

尤垂淮, 林丽琳, 陈晟, 等. 镁营养对西瓜叶绿素荧光特性及生理代谢的影响 [J]. 福建农业学报, 2021, 36 (11): 1302-1314.

YOU C H, LIN L L, CHEN S, et al. Effects of Magnesium on Chlorophyll Fluorescence and Metabolism of *Citrullus lanatus* [J]. *Fujian Journal of Agricultural Sciences*, 2021, 36 (11): 1302-1314.

镁营养对西瓜叶绿素荧光特性及生理代谢的影响

尤垂淮^{1,2}, 林丽琳¹, 陈晟³, 吴宇芬³, 赵依杰⁴, 柯彦¹, 林新萍⁵, 施木田^{1*}

(1. 福建农林大学园艺学院 福州 350002; 2. 福建农林大学生命科学学院 福州 350002; 3. 福建省农业科学院农业生物资源研究所 福州 350003; 4. 福州市农业科学研究所 福州 350019; 5. 漳州城市职业学院 漳州 363000)

摘要:【目的】探讨镁营养对西瓜 (*Citrullus lanatus*) 生长发育和生理代谢的影响, 明确西瓜生长的适宜镁浓度范围。【方法】采用砂培法, 对西瓜进行 5 个施镁质量浓度 (0、24、48、96 和 192 mg·L⁻¹) 处理, 并测定西瓜在不同施镁浓度下的生长特性 (叶片和根系形态、生物量积累)、果实品质 (维生素 C、可溶性固形物、可溶性蛋白和可溶性糖含量)、叶绿素荧光特性和生理响应 (渗透调节、膜伤害和抗氧化酶系统)。【结果】用 24 ~ 96 mg·L⁻¹ 的镁素可以降低西瓜叶片膜伤害, 提高光系统 II (PSII) 活性, 增加叶片抗氧化物质谷胱甘肽 (glutathione, GSH) 和还原型抗坏血酸 (reduced ascorbic acid, AsA) 含量, 增强叶片抗氧化酶活性, 包括过氧化物酶 (peroxidase, POD)、超氧化物歧化酶 (superoxide dismutase, SOD)、过氧化氢酶 (catalase, CAT) 和单脱氢抗坏血酸还原酶 (monodehydroascorbate reductase, DHAR), 降低叶片丙二醛 (malondialdehyde, MDA) 和脯氨酸 (proline, Pro) 含量以及细胞膜透性, 促进 AsA-GSH 循环, 增强光合作用, 提高生物量积累, 增加果实中维生素 C、可溶性固形物、可溶性蛋白和可溶性糖含量。其中, 48 mg·L⁻¹ 镁处理对西瓜的生长发育增效最明显, 而缺镁 (0 mg·L⁻¹) 和镁过量 (192 mg·L⁻¹) 胁迫下, 西瓜叶片产生膜脂过氧化伤害, 根系变短, 叶绿素荧光参数放氧复合体 (OEC)、电子传递量子产额 (Φ_{E0})、受体库容量 (Sm) 和单位面积反应中心数量 (RC/CS₀) 降低, 单位反应中心光能的吸收 (ABS/RC)、耗散 (DI0/RC)、捕获 (TR0/RC) 及 Q_A 还原速率 (Mo) 增加, 叶片光合机构完整性被破坏, 光合作用减弱, 西瓜生长受到明显抑制, 其中缺镁影响最严重。【结论】缺镁和镁过量处理降低西瓜 PSII 活性, 抑制西瓜生长, 而适量增施镁可有效提高西瓜的生理活性, PSII 的结构和功能稳定, 光合作用强, 西瓜生长好, 果实品质高, 48 mg·L⁻¹ 为西瓜栽培最适宜施镁质量浓度。

关键词: 西瓜; 镁; 生理生化指标; 响应机理; 叶绿素荧光

中图分类号: S 651

文献标志码: A

文章编号: 1008-0384 (2021) 11-1302-13

Effects of Magnesium on Chlorophyll Fluorescence and Metabolism of *Citrullus lanatus*

YOU Chuihui^{1,2}, LIN Lili¹, CHEN Sheng³, WU Yufen³, ZHAO Yijie⁴, KE Yan¹, LIN Xinping⁵, SHI Mutian^{1*}

(1. College of Horticulture, Fujian Agriculture and Forestry University, Fuzhou, Fujian 350002, China; 2. College of Life Sciences, Fujian Agriculture and Forestry University, Fuzhou, Fujian 350002, China; 3. Agricultural Bio-resources Research Institute, Fujian Academy of Agricultural Sciences, Fuzhou, Fujian 350003, China; 4. Fuzhou Institute of Agricultural Sciences, Fuzhou, Fujian, 350019, China; 5. Zhangzhou City University, Zhangzhou, Fujian 363000, China)

Abstract: 【Objective】Effects of magnesium on the growth, development, and metabolism of *Citrullus lanatus* were studied to determine the appropriate nutrient supply for the melon cultivation. 【Method】At the concentrations of 0, 24, 48, 96, and 192 mg·L⁻¹ on magnesium in sand culture, the growth characteristics (i.e., leaf and root morphology, chlorophyll fluorescence, and biomass accumulation), fruit quality (i.e., vitamin C, soluble solids, soluble protein, and soluble sugar), and physiological responses (i.e., osmoregulation, membrane damage, and antioxidases) of various *C. lanatus* varieties were compared.

【Result】In the range of 24-96 mg·L⁻¹, the application of magnesium reduced the vulnerability of leaf membrane to damages, increased the contents of antioxidant glutathione (GSH) and ascorbic acid (AsA) as well as the activities of photosystem II (PSII), peroxidase (POD), superoxide dismutase (SOD), catalase (CAT), and monodehydroascorbate reductase

收稿日期: 2021-07-19 初稿; 2021-08-12 修改稿

作者简介: 尤垂淮 (1985-), 男, 博士, 研究方向: 主要从事植物生理生态与栽培理论技术等研究工作 (E-mail: you123chui@163.com)

* 通信作者: 施木田 (1965-), 男, 教授, 研究方向: 主要从事西瓜甜瓜育种与栽培等研究工作 (E-mail: shimutian@126.com)

基金项目: 福建农林大学科技创新专项基金项目 (CXZX2016105)

(DHAR), while decreased the contents of malondialdehyde (MDA) and proline (Pro), and reduced the cell membrane permeability of the leaves. The addition also promoted the AsA-GSH cycle, photosynthesis, and the biomass accumulations on vitamin C, soluble solids, soluble protein, and soluble sugar. Among the treatments, the $48 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ magnesium addition in the culture substrate rendered the most significant improvements on the growth and development of *C. lanatus*. Whereas, either a deficiency (at $0 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$) or an excess (e.g., at $192 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$) on the nutrient ill-affected the membrane lipid peroxidation and shortened the plant roots. Furthermore, the chlorophyll fluorescence declined as indicated by the lower oxygen evolution complex (OEC), quantum yield for electron transport (Φ_{EO}), and receptor library capacity (Sm), the density of reaction centers (RC/CSO) decreased, the light energy absorption per unit reaction center (ABS/RC) lowered, and the dissipative (DI0/RC), capture (TR0/RC), and Q_A reduction rate (Mo) increased. Thus, either deprivation or over-supply of magnesium could significantly disrupt the normal photosynthetic function inhibiting the growth of *C. lanatus*. 【Conclusion】 Particularly in deficiency, but also in excess, magnesium in soil could diminish the PSII activity and retard the growth of *C. lanatus*. Appropriate application of the nutrient, such as at $48 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ concentration in soil, could effectively improve the physiological activity, stabilize the structure and function of PSII, strengthen the leaf photosynthesis to result in healthy growth and high quality fruit production of *C. lanatus*.

Key words: *Citrullus lanatus*; magnesium; physiological and biochemical characteristics; response mechanism; chlorophyll fluorescence

0 引言

【研究意义】西瓜 (*Citrullus lanatus*) 素有天生白虎汤之称, 原产地为非洲, 滋味甘甜, 细爽多汁, 素有“夏季水果之王”的美誉, 另外, 西瓜因富含糖、酸、盐等物质而具有降血压、治疗肾炎的作用, 兼具美容功效, 常吃西瓜能增加皮肤的光泽度和弹性^[1]。我国是世界上西瓜种植面积最大, 产量最高, 且消费量最大的国家^[2]。然而在西瓜种植过程中经常出现镁肥施用不当而间接影响西瓜产量和品质, 造成严重经济损失^[3]。课题组前期调研, 发现不少西瓜产区叶片缺镁现象严重, 初步研究表明缺镁导致西瓜叶片叶绿素、可溶性糖、可溶性蛋白含量下降^[4-5]。镁元素 (magnesium, Mg) 是植物生长发育不可或缺的中量元素, 是植物体内叶绿素的重要成分, 在维持叶绿体结构与功能等方面起着重要作用^[6]。研究发现在我国耕地面积中, 土壤缺镁面积占 6%^[7], 另外随着工业现代化的迅速发展, 许多地区酸雨频发, 导致酸性土壤 Mg^{2+} 流失严重^[8], 使耕作土壤缺镁问题更加突出。此外, 在追求作物高产和经济高效的过程中, 当矿物质肥料没有及时补施时, 农作物的高强度轮作和密集种植进一步加剧了土壤镁元素的消耗。同时, 过量施用镁肥不仅会造成肥料浪费且也会抑制植物生长发育, 这又直接阻断了农民为了补充植物镁素营养大量施用镁肥的途径。因此, 开展镁素营养对西瓜生长发育的影响及其生理响应的差异研究, 明确西瓜生长所需的镁素浓度范围, 对生产上指导西瓜栽培具有重要意义。【前人研究进展】前人研究表明镁是植物生长和发育过程中所必需的中量营养元素, 其含量的缺乏和过量均会对植物的正常生长及产量和品质造成影响^[9]。

