

钛铁试剂对低温胁迫及恢复后秋茄幼苗光合生理特性的影响

潘晓娇¹, 郑春芳^{2*}, 刘伟成³, 陈继浓³, 丁文勇³ (1.浙江工贸职业技术学院设计与数字艺术学院, 浙江温州 325000; 2.城镇水污染生态治理技术国家地方联合工程研究中心, 温州大学生命与环境科学学院, 浙江温州 325035; 3.浙江省海洋水产养殖研究所, 温州海洋研究院, 浙江省近岸水域生物资源开发与保护重点实验室, 浙江温州 325005)

摘要 [目的]探讨钛铁试剂对秋茄幼苗的抗寒性调控作用。[方法]以秋茄幼苗为试材,研究喷洒 10 mmol/L 钛铁试剂对低温胁迫及恢复后植株叶片光合和叶绿素荧光参数、抗氧化系统以及细胞膜透性的影响。[结果]钛铁试剂能显著提高低温胁迫及恢复后秋茄幼苗叶片净光合速率(P_n)、气孔导度(G_s)、PSII 最大光化学效率(F_v/F_m)、实际光化学效率(Φ_{PSII})、光化学猝灭系数(q_p)、抑制非光化学猝灭系数(NPQ);钛铁试剂也能增加短期低温胁迫及恢复后秋茄幼苗叶片的超氧化物歧化酶(SOD)、过氧化物酶(POD)、抗坏血酸过氧化物酶(APX)活性,抑制相对电导率以及 MDA 含量积累。[结论]钛铁试剂能有效改善植株抗氧化系统,提高植株的光合作用,从而增强秋茄幼苗的抗寒性。

关键词 红树林;秋茄;钛铁试剂;低温胁迫;光合作用;酶活性

中图分类号 S 796 **文献标识码** A

文章编号 0517-6611(2022)12-0120-04

doi: 10.3969/j.issn.0517-6611.2022.12.030

开放科学(资源服务)标识码(OSID): 

Effect of Tiron on Photosynthetic Physiological Characteristics of *Kandelia obovata* Seedlings under Low Temperature Stress and Recovery

PAN Xiao-jiao¹, ZHENG Chun-fang², LIU Wei-cheng³ et al (1.School of Design and Digital Arts, Zhejiang Industry and Trade Vocational College, Wenzhou, Zhejiang 325000; 2.College of Life and Environmental Science, Wenzhou University, Wenzhou, Zhejiang 325035; 3. Zhejiang Key Laboratory of Exploitation and Preservation of Coastal Bio-resource, Zhejiang Mariculture Research Institute, Wenzhou, Zhejiang 325005)

Abstract [Objective] In order to explore the regulative role of tiron on cold tolerance of *Kandelia obovata* seedlings. [Method] An experiment was carried out to analyze the effects of 10 mol/L tiron on parameters of gas exchange and chlorophyll fluorescence, antioxidant system and relative electrical conductivity in *K. obovata* seedling to low temperature stress and recovery. [Result] The results showed that tiron significantly increased leaf net photosynthetic rate (P_n), stomatal conductance (G_s), photochemical efficiency of photosystem II (F_v/F_m), actual photochemical efficiency (Φ_{PSII}), photochemical quenching coefficient (q_p) in *K. obovata*, while significantly decreased leaf non-photochemical quenching coefficient (NPQ). In addition, tiron increased the activities of superoxide dismutase (SOD), peroxidase (POD) and ascorbate peroxidase (APX), and alleviated the oxidative damage in leaves of *K. obovata* by reducing cell membrane permeability (relative electrical conductivity) and lipid peroxidation (malondialdehyde, MDA). [Conclusion] The study indicates that tiron could effectively improve the antioxidant system, increase leaf photosynthesis, and enhance cold tolerance of *K. obovata* seedlings.

Key words Mangrove; *Kandelia obovata*; Tiron; Low temperature stress; Photosynthesis; Enzymatic activity

秋茄(*Kandelia obovata*)是我国分布纬度最北,且最耐寒的红树植物之一^[1],被作为向更高纬度引种的最佳红树植物品种之一。低温是影响红树林存活及其生长发育的主要非生物胁迫因子,严重影响秋茄的生长发育和地理分布^[2]。近年来,随着全球气候变暖,极端低温发生的频率、强度和持续时间都在不断增加,低温胁迫对红树林产生了极大的伤害^[3]。研究表明,低温胁迫会影响秋茄抗氧化系统,提高植株体内活性氧(ROS)含量,抑制叶绿素合成,最终降低植株的光合作用^[4-6]。钛铁试剂(Tiron, disodium 1,2-dihydroxybenzene-3,5-disulfonate)是一种非毒性的自由基清除剂^[7],并已经作为植物清除 ROS 清除剂得以应用^[8-9]。研究发现,适宜浓度的钛铁试剂能减轻重金属胁迫对冬珊瑚幼苗根系生长的抑制^[10]。然而,关于钛铁试剂调控低温胁迫下红树植物秋茄叶片光合作用和保护酶的研究尚鲜见报道。为此,笔者探讨了叶面喷洒钛铁试剂对低温胁迫下秋茄叶片光合、荧光参数以及抗氧化系统中相关保护酶的影响,探讨 ROS

