

引用格式: 陈晓莉, 杨宏羽, 韩佳, 等. 化肥减量配施微生物菌肥对兰州百合光合生理特性的影响[J]. 西北植物学报, 2024, 44(9): 1365-1375.
[CHEN X L, YANG H Y, HAN J, et al. Effects of chemical fertilizer reduction and application of microbial fertilizers on the photosynthetic physiological characteristics of *Lilium davidii* var. *willmottiae*[J]. Acta Botanica Boreali-Occidentalia Sinica, 2024, 44(9): 1365-1375.] DOI: 10.7606/j.issn.1000-4025.20240206

化肥减量配施微生物菌肥对兰州百合 光合生理特性的影响

陈晓莉^{1,2}, 杨宏羽¹, 韩佳¹, 满华丽¹, 李元鹏¹, 师桂英^{1*}

(1 甘肃农业大学 园艺学院, 兰州 730070; 2 兰州市西固区农业技术推广站, 兰州 730060)

摘要 【目的】探究化肥减量配施微生物菌肥对兰州百合生长及光合生理特性的影响, 为连作兰州百合提供科学的施肥管理措施。【方法】2019—2021 年在甘肃省二阴山区兰州百合试验田设置 100% 化肥(对照)及化肥减量 30%、50% 配施微生物菌肥 3 个处理, 连续施肥 3 年后考察生长、光合特性、抗氧化酶活性等生理指标的变化。【结果】与对照相比, 化肥减量 30% 和 50% 配施微生物菌肥处理均可不同程度提升兰州百合壮苗指数、光合特性及抗氧化酶活性, 并以化肥减量 30% 配施微生物菌肥处理效果最佳, 此时株高、茎粗、叶面积、地下生物量、壮苗指数显著提高, 光合色素含量增加, PSII 最大光化学效率、实际光化学量子效率、电子传递速率提高, 非光化学淬灭系数降低, 抗氧化酶活性(SOD、POD、CAT、APX)显著提升, 渗透调节物质(脯氨酸、可溶性蛋白)含量显著增加, 丙二醛含量下降, 植物根系活力显著增强。【结论】化肥减量 30% 配施微生物菌肥能促进兰州百合生长, 增强叶片光合作用, 提高叶片保护酶活性及渗透调节物质含量, 有效改善连作兰州百合栽培环境。

关键词 兰州百合; 化肥减量; 微生物菌肥; 光合特性; 抗氧化酶活性

中图分类号 Q945.79; S631.9 **文献标志码** A

Effects of chemical fertilizer reduction and application of microbial fertilizers on the photosynthetic physiological characteristics of *Lilium davidii* var. *willmottiae*

CHEN Xiaoli^{1,2}, YANG Hongyu¹, HAN Jia¹, MAN Huali¹, LI Yuanpeng¹, SHI Guiying^{1*}

(1 College of Horticulture, Gansu Agricultural University, Lanzhou 730070, China; 2 Xigu Agricultural Technology Promotion Station of Lanzhou, Lanzhou 730060, China)

Abstract [Objective] The study aims to explore the effects of chemical fertilizer reduction and application of microbial fertilizers on growth and photosynthetic physiological characteristics of Lanzhou lily (*Lilium davidii* var. *willmottiae*), and to provide scientific fertilization management for continuous cropping of Lanzhou lily. [Methods] From 2019 to 2021, fertilization was applied in the experimental field of Lanzhou lily located in alpine humid area in Gansu Province. The studies set up three different treatments: 100% chemical fertilizers (control), chemical fertilizer reduction by 30% with microbial fertilizers, and chemical

收稿日期: 2024-04-02; 修改稿收到日期: 2024-05-23

基金项目: 国家自然科学基金项目(31860549); 甘肃省教育厅产业支撑项目(2023CYZC-49); 甘肃省重点研发计划项目(22YF7NA108)

作者简介: 陈晓莉(1982—), 女, 硕士, 高级农艺师, 主要从事蔬菜栽培技术和生理生态研究。E-mail: 24438314@qq.com

* 通信作者: 师桂英, 教授, 博士生导师, 主要从事蔬菜栽培生理与技术研究。E-mail: shigy@gsau.edu.cn

fertilizer reduction by 50% with microbial fertilizers. After three years of continuous fertilization, the changes of physiological indexes such as growth, photosynthetic characteristics, and antioxidant enzyme activity of Lanzhou lily were investigated. [Results] Compared with control, chemical fertilizer reduction by 30% and 50% with microbial fertilizers improved seedling index, photosynthetic characteristics, and antioxidant enzyme activities of Lanzhou lily to different degrees, with the treatment of fertilizer reduction by 30% with microbial fertilizers had the best effect. Under the treatment of fertilizer reduction by 30% with microbial fertilizers, plant height, stem thickness, leaf area, underground biomass, and seedling index were increased. The photosynthetic pigment content was increased. Maximum photochemical efficiency of PS II, actual photochemical quantum efficiency, electron transfer rate increased, none photochemical quenching coefficient were decreased. The enzyme activity of the antioxidant (SOD, POD, CAT, APX) was increased. The content of osmoregulatory substances (proline, soluble protein) was increased. The content of malondialdehyde was decreased, and the root vitality was enhanced. [Conclusion] The treatment of fertilizer reduction by 30% with microbial fertilizers promotes the growth of Lanzhou lily, enhances leaf photosynthesis, improves protection enzyme activities and osmoregulatory substances, alleviates the degree of membrane lipid peroxide, and improves root vitality. This treatment effectively improves the cultivation environment of continuous cropping Lanzhou lily.

Key words Lanzhou lily (*Lilium davidii* var. *willmottiae*); chemical fertilizer reduction; microbial fertilizers; photosynthetic characteristic; antioxidant enzyme activity

兰州百合(*Lilium davidii* var. *willmottiae*)是甘肃的特色农产品,味甘香甜,纤维极少,营养丰富,称为“蔬菜人参”^[1],百合种植是兰州、定西及临夏山旱地区农村的支柱产业。兰州百合适生区狭窄,且多年生栽培,随着需求量的不断扩大,农户重茬种植百合现象日趋普遍,造成严重连作障碍^[2]。化肥在兰州百合生产中发挥重要作用,其肥效快,且适宜配比的氮、磷、钾肥能提高兰州百合产量及品质^[3]。然而,长期施用化肥使得土壤有机质含量下降,养分失调,土壤中微生物活性降低,土壤结构和理化性质劣化,导致作物产量和品质降低^[4-5]。因此,农业农村部提出化肥农药“双减”行动,控制化肥农药使用量,减轻农业面源污染,确保农业绿色生态可持续发展^[6]。兰州百合鳞茎籽球长至商品百合周期需要3年及以上,大部分种植户在生长期内每年追施1次以腐熟农家肥为主的有机肥,追施2次化肥来补充百合生长期间需要的养分,但随着百合种植周期的延长,连续施用化肥造成土壤肥力退化,肥料利用率下降,百合产量品质均受到抑制,如何在保证兰州百合产量品质的前提下提高肥料利用率,降低化肥施用量,筛选出最佳施肥配比,且能缓解连作障碍,成为目前兰州百合种植面临的关键问题。施用微生物菌肥是实现化肥减量及减轻作物连作障碍的有效途径之一^[7-8]。