植物代谢过程中关键酶活性和细胞色素的合成会因缺镁而受阻^[10]。缺镁导致叶片过氧化氢 (hydrogen peroxide H_2O_2)、超氧阴离子 ($\cdot\text{O}_2^-$) 及丙二醛 (malondialdehyde MDA) 含量积累, 细胞膜系统和叶绿体结构被破坏, 植物的光合色素含量减少, 而导致净光合速率和叶绿素荧光动力学参数 [F_v/F_m 和 $Y(\text{II})$] 的降低, 抑制作物生长^[9 11-12]。王芳等^[13]等研究表明, 大豆 (*Glycine max*) 经缺镁处理后, 叶片 MDA 含量显著上升, 反之, 施镁后大豆叶片 MDA 含量显著下降, 大豆抗膜脂过氧化胁迫的能力提高。课题组前期研究发现镁元素显著影响小白菜 (*Brassica chinensis*) 和苦瓜 (*Momordica charantia*) 生物量的积累, 小白菜、苦瓜在缺镁处理下产生大量 $\cdot\text{O}_2^-$, 叶片 MDA 含量增加, 叶绿素含量下降, 而适量施用镁肥 ($40 \sim 50 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$) 能够显著提高小白菜和苦瓜的光合速率及抗氧化酶活性, 促进作物生长^[14-15]。与此同时, 为了补充植物缺镁现象, 过量施用镁肥也会抑制植物生长发育^[16-18]。在镁过量处理条件下, 植株叶绿素含量会下降, 生长受抑制, 影响植物抗氧化系统, 导致植株的株高、茎粗、根长、根系活力等均降低^[16-18]。【本研究的切入点】目前, 有关镁缺失或过量对西瓜的生长及生理生化响应的研究仅课题组前期进行初步研究^[4-5], 尚未见镁营养对西瓜叶绿素荧光特性的影响及其生理响应差异的研究。本研究利用砂培试验技术, 选用农业生产上较为常用的西瓜品种—黑美人, 分析 5 个不同 Mg^{2+} 浓度对西瓜农艺性状、果实品质、叶绿素荧光特性、细胞膜透性、抗氧化系统的影响。【拟解决的关键问题】本研究旨在探讨西瓜响应镁胁迫的生长特性和生理代谢变化, 明确西瓜对镁素需求的适宜范围, 为指导镁高效利用西瓜品种的选育及其科

学种植提供理论和技术支撑。

1 材料与方法

1.1 试验材料与试验设计

供试西瓜品种为黑美人，农业生产上较为常用的品种，由福建省农业科学院农业生物资源研究所提供。试验于 2014 年 3 月在福州市农科所玻璃温室开展，采用砂质培养（从花卉市场购买纯石英砂粒作为植物生长介质），营养液配方（Hoagland & Arnon 配方）如表 1 所示^[19]，选均匀一致且饱满的西瓜种子，用温汤浸种法进行处理，水冷后连续浸泡 8 h，待种子吸水膨胀后，置 30 ℃ 培养箱。待种子大部分露白后，将其播种到育苗盘上，保持一定的温湿度。待小苗长两叶一心时定植于装有砂子的盆中，盆规格（35 cm×40 cm×40 cm），5 d 后开始处理。

表 1 营养液配方
Table 1 Formulation of nutrient solution

化合物 Compound	化合物含量 Compound content/ (mg·L ⁻¹)	各元素总含量 Content of element/ (mg·L ⁻¹)
Ca(NO ₃) ₂ ·4H ₂ O	1 000	Ca:169.70
KNO ₃	500	N:187.80
KH ₂ PO ₄	250	K:337.00
K ₂ SO ₄	160	P:56.90
C ₁₀ H ₁₂ FeN ₂ NaO ₈ ·3H ₂ O	21	Fe:2.80
MnSO ₄ ·4H ₂ O	2.02	Mn:0.50
H ₃ BO ₃	2.86	B:0.50
ZnSO ₄ ·7H ₂ O	0.22	Zn:0.05
CuSO ₄ ·5H ₂ O	0.08	Cu:0.02
(NH ₄) ₆ Mo ₇ O ₂₄ ·4H ₂ O	0.02	Mo:0.01

本试验镁质量浓度设为 0（缺镁处理）、24、48、96、192 mg·L⁻¹ 等 5 个处理，镁源为 MgSO₄·7H₂O，0 mg·L⁻¹ 处理缺少的 SO₄²⁻ 以 K₂SO₄ 代替，每个处理 6 组重复，每组 6 株。前期间隔 1 d 浇一次营养液，待到瓜蔓旺盛生长时 1 d 浇一次，膨瓜期时遇炎热天气早晚各浇一次，每次 300 mL，其他均按科学管理措施进行。分别于伸蔓期、盛花期和膨瓜期取西瓜上部相同部位叶片进行生理生化指标测定，样品用液氮冷冻后保存于-80 ℃ 备用。

1.2 测定指标与方法

在膨瓜期对西瓜的农艺性状进行测定，其中，株高：用直尺测量植株茎基部到生长点的高度；根长：用直尺测量根基部到根系末端的长度；根系体积：采用排水法测定根系体积；植株干重（包含

根、茎、叶总和）：取长势相似的植株，用蒸馏水冲洗干净，用滤纸吸干植株表面的水分后置于 105 ℃ 烘箱杀青 15 min，70 ℃ 烘干至恒重，用电子天平测量干重。

西瓜生长至伸蔓期、盛花期和膨瓜期时分别对其叶片进行叶绿素荧光诱导动力学测定，方法如下：利用多功能植物效率分析仪（M-PEA，Hansatech，英国）经 3 000 μmol·m⁻²·s⁻¹ 的脉冲光诱导，分别在西瓜伸蔓期、盛花期和膨瓜期的晴天早上 10:00—11:00 西瓜叶片快速叶绿素荧光诱导动力学曲线（OJIP）进行检测分析，叶片选择以主蔓及第一侧蔓的第 3 或第 4 片功能叶为佳。参考李鹏民等^[20]的计算方法，从 OJIP 诱导曲线中可获得能够反映西瓜光系统 II（PS II）的指标，包括如下参数：初始（最小）荧光值 Fo，最大荧光值 Fm，放氧复合体 OEC，单位面积有活性反应中心数目用 RC/CS₀ 表示，V_J 表示 J 点相对可变荧光，Mo 表示 Q_A 被还原的最大速率，Sm 表示标准化后的在 OJIP 荧光诱导曲线和 F=Fm 之间的面积，用 Ψ₀ 表示捕获的激子将电子传递到电子传递链中超过 Q_A⁻ 的其他电子受体的概率，φ_{E₀} 表示电子传递的量子产额，Dl₀/RC 表示单位反应中心耗散掉的能量，ABS/RC 表示单位反应中心吸收的光能，TR₀/RC 表示单位反应中心捕获的用于还原 Q_A 的能量。

西瓜生长至伸蔓期、盛花期和膨瓜期时，取靠近新叶同一叶位，测定生理生化指标，测定方法如下：还原型抗坏血酸（reduced ascorbic acid，AsA）和脱氧抗坏血酸（deoxyascorbic acid，DAsA）采用钼蓝比色法测定，细胞膜透性采用电导法测定^[21]；可溶性糖和可溶性蛋白分别采用蒽酮-硫酸法和考马斯亮蓝法进行测定^[22]；超氧化物歧化酶（superoxide dismutase，SOD）采用氮蓝四唑（nitro-blue tetrazolium，NBT）光化还原法测定，过氧化氢酶（catalase，CAT）活性采用紫外吸收法测定，过氧化物酶（per oxidase，POD）活性采用愈创木酚法测定，MDA 含量采用硫代巴比妥酸（thiobarbituric acid，TBA）比色法测定，游离脯氨酸（proline，Pro）含量用甲苯萃取法测定，抗坏血酸过氧化物酶（ascorbate peroxidase，APX）、脱氢抗坏血酸还原酶（dehydrogenation ascorbic acid reductase，DHAR）和单脱氢抗坏血酸还原酶（monodehydroascorbic acid reductase，MDAR）活性等的测定参照 Nakano 和 Asada^[23]的方法；谷胱甘肽还原酶（glutathione reductase，GR）活性的测定参照 Halliwell 等^[24]的方法；还原型谷胱甘肽（glutathione，GSH）、氧化型谷胱甘肽（oxidized glutathione，GSSG）含量的测定

参照高俊风^[25]的方法。中心和边缘可溶性固形物含量测定采用手持式折光仪测定。

1.3 数据分析

数据采用 Office 2016 和 DPS 7.05 软件进行统计学分析。

2 结果与分析

2.1 镁对西瓜生长发育及果实品质的影响

表 2 显示，随着镁质量浓度的增加（0 mg·L⁻¹~

192 mg·L⁻¹），西瓜的株高、根长、根系体积、地上部干重、根干重及生物产量均呈先增后降的趋势，48 mg·L⁻¹ 镁处理时各指标均达到最大值，各处理间上述指标基本都达到显著差异。与缺镁（0 mg·L⁻¹）相比，在 48 mg·L⁻¹ 镁水平处理下西瓜株高、根长、根系体积、生物量分别增加 58.25%、64.79%、113.75%、136.79%，而在缺镁处理中，西瓜上述指标均最低。结果表明，适量施镁能促进西瓜生长，提高西瓜生物量，且在镁为 48 mg·L⁻¹ 时促进效果最显著。

表 2 不同施镁量对西瓜生长发育的影响
Table 2 Effect of different magnesium application on growth and development of *C. lanatus*

Mg 的质量浓度 Mg mass concentration/ (mg·L ⁻¹)	株高 Plant height/cm	根长 Root length/cm	根系体积 Root volume/cm ³	地上部干重 Plant dry weight/g	根干重 Root dry weight/g	生物量 Biological yield/g
0	172.07±2.80 Dd	70.47±1.72 Dd	9.67±0.58 Dd	19.33±0.58 De	1.22±0.16 Dd	20.55±0.60 Ee
24	188.87±1.39 CDd	72.97±0.81 Dd	14.33±0.58 BCbc	23.00±1.73 Dd	1.87±0.27 Cc	24.87±1.68 Dd
48	272.30±14.48 Aa	116.13±5.01 Aa	20.67±2.08 Aa	43.93±2.08 Aa	4.73±0.32 Aa	48.66±2.23 Aa
96	244.67±10.52 Bb	92.43±4.19 Bb	15.67±0.58 Bb	36.83±1.61 Bb	2.78±0.19 Bb	39.61±1.43 Bb
192	215.17±15.45 Cc	84.20±1.08 Cc	12.33±1.15 CDc	30.80±0.26 Cc	2.49±0.16 Bb	33.29±1.42 Cc

注：*邓肯氏新复极差测验，大写字母和小写字母不同者分别表示极显著差异（*P*<0.01）和显著差异（*P*<0.05）。下同。
Note: In Duncan’s new multiple range test, data with different capital and lowercase letters indicate a highly significant difference (*P*<0.01) and a significant difference (*P*<0.05), respectively. Same for the following.