清除剂调控秋茄抗寒的机制,以期为我国高纬度引种红树林的安全越冬提供新的途径。

1 材料与方法

1.1 试验材料 2019 年 4 月,从福建漳州购置秋茄胚轴,经消毒后种植在高 30 cm 直径 20 cm 并装有 3 kg 滩涂淤泥自然风干土的聚乙烯塑料桶内,每个桶中插种 4 株,自然环境下培养,定期浇灌霍格兰氏(Hoagland's)营养液,保持水层 1~2 cm。次年(2020 年)12 月进行低温胁迫试验。

1.2 试验设计 试验设定 4 个处理:①喷洒清水作为对照(CK);②喷洒 10 mmol/L 钛铁试剂(TIR);③低温胁迫处理(LTS):喷洒清水+低温;④钛铁试剂缓解低温胁迫处理(TIR+LTS):喷洒 10 mol/L 钛铁试剂+低温。每处理 3 次重复,每个重复 3 桶。

1.3 试验处理 把植株大小一致的秋茄幼苗移入智能光照培养箱内适应 8 d,设定温度为 20 ℃(昼)/15 ℃(夜),光照 12 h/d,光照强度 400 $\mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ 。适应结束后,仍保留在光照培养箱(各设定参数均不变)内。把幼苗分为 2 部分,一部分叶面喷洒清水,另一部分叶面喷洒钛铁试剂溶液。隔天早晚各喷施 1 次,喷洒以叶面湿润且不下滴为宜,共喷施 4 d,共 8 d。之后,一半喷施清水和钛铁试剂溶液的植株仍

基金项目 国家自然科学基金项目(32071503);温州市科技计划项目(N2020009)。

作者简介 潘晓娇(1984—),女,浙江温州人,副教授,从事植物生态学* 通信作者,研究员,从事岸线生态修复研究。

收稿日期 2021-08-06

保留在原培养箱(各设定的参数仍与适应时设置一致)内作为对照(CK)和钛铁试剂(TIR)处理,而另一半喷施清水和钛铁试剂溶液的植株转入另一个温度设定为 5 ℃(昼)/-1 ℃(夜)冷光源植物生长箱(GDX-260E;除温度外,其他设定参数均不变)内进行低温胁迫处理 4 d,其中清水处理的植株为低温胁迫处理(LTS),喷洒钛铁试剂后进行低温胁迫的植株作为钛铁试剂缓解低温胁迫处理(TIR+LTS),光照条件不变。低温胁迫 4 d 后,温度调整为 20 ℃(昼)/15 ℃(夜),LTS 和 TIR+LTS 处理的植株均恢复 1 d。分别在低温 4 d 和恢复 1 d 选取各处理幼苗顶端完全展开的倒三对叶片进行光合、荧光及生理指标测定。

1.4 测定指标与方法

1.4.1 光合参数测定。分别在 20 ℃ 和 8 ℃ 光照培养箱内,10:00—11:30 利用 Li-6400 型便携式光合仪(Li-Cor Inc., USA)测定顶端完全展开的倒三对叶片的净光合速率(P_n)、气孔导度(G_s)。测定光合参数时,设定光强 400 $\mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$, CO_2 供应浓度为 390 $\mu\text{mol}/\text{mol}$ 。

1.4.2 荧光参数测定。在测定光合参数相同的条件下,用英国 Hansatech 公司生产的 FMS-2 型便携调制式叶绿素荧光仪测定叶片荧光参数。测定前先暗适应 30 min,然后打开 FMS-2 的内源光化光[400 $\mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$],5 min 后测定稳态荧光(F_s)、光下最大荧光(F_m')、初始荧光(F_0)等。依据 Roháček^[11]方法,计算光适应下实际光化学效率(Φ_{PSII})、暗适应下最大光化学效率(F_v/F_m)、光化学猝灭系数(q_p)和非光化学猝灭系数(NPQ)。

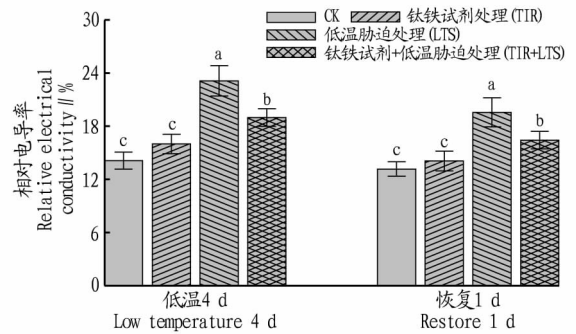
1.4.3 生理生化指标测定。超氧化物歧化酶(SOD)活性采用氯化硝基四氮唑蓝(NBT)法测定^[12];过氧化物酶(POD)活性采用愈创木酚法测定^[12];丙二醛(MDA)含量采用硫代巴比妥酸法测定^[13]。抗坏血酸过氧化物酶(APX)活性采用抗坏血酸法测定^[14]。