近年来研究表明化肥减量配施有机肥、微生物菌肥、腐殖酸肥、生物炭等能提高肥料利用率,诱导植株提高抗氧化能力,促进养分吸收^[9],提高叶片叶绿素

含量和光合速率,增加植株干物质和氮素积累^[10],从而促进农作物生长发育,提升农作物品质及产量^[11-13]。

微生物菌肥是指经发酵含有多种可繁殖的活微生物及养分,且对环境无污染的新型肥料,不仅能促进土壤有益微生物的繁殖,腐解有机质,提高土壤养分含量^[14],还有促生增产、改善生态等效果^[15],能提高叶片叶绿素含量,平衡叶片能量分配^[16],促进光合作用^[17],减轻连作障碍^[18]。研究指出,微生物菌肥替代部分化肥能促进燕麦(*Avena sativa*),生长提升营养品质,降低化肥施用量,提高化肥利用率^[19];微生物菌肥配施其他肥料能够显著提高花椒(*Zanthoxylum bungeanum*)叶片光合系统II(PS II)的光能利用率,从而显著提高光合生产力^[20]。因此,微生物菌肥配施适当比例的化肥是一种环境友好、可持续发展的施肥措施。近年来,甘肃农业大学百合课题组研究发现,连作栽培对兰州百合的农艺性状、叶片光合特性及抗氧化系统均存在不同程度的抑制^[21-22]。大量研究表明,化肥减量配施菌肥等其他肥料能促进1年生作物生长发育,增强作物光合等生理特性^[9-12],但鲜见在多年生蔬菜上的相关研究报道。

兰州百合属高海拔旱作多年生栽培蔬菜,无灌溉,本研究连续3年施用不同比例化肥配施微生物菌肥,分析收获年兰州百合旺盛生长期生长状况、叶片光化学效率、光合色素含量、抗氧化能力等生理特征,了解兰州百合在不同比例化肥与微生物菌肥配施条件下对外界环境的响应和调节能力,旨在改善兰州百合连作栽培环境,明确兰州百合种植区连作

生产田修复技术及绿色高效的肥料调控管理措施。

1 材料和方法

1.1 试验设计

试验田块位于甘肃省定西市临洮县中堡镇蒋家山村,处于兰州七里河区、榆中县及定西市临洮县交界地带,海拔 2 300 m,是典型的二阴山区,该地区土壤为大白土、黑麻土,土层较厚,保水能力较好,土壤肥力适中,已有 140 余年百合种植历史。试验地兰州百合生长周期 3 年,试验于 2019 年 4 月至 2021 年 10 月进行,试验田前茬为连作 3 年的兰州百合,试验设置 3 个处理(表 1),分别为 100%化肥(CK)、化肥减量 30%配施微生物菌肥(T₁)、化肥减量 50%配施微生物菌肥(T₂),每个处理 4 个重复,共 12 个小区,其中 100%化肥用量是根据兰州百合种植区综合养分情况及百合需肥规律提出的配方施

肥量^[3],在实践中普遍应用,有机肥用量根据当地施肥习惯施用于试验每个处理中。不同肥料处理采用单因素随机区组试验设计,小区面积 15 m²(7.5 m×2 m)。百合籽球重(17±2) g,种植行距 0.40 m,株距 0.15 m,每小区种植 250 株,田间管理与农户常规方法一致。

按照兰州百合施肥习惯,肥料每年分 2 次采用沟施法施入,施肥后覆土。第 1 次施肥量为 100%有机肥+50%微生物菌剂+50%化肥,第 2 次施肥量为 50%微生物菌剂+50%化肥。在百合种植第 1 年定植前(2019 年 4 月 10 日)按照第 1 次施肥量进行基施,旺盛生长期(2019 年 7 月 10 日)按照第 2 次施肥量进行追施;第 2、3 年,苗期(2020 年 5 月 6 日、2021 年 5 月 10 日)按照第 1 次施肥量进行追施,旺盛生长期(2020 年 7 月 12 日、2021 年 6 月 25 日)按照第 2 次施肥量进行追施。

表 1 试验设计及各处理肥料施用量

Table 1 Experimental design and the amount of fertilization under different treatments

处理 Treatment	化肥养分含量 Nutrient content of fertilizers/(kg/hm ²)			化肥用量 Fertilizer dosage/(kg/hm ²)			微生物菌剂 Microbial bacteria dosage/ (L/hm ²)	有机肥用量 Organic fertilizer dosage/ (kg/hm ²)
	N	P ₂ O ₅	K ₂ O	碳铵 Ammonium carbonate	过磷酸钙 Calcium superphosphate	硫酸钾 Potassium sulfate		
CK	150	150	225	882	1 250	938	0	11 250
T ₁	105	105	158	617	875	657	67.5	11 250
T ₂	75	75	113	441	625	469	67.5	11 250

1.2 测定指标与方法

1.2.1 植株生长指标

于试验田最后一次施肥后 10 d(2021 年 7 月 5 日),每小区随机选择 10 株长势一致的植株,测定株高及基部茎粗;用作物叶片形态测量仪测定生长点以下 5 cm 处百合叶面积;将百合植株从根茎部位切断,测定百合植株地上(下)鲜重;将称完鲜重的百合植株于 105 ℃烘箱中杀青 15 min,再将烘箱调至 80 ℃烘至恒重,测定百合植株地上(下)干重,并计算壮苗指数[(茎粗/株高+地下部干重/地上部干重)×全株干重]^[22]。

1.2.2 叶片光合色素含量及叶绿素荧光参数

每小区随机选择 10 株长势一致的百合植株,取生长点以下 5 cm 处叶片,用锡纸包裹后液氮速冻,放入-70 ℃低温冰箱保存。称取 0.1 g 百合叶片至试管中,置暗处采用 80%丙酮浸泡 48 h 后,提取叶绿素和类胡萝卜素,振荡均匀后利用分光光度计测定叶绿素 a、叶绿素 b、类胡萝卜素含量^[23],并计

算叶绿素总量及叶绿素 a/b。

叶片取样方法同上,使用便携式叶绿素荧光仪(Imaging-Pam, Walz, 德国),暗处理 20 min 后,原位测定各项叶绿素荧光参数,计算 PS II 最大光化学效率(F_v/F_m)、PS II 光化学最大捕获效率(F_v'/F_m')、PS II 实际光化学量子效率(Φ_{PSII})、光化学淬灭系数(qP)、非光化学淬灭系数(NPQ)和电子传递速率(ETR)^[22]。

1.2.3 叶片抗氧化酶活性

采用与光合色素含量测定相同的叶片取样方法,参考《植物生理学实验指南》^[24]氮蓝四唑光化学还原法测定超氧化物歧化酶(SOD)活性、愈创木酚比色法测定过氧化物酶(POD)活性、紫外线吸收法测定过氧化氢酶(CAT)活性、比色法测定抗坏血酸过氧化物酶(APX)活性。分别称取 0.5 g、1.0 g、0.5 g、1.0 g 叶片加入相应抗氧化酶活性测定提取液在预冷研钵中研磨呈匀浆,在 4 ℃下离心 20 min,上清液为粗酶液,分别加入对应反应液,SOD

活性测定时将 1 支对照管放置暗处,其他测定管与对照管于 4 000 lx 日光灯下反应 20 min,以暗处的对照管调零,测定 560 nm 处吸光度,计算 SOD 活性;POD、CAT 活性测定每 1 min 吸光度变化,记录 470 nm、240 nm 处吸光值,分别计算 POD、CAT 活性;APX 活性测定每 30 s 内在 290 nm 处的吸光值减少值,按消光系数 2.8 计算 APX 活性。