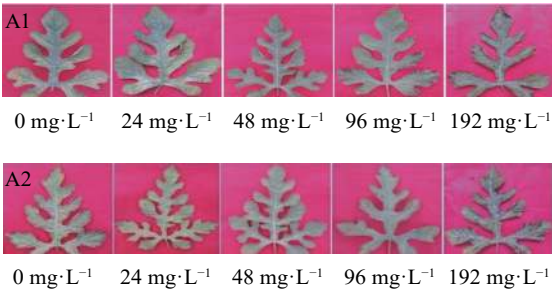
表型观察发现（图 1），西瓜整体的缺镁、低镁症状表现为植株矮小，叶片稀少并且薄小，叶柄细弱，植株下部老叶先失绿，叶片从叶缘与叶尖开始出现黄化现象并逐渐扩展到脉间叶肉，在膨瓜期时西瓜缺镁症状愈发严重，叶片叶尖焦枯，西瓜植株下部老叶几乎变黄。镁过量（192 mg·L⁻¹）症状表现为西瓜植株矮小，叶片皱缩，叶缘轻微焦枯并向里卷曲，质地脆，严重时可见大面积的焦枯叶缘或整叶焦枯如灼烧状。在 48 mg·L⁻¹ 镁水平处理下西瓜未表现不良症状，其叶片厚大且颜色深绿。缺镁、低

镁及镁过量时西瓜从盛花期开始叶片先后出现以上情况，进入膨瓜期其症状逐渐明显。

从表 3 可知，西瓜可溶性固形物（中心可溶性固形物和边缘可溶性固形物）、可溶性糖、可溶性蛋白、维生素 C 等物质的含量随镁质量浓度的增加均呈先增后降的趋势，且在 48 mg·L⁻¹ 镁处理下均达到最大值，且都达到显著性差异，当镁高于 48 mg·L⁻¹ 时各处理上述指标下降但都比缺镁处理的高，说明缺镁对西瓜品质的影响比过量镁大，施镁有助于提高西瓜果实品质。

2.2 镁对西瓜叶绿素荧光特性的影响

2.2.1 镁对西瓜叶片 PSⅡ 反应中心数量、反应中心闭合程度的影响 表 4 显示，在不同镁处理下西瓜三个生育期叶片 RC/CS₀ 大小均呈现相似的变化规律，即随着镁质量浓度的增加 RC/CS₀ 值表现出先升后降的趋势，在 48 mg·L⁻¹ 镁处理时达到峰值，缺镁时最小，低镁和镁过量处理略高于缺镁处理。由此说明西瓜在 48 mg·L⁻¹ 镁处理时有足够数量的活跃的 PSⅡ 反应中心参与光合作用，而缺镁、低镁和镁过量时 PSⅡ 的反应中心个数较少，光合作用减弱，缺镁胁迫影响较大。由表 4 可知，西瓜三个生育期 V_j 值随镁质量浓度的增加呈现先降后增的趋势，48 mg·L⁻¹ 镁处理时值最小，缺镁处理值最大，其次是



注：A1 和 A2 分别表示盛花期和膨瓜期。

Note: A1 means full bloom period; A2 means melon expansion stage.

图 1 不同施镁量对西瓜不同生育期叶片形态的影响

Fig.1 Effects of different magnesium application on leaf morphology of varied genotypes of *C. lanatus* at different growth stages

表 3 不同施镁量对西瓜果实品质的影响
Table 3 Effect of different magnesium application on fruit quality of *C. lanatus*

Mg 的质量浓度 Mg mass concentration/ (mg·L ⁻¹)	中心可溶性固形物 Central soluble solid/%	边缘可溶性固形物 Marginal soluble solid/%	可溶性糖 Soluble sugar/ (mg·g ⁻¹)	可溶性蛋白 Soluble protein/ (mg·g ⁻¹)	维生素C Vitamin C/ (mg·g ⁻¹)
0	9.04±0.37 Cd	6.25±0.24 Cc	42.24±0.19 Ee	13.82±0.17 Ee	21.37±0.21 Ee
24	9.37±0.27 Cd	6.49±0.22 Cc	43.19±0.21 Dd	17.57±0.34 Dd	25.89±0.23 Dd
48	12.65±0.27 Aa	8.92±0.16 Aa	56.68±0.22 Aa	24.36±0.20 Aa	32.56±0.24 Aa
96	11.94±0.21 ABb	8.25±0.20 Bb	50.55±0.35 Bb	21.31±0.21 Bb	31.97±0.07 Bb
192	11.08±0.62 Bc	8.15±0.11 Bb	48.96±0.26 Cc	19.28±0.14 Cc	30.45±0.31 Cc

镁过量处理。说明 48 mg·L⁻¹ 镁处理 PS II 反应中心闭合较少、Q_A⁻累积少，Q_A⁻向 Q_B 电子传递能正常进行，缺镁和镁过量处理下西瓜不同生长期有活性

PS II 的反应中心不同程度的关闭并积累 Q_A⁻，阻碍了电子传递链中 Q_A⁻向 Q_B 的电子传递。

表 4 不同施镁量对西瓜不同生长期叶片 PS II 反应中心数量和闭合程度的影响
Table 4 Effects of different magnesium application on PS II RC/CS₀ and closed extent of varied genotypes of *C. lanatus*

Mg 的质量浓度 Mg mass concentration/ (mg·L ⁻¹)	伸蔓期 Stretch tendril stage		盛花期 Full-bloom stage		膨瓜期 Growth stage	
	RC/CS ₀	V _j	RC/CS ₀	V _j	RC/CS ₀	V _j
0	285.92±7.62 Dc	0.54±0.05 Aa	252.40±6.27 Cc	0.68±0.01 Aa	235.68±5.95 Dd	0.72±0.05 Aa
24	302.51±4.04 Cb	0.45±0.02 Ca	289.56±4.12 Bb	0.55±0.04 Bb	269.72±5.81 Cc	0.63±0.03 Aab
48	357.26±8.38 Aa	0.23±0.01 Da	348.41±5.11 Aa	0.25±0.01 Cc	334.29±3.91 Aa	0.32±0.03 Cc
96	314.71±4.54 Bb	0.46±0.05 Bcb	289.80±2.43 Bb	0.48±0.05 Bb	285.71±4.10 Bb	0.53±0.05 Bb
192	304.23±3.95 Bcb	0.52±0.03 ABa	287.04±5.05 Bb	0.54±0.07 Bb	273.25±6.18 Cbc	0.65±0.08 Aab

2.2.2 镁对西瓜叶片 PS II 反应中心活性的影响 1/F_O-1/F_M 值的大小可以反映西瓜叶片反应中心活性的强弱，从图 2 可以看出，不同镁质量浓度对西瓜叶片 1/F_O-1/F_M 值在伸蔓期时影响不大，此时 1/F_O-1/F_M 值总体上要高于其他两个生育期。盛花期和膨瓜期西瓜叶片 1/F_O-1/F_M 值随着镁质量浓度的增加呈现先升后降的趋势，在 48 mg·L⁻¹ 镁处理时最大，镁过量处理的值均大于低镁和缺镁处理。说明 48 mg·L⁻¹ 处理时西瓜叶片 PS II 反应中心活性明显高于缺镁、低镁和镁过量处理。

OEC 比例越小说明 H₂O 的裂解受抑制越严重，图 2 显示，西瓜三个生育期叶片 OEC 比例均随镁质量浓度的增加呈现先增后降的趋势，48 mg·L⁻¹ 镁处理时达最大值，且与其他处理均达到显著差异，镁过量处理大体上高于缺镁处理。说明缺镁、低镁和镁过量处理下叶片 OEC 受到严重伤害，而 48 mg·L⁻¹ 处理下 OEC 作用正常发挥，西瓜叶片光合作用正常进行。

由表 5 可知，西瓜在不同生育期叶片中的 M₀ 值随镁质量浓度的增加均呈先降后增的趋势，缺镁处理的 M₀ 值最高，48 mg·L⁻¹ 镁处理时 M₀ 值最低，当镁质量浓度高于 48 mg·L⁻¹ 时 M₀ 值大体上随之升高但均低于缺镁处理，说明施镁可以降低西瓜叶片

Q_A 的积累，48 mg·L⁻¹ 处理时西瓜叶片 Q_A 积累最少。不同生育期叶片的 S_m、Area、Ψ₀ 和 ϕ_{E0} 随镁质量浓度的增加均呈现先增后降的趋势，在 48 mg·L⁻¹ 镁处理时均达到最大值，而缺镁处理最低，其中镁过量处理下的这些指标值均高于缺镁、低镁处理，表明缺镁胁迫严重伤害西瓜叶片 PS II 受体侧。

2.2.3 镁对西瓜叶片 PS II 反应中心能量流动的影响

由图 3 可知，西瓜三个不同生育期叶片单位反应中心对光能的吸收 (ABS/RC)、捕获 (TR₀/RC) 以及耗散 (DI₀/RC) 随着的增加均呈先降后增的趋势，在 48 mg·L⁻¹ 镁处理时均达到最小值，而当处理浓度高于 48 mg·L⁻¹ 时上述参数值有所上升，但都低于缺镁处理，且各施镁处理与缺镁处理相比大体上均存在显著差异。镁过量处理西瓜叶片的 ABS/RC、DI₀/RC 总体上要低于缺镁和低镁处理。西瓜三个不同生育期叶片单位反应中心用于电子传递的能量 (ET₀/RC) 随着的增加均表现出先升后降的趋势，在 48 mg·L⁻¹ 镁处理时均达到最大值，除了伸蔓期差异不显著外，盛花期和膨瓜期总体上存在显著差异，且随着生育期的延长叶片的 ET₀/RC 值有所降低，另外镁过量处理 ET₀/RC 值高于低镁和缺镁处