将 0.5 g 新鲜叶片放入 15 mL 去离子水中,用抽气机抽气 15 min 后静置 60 min,用 DDS211AT 型电导仪测定外渗电解质(S1),以沸水煮 10 min 杀死植物组织为终电导值(S2),并计算相对电导率^[15]。

1.5 数据处理 试验数据用软件 SPSS 20.0 进行方差分析和 LSD 显著性测验,并采用 SigmaPlot 10.0 绘图软件作图。数据为平均值±标准差。

2 结果与分析

2.1 钛铁试剂对低温胁迫及恢复后秋茄幼苗叶片相对电导率的影响 由图 1 可知,低温 4 d 条件下,与 CK 相比,TIR 处理提高了秋茄幼苗叶片相对电导率,但未达到显著差异水平;LTS 处理显著提高了秋茄幼苗叶片相对电导率($P < 0.05$),为 CK 的 1.6 倍;TIR+LTS 处理能显著抑制秋茄幼苗叶片相对电导率增加,且叶片相对电导率仅为 LTS 处理的 82.1%。正常条件下恢复 1 d,LTS 处理秋茄幼苗叶片相对电导率仍显著高于 CK,且为 CK 的 1.5 倍;TIR+LTS 处理仍能显著抑制叶片相对电导率的增加($P < 0.05$),且叶片相对电导率为 LTS 处理的 84.0%。



注:不同小写字母表示处理间差异显著($P < 0.05$)

Note: Different lowercases indicated significant difference between different treatments ($P < 0.05$)

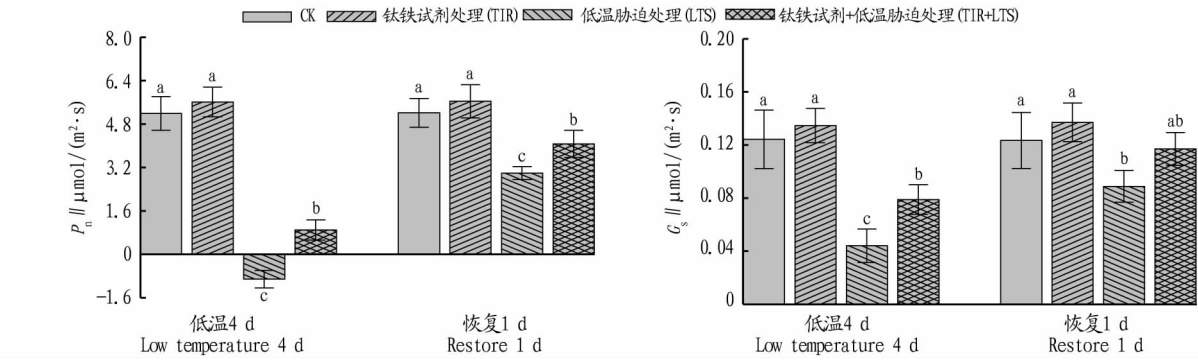
图1 钛铁试剂对低温胁迫及恢复后秋茄幼苗叶片相对电导率的影响

Fig.1 Effect of tiron on leaf relative electrical conductivity of *K. obovate* seedlings under low temperature stress and recovery

2.2 钛铁试剂对低温胁迫及恢复后秋茄幼苗叶片 P_n 和 G_s 的影响 由图 2 可知,低温 4 d 条件下,与 CK 相比,TIR 处理能提高正常生长条件下秋茄幼苗叶片 P_n 和 G_s ,而 LTS 处理显著降低秋茄幼苗叶片的 P_n 和 G_s ($P < 0.05$)。与 LTS 处理相比,TIR+LTS 处理能显著提高秋茄叶片 P_n 和 G_s ($P < 0.05$)。正常条件下恢复 1 d 后,LTS 处理秋茄幼苗叶片 P_n 和 G_s 升高,但仍显著低于 CK ($P < 0.05$);LTS+TIR 处理能加速秋茄幼苗叶片 P_n 和 G_s 恢复,但与 CK 相比,仅叶片 P_n 显著降低 ($P < 0.05$),而 G_s 基本恢复正常。