1.2.4 叶片脯氨酸和可溶性蛋白含量

脯氨酸(Pro)含量采用磺基水杨酸提取法测定,称取叶片 0.2 g,加入 5 mL 3%磺基水杨酸溶液研磨呈匀浆,移至具塞试管中,在沸水中浸提 10 min 后,冷却取上清液测定吸光度,从标准曲线中计算 Pro 含量。可溶性蛋白(SP)含量采用考马斯亮蓝法测定^[25],称取叶片 2 g,加入 10 mL 预冷提取液研磨呈匀浆,在 4 ℃下离心 15 min,取上清液 0.1 mL 加入 4.9 mL 考马斯亮蓝 G-250 溶液,放置 2 min 后测定 595 nm 处吸光值,从标准曲线中计算 SP 含量^[25]。

1.2.5 叶片丙二醛含量及根系活力

叶片丙二醛(MDA)含量采用硫代巴比妥酸比色法测定,称取叶片 0.5 g,加入 10%三氯乙酸研磨,离心提取上清液,上清液移至试管中后加入反应液,在 100 ℃水浴中煮沸反应 20 min,再取上清液测定吸光度,计算丙二醛含量^[25]。根系活力(RA)采用氯化苯基四氮唑法测定,每小区随机选择 10 株长势一致的百合植株将根部从鳞茎处切除,去除根

部土壤并冲洗干净,锡纸包裹后液氮速冻,在-70 ℃低温冰箱保存。称取根部样品 0.5 g,加入反应液,置 37 ℃暗处恒温振荡箱 1 h 后,加入 1 mol/L 硫酸 2 mL 终止反应,将根取出吸干水分后,再加入乙酸乙酯研磨,取上清液测定吸光度,从标准曲线中计算氯化苯基四氮唑法还原强度^[25]。

1.3 数据分析

采用 Excel 2010 进行数据整理和统计,用 SPSS 27.0 进行显著性、相关性及主成分分析,用 Origin 2022 绘图。

2 结果与分析

2.1 化肥减量配施微生物菌肥对兰州百合生长指标的影响

连续施肥 3 年后,不同施肥处理对兰州百合收获年旺盛期植株生长状况影响不一。表 2 显示,化肥减量配施微生物菌肥处理下兰州百合株高、茎粗、叶面积、生物量、壮苗指数均比全量化肥处理(对照,CK)不同程度提高,T₁ 处理除地上部鲜重外增幅均达到显著水平,而 T₂ 处理仅茎粗、地下干鲜重及壮苗指数增幅达显著水平($P < 0.05$);壮苗指数是包括株高、茎粗、地上(下)干重的综合指标,T₁、T₂ 处理壮苗指数较 CK 分别显著提高了 35.12%、20.59%。由此可见不同比例的化肥减量配施微生物菌肥均能促进百合生长,化肥减量 30%效果更佳。

表 2 不同施肥处理下兰州百合生长指标

Table 2 Growth index of Lanzhou lily under different fertilization treatments

处理 Treatment	株高 Plant height/ cm	茎粗 Stem diameter/ mm	叶面积 Leaf area/ mm ²	地上部 Above ground part		地下部 Underground part		壮苗指数 Seedling index
				鲜重 Fresh weight/g	干重 Dry weight/g	鲜重 Fresh weight/g	干重 Dry weight/g	
CK	26.82±0.00b	9.76±0.01c	282.46±4.12b	59.21±0.78a	12.62±0.47b	69.38±1.19c	20.47±0.45c	65.80±1.56c
T ₁	31.58±0.01a	11.29±0.00a	349.25±18.05a	63.45±1.43a	16.20±0.93a	84.55±2.30a	27.16±0.51a	88.91±3.51a
T ₂	27.58±0.01b	10.46±0.01b	303.45±10.30b	60.41±3.24a	13.65±0.88b	74.98±0.59b	23.72±0.58b	79.35±1.92b

注:表中同列不同小写字母表示处理间在 0.05 水平差异显著($P < 0.05$)。
Note: Different lowercase letters within the same column indicate significant differences between treatments at 0.05 level ($P < 0.05$).

2.2 化肥减量配施微生物菌肥对兰州百合叶片光合特性的影响

2.2.1 光合色素含量

从图 1 可知,不同施肥处理下兰州百合叶片光合色素及其比值呈现先升高再降低的趋势,但各化肥减量配施微生物菌肥处理光合色素含量均比 CK 有所提高。其中,T₁ 处理叶片各色素含量均比 CK 显著提高,其叶绿素总量、类胡萝卜素含量增幅分别为 44.33%、35.00%;T₂ 处理叶片仅叶绿素 a 含量

和叶绿素总量比 CK 显著提高($P < 0.05$),增幅分别为 22.86%、20.62%;T₁ 和 T₂ 处理的叶绿素 a/b 均与 CK 差异不显著($P > 0.05$)。可见,化肥减量配施微生物菌肥可促进兰州百合叶片光合色素合成积累,增强其光能吸收、传递及转换,并以化肥减量 30%效果最佳。

2.2.2 叶绿素荧光参数

图 2 表明,各化肥减量配施微生物菌肥处理兰州百合叶片 F_v/F_m 、 F_v'/F_m' 、 q_p 、ETR 与 CK 相比

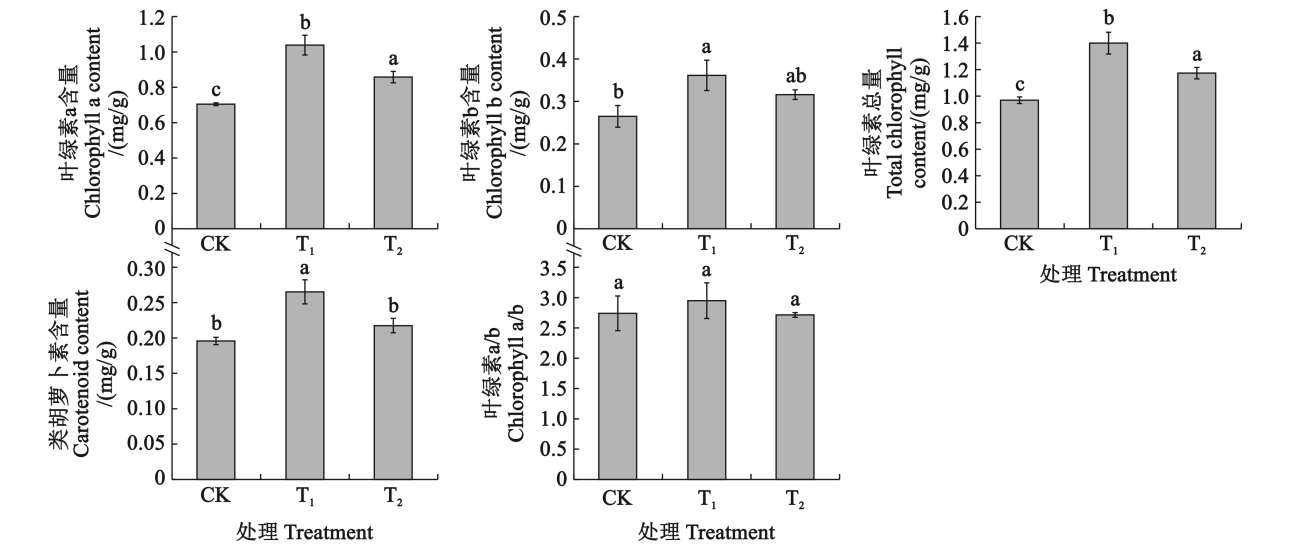
均无显著差异;T₁ 处理叶片 Φ_{PSII} 较 CK 显著提高 9.09%,其 NPQ 则较 CK 显著降低 20.00% ($P<0.05$),而 T₂ 处理 Φ_{PSII} 、NPQ 仍与 CK 差异未达到显著水平 ($P>0.05$)。由此表明化肥减量 30% 配施微生物菌肥更能提高 PS II 反应中心开放度与光能捕获能力,提高光合作用效率。