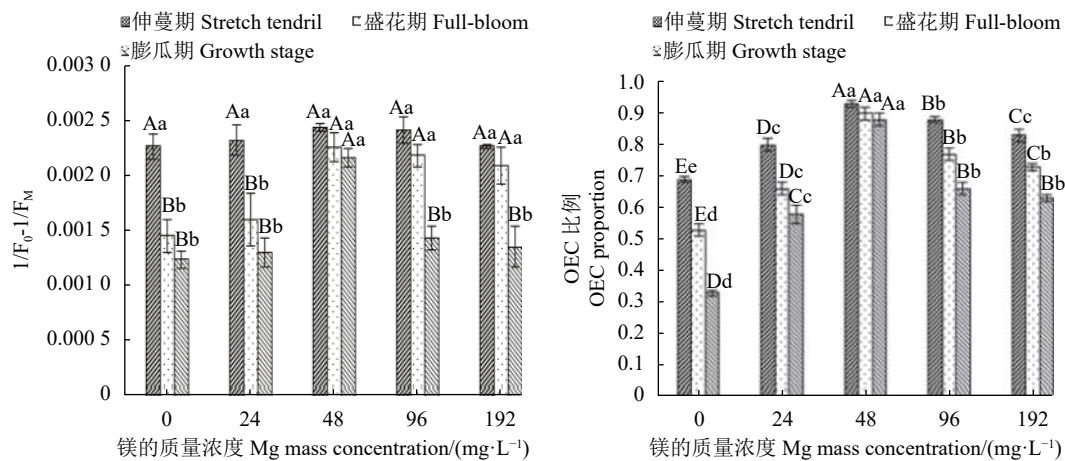


图 2 不同施镁量对西瓜不同生育期叶片 $1/F_0-1/F_M$ 和 OEC 比例的影响

Fig. 2 Effects of different magnesium application on leaf $1/F_0-1/F_M$ and OEC proportion of *C. lanatus* at different growth stages

表 5 不同施镁量对西瓜不同生育期叶片 M_0 、 S_m 、Area、 Ψ_0 和 ϕ_{E_0} 的影响

Table 5 Effects of different magnesium application on leaf M_0 , S_m , Area, Ψ_0 , and ϕ_{E_0} of *C. lanatus* at different growth stages

时期 Time	Mg 的质量浓度 Mg mass concentration/ ($\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$)	M_0	S_m	Area ($\times 100$)	Ψ_0	ϕ_{E_0}
伸蔓期 Stretch tendril stage	0	0.94±0.06 Aa	17.32±1.11 Dc	226.67±17.93 Bb	0.29±0.05 Cb	0.23±0.02 Cc
	24	0.71±0.04 Bb	24.10±2.05 Cb	232.00±11.14 Bb	0.36±0.02 Bb	0.33±0.03 Bb
	48	0.52±0.01 Dc	33.12±1.41 Aa	276.00±11.14 Aa	0.66±0.01 Aa	0.53±0.03 Aa
	96	0.53±0.05 CDc	31.34±1.40 ABa	261.33±12.22 Aab	0.63±0.03 Aa	0.51±0.03 Aa
	192	0.60±0.03 Cc	29.96±1.45 Ba	255.33±21.39 ABab	0.62±0.03 Aa	0.49±0.05 Aa
盛花期 Full-bloom stage	0	1.02±0.02 Aa	14.62±1.69 Dd	259.33±31.77 Dc	0.22±0.03 Bb	0.18±0.02 Dd
	24	0.80±0.04 Bb	22.47±1.03 Cc	384.67±12.06 Cb	0.28±0.05 Bb	0.27±0.03 Cc
	48	0.55±0.02 Dd	32.61±1.19 Aa	502.00±12.00 Aa	0.67±0.03 Aa	0.53±0.01 Aa
	96	0.65±0.05Cc	32.77±0.78Aa	482.67±16.17ABa	0.63±0.07Aa	0.51±0.01Bab
	192	0.67±0.03 Cc	29.01±1.06 Bb	448.00±33.05 Ba	0.62±0.01 Aa	0.47±0.02 Bb
膨瓜期 Growth stage	0	1.40±0.03 Aa	10.62±1.01 Dc	251.33±21.94 Bb	0.19±0.03 Dd	0.14±0.03 Db
	24	1.02±0.07 Bb	20.26±0.93 Cb	378.33±23.54 Bb	0.27±0.01 Cc	0.20±0.02 Cb
	48	0.53±0.05 Cc	35.45±1.03 Aa	499.33±8.08 Aa	0.58±0.03 Aa	0.52±0.04 Aa
	96	1.05±0.04 Bb	34.15±0.98 ABa	494.67±25.79 Aa	0.57±0.02 Bab	0.47±0.01 Ba
	192	1.05±0.04 Bb	33.13±0.77 Ba	482.67±21.94 Aa	0.50±0.04 Bb	0.46±0.02 Ba

理。这表明 $48\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 处理可以提高用于电子传递的能量，减少因热耗散而损失的能量，而镁过量和缺镁处理热耗散增加，能量的损失加大。

2.3 镁对西瓜叶片渗透调节物质及细胞膜透性的影响

图 4 显示，施镁处理对西瓜不同生育期叶片 MDA 和 Pro 含量的影响一致，即随着镁质量浓度的增加 MDA 和 Pro 含量均呈先降后增的趋势，在 $48\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 镁处理时西瓜叶片 MDA 和 Pro 含量最小，且与其他处理都达到显著差异，当镁质量浓度超过 $48\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 时 MDA 和 Pro 含量开始增加但均低于缺镁和低镁处理，缺镁处理下西瓜叶片 MDA 和 Pro 含量最大。从不同生育期看，在膨瓜期时叶片这两个指标含量要高于前面两个生育期，表明缺镁和镁过量胁迫在膨

瓜期对西瓜叶片伤害最大。不同生育期叶片细胞膜透性均随镁质量浓度的增加呈先降后增趋势，在 $48\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 镁处理时细胞膜透性最小，而其他处理的细胞膜透性增加，且都达到显著差异，其中缺镁、镁过量处理细胞膜透性也较大，尤其是缺镁处理。由此说明，缺镁和镁过量处理下西瓜叶片细胞发生了膜脂过氧化反应，对叶片产生损伤，其中缺镁伤害最严重。

2.4 镁对西瓜叶片抗氧化物质及抗氧化酶类防御系统的影响

2.4.1 镁对西瓜叶片 SOD、POD、CAT 活性的影响

随着镁质量浓度的增加，西瓜不同生育期叶片 SOD、POD、CAT 活性均表现出先升后降的趋势，

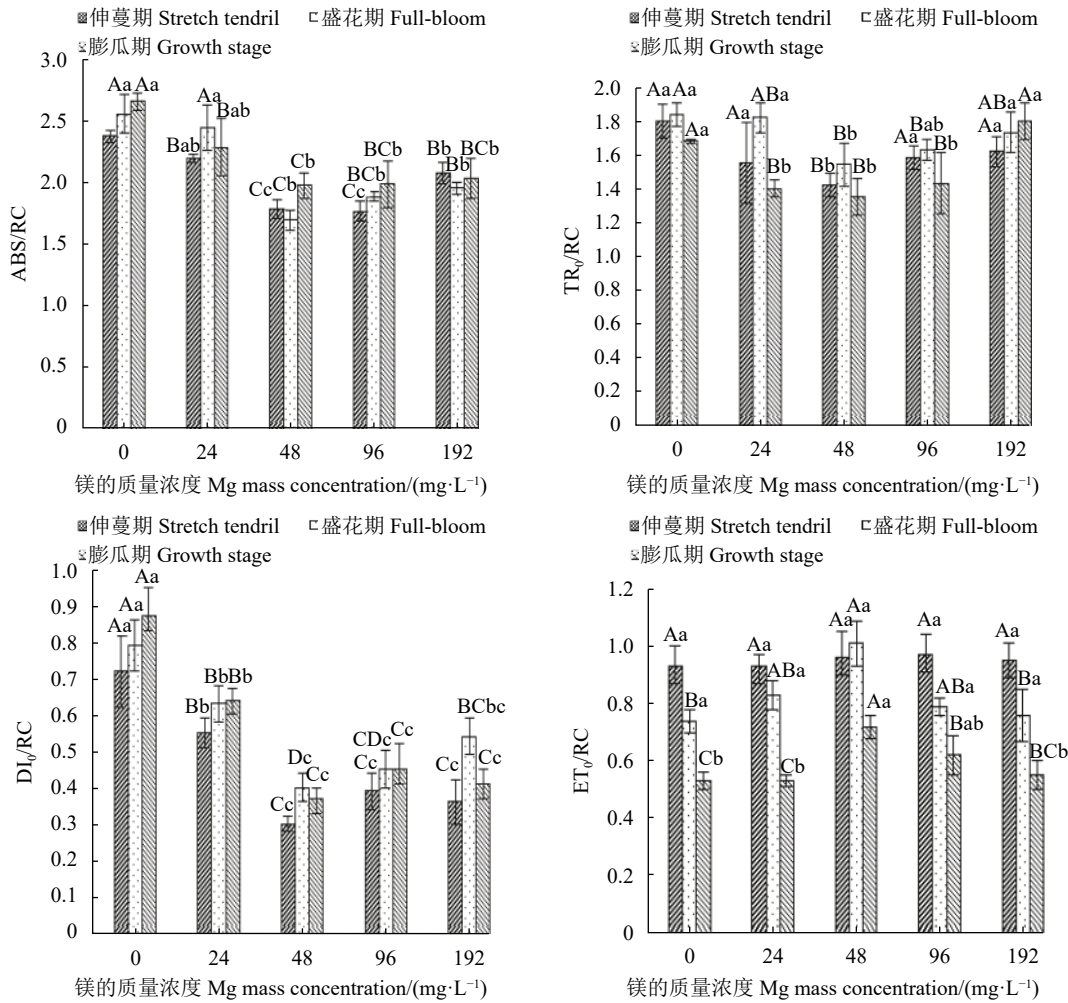


图 3 不同施镁量对西瓜不同生育期叶片 ABS/RC、TR₀/RC、DI₀/RC 和 ET₀/RC 的影响

Fig. 3 Effects of different magnesium application on leaf ABS/RC, TR₀/RC, DI₀/RC, and ET₀/RC of *C. lanatus* at different growth stages

48 mg·L⁻¹ 镁处理时活性最强，当镁质量浓度超过 48 mg·L⁻¹ 时酶活性总体上开始下降但都高于缺镁处理，其他施镁处理与缺镁处理之间均存在显著差异，镁过量处理西瓜叶片的活性略高于低镁和缺镁