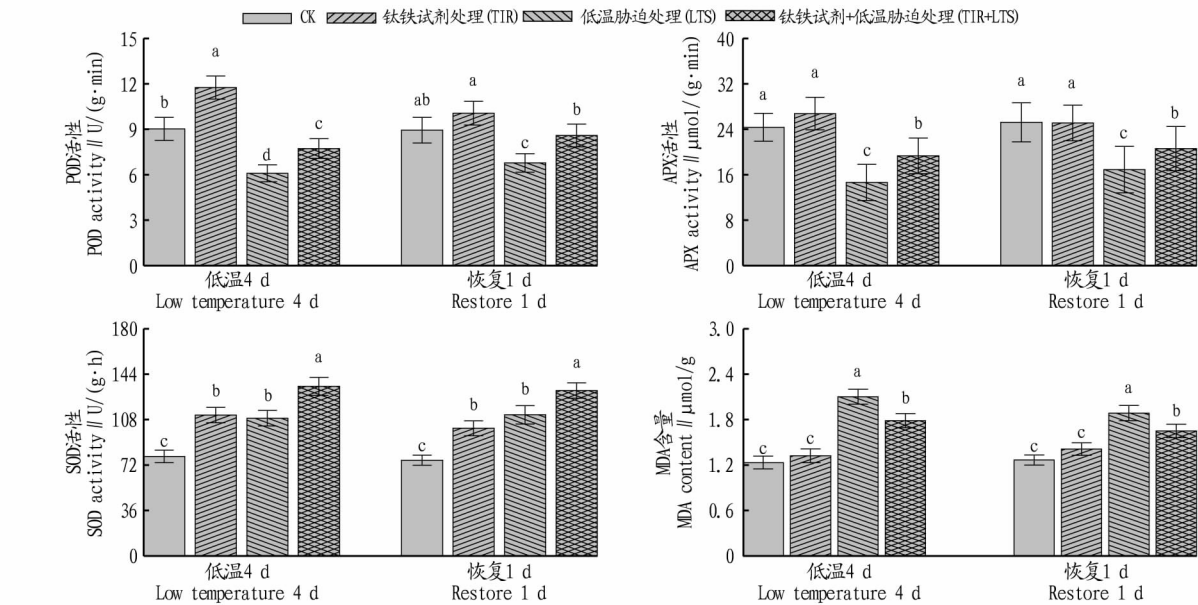
2.3 钛铁试剂对低温胁迫及恢复后秋茄幼苗叶片 POD、APX、SOD 活性和 MDA 含量的影响 由图 3 可知,低温 4 d 条件下,与 CK 相比,正常条件下 TIR 处理能提高秋茄幼苗叶片 POD、APX 以及 SOD 活性,但仅叶片 POD 和 SOD 活性与 CK 存在显著差异 ($P < 0.05$);LTS 处理显著降低秋茄幼苗叶片 POD 和 APX 活性 ($P < 0.05$),而显著增加了 SOD 活性和 MDA 含量 ($P < 0.05$)。与 LTS 处理相比,LTS+TIR 处理显著提高了幼苗叶片 POD、APX、SOD 活性 ($P < 0.05$),且分别为 TIR 处理 1.3、1.3、1.2 倍;LTS+TIR 处理反而显著降低 MDA 含量 ($P < 0.05$),且为 LTS 处理的 84.9%。正常条件下恢复 1 d,TIR+LTS 处理能加速叶片 POD 活性恢复,并与 CK 差异不显著;与 LTS 相比,LTS+TIR 处理仍显著提高秋茄幼苗叶片 POD、APX、SOD 活性 ($P < 0.05$),显著降低 MDA 含量 ($P < 0.05$)。

2.4 钛铁试剂对低温胁迫及恢复秋茄幼苗叶片 Φ_{PSII} 、 F_v/F_m 、 q_p 和 NPQ 的影响 由图 4 可知,低温 4 d 条件下,与 CK 相比,TIR 处理对 Φ_{PSII} 、 F_v/F_m 、 q_p 和 NPQ 均无显著影响 ($P > 0.05$)。与 CK 相比,LTS 处理显著降低了秋茄幼苗叶片 Φ_{PSII} 、 F_v/F_m 、 q_p ,且分别为 CK 的 56.7%、49.0%、43.3%;显著增加了叶片 NPQ,为 CK 的 2.2 倍。与 LTS 相比,LTS+TIR 处理显著提高了叶片的 Φ_{PSII} 、 F_v/F_m 和 q_p ($P < 0.05$),且分别为低温胁迫处理的 1.3、1.4、1.5 倍,说明钛铁试剂能缓解低温胁迫对秋茄幼苗叶片叶绿素荧光的伤害;LTS+TIR 处理反而显著降低叶片 NPQ ($P < 0.05$),为 LTS 处理的 67.3%。正常条件下



注:不同小写字母表示处理间差异显著($P<0.05$)
Note: Different lowercases indicated significant difference between different treatments ($P<0.05$)

图2 钛铁试剂对低温胁迫及恢复后秋茄幼苗叶片 P_n 和 G_s 的影响
Fig.2 Effect of tiron on leaf P_n and G_s of *K. ovovata* seedlings under low temperature stress and recovery



注:不同小写字母表示处理间差异显著($P<0.05$)
Note: Different lowercases indicated significant difference between different treatments ($P<0.05$)

图3 钛铁试剂对低温胁迫及恢复后秋茄幼苗叶片 POD、APX、SOD 活性和 MDA 含量的影响

Fig.3 Effect of tiron on leaf activities of POD, APX, SOD and MDA content of *K. ovovata* seedlings under low temperature stress and recovery