2.3 化肥减量配施微生物菌肥对兰州百合叶片抗氧化酶活性的影响

兰州百合叶片各抗氧化酶活性在化肥减量配施

微生物菌肥处理下均比 CK 不同程度提高,T₁ 处理下抗氧化酶 SOD、POD、CAT、APX 活性增幅均达到显著水平,分别是 CK 的 1.39,1.27,1.53,1.37 倍 ($P<0.05$);T₂ 处理下仅 POD、CAT 活性与 CK 处理差异显著 ($P<0.05$),分别较 CK 提高了 11.84%、17.48%(图 3)。

因此,化肥减量配施微生物菌肥可提高兰州百合叶片抗氧化酶活性,增强其抗逆性,并以化肥减量 30% 处理的效果更为显著。



图中不同小写字母表示处理间差异显著 ($P<0.05$)。下同。
图 1 不同施肥处理下兰州百合叶片光合色素含量
Different lowercase letters indicate significant differences between treatments ($P<0.05$). The same as below.

Fig. 1 Photosynthetic pigment content in the leaves of Lanzhou lily under different fertilization treatments

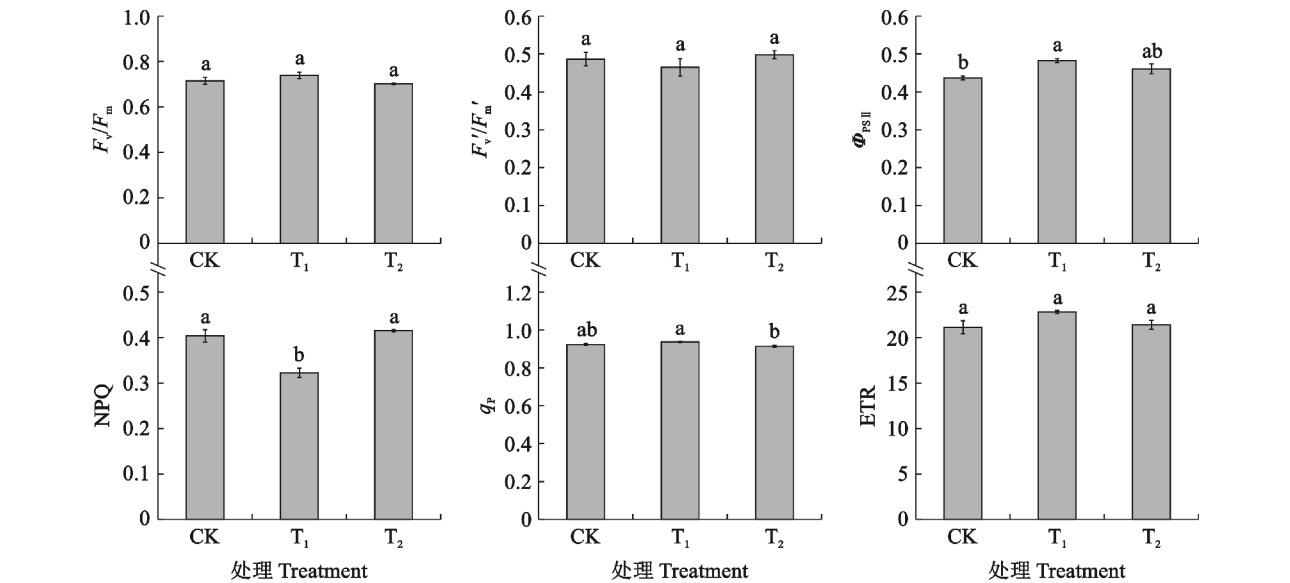


图 2 不同施肥处理下兰州百合叶片叶绿素荧光参数
Fig. 2 Chlorophyll fluorescence parameters in leaves of Lanzhou lily under different fertilization treatments

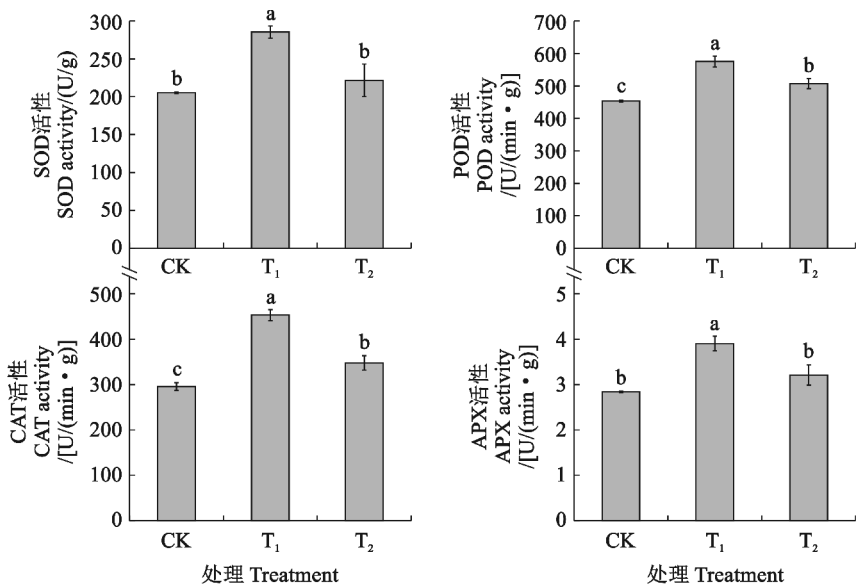


图 3 不同施肥处理下兰州百合叶片抗氧化酶活性

Fig. 3 Antioxidant enzyme activities in leaves of Lanzhou lily under different fertilization treatments

2.4 化肥减量配施微生物菌肥对兰州百合叶片渗透调节物质含量的影响

渗透调节是植物适应环境变化的重要生理机制,脯氨酸与可溶性蛋白是常见的渗透调节物质。在图 4 中,2 种化肥减量配施微生物菌肥处理兰州百合叶片的 Pro 和 SP 含量均与 CK 差异显著($P < 0.05$)。其中,T₁ 处理的 Pro 和 SP 含量分别比 CK 显著提高 24.39%、43.26%,T₂ 处理的 Pro 含量比 CK 显著降低 15.71%,而其 SP 含量较 CK 显著提高 10.30% ($P < 0.05$)。可见,化肥减量配施微生物菌肥可改善兰州百合的渗透调节能力,并以化肥减量 30% 处理的效果更佳。