处理（图 5）。说明施镁处理在一定范围内可以提高西瓜叶片 SOD、POD、CAT 活性，缺镁和低镁处理一定程度上抑制这三个酶活性，且缺镁胁迫影响最大。

2.4.2 镁对西瓜叶片 AsA-GSH 循环代谢活性的影响

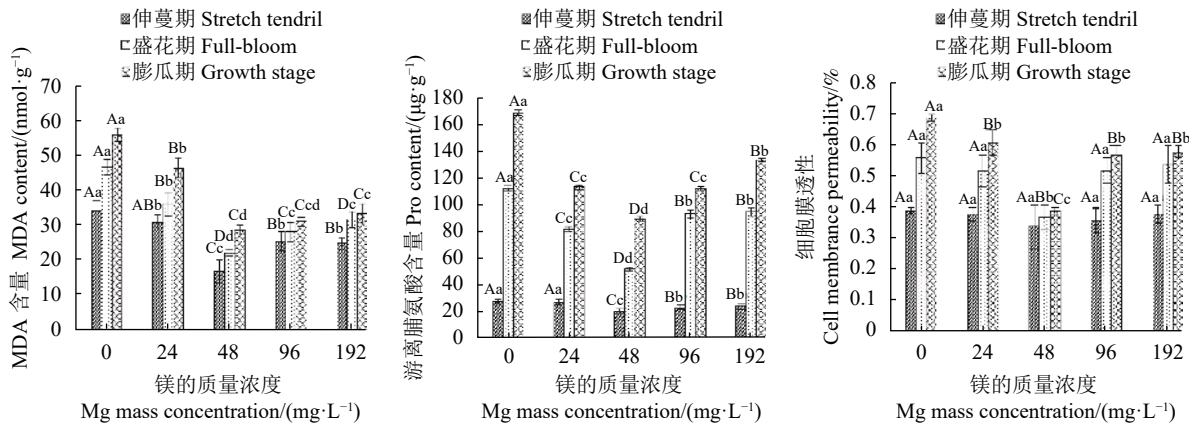


图 4 不同施镁量对西瓜不同生育期叶片 MDA 和 Pro 含量以及细胞膜透性的影响

Fig. 4 Effects of different magnesium application on MDA and Pro contents and membrane permeability of *C. lanatus* at different growth stages

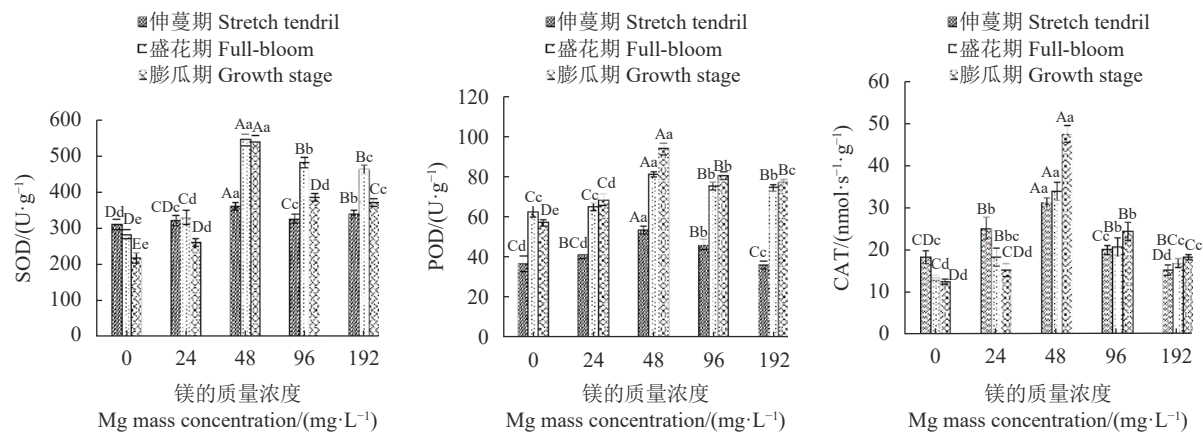


图 5 不同施镁量对西瓜不同生育期叶片 SOD、POD 和 CAT 活性的影响

Fig. 5 Effects of different magnesium application on SOD, POD, and CAT activities of *C. lanatus* at different growth stages

随着镁质量浓度的增加，西瓜不同生育期叶片中 APX、MDAR、GR 活性均呈现先降后增的趋势（图 6），缺镁处理活性最大，在 48 mg·L⁻¹ 镁处理时活性最弱，当浓度超过 48 mg·L⁻¹ 时这三个酶活性开始增强但整体上都低于缺镁处理和低镁处理，差异达到显著水平。从不同生育期分析发现，随着生育期的推进，西瓜叶片中 APX、GR、MDAR 活性逐

渐增强，即膨瓜期>盛花期>伸蔓期。不同生育期叶片 DHAR 活性随镁质量浓度的增加呈现先增后降的趋势，在 48 mg·L⁻¹ 镁处理时 DHAR 活性最强，缺镁处理最弱，镁过量处理西瓜叶片 DHAR 活性大体上高于缺镁处理和低镁处理；西瓜叶片 DHAR 活性膨瓜期>盛花期>伸蔓期。

从图 7 可知，西瓜不同生育期叶片 GSH 含量随

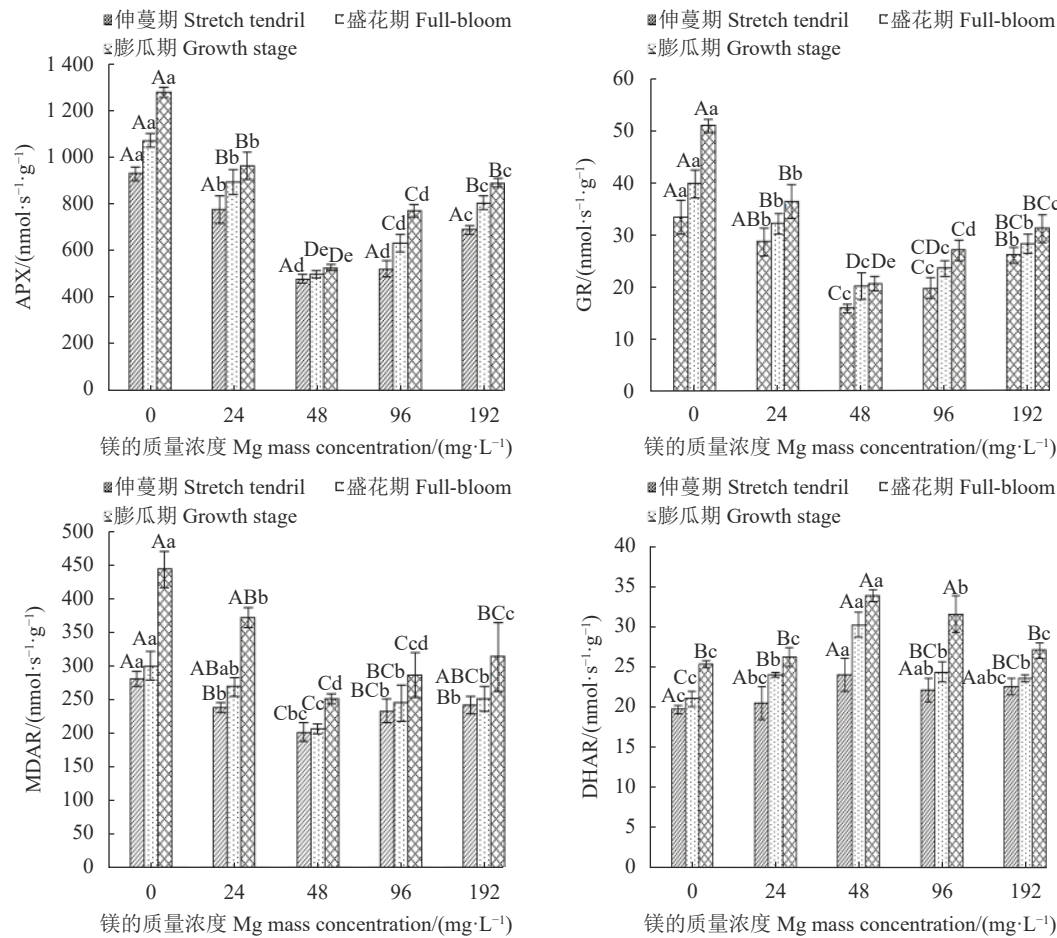


图 6 不同施镁量对西瓜不同生育期叶片 APX、MDAR、GR 和 DHAR 活性的影响

Fig. 6 Effects of different magnesium application on APX, MDAR, GR, and DHAR activities of *C. lanatus* at different growth stages

着镁质量浓度的增加均呈现先增后降的趋势，在 48 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 镁处理时含量最高，缺镁处理时含量最低，差异显著。西瓜不同生育期叶片 GSSG 含量随镁质量浓度的增加呈先降后增的趋势，在 48 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 处理时

含量最低，缺镁处理含量最高。不同生育期叶片 GSH/GSSG 比值随镁处理浓度的增加呈先增后降的趋势，在 48 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 处理时比值最高，缺镁处理时比值最低。

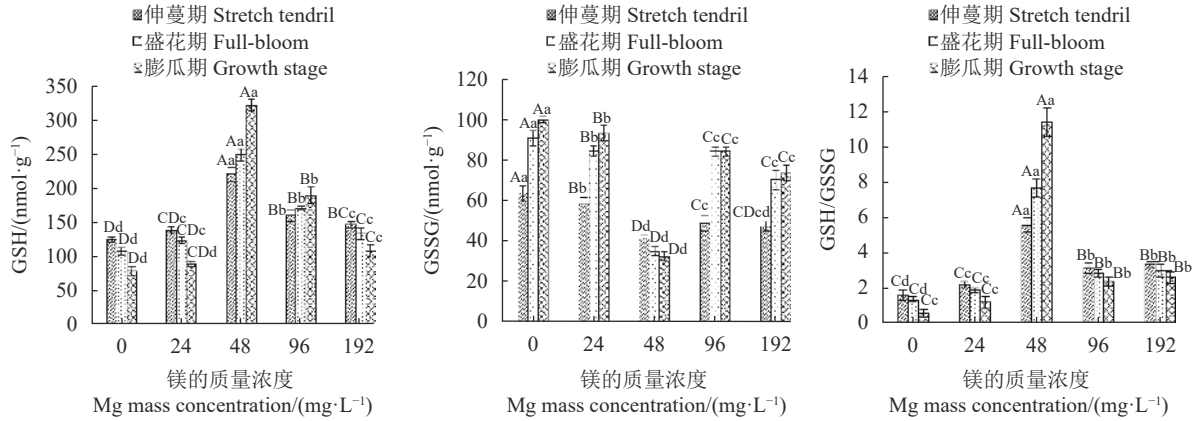


图 7 不同施镁量对西瓜不同生育期叶片 GSH 和 GSSG 含量以及 GSH/GSSG 的影响

Fig. 7 Effects of different magnesium application on GSH and GSSG contents and GSH/GSSG of *C. lanatus* at different growth stages