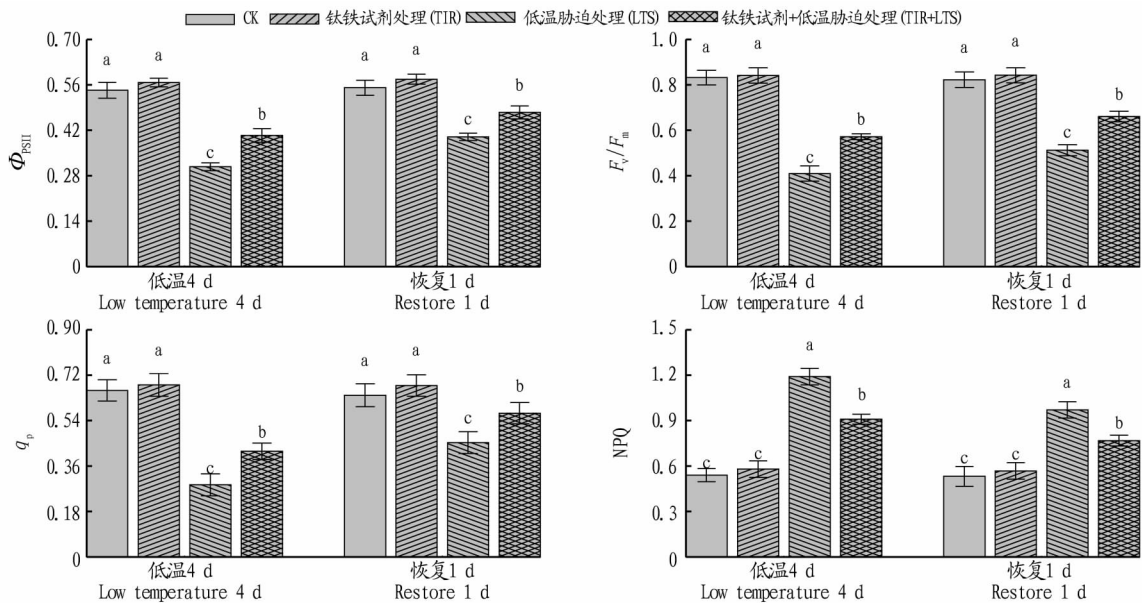
恢复1 d, LTS 处理的秋茄幼苗叶片 Φ_{PSII} 、 F_v/F_m 和 q_P 仍显著低于 CK ($P<0.05$), 而叶片 NPQ 显著高于 CK ($P<0.05$); LTS+TIR 处理有助于秋茄幼苗叶片叶绿素荧光参数 (Φ_{PSII} 、 F_v/F_m 和 q_P) 的恢复, 叶片 Φ_{PSII} 、 F_v/F_m 和 q_P 分别为 LTS 处理的1.2、1.3、1.3 倍; 反而抑制 NPQ 增加, 约为 LTS 处理的 79.1%。

3 讨论

一般来说, 在正常情况下, 植物细胞内自由基的产生与清除处于动态平衡, 而低温胁迫会破坏这种平衡, 使大量自由基积累, 致使膜脂过氧化程度加剧, 导致细胞膜损伤与破坏^[16]。其中, 抗氧化酶 SOD、POD、APX 是清除 ROS 的重要酶类。研究表明, 红树植物秋茄叶片相对电导率和 MDA 含量是衡量植物细胞膜脂过氧化的重要指标^[17]。低温胁迫会降低秋茄幼苗叶片 POD 和 APX 活性, 增加 MDA 含量和相对电导率, 表明低温胁迫导致植物细胞膜受损, 膜脂过氧化程度加剧, 最终导致秋茄叶片 P_n 和 G_s 显著降低^[5, 18]。前期

研究发现, 外施褪黑素^[17]、烯效唑^[19] 以及抗寒锻炼^[19] 均能通过提高 SOD、POD 及 APX 活性, 减少 MDA 含量, 增强叶片光合能力, 提高秋茄植株抗寒性。该研究中, 低温胁迫 4 d 及恢复 1 d 均显著降低秋茄幼苗叶片 POD、APX 活性, 增加 SOD 活性、MDA 含量和细胞膜透性, 说明低温胁迫能诱导叶片 SOD 清除超氧阴离子 ($O_2^{\cdot -}$) 能力, 但又因为其清除能力有限, 造成 ROS 大量积累, 从而导致 MDA 含量和相对电导率增加, 最终降低叶片 P_n 和 G_s , 这与前人研究一致^[20]。在低温胁迫和恢复期间, 钛铁试剂能提高低温胁迫下叶片 SOD、POD、APX 活性, 抑制 MDA 含量和相对电导率增加。表明钛铁试剂能提高抗氧化酶, 抑制 ROS 积累, 减轻质膜受氧化损伤的程度, 提高叶片的 P_n 和 G_s 。

叶绿素荧光参数 (Φ_{PSII} 、 q_P 、 F_v/F_m 等) 是反映植物对光能的吸收、转化、传递等变化的灵敏探针, 能够快速、灵敏和无损伤地研究和探测完整秋茄植株在低温胁迫下叶片光合



注:不同小写字母表示处理间差异显著($P<0.05$)
Note: Different lowercases indicated significant difference between different treatments ($P<0.05$)

图4 钛铁试剂对低温胁迫及恢复秋茄幼苗叶片 Φ_{PSII} 、 F_v/F_m 、 q_p 和 NPQ 的影响

Fig.4 Effect of tiron on leaf Φ_{PSII} 、 F_v/F_m 、 q_p 和 NPQ of *K.obovata* seedlings under low temperature stress and recovery