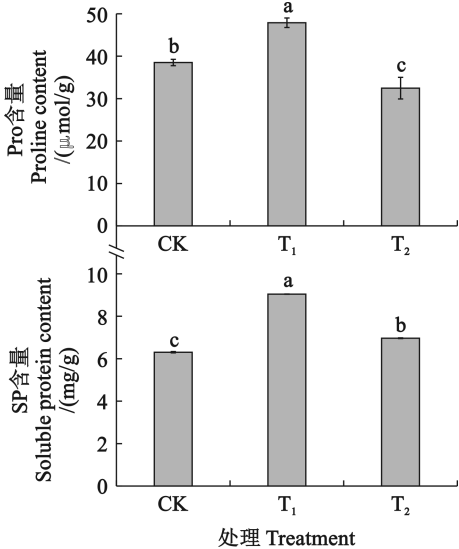


图 4 不同施肥处理下兰州百合渗透物质含量

Fig. 4 Osmoregulatory substances content in leaves of Lanzhou lily under different fertilization treatments

2.5 化肥减量配施微生物菌肥对兰州百合叶片丙二醛含量和根系活力的影响

图 5 显示,在连续施肥 3 年后,2 种化肥减量配施微生物菌肥处理兰州百合叶片 MDA 含量均比 CK 显著降低,降幅分别为 13.43%、14.18%,但 T₁ 与 T₂ 处理间无显著差异($P > 0.05$);同时,与 CK 相比,T₁ 和 T₂ 处理的根系活力均比 CK 显著提高,增幅分别为 19.29%和 12.15%,而 T₁ 处理又显著高于 T₂ 处理($P < 0.05$)。因此,化肥减量配施微生物菌肥可显著降低兰州百合膜脂过氧化的产物含量,提高根系活力,并以化肥减量 30% 处理效果最佳,但随化肥减量幅度的增加根系活力明显降低。

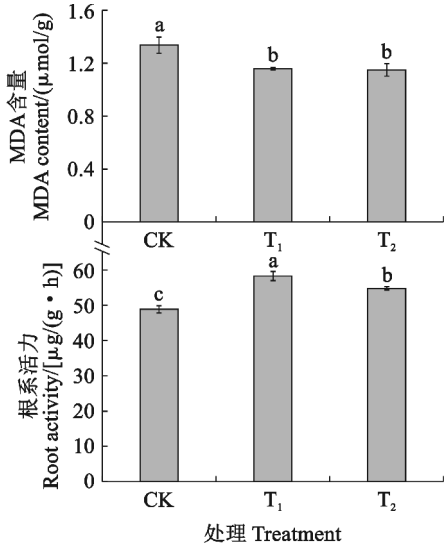


图 5 不同施肥处理下兰州百合叶片丙二醛含量和根系活力

Fig. 5 Leaf malondialdehyde content and root vitality of Lanzhou lily under different fertilization treatments

2.6 化肥减量配施微生物菌肥下兰州百合生长生理指标相关分析、主成分分析及综合评价

2.6.1 相关性分析

兰州百合各项指标 Pearson 相关性分析结果如表 3 所示。在生长指标中,叶面积与 SP 含量呈极显著正相关,与 SOD 活性呈显著正相关;壮苗指数与根系活力呈显著正相关。在光合色素指标中,叶绿素总量与 POD 活性呈显著正相关;类胡萝卜素含量与 CAT 活性、APX 活性、SP 含量呈显著性正

相关。

在叶绿素荧光参数中, Φ_{PSII} 与 POD 活性呈显著正相关; F_v'/F_m' 、NPQ 与抗氧化酶活性等生理指标存在着不同程度的负相关性,但均未达到显著水平; q_P 与 Pro 含量呈显著正相关;ETR 与 SOD 活性、SP 含量呈显著性正相关。由此可见不同肥料处理下生长指标、光合特性指标与抗氧化酶活性、MDA 含量、渗透调节物质含量及根系活力存在着相互关联,彼此之间相互影响。

表 3 不同施肥处理下兰州百合各项指标相关系数

指标 Index	SOD	POD	CAT	APX	MDA	Pro	SP	RV
LA	1.000 *	0.972	0.994	0.991	−0.641	0.815	1.000 **	0.899
SI	0.905	0.984	0.954	0.960	−0.896	0.512	0.920	0.999 *
Chl t	0.959	1.000 *	0.988	0.991	−0.819	0.635	0.968	0.982
Car	0.996	0.985	0.999 *	0.998 *	−0.687	0.777	0.999 *	0.924
F_v/F_m	0.753	0.559	0.658	0.641	0.047	0.992	0.729	0.366
F_v'/F_m'	−0.906	−0.767	−0.841	−0.829	0.232	−0.988	−0.890	−0.610
Φ_{PSII}	0.947	0.998 *	0.981	0.985	−0.842	0.603	0.957	0.989
NPQ	−0.927	−0.799	−0.868	−0.857	0.283	−0.978	−0.913	−0.650
q_P	0.864	0.705	0.789	0.775	−0.143	0.998 *	0.845	0.535
ETR	0.999 *	0.956	0.985	0.981	−0.591	0.850	0.997 *	0.869

注:SOD. SOD 活性;POD. POD 活性;CAT. CAT 活性;APX. APX 活性;MDA. 丙二醛含量;Pro. 脯氨酸含量;SP. 可溶性蛋白含量;RA. 根系活力;LA. 叶面积;SSI. 壮苗指数;Chl t. 叶绿素总量;Car. 类胡萝卜素含量; F_v/F_m . PSⅡ最大光化学效率; F_v'/F_m' . PSⅡ光化学最大捕获效率; Φ_{PSII} . PSⅡ实际光化学量子效率; q_P . 光化学淬灭系数;NPQ. 非光化学淬灭系数;ETR. 电子传递速率。* 表示 $P < 0.05$, ** 表示 $P < 0.01$ 。

Note: SOD, SOD activity. POD, POD activity. CAT, CAT activity. APX, APX activity. MDA, malondialdehyde content. Pro, proline content. SP, soluble protein content. RV, root vitality. LA, leaf area. SI, seedling index. Chl t, total chlorophyll. Car, carotenoid content. F_v/F_m , maximum photochemical efficiency of PSⅡ. F_v'/F_m' , photochemical maximum capture efficiency of PSⅡ. Φ_{PSII} , actual photochemical efficiency of PSⅡ. q_P , photochemical quenching coefficient. NPQ, none photochemical quenching coefficient. ETR, electron transport rate. * indicates $P < 0.05$, ** indicates $P < 0.01$.