AsA 和 DAsA 在植物抗逆中扮演着重要角色，DAsA 在 DHAR 催化下可转变为 AsA。西瓜不同生育期叶片的 AsA 含量随镁质量浓度的增加呈先增后降的趋势，在 48 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 镁处理时达到最高，缺镁处理时最低，且低镁和缺镁处理均比镁过量处理低，彼此间差异显著（图 8）。随着镁处理浓度的增加，不同生育期叶片的 DAsA 含量呈先降后增的趋势，在 48 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 镁处理时达到最低，缺镁处理时最高，

镁过量处理低于缺镁和低镁处理，处理间存在显著差异（图 8）。西瓜叶片 AsA/DAsA 比例可以反映西瓜体内抗氧化物的抗氧化能力，一般 AsA/DAsA 比值越大，相应物质的抗氧化能力也越强。不同生育期叶片 AsA/DAsA 比值随镁质量浓度的增加呈先增后降的趋势，在镁质量浓度为 48 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 时达到最高值，缺镁、镁水平低于或高于 48 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 时 AsA/DAsA 值都减小，缺镁处理最低，且差异达到了极显著水平。

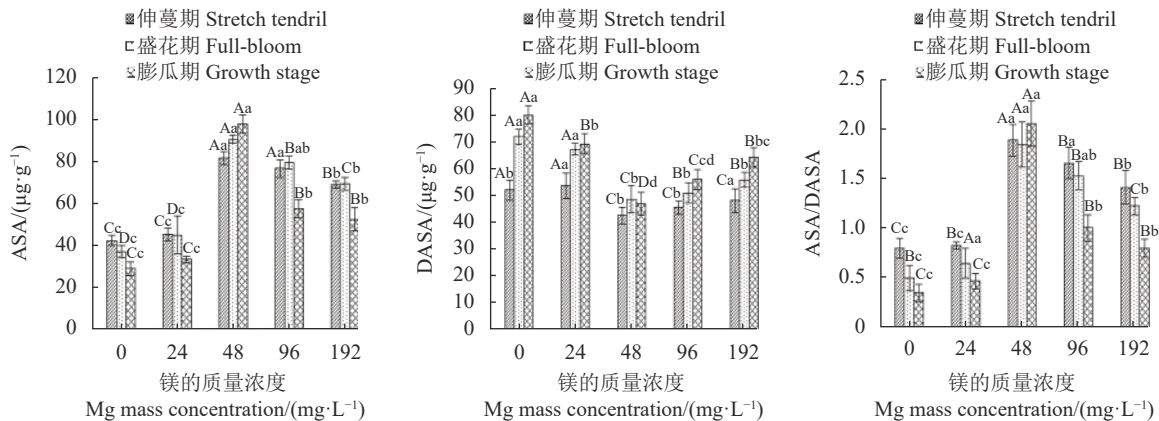


图 8 不同施镁量对西瓜不同生育期叶片 AsA 和 DAsA 含量以及 AsA/DAsA 的影响

Fig. 8 Effects of different magnesium application on AsA and DAsA contents and AsA/DAsA of *C. lanatus* at different growth stages

3 讨论

3.1 镁缺乏和过量胁迫对西瓜 PS II 光合特性的影响

镁元素是植物叶绿素的重要组成成分，参与多种光合酶的合成，对植物的光合作用具有重要意

义，因此镁缺乏或过量都会影响植物的正常生长^[6]。叶绿素荧光诱导动力学参数能够用于描述植物光合作用的机理和光合生理情况，可作为检测植物遭受胁迫伤害程度的指标^[12]。RC/CS₀ 参数表示被测西瓜叶片单位面积上有活性 PS II 的反应中心个数，当叶

片处于不正常光合作用状态时有活性的 PS II 反应中心个数偏少, 光合作用减弱; $1/F_0-1/F_M$ 值的大小可以反映西瓜叶片反应中心活性的强弱; V_J 参数表示光反应 2 ms 时有活性的 PS II 反应中心闭合程度, 同时 PS II 受体侧的 Q_A^- 累积情况也可以由 V_J 参数反映出, V_J 逐渐升高, 表明 Q_A^- 向 Q_B 的电子传递受阻^[26], 本试验中西瓜叶片 RC/CS_0 值和 $1/F_0-1/F_M$ 值随着镁质量浓度的增加均呈先增后降的趋势, 在 $48\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 处理时最大, 缺镁时最小; V_J 值呈现先降后增的趋势, $48\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 镁处理时值最小, 缺镁处理值最大, 表明 $48\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 镁处理时西瓜叶片有足够数量的活跃的 PS II 反应中心参与光合作用, 而缺镁 ($0\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$) 和镁过量 ($192\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$) 处理时西瓜叶片活跃的 PS II 反应中心个数少, 反应中心活性弱, 光合作用弱, PS II 的电子传递能力严重受阻, 在 Q_A^- 到 Q_B 电子传递受到的抑制程度较大, 导致 PS II 反应中心关闭并积累 Q_A^- 。

植物中放氧复合体 (OEC) 的作用是裂解 H_2O 并释放 O_2 , OEC 是 PS II 反应中心的电子供体, 它使被捕获的光能以电子形式持续在电子传递链中传递, 当植物受到不良环境因子胁迫时, OEC 受损害, H_2O 的裂解受抑制, 影响 PS II 电子供体的正常供应^[27]。本研究发现西瓜不同生育期叶片 OEC 活性在 $48\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 镁处理时最高, 缺镁和镁过量处理较低, 说明缺镁、镁过量处理西瓜叶片受伤害, 造成放氧过程中 H_2O 的不完全裂解, 导致 H_2O_2 的产生, PS II 电子传递受阻。

西瓜叶片光合电子传递链中 Q_A 被还原的速率可以由 M_0 值反映出来^[28]。PS II 受体侧的 PQ 库容量由 S_m 的值可以反映出来, PQ 库容量即为完全还原 Q_A 所需能量; 进入电子传递链的电子数量越多则被还原 Q_A 的越多, S_m 值则越大; PS II 受体库大小可由 Area 值反映出来; ϕ_{E_0} 和 Ψ_0 表示叶绿素反应中心捕获的激子和光能分别将电子传递到电子传递链中那些超过 Q_A 的其他电子受体的概率, 可以反映叶片将所捕获的激发能转化为电子并继续传递的效率高低^[29]。在本试验中, $48\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 镁质量浓度处理不同生育期叶片中的 M_0 值最低, 而缺镁和镁过量处理较高; 叶片 S_m 、Area、 Ψ_0 和 ϕ_{E_0} 在 $48\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 处理时最高, 而在缺镁和镁过量处理时较低, 表明缺镁和镁过量胁迫会造成西瓜叶片 PS II 受体侧的严重损害, 缺镁胁迫影响较大。

PS II 反应中心捕光天线色素的大小用 ABS/RC 表示, 该比例升高表明叶片捕光天线色素增加, 预示部分 PS II 反应中心的失活; 当 ABS/RC 和 TR_0/RC

两个比例增加, 叶片增强捕光天线色素的大小以及对光的捕获能力, 从而增强单一反应中心对光的吸收与捕获能力^[30]。西瓜叶片单位面积的热耗散 (DI_0/RC) 在缺镁和镁过量胁迫下升高, ET_0/RC 减少, 西瓜叶片减少用于电子传递的量子份额, 通过增加热耗散来将过多的光能耗散掉, 来减少光抑制对叶片产生的伤害。在本试验中 ϕ_{E_0} 下降, V_J 、 ABS/RC 和 TR_0/RC 升高, 表明缺镁和镁过量胁迫导致西瓜叶片 PS II 反应中心失活, PS II 电子传递受阻, 叶片发生了光抑制, 导致其叶片光能利用率降低。

综上所述, 施镁处理对西瓜叶片光合生理产生显著影响, 通过对生育期西瓜叶片观察, 缺镁和镁过量处理下茎细弱, 叶薄小, 叶片皱缩, 叶片发黄, 叶尖焦枯, 而在 $48\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 镁处理下叶片没有上述症状, 叶片厚大且颜色深绿, 与叶绿素荧光诱导动力学参数相互佐证。进一步对西瓜生长相关指标观测发现, 西瓜的株高、根长、根系体积、地上部干重、根干重、生物产量、可溶性糖、可溶性蛋白、维生素 C、可溶性固形物等含量在 $48\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 镁处理时均达到最大值, 当镁质量浓度低于或高于 $48\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 时, 西瓜各项生长指标增长幅度有所下降, 即缺镁、低镁和高量镁处理下会抑制西瓜的生长, 这与申燕^[15]、田斌^[16]等的研究结果相符。以上结果表明, 镁质量浓度在 $48\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 时西瓜叶片光合色素含量高^[18]、PS II 稳定, 有助于提升叶片光合速率, 促进西瓜植株的生长, 提高果实品质。

3.2 镁缺乏和过量胁迫对西瓜抗氧化能力的影响

镁缺乏或过量都会对植物生长产生影响, 植物的生理生化指标能够反映出植物在镁胁迫条件下的应答情况, 通常被作为植物抗逆性的评价指标^[31]。Pro 作为一种重要的植物渗透调节物质, 能够调节细胞渗透势, 增强细胞保水能力, 减轻膜脂过氧化程度, 保护蛋白分子与酶活性, 在提高植物抗性方面具有极其重要的意义^[32]。MDA 是膜脂过氧化的有毒代谢产物之一, 是活性氧毒害作用通常表现为 MDA 含量累积, 因此, MDA 可作为质膜受损的衡量指标, 反映植物细胞膜脂过氧化程度、衰老程度和对逆境因子的应答强弱^[33], 胁迫程度越剧烈, MDA 含量越多^[34]。已有研究表明, 镁缺乏和过量下植物 MDA 含量增加^[13], 逆境胁迫使植物细胞质膜的结构和功能受损^[35]。本研究结果显示, 缺镁和镁过量处理下西瓜叶片 MDA 和 Pro 含量明显增加, 细胞膜透性也增加, 而 $48\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 处理时细胞膜透性降低, 叶片 Pro、MDA 含量减少, 说明缺镁和镁过量处理西瓜叶片受到损伤, 而适量施镁可以减轻逆境对细胞膜的