作用能力^[21-22]。其中, Φ_{PSII} 能反映电子在PSII与PSI的传递情况, F_v/F_m 可反映PSII在全开状态时能够达到的最大光能转换效率, q_p 是光合作用引起的荧光猝灭,反映PSII反应中心的电子传递活性,NPQ用来反映植物耗散过剩光能为热的能力,即光保护能力^[23]。郭菊兰等^[24]研究发现, Φ_{PSII} 、 q_p 、 F_v/F_m 值随低温胁迫程度增强而迅速下降,这是反映红树植物响应低温胁迫的重要特征。郑春芳等^[25]研究发现,低温胁迫会降低秋茄幼苗叶片 Φ_{PSII} 、 q_p ,增加NPQ,减轻叶片PSII光抑制,降低光合能力,这与该研究结果一致。该研究还发现,即使在20℃(昼)/15℃(夜)条件恢复1d,叶片叶绿素荧光参数(Φ_{PSII} 、 q_p 、 F_v/F_m 、NPQ)均与CK存在显著差异,表明低温胁迫使得电子传递活性受到抑制,光能转化利用率下降,同时也增加PSII吸收的光能转化为热能消耗的比例。外施钛铁试剂能通过调控植物生物碱改善根系生长^[7],至于钛铁试剂是否影响低温胁迫下秋茄幼苗叶片叶绿素荧光参数的变化,目前鲜见报道。该研究中,钛铁试剂能显著增加低温胁迫下秋茄叶片 Φ_{PSII} 、 q_p 、 F_v/F_m ,抑制NPQ增加,同时提高了 P_n 和 G_s ,而且在20℃(昼)/15℃(夜)条件恢复1d时钛铁试剂仍能促进 Φ_{PSII} 、 q_p 、 F_v/F_m 恢复。这可能是由于钛铁试剂通过光合功能的改善,使吸收的光能较多地进入光化学过程,有效减少光能的热耗散,提高了叶片 P_n 和 G_s 。这表明低温胁迫下钛铁试剂有利于光合色素将捕获的光能转化成化学能,维持较高的PSII光化学活性,提升叶片光合作用,有效缓解低温胁迫对幼苗生长的抑制作用。

综上所述,一定浓度的钛铁试剂能提高SOD、POD和APX活性,降低秋茄幼苗膜脂过氧化产物MDA含量,稳定了细胞膜结构;钛铁试剂还能提高低温胁迫下秋茄幼苗叶片 Φ_{PSII} 、 q_p 、 F_v/F_m ,使光合机构趋于稳定,抑制 P_n 和 G_s 下降,

缓解低温胁迫对光合系统的损伤,进而提高秋茄叶片光合作用,减轻低温胁迫对植株的伤害。

参考文献

[1] WANG W Q, YOU S Y, WANG Y B, et al. Influence of frost on nutrient re-sorption during leaf senescence in a mangrove at its latitudinal limit of distribution [J]. Plant and soil, 2011, 342 (1/2): 105-115.
[2] QUISTHOUTD K, SCHMITZ N, RANDIN C F, et al. Temperature variation among mangrove latitudinal range limits worldwide [J]. Trees, 2012, 26 (6): 1919-1931.
[3] LIU K, LIU L, LIU H X, et al. Exploring the effects of biophysical parameters on the spatial pattern of rare cold damage to mangrove forests [J]. Remote sensing of environment, 2014, 150: 20-33.
[4] WANG Z, YU D L, ZHENG C F, et al. Ecophysiological analysis of mangrove seedlings *Kandelia obovata* exposed to natural low temperature at near 30°N [J]. Journal of marine science and engineering, 2019, 292: 1-11.
[5] PENG Y L, WANG Y S, FEI J, et al. Ecophysiological differences between three mangrove seedlings (*Kandelia obovata*, *Aegiceras corniculatum*, and *Avicennia marina*) exposed to chilling stress [J]. Ecotoxicology, 2015, 24 (7/8): 1722-1732.
[6] 郑春芳, 刘伟成, 陈少波, 等. 短期夜间低温胁迫对秋茄幼苗碳氮代谢及其相关酶活性的影响 [J]. 生态学报, 2013, 33 (21): 6853-6862.
[7] AKITA M, OHTA Y. The effect of Tiron, a water soluble radical scavenger, on growth, morphology and alkaloid content of adventitious roots in *Atropa belladonna* [J]. Plant cell reports, 2000, 19 (7): 705-709.
[8] 王新霞. ROS 和 PLD 在冬凌草甲素对拟南芥的化感调节中的作用研究 [D]. 兰州: 西北师范大学, 2018.
[9] 杨文华. 活性氧在蓝萼甲、乙和丙素对莴苣的化感调节和 HL-60 细胞凋亡诱导中的作用研究 [D]. 苏州: 苏州大学, 2013.
[10] 瞿静, 吴楚. 重金属胁迫下外源钛铁试剂对冬珊瑚幼苗根系发育、生物量累积及其分配格局的影响 [J]. 长江大学学报 (自科版), 2014, 11 (23): 55-59.
[11] ROHÁ ĀEK K. Chlorophyll fluorescence parameters: The definitions, photosynthetic meaning, and mutual relationships [J]. Photosynthetica, 2002, 40 (1): 13-29.
[12] TAN W, LIU J, DAI T, et al. Alterations in photosynthesis and antioxidant enzyme activity in winter wheat subjected to post-anthesis water-logging [J]. Photosynthetica, 2008, 46 (1): 21-27.
[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, 2000.