2.6.2 主成分分析与综合评价

为了综合评价不同施肥处理配施微生物菌肥对兰州百合的生长及光合生理影响,对不同处理下兰州百合的各指标进行主成分分析和综合评价,从中提取出了 2 个主要成分,第 1 及第 2 主成分特征值分别为 15.381、2.619,方差贡献率分别为 84.451%、14.549%,2 个主成分涵盖了总数据量的 100% 信息(表 4)。通过主成分分析计算各主成分与对应方差贡献率的乘积之和即综合得分,得分越高,综合评价越好,不同处理综合排名依次为: $T_1 > T_2 > CK$,即化肥减量 30% 配施生物菌肥处理下兰州百合各项指标最佳(表 5)。

表 4 不同施肥处理各项指标主成分分析的特征值及累计贡献率

Table 4 Eigenvalue and cumulative contribution of principal component analysis on various indicators of different fertilization treatments			
主成分 Principal component	特征值 Eigenvalue	累计贡献率 Cumulative contribution	
		方差 Variance/%	累计方差 Cumulative variance/%
1	15.381	85.451	85.451
2	2.619	14.549	100.00

表 5 不同施肥处理效应的综合评价

Table 5 Comprehensive evaluation of different fertilization treatments

处理 Treatment	主成分 Principal component		综合得分 Comprehensive score	综合排名 Comprehensive ranking
	PC1 (F1)	PC2 (F2)		
CK	-0.785	-0.847	-0.794	3
T ₁	1.126	-0.256	0.925	1
T ₂	-0.341	1.1032	-0.131	2

3 讨 论

株高、茎粗、叶面积、生物量等生长指标能直观反映植株生长状况。孙鸿强^[21]研究发现兰州百合株高、茎粗、叶面积、生物量等农艺性状指标随着连作年限的增加而降低,本试验田前茬已连续种植百合 3 年,且长期施用百合配方肥,连作栽培及长期施用化肥造成土壤理化性状劣化及土壤结构失调,作物没有完全吸收养分造成营养物质过量,氮、磷、钾肥转变成盐分,抑制了植株生长^[26]。本研究结果显示连续实施化肥减量 30%、50% 配施微生物菌肥 3 年后,兰州百合株高、茎粗、生物量等较全量化肥处理(对照)均有所提高,由此可见化肥减量配施微生物菌肥可缓解百合连作障碍,而且化肥减量 30% 配施微生物菌肥处理的兰州百合叶面积、壮苗指数提高,长势最佳,研究课题组还发现化肥减量 30% 配施微生物菌肥可提升兰州百合鳞茎产量及百合品质,优化土壤微生物群落结构和促进土壤有益细菌及真菌多样性。分析认为化肥减量 30% 配施微生物菌肥处理营养均衡,微生物菌肥在植株生长过程中与化肥互相作用,一方面可替代部分化肥,避免植株氮、磷、钾营养积累过量;另一方面其含有多种有益微生物,微生物通过自身代谢及次生代谢物改善兰州百合根际土壤环境,提高土壤养分的释放及分解转化的速度^[27],提升氮、磷、钾利用率,促进植株的生长,提高抗逆性^[28-29],这与化肥减量配施微生物菌剂对圣女果(*Lycopersicon esculentum*)影响的研究结果^[12]一致。本研究中化肥减量 50% 配施微生物菌肥处理的百合长势弱于化肥减量 30% 处理的百合,则认为可能是化肥减量过多造成植物养分吸收不足,导致兰州百合生长不佳。

光合色素在光合作用中起着关键作用,其含量高影响植物光合作用时光捕获、能量转运及转换能力^[30-31]。叶绿素荧光参数反映植物光合作用过程中 PSII 系统对光捕获、电子传递、光能吸收及耗

散能力^[32]。王晶等^[31]研究发现逆境条件下沙芦草(*Agropyron mongolicum*)光合色素含量降低,PSII 系统中的最大光化学效率(F_v/F_m)明显下降,植株通过降低光合作用阻碍养分积累;师桂英等^[22]研究显示连作栽培影响兰州百合光合色素及叶绿素荧光参数。本研究中,化肥减量配施微生物菌肥与全量化肥对照相比光合色素含量均有所提高,叶绿素荧光参数得到优化,且化肥减量 30% 配施微生物菌肥处理下叶片光合色素含量显著增加,叶片 PSII 系统中 F_v/F_m 、 Φ_{PSII} 、 q_P 、ETR 均有所提高,NPQ 显著降低,表明适宜配比的肥料施用量使得植株叶片内电子传递和光合速率提高,光捕获及转运能力增强,激发了 PSII 反应中心的光化学活性,捕获的光能充分用于百合叶片光合作用,这与化肥减施配施其他肥料对冬小麦(*Triticum aestivum*)叶绿素^[33]及花椒的光合特性^[20]影响研究的结论一致。分析认为微生物菌肥与化肥协同促进连作土壤施肥达到了最佳效果,微生物菌肥含有机质及 22 种有益微生物菌,不仅提高了土壤肥力,且生物菌剂能改善连作土壤环境,增加有益微生物菌群,减少连作栽培产生的自毒物质,从而降低自毒物质对叶绿素合成的伤害,抑制连作障碍对叶片 PSII 系统的破坏^[16],提高光能捕获及吸收能力,增强光合作用。

抗氧化系统是抵御及清除植物体内过量活性氧(ROS)和自由基毒害影响的防御系统,SOD、POD、CAT、APX 是植物体内常见的抗氧化酶,能平衡体内活性氧含量水平,参与维持植物的活性氧稳态^[34]。脯氨酸(Pro)和可溶性蛋白(SP)是植物体内重要的渗透调节物质。研究发现长期连作栽培环境下抗氧化系统与自由基平衡遭到破坏,使得兰州百合处于逆境胁迫环境^[27],ROS 含量的增加引起植物细胞内一系列的防御响应^[35]。孙海燕等^[9]研究表明化肥减量 15% 配施其他肥料能提高作物抗氧化酶活性及渗透调节物质含量,本研究结果与之基本一致。本试验发现连续施肥 3 年后,与 CK 相比,化肥减量 30%、50% 配施微生物菌肥处理使得百合叶片 SOD、POD、CAT、APX 活性提高,且在化肥减量 30% 处理下各保护酶活性更高,同时可溶性蛋白(SP)、脯氨酸(Pro)含量均显著增加。分析认为合理配比的化肥配施生物菌肥可提高植株养分吸收利用效率,抑制过量 ROS 的产生^[36],增加渗透调节物质含量可减轻环境胁迫对兰州百合细胞膜、关键酶、蛋白质和核酸造成氧化损伤^[30],保护植物细胞及生物膜结构功能完整,维持细胞稳态,从而提高抗逆性。

逆境环境下 ROS 过量积累对植物伤害的初始和关键部分为细胞膜,MDA 为膜脂氧化的主要产物,其含量在逆境条件下显著增加^[30]。根系活力水平影响植株地上部分生长水平,根系活力越高,吸收养水分能力越好,植物抗逆性则越强^[37]。本研究发现,在化肥减量配施微生物菌肥的 2 个处理下兰州百合叶片 MDA 含量显著降低,根系活力显著提升,且化肥减量 30%配施微生物菌肥处理效果更为显著。分析认为合理优化化肥用量及微生物菌肥配比能改良土壤结构及百合根际土壤生理环境,为根际微生物的定殖提供了良好的环境,适宜的环境抑制 MDA 对叶片质膜透性的破坏^[35],提高植株的根系活力,促进植株生长发育。另外,对兰州百合生长、光合特性及抗氧化酶等生理指标进行相关性和主成分分析,综合评价化肥减量配施生物菌肥对兰州百合收获年旺盛生长期植株生长的影响,发现叶片抗氧化酶活性、渗透调节物质含量、根系活力、MDA 含量与壮苗指数、叶面积、光合色素含量、叶绿素荧光

参数之间协同互作,彼此促进,抗氧化酶活性、根系活力的提高、渗透调节物质含量的增加,可以促进兰州百合生长及光合色素的积累,提高 PSⅡ中心开放度及光能捕获能力,增强叶片光合作用效率。经主成分分析,化肥减量 30%配施微生物菌肥处理的效果最佳,从而印证了各生长生理指标的表现。

4 结 论

兰州百合壮苗指数、光合等生理指标在 100%化肥配方施肥处理下受到连作障碍影响处于较低水平,化肥减量 30%与 50%配施微生物菌肥均可不同程度缓解兰州百合连作障碍。化肥减量 30%配施微生物菌肥处理的缓解效果最佳,能够促进兰州百合生长,提高光合系统 PSⅡ的光能捕获、传递及吸收能力,增强叶片光合作用效率,提高兰州百合叶片保护酶活性及渗透调节物质含量,降低膜脂过氧化程度,提升根系活力,可作为改善兰州百合种植区域连作栽培环境下优选的肥料施用配比。

参考文献:

[1] 李艳. 兰州百合黄化现象发生原因与影响机理研究[D]. 兰州: 甘肃农业大学, 2022.