损伤, 提高植物抵御逆境胁迫的能力。

POD、SOD 和 CAT 等是植物体内重要的抗氧化酶和细胞保护酶系统^[36], 在逆境条件下能够清除活性氧和自由基, 从而避免膜损伤, 以维持植物的代谢平衡^[37]。已有研究表明, 缺镁处理显著降低植物叶片 SOD 和 CAT 活性^[13]。本试验结果与前人研究相似, 缺镁和镁过量处理下西瓜叶片 POD、SOD 和 CAT 活性显著降低, 缺镁胁迫下降幅度最大, 而当镁质量浓度控制在 $48 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 左右时能显著提高西瓜叶片 POD、SOD 和 CAT 活性, 表明适量增施镁肥可以提高植物抗氧化酶活性。

在正常生长条件下, 植物体内清除活性氧的酶类活性较强, 可及时清除植物受环境胁迫时产生的过量活性氧, 从而使其保持一种动态平衡^[38]。抗坏血酸—谷胱甘肽 (AsA-GSH) 循环是存在于植物体内的重要 H_2O_2 清除系统, 在清除活性氧过程中起着很重要的作用^[39]。AsA-GSH 循环存在于植物叶绿体内, 是一系列连续的生化反应, APX 的酶促反应产生了 MDHA, MDHA 很不稳定, 一部分被氧化生成 DHA, 另一部分被 MDAR 还原为 AsA; DHA 以 GSH 作为电子供体, 在 DHAR 的作用下生成 AsA^[40]。上述反应产生的 GSSG 又在 GR 的催化下被还原成 GSH^[41]。APX 是 AsA-GSH 循环的第一个酶, 该酶能专一性地催化 AsA 与 H_2O_2 反应形成 MDHA, 在降低 H_2O_2 对植物产生的损伤方面发挥着重要作用^[42]。GR 是一种重要的抗氧化酶类, 能够将氧化型 GSSG 还原成还原型 GSH, 为清除活性氧提供还原力, 避免植物受到损伤^[43]。还原型 GSH 是植物体内重要的抗氧化剂和信号物质, 对植物新陈代谢的维持起到很重要的作用, 具有清除自由基、抵抗过氧化损伤、保护酶和结构蛋白及膜系统的功能^[44], 前人研究植物的抗逆境胁迫能力时通过测定 GSH 含量的高低来衡量^[45]。DHAR 是一种重要的植物抗氧化酶, 也是植物 AsA-GSH 循环中能够促进 AsA 再生的关键酶。本研究结果显示, 缺镁和镁过量胁迫下西瓜叶片 APX、GR、MDAR 活性增强, DHAR 减弱。APX 和 MDAR 活性增强, 说明镁胁迫下植物体内产生较多的 H_2O_2 , 为了减轻自身损伤, 植物体启动了 AsA-GSH 循环, 首先增强 APX 活性, 促使 AsA 与 H_2O_2 反应形成 MDHA; 为了 APX 酶促反应持续提供还原底物 AsA 保证正常还原过氧化氢, 镁胁迫下刺激体内 MDAR 和 GR 活性增强。但可能由于镁胁迫强度过大, 西瓜光合作用受到严重影响, 叶片内光合 PS II 系统紊乱, 电子传递受阻, NADPH 和 NADH 大量减少, MDHA 和 DHA 很难及时被还原为 AsA, 造成

AsA 总量减少, AsA/DAsA 比率下降; 与此同时, 由于 GSSG 的还原需要 NADPH 提供电子, 这样又阻碍 GSH 的生成进而导致 GSH/GSSG 比率降低。说明, 缺镁和镁过量处理下植物体内 AsA-GSH 循环无法正常运转, 不能及时清除 H_2O_2 , 导致体内活性氧大量积累, 对植物体造成巨大损伤, 缺镁处理影响最大。镁质量浓度为 $48 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 时, 西瓜叶片 APX、GR、MDAR 活性处于较低水平, DHAR 活性较高, 叶内 GSH、AsA 含量及 AsA/DAsA、GSH/GSSG 比率显著高于其他处理, 促进 AsA-GSH 循环, 提高植物逆境综合防御能力。

4 结论

通过分析 5 个不同 Mg^{2+} 浓度对西瓜农艺性状和生理特性的影响, 结果显示, 缺镁 ($0 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$) 和镁过量 ($192 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$) 胁迫造成西瓜放氧复合体 (OEC) 受到伤害, PS II 的光合电子传递受阻, 抑制了 PS II 的活性, 导致叶片 SOD、POD、CAT 等抗氧化酶活性下降, 抑制西瓜生长。增施适量镁肥 ($24 \sim 96 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$) 可明显提高西瓜抗氧化物质含量及抗氧化酶活性, 促进 AsA-GSH 循环, 减轻膜脂过氧化程度及活性氧积累, 保护细胞膜和光系统的稳定性, 通过热耗散降低过剩光能对光合系统的破坏, 有助于增强光合作用, 促进西瓜生长发育, 提高西瓜营养物质积累。在供试条件下, $48 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 镁处理下西瓜在生理生化指标上表现为多方面的综合防御, 故 $48 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 为西瓜栽培最适宜施镁质量浓度。

参考文献:

- [1] 赵跃, 李飒, 黄楠, 等. 减量施肥对京郊地区设施小果型西瓜产量和品质的影响 [J]. 中国瓜菜, 2020, 33 (9): 47-49.
ZHAO Y, LI S, HUANG N, et al. Effect of reduced fertilization on the yield and quality of protected mini watermelon in Daxing district [J]. *China Cucurbits and Vegetables*, 2020, 33 (9): 47-49. (in Chinese)
- [2] 刘文革, 何楠, 赵胜杰, 等. 我国西瓜品种选育研究进展 [J]. 中国瓜菜, 2016, 29 (1): 1-7.
LIU W G, HE N, ZHAO S J, et al. Advances in watermelon breeding in China [J]. *China Cucurbits and Vegetables*, 2016, 29 (1): 1-7. (in Chinese)
- [3] 张文, 潘顺秋, 符传良, 等. 钾镁肥在西瓜上的施用效果研究 [J]. 现代农业科技, 2010 (17): 108-109.
ZHANG W, PAN S Q, FU C L, et al. Effect of potassium and magnesium fertilizer on Watermelon [J]. *Modern Agricultural Sciences and Technology*, 2010 (17): 108-109. (in Chinese)
- [4] 林丽琳, 陈晟, 施木田, 等. Mg 对黑美人西瓜叶片 C、N 代谢的影响 [J]. 亚热带农业研究, 2015, 11 (1): 25-30.