土壤全钾含量较种植前明显增加。

表 4 花卉种植前后土壤全钾含量空间分布特征

Table 4 Spatial distribution characteristics of soil total potassium content before and after flower planting										g/kg
土壤深度 Soil depth cm	月季 Rose		油菜 Rape		大花黄牡丹 Rhubarb Peony		菊花 Chrysanthemum		野韭菜 Wild leek	
	种植前 Before planting	种植后 After planting	种植前 Before planting	种植后 After planting	种植前 Before planting	种植后 After planting	种植前 Before planting	种植后 After planting	种植前 Before planting	种植后 After planting
0~10	16.65±2.43 a	18.65±2.62 a	16.31±2.40 a	19.47±2.55 a	17.13±2.76 a	18.58±2.39 a	19.22±3.10 a	20.18±2.21 a	16.39±2.41 a	18.05±2.25 a
10~20	12.76±1.63 b	15.00±1.80 b	13.97±1.66 a	15.35±1.80 b	14.98±2.05 a	15.56±1.68 b	14.83±2.16 b	15.98±1.26 b	12.33±1.22 b	13.56±1.46 b
20~30	9.70±0.56 c	11.75±1.41 bc	10.41±0.92 b	12.72±1.23 bc	11.64±1.40 b	14.02±1.43 b	10.36±0.97 c	11.38±0.70 c	9.58±0.73 c	9.30±0.97 c
30~40	8.27±0.89 cd	9.73±1.05 c	9.70±0.61 b	10.33±0.92 cd	8.85±0.86 c	10.01±0.86 c	8.39±0.64 cd	10.21±0.53 c	7.66±0.54 cd	9.18±0.59 c
40~50	5.54±0.73 d	6.34±0.22 d	5.24±0.12 c	7.19±0.44 d	7.56±0.35 c	7.52±0.33 c	5.09±0.30 d	6.04±0.31 d	5.97±0.30 d	6.31±0.22 d
平均 Average	10.58	12.29	11.13	13.01	12.03	13.14	11.58	12.76	10.39	11.28
SD	4.28	4.75	4.25	4.70	4.03	4.40	5.54	5.45	4.11	4.59
CV	0.40	0.39	0.38	0.36	0.33	0.34	0.48	0.43	0.40	0.41

注:同列不同小写字母表示不同土壤深度间差异显著($P<0.05$)
Note:Different lowercase letters in the same column indicated significant difference between different soil depths at 0.05 level

3 结论与讨论

花卉种植前,土壤有机碳、全氮、全磷及全钾含量随土壤深度的增加呈降低趋势,即表现出明显的养分“表聚现象”。其中,垂直剖面上有机碳含量的空间变异性以菊花和野韭菜最高,其变异系数均为 0.34,油菜样地土壤有机碳垂直空间变异系数最小,为 0.29;土壤全氮含量在剖面上的垂直空间变异性以油菜和大花黄牡丹样地最大,其变异系数均为 0.32,菊花样地最小,为 0.29;土壤全磷含量垂直空间变异性以月季最大,其变异系数为 0.32,油菜样地最小,为 0.24;土壤全钾含量垂直空间变异系数以菊花样地最大,其空间变异系数为 0.48,大花黄牡丹样地垂直空间变异性最小,为 0.33。种植花卉后,土壤有机碳、全氮、全磷及全钾含量随土壤深度的增加呈降低趋势。其中,土壤有机碳垂直空间变异系数在 0.35~0.40,土壤全氮垂直空间变异系数为 0.31~0.37,土壤全磷垂直空间变异系数为 0.25~0.39,土壤全钾垂直空间变异系数为 0.34~0.43。

花卉种植 1 年后,土壤有机碳、全氮、全磷及全钾含量均有所提高,可见,种植以上花卉可以提高土壤养分含量。其中,土壤有机碳含量增加幅度以月季样地最大,即种植月季后,土壤有机碳含量平均增加了 10.08 g/kg,以野韭菜样地最小,其增加值仅为 5.18 g/kg;土壤全氮含量增加幅度以野韭菜最小,其增加值为 0.04 g/kg,其他各样地增加幅度一致,均提高了 0.08 g/kg;土壤全磷含量增加幅度以月季最大,即种

植月季后,土壤全磷含量平均增加了 0.09 g/kg,以油菜最小,其全磷含量增加了 0.04 g/kg;土壤全钾含量提高幅度以油菜最高,野韭菜最低,其增加值分别为 1.88 和 0.89 g/kg。

参考文献

[1] SUO Y Y, YUAN Z Q, LIN F, et al. Local-scale determinants of elemental stoichiometry of soil in an old-growth temperate forest [J]. Plant and soil, 2016, 408 (1/2): 401-414.