[2] 黄钰芳. 兰州百合连作障碍中自毒作用的研究[D]. 兰州: 甘肃农业大学, 2018.

[3] 林玉红, 石有太, 崔文娟, 等. 不同肥料配比对旱地兰州百合产量、品质及养分累积的影响[J]. 干旱地区农业研究, 2013, 31(5): 186-190.

LIN Y H, SHI Y T, CUI W J, *et al.* Effects of different fertilization ratio on yield, quality and nutrient accumulation of Lanzhou lily in dryland[J]. *Agricultural Research in the Arid Areas*, 2013, 31(5): 186-190.

[4] 平怀香, 崔建宇, 陈硕, 等. 施肥对农田土壤碳氮磷化学计量特征及相关酶活变化的影响[J]. 华北农学报, 2022, 37(1): 112-120.

PING H X, CUI J Y, CHEN S, *et al.* Effects of fertilization on the stoichiometry of carbon, nitrogen and phosphorus and enzyme activities in agricultural system[J]. *Acta Agriculturae Boreali-Sinica*, 2022, 37(1): 112-120.

[5] 唐继伟, 徐久凯, 温延臣, 等. 长期单施有机肥和化肥对土壤养分和小麦产量的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2019, 25(11): 1827-1834.

TANG J W, XU J K, WEN Y C, *et al.* Effects of organic fertilizer and inorganic fertilizer on the wheat yields and soil nutrients under long-term fertilization[J]. *Journal of Plant Nu-*

trition and Fertilizers, 2019, 25(11): 1827-1834.

[6] 崔元培, 魏子鲲, 王建忠, 等. “双减”背景下化肥、农药施用现状与发展路径[J]. 北方园艺, 2021(9): 164-173.

CUI Y P, WEI Z K, WANG J Z, *et al.* Development status and path of application of chemical fertilizers and pesticides under the background of reduced[J]. *Northern Horticulture*, 2021(9): 164-173.

[7] YU Y L, ZHANG L P, LI Y P, *et al.* Silicon fertilizer and microbial agents changed the bacterial community in the consecutive replant soil of lilies[J]. *Agronomy*, 2022, 12(7): 1530.

[8] 焦艳阳, 林煜, 蔡昭莹, 等. 不同技术迭代对太子参连作障碍的消减效果及作用机制[J]. 应用生态学报, 2021, 32(7): 2485-2495.

JIAO Y Y, LIN Y, CAI Z Y, *et al.* Effects of different technical substitutions on reducing replant disease of *Radix pseudostellariae* and the underlying mechanism[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2021, 32(7): 2485-2495.

[9] 孙海燕, 刘浩南, 牡丹凤, 等. 化肥减量配施腐殖酸对玉米抗氧化系统、养分吸收及干物质积累的影响[J]. 江苏农业科学, 2023, 51(22): 61-68.

SUN H Y, LIU H N, DU D F, *et al.* Impacts of chemical fertilizer reduction combined with humic acid on antioxidant system, nutrient absorption and dry matter accumulation of maize[J]. *Jiangsu Agricultural Sciences*, 2023, 51(22): 61-68.

[10] 李春喜, 张令令, 马守臣, 等. 有机培肥和减施氮肥对小麦光合特性和氮素吸收及产量的影响[J]. 西北植物学报,

2017, 37(5): 943-951.

LI C X, ZHANG L L, MA S C, *et al.* Effects of organic fertilization combined with reduced nitrogen fertilizer on wheat photosynthetic characteristics, nitrogen uptake and grain yield[J]. *Acta Botanica Boreali-Occidentalia Sinica*, 2017, 37(5): 943-951.

[11] 王磊, 高方胜, 曹逼力, 等. 有机肥和化肥配施对不同熟期大白菜土壤生物特性及产量品质的影响[J]. 生态学杂志, 2022, 41(1): 66-72.

WANG L, GAO F S, CAO B L, *et al.* Effects of combined organic fertilizer and chemical fertilizer application on soil biological characteristics, yield, and quality of Chinese cabbage with different maturity periods[J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2022, 41(1): 66-72.

[12] 张德楠, 张燕钊, 滕秋梅, 等. 化肥减量配施微生物菌肥对圣女果产量、品质及土壤肥力的影响[J]. 中国土壤与肥料, 2023(10): 36-47.

ZHANG D N, ZHANG Y Z, TENG Q M, *et al.* Effects of chemical fertilizer reduction and application of microbial fertilizer on yield and quality of cherry tomatoes and soil fertility[J]. *Soil and Fertilizer Sciences in China*, 2023(10): 36-47.

[13] 孙海军, 吴思, 萧洪东, 等. 化肥氮素减施条件下生物炭施用对冬瓜产量和品质及土壤氮素淋失的影响[J]. 土壤通报, 2023, 54(3): 673-681.

SUN H J, WU S, XIAO H D, *et al.* Effect of biochar application on yield and quality of white gourd and soil nitrogen leaching with fertilizer nitrogen reduction[J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 2023, 54(3): 673-681.

[14] 王志远, 张广娜, 于军香, 等. EM 菌结合有机物料还田对桃园土壤理化性质及桃叶片光合特性的影响[J]. 生态学杂志, 2018, 37(9): 2657-2662.

WANG Z Y, ZHANG G N, YU J X, *et al.* Influences of EM application with organic material input on soil physico-chemical properties and peach photosynthetic characteristics[J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2018, 37(9): 2657-2662.

[15] 孟思达, 张文祥, 郑昕雨, 等. 不同微生物菌肥对日光温室袋培番茄生长、产量和品质的影响[J]. 北方园艺, 2021(7): 49-54.

MENG S D, ZHANG W X, ZHENG X Y, *et al.* Effects of different microbial inoculants treatment on growth, yield and quality of tomato in greenhouse[J]. *Northern Horticulture*, 2021(7): 49-54.

[16] 王政, 尹承苗, 孙萌萌, 等. 黄腐酸微生物菌剂对连作平邑甜茶光合特性的影响[J]. 植物生理学报, 2019, 55(1): 99-106.

WANG M, YIN C M, SUN M M, *et al.* Effect of fulvic acid on leaf photosynthesis fluorescent parameters of apple (*Malus hupehensis*) under replant condition[J]. *Plant Physiology Journal*, 2019, 55(1): 99-106.

[17] 林铭业, 廖良宁, 姚贤宇, 等. 接种促生菌对尾巨桉-降香黄檀混作幼苗光合生理特性和生长的影响[J]. 西北植物学报, 2023, 43(7): 1126-1135.

LIN M Y, LIAO L N, YAO X Y, *et al.* Effects of growth-promoting bacteria inoculation on the photosynthetic physiological characteristics and growth of *Eucalyptus urophylla* × *E. grandis*-*Dallergia odorifera* intercropping systems[J]. *Acta Botanica Boreali-Occidentalia Sinica*, 2023, 43(7): 1126-1135.