- LIN L L, CHEN S, SHI M T, et al. Effect of magnesium on carbon and nitrogen metabolism of Heimeiren watermelon leaves [J]. *Subtropical Agriculture Research*, 2015, 11 (1): 25–30. (in Chinese)
- [5] 林丽琳, 陈晟, 施木田, 等. 镁对新天玲西瓜叶片光合色素、可溶性蛋白含量和硝酸还原酶活性的影响 [J]. *热带农业科学*, 2015, 35 (1): 26–30.
- LIN L L, CHEN S, SHI M T, et al. Effects of magnesium on leaf photosynthesis pigments, soluble protein content and reducing nitric acid activity of xintianling watermelon [J]. *Chinese Journal of Tropical Agriculture*, 2015, 35 (1): 26–30. (in Chinese)
- [6] BEALE S I. Enzymes of chlorophyll biosynthesis [J]. *Photosynthesis Research*, 1999, 60 (1): 43–73.
- [7] 熊英杰, 陈少凤, 李恩香, 等. 植物缺镁研究进展及展望 [J]. *安徽农业科学*, 2010, 38 (15): 7754–7757.
- XIONG Y J, CHEN S F, LI E X, et al. Research progress and outlook on magnesium deficiency in plants [J]. *Journal of Anhui Agricultural Sciences*, 2010, 38 (15): 7754–7757. (in Chinese)
- [8] MURPHY M P. How mitochondria produce reactive oxygen species [J]. *The Biochemical Journal*, 2009, 417 (1): 1–13.
- [9] HERMANS C, BOURGIS F, FAUCHER M, et al. Magnesium deficiency in sugar beets alters sugar partitioning and phloem loading in young mature leaves [J]. *Planta*, 2005, 220 (4): 541–549.
- [10] YIN S T, ZE Y G, LIU C, et al. Cerium relieves the inhibition of nitrogen metabolism of spinach caused by magnesium deficiency [J]. *Biological Trace Element Research*, 2009, 132 (1/2/3): 247–258.
- [11] 李佳, 曹先梅, 刘立云, 等. 镁对槟榔幼苗光合特性和叶绿体超微结构的影响 [J]. *植物营养与肥料学报*, 2019, 25 (11): 1949–1956.
- LI J, CAO X M, LIU L Y, et al. Effects of different magnesium nutrition levels on photosynthetic characteristics and chloroplast ultrastructure of *Areca* palm seedlings [J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizers*, 2019, 25 (11): 1949–1956. (in Chinese)
- [12] 原佳乐, 马超, 冯雅岚, 等. 不同抗旱性小麦快速叶绿素荧光诱导动力学曲线对干旱及复水的响应 [J]. *植物生理学报*, 2018, 54 (6): 1119–1129.
- YUAN J L, MA C, FENG Y L, et al. Response of chlorophyll fluorescence transient in leaves of wheats with different drought resistances to drought stresses and rehydration [J]. *Plant Physiology Journal*, 2018, 54 (6): 1119–1129. (in Chinese)
- [13] 王芳, 刘鹏, 史锋, 等. 镁对大豆叶片细胞膜透性和保护酶活性的影响 [J]. *植物营养与肥料学报*, 2005, 11 (5): 659–664.
- WANG F, LIU P, SHI F, et al. Influences of magnesium on cell membrane permeability and activities of protective enzymes of soybean leaves [J]. *Plant Nutrition and Fertilizing Science*, 2005, 11 (5): 659–664. (in Chinese)
- [14] 林仁辉. 小白菜镁素营养生理研究[D]. 福州: 福建农林大学, 2009.
- LIN R H. *Studies on magnesium nutritive physiology of pakchoi*[D]. Fuzhou: Fujian Agriculture and Forestry University, 2009. (in Chinese)
- [15] 孙青慧. 苦瓜镁素营养生理的研究[D]. 福州: 福建农林大学, 2010.
- SUN Q H. *Studies on magnesium nutrition physiology of balsam pear*[D]. Fuzhou: Fujian Agriculture and Forestry University, 2010. (in Chinese)
- [16] 凌丽俐, 黄翼, 彭良志, 等. 镁缺乏和过量胁迫对纽荷尔脐橙叶绿素荧光特性的影响 [J]. *生态学报*, 2014, 34 (7): 1672–1680.
- LING L L, HUANG Y, PENG L Z, et al. Influence of magnesium deficiency and excess on chlorophyll fluorescence characteristics of Newhall navel orange leaves [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2014, 34 (7): 1672–1680. (in Chinese)
- [17] 申燕, 肖家欣, 杨慧, 等. 镁胁迫对春见橘橙生长和矿质元素分布及叶片超微结构的影响 [J]. *园艺学报*, 2011, 38 (5): 849–858.
- SHEN Y, XIAO J X, YANG H, et al. Effects of magnesium stress on growth, distribution of several mineral elements and leaf ultrastructure of Harumi Tangor [J]. *Acta Horticulturae Sinica*, 2011, 38 (5): 849–858. (in Chinese)
- [18] 田斌, 胡玉洁, 路雪丽, 等. 镁缺乏和过量胁迫对大麦幼苗生长以及生理生化指标的影响 [J]. *杭州师范大学学报 (自然科学版)*, 2018, 17 (2): 146–152.
- TIAN B, HU Y J, LU X L, et al. Effects of magnesium deficiency and excessive stress on the growth and physiological and biochemical indexes of barley seedlings [J]. *Journal of Hangzhou Normal University (Natural Science Edition)*, 2018, 17 (2): 146–152. (in Chinese)
- [19] 林丽琳. 镁对不同基因型西瓜若干生理生化代谢指标的影响[D]. 福州: 福建农林大学, 2015.
- LIN L L. Effect of magnesium on different genotypes of watermelon in some physiological and biochemical metabolism[D]. Fuzhou: Fujian Agriculture and Forestry University, 2015. (in Chinese)
- [20] 李鹏民, 高辉远, Reto J. Strasser. 快速叶绿素荧光诱导动力学分析在光合作用研究中的应用 [J]. *植物生理与分子生物学报*, 2005, 31 (6): 559–566.
- LI P M, GAO H Y, STRASSER R. Application of the fast chlorophyll fluorescence induction dynamics analysis in photosynthesis study [J]. *Acta Photophysiological Sinica*, 2005, 31 (6): 559–566. (in Chinese)
- [21] 李合生. 植物生理生化试验原理和技术[M]. 北京: 高等教育出版社, 2000.
- [22] SPYCHALLA J P, DESBOROUGH S L. Superoxide dismutase, catalase, and alpha-tocopherol content of stored potato tubers [J]. *Plant Physiology*, 1990, 94 (3): 1214–1218.
- [23] NAKANO Y, ASADA K. Hydrogen peroxide is scavenged by ascorbate-specific peroxidase in spinach chloroplasts [J]. *Plant and Cell Physiology*, 1981, 22 (5): 867–880.
- [24] HALLIWELL B, FOYER C H. Properties and physiological function of a glutathione reductase purified from spinach leaves by affinity chromatography [J]. *Planta*, 1978, 139 (1): 9–17.
- [25] 高俊凤. 植物生理学实验指导[M]. 北京: 高等教育出版社, 2006.
- [26] 李长志, 李欢, 刘庆, 等. 不同生长期干旱胁迫甘薯根系生长及荧光生理的特性比较 [J]. *植物营养与肥料学报*, 2016, 22 (2): 511–517.
- LI C Z, LI H, LIU Q, et al. Comparison of root development and fluorescent physiological characteristics of sweet potato exposure to drought stress in different growth stages [J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizer*, 2016, 22 (2): 511–517. (in Chinese)
- [27] ZHOU X T, ZHAO H L, CAO K, et al. Beneficial roles of melatonin

- on redox regulation of photosynthetic electron transport and synthesis of D1 protein in tomato seedlings under salt stress [J]. *Frontiers in Plant Science*, 2016, 7: 1823.
- [28] 罗丽娟, 唐莉娜, 陈星峰, 等. 硅对镉胁迫下烟草叶片PS II 叶绿素荧光特性的影响 [J]. *烟草科技*, 2019, 52 (8): 1–8.
- LUO L J, TANG L N, CHEN X F, et al. Effects of silicon on chlorophyll fluorescence characteristics of PS II in tobacco leaves under cadmium stress [J]. *Tobacco Science & Technology*, 2019, 52 (8): 1–8. (in Chinese)
- [29] 耿庆伟, 邢浩, 翟衡, 等. 臭氧胁迫下不同光强与温度处理对赤霞珠葡萄叶片PS II 光化学活性的影响 [J]. *中国农业科学*, 2019, 52 (7): 1183–1191.
- GENG Q W, XING H, ZHAI H, et al. Effects of different light intensity and temperature on PS II photochemical activity in cabernet sauvignon grape leaves under ozone stress [J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2019, 52 (7): 1183–1191. (in Chinese)
- [30] STRASSER B J. Donor side capacity of Photosystem II probed by chlorophyll a fluorescence transients [J]. *Photosynthesis Research*, 1997, 52 (2): 147–155.
- [31] VIERLING E, KIMPEL J A. Plant responses to environmental stress [J]. *Current Opinion in Biotechnology*, 1992, 3 (2): 164–170.
- [32] 沙汉景, 胡文成, 贾琰, 等. 外源水杨酸、脯氨酸和 γ -氨基丁酸对盐胁迫下水稻产量的影响 [J]. *作物学报*, 2017, 43 (11): 1677–1688.
- SHA H J, HU W C, JIA Y, et al. Effect of exogenous salicylic acid, proline, and γ -aminobutyric acid on yield of rice under salt stress [J]. *Acta Agronomica Sinica*, 2017, 43 (11): 1677–1688. (in Chinese)
- [33] ÇAKMAK I. Activity of ascorbate-dependent H_2O_2 -scavenging enzymes and leaf chlorosis are enhanced in magnesium- and potassium-deficient leaves, but not in phosphorus-deficient leaves [J]. *Journal of Experimental Botany*, 1994, 45 (9): 1259–1266.
- [34] 袁琳, 克热木·伊力, 张利权. NaCl胁迫对阿月浑子实生苗活性氧代谢与细胞膜稳定性的影响 [J]. *植物生态学报*, 2005, 29 (6): 985–991.
- YUAN L, KEREMU Y L, ZHANG L Q. Effects of nacl stress on active oxygen metabolism and membrane stability in *Pistacia vera* seedlings [J]. *Acta Phytocologica Sinica*, 2005, 29 (6): 985–991. (in Chinese)
- [35] 何云, 李贤伟, 龚伟. 3种岩石边坡护坡植物叶片质膜透性和可溶性糖含量对低温胁迫的响应 [J]. *四川农业大学学报*, 2012, 30 (1): 42–45.
- HE Y, LI X W, GONG W. Response of membrane permeability and soluble carbohydrate of three native *Petrophile* plants to low temperature stress [J]. *Journal of Sichuan Agricultural University*, 2012, 30 (1): 42–45. (in Chinese)
- [36] 王天, 宋佳承, 闫士朋, 等. 低温胁迫下磷肥施用量对油橄榄生长发育的影响 [J]. *植物营养与肥料学报*, 2020, 26 (5): 879–890.
- WANG T, SONG J C, YAN S P, et al. Growth and development of olive under low temperature stress influenced by phosphate fertilizer application [J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizers*, 2020, 26 (5): 879–890. (in Chinese)
- [37] 王利界, 周智彬, 常青, 等. 盐旱交叉胁迫对灰胡杨(*Populus pruinosa*)幼苗生长和生理生化特性的影响 [J]. *生态学报*, 2018, 38 (19): 7026–7033.
- WANG L J, ZHOU Z B, CHANG Q, et al. Growth, physiological and biochemical characteristics of *Populus pruinosa* seedlings under salt-drought stress [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2018, 38 (19): 7026–7033. (in Chinese)
- [38] XUE Y F, LIU Z P. Antioxidant enzymes and physiological characteristics in two Jerusalem artichoke cultivars under salt stress [J]. *Russian Journal of Plant Physiology*, 2008, 55 (6): 776–781.
- [39] PU F, REN X L. Ascorbate levels and activities of enzymes related to the glutathione-ascorbate cycle in fruits of Chinese persimmon cultivars [J]. *Horticulture, Environment, and Biotechnology*, 2014, 55 (4): 315–321.
- [40] NISHIKAWA F. Ascorbate metabolism in harvested broccoli [J]. *Journal of Experimental Botany*, 2003, 54 (392): 2439–2448.
- [41] STRASSER B J, STRASSER R J. Measuring fast fluorescence transients to address environmental questions: The JIP-test[M]//Photosynthesis: from Light to Biosphere. Dordrecht: Springer Netherlands, 1995: 4869–4872.
- [42] IMAHORI Y, BAI J H, BALDWIN E. Antioxidative responses of ripe tomato fruit to postharvest chilling and heating treatments [J]. *Scientia Horticulturae*, 2016, 198: 398–406.
- [43] GILL S S, TUTEJA N. Reactive oxygen species and antioxidant machinery in abiotic stress tolerance in crop plants [J]. *Plant Physiology and Biochemistry*, 2010, 48 (12): 909–930.
- [44] JOZEFČZAK M, REMANS T, VANGRONSVELD J, et al. Glutathione is a key player in metal-induced oxidative stress defenses [J]. *International Journal of Molecular Sciences*, 2012, 13 (3): 3145–3175.
- [45] MAY M J, VERNOUX T, LEAVER C, et al. Glutathione homeostasis in plants: Implications for environmental sensing and plant development [J]. *Journal of Experimental Botany*, 1998, 49 (321): 649–667.

(责任编辑: 于洪杰)