[2] OERTER E J, BOWEN G J. Spatio-temporal heterogeneity in soil water stable isotopic composition and its ecohydrologic implications in semiarid ecosystems [J]. Hydrological processes, 2019, 33 (12): 1724-1738.

[3] 徐新朋, 赵士诚, 张云贵, 等. 吉林省玉米种植区土壤养分空间变异特征研究 [J]. 植物营养与肥料学报, 2011, 17 (6): 1342-1350.

[4] 赵明松, 李德成, 张文凯, 等. 淮北平原农田土壤养分空间变异特征: 以安徽省蒙城县为例 [J]. 土壤通报, 2016, 47 (3): 611-617.

[5] 刘莹, 李洁, 赵凌霄, 等. 黄河故道区域不同种植模式及秸秆还田方式对土壤的改良效果 [J]. 作物杂志, 2020 (6): 109-115.

[6] 常海涛, 刘任涛, 陈蔚, 等. 内蒙古乌拉特荒漠草原红砂灌丛林引|人柠条后地面节肢动物群落结构分布特征 [J]. 草业学报, 2020, 29 (12): 188-197.

[7] 曹小青. 不同林分白芨复合模式对土壤理化性质及微生物群落结构的影响 [D]. 合肥: 安徽农业大学, 2020.

[8] 吴宇伦, 赵雪淞, 宋王芳, 等. 花生和玉米种植模式对科尔沁沙地土壤养分和生物特性的影响 [J]. 安徽农业科学, 2022, 50 (5): 48-54, 60.

[9] 曹斐姝, 涂春艳, 张超兰, 等. 花卉植物对 Cd、As、Pb 污染农田的修复及其精油应用 [J]. 广西植物, 2021, 41 (12): 2033-2042.

[10] 刘家女, 周启星, 孙挺. Cd-Pb 复合污染条件下 3 种花卉植物的生长反应及超积累特性研究 [J]. 环境科学学报, 2006, 26 (12): 2039-2044.

[11] 程文娟, 肖辉, 肖茜, 等. 不同种植年限玫瑰大棚土壤中养分变化研究 [J]. 山西农业科学, 2018, 46 (5): 791-794.

[12] ELZEIN A, BALESDENT J. Mechanism simulation of vertical distribution of carbon concentrations and residence times in soils [J]. Soil science society of America journal, 1995, 59 (5): 1328-1335.

(上接第 123 页)

[14] 沈文飏, 徐朗莱, 叶茂炳, 等. 抗坏血酸过氧化物酶活性测定的探讨 [J]. 植物生理学通讯, 1996, 32 (2): 203-205.

[15] 高俊凤. 植物生理学实验技术 [M]. 北京: 世界图书出版公司, 2000.

[16] 明萌, 何静雯, 卢丹, 等. 低温胁迫对“琉球红”杜鹃生理特性的影响 [J]. 安徽农业科学, 2017, 45 (23): 29-31, 88.

[17] 郑春芳, 刘伟成, 魏龙, 等. 外施褪黑素对低温胁迫下红树植物秋茄光合作用和抗坏血酸-谷胱甘肽循环的调控 [J]. 植物生理学报, 2019, 55 (8): 1211-1221.

[18] ZHENG C F, TANG J W, CHEN J N, et al. Mechanisms on inhibition of photosynthesis in *Kandelia obovata* due to extreme cold events under climate change [J]. Ecological processes, 2016, 5: 1-11.

[19] 郑春芳, 陈继浓, 仇建标, 等. 烯效唑对低温胁迫下秋茄幼苗光合作

与抗氧化系统的影响 [J]. 植物生理学报, 2016, 52 (1): 109-116.

[20] LIU W C, ZHENG C F, CHEN J N, et al. Cold acclimation improves photosynthesis by regulating the ascorbate-glutathione cycle in chloroplasts of *Kandelia obovata* [J]. Journal of forest research, 2019, 30 (3): 755-765.

[21] 李晓, 冯伟, 冯晓春. 叶绿素荧光分析技术及应用进展 [J]. 西北植物学报, 2006, 26 (10): 2186-2196.

[22] 李红, 郑春芳, 陈继浓, 等. 不同温度下秋茄树幼苗叶绿素荧光参数对光强的响应 [J]. 浙江林业科技, 2020, 40 (2): 17-22.

[23] 薛晓敏, 韩雪平, 王来平, 等. 苯噻草酮对苹果坐果和光合生物学特征的影响 [J]. 应用生态学报, 2021, 32 (2): 557-563.

[24] 郭菊兰, 朱耀军, 文苑玉, 等. 秋茄幼苗光合特性对寒害的响应 [J]. 林业科学研究, 2018, 31 (6): 63-68.

[25] 郑春芳, 陈威, 刘伟成, 等. 低温胁迫后红树植物秋茄幼苗光合特性及蔗糖代谢的恢复机制 [J]. 生态学杂志, 2020, 39 (12): 4048-4056.