[18] 于会丽, 徐国益, 路绪强, 等. 微生物菌剂对连作西瓜土壤微环境及果实品质的影响[J]. 果树学报, 2020, 37(7): 1025-1035.

YU H L, XU G Y, LU X Q, *et al.* Effects of microbial agents on soil microenvironment and fruit quality of watermelon under continuous cropping[J]. *Journal of Fruit Science*, 2020, 37(7): 1025-1035.

[19] 李琦, 姚拓, 杨晓玫, 等. 半干旱地区不同剂型微生物菌肥替代部分化肥对燕麦生长和品质的影响[J]. 干旱区资源与环境, 2020, 34(3): 159-165.

LI Q, YAO T, YANG X M, *et al.* Effects of different dosages of microbial fertilizers on growth and quality of oat in semi-arid area[J]. *Journal of Arid Land Resources and Environment*, 2020, 34(3): 159-165.

[20] 张树衡, 丁德东, 何静, 等. 2 种生物肥料配施对再植花椒生长及光合特性的影响[J]. 西北农业学报, 2021, 30(9): 1355-1364.

ZHANG S H, DING D D, HE J, *et al.* Effect of two biofertilizer mixtures on growth and photosynthetic characteristics of replanted *Zanthoxylum bungeanum*[J]. *Acta Agricolae Boreali-Occidentalis Sinica*, 2021, 30(9): 1355-1364.

[21] 孙鸿强. 连作对兰州百合生理特性及土壤环境效应的影响[D]. 兰州: 甘肃农业大学, 2017.

[22] 陆桂英, 孙鸿强, 于彦琳, 等. 连作栽培对兰州百合(*Lilium davidii* var. *unicolor*)叶片 PS II 光化学效率和抗氧化作用的影响[J]. 中国沙漠, 2020, 40(2): 206-213.

SHI G Y, SUN H Q, YU Y L, *et al.* Effect of long-term consecutive cropping on leaf PS II photochemical efficiency and antioxidant enzyme activity of Lanzhou lily[J]. *Journal of Desert Research*, 2020, 40(2): 206-213.

[23] 李志丹, 韩瑞宏, 廖桂兰, 等. 植物叶片中叶绿素提取方法的比较研究[J]. 广东第二师范学院学报, 2011, 31(3): 80-83.

LI Z D, HAN R H, LIAO G L, *et al.* A comparative study on the different extraction techniques about the chlorophyll concentration of plant leaf[J]. *Journal of Guangdong University of Education*, 2011, 31(3): 80-83.

[24] 陈刚, 李胜. 植物生理学实验[M]. 北京: 高等教育出版社, 2016.

[25] 邹琦. 植物生理学实验指导[M]. 北京: 中国农业出版社, 2000.

[26] 郑国栋, 龚岫, 黄炎霞, 等. 不同用量有机肥与菌剂组合对花生产量、品质及土壤肥力的影响[J]. 花生学报, 2022, 51(2): 25-31.

ZHENG G D, GONG S, HUANG Y X, *et al.* Effect of different amounts of combination of organic fertilizer and micro-

bial agent on yield, quality of peanut and soil fertility[J]. *Journal of Peanut Science*, 2022, 51(2): 25-31.

[27] 夏可心, 于亚楠, 张建, 等. 2 种木霉生物有机肥对蔬菜产量和品质的影响[J]. 南京农业大学学报, 2020, 43(2): 284-291.

XIA K X, YU Y N, ZHANG J, *et al.* Effect of two *Trichoderma*-enriched bio-organic fertilizers on yield and quality of water spinach (*Ipomoea aquatica* Forsk.)[J]. *Journal of Nanjing Agricultural University*, 2020, 43(2): 284-291.

[28] 李凤霞, 赵营. 氮肥减量配施微生物菌剂对灌淤土花椰菜产量及土壤微生物的影响[J]. 水土保持研究, 2017, 24(2): 94-100.

LI F X, ZHAO Y. Effect of nitrogen fertilizer reduction with microbial inoculants on broccoli production and the influence of the soil microbial characteristics[J]. *Research of Soil and Water Conservation*, 2017, 24(2): 94-100.

[29] 马凤捷, 蔡立群, 刘垠霖, 等. 不同微生物菌剂处理对哈密瓜品质及土壤养分和酶活性的影响[J]. 中国土壤与肥料, 2021(2): 69-77.

MA F J, CAI L Q, LIU Y L, *et al.* Effects of different microbial inoculants on the quality of cantaloupe and soil nutrients and enzyme activities[J]. *Soil and Fertilizer Sciences in China*, 2021(2): 69-77.

[30] SIMKIN A J, KAPOOR L, DOSS C P, *et al.* The role of photosynthesis related pigments in light harvesting, photo-protection and enhancement of photosynthetic yield in plant [J]. *Photosynthesis Research*, 2022, 152(1): 23-42.

[31] 王晶, 伏兵哲, 李淑霞, 等. 外源褪黑素对干旱胁迫下沙芦草幼苗生长和生理特性的影响[J]. 应用生态学报, 2023, 34(11): 2947-2957.

WANG J, FU B Z, LI S X, *et al.* Effects of exogenous melatonin on growth and physiological characteristics of *Agropyron mongolicum* seedlings under drought stress[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2023, 34(11): 2947-2957.

[32] 何海锋, 闫承宏, 吴娜, 等. 施氮量对柳枝稷叶片叶绿素荧光特性及干物质积累的影响[J]. 草业学报, 2020, 29(11): 141-150.

HE H F, YAN C H, WU N, *et al.* Effects of nitrogen application rate on chlorophyll fluorescence characteristics and dry matter accumulation in switchgrass (*Panicum virgatum*) leaves[J]. *Acta Prataculturae Sinica*, 2020, 29(11): 141-150.

[33] 丛孟菲, 赖宁, 胡洋, 等. 化肥减施对滴灌冬小麦灌浆期光合生理特性的影响[J]. 中国土壤与肥料, 2022(5): 43-50.

CONG M F, LAI N, HU Y, *et al.* Effects of chemical fertilizer reduction on photosynthetic physiological characteristics of winter wheat at grain filling stage under drip irrigation[J]. *Soil and Fertilizer Sciences in China*, 2022(5): 43-50.

[34] 杨舒贻, 陈晓阳, 惠文凯, 等. 逆境胁迫下植物抗氧化酶系统响应研究进展[J]. 福建农林大学学报(自然科学版), 2016, 45(5): 481-489.

YANG S Y, CHEN X Y, HUI W K, *et al.* Progress in responses of antioxidant enzyme systems in plant to environmental stresses[J]. *Journal of Fujian Agriculture and Forestry University (Natural Science Edition)*, 2016, 45(5): 481-489.

[35] 苏兰茜, 白亭玉, 谭乐和, 等. 氮钾肥对盐胁迫下面包果光合作和抗氧化系统的影响[J]. 中国土壤与肥料, 2022(9): 18-25.

SUN L X, BAI T Y, TAN L H, *et al.* Effects of nitrogen and potassium fertilizer on photosynthesis and antioxidant system of breadfruit under salt stress[J]. *Soil and Fertilizer Sciences in China*, 2022(9): 18-25.

[36] BAXTER A, MITTLER R, SUZUKI N. ROS as key players in plant stress signaling[J]. *Journal of Experimental Botany*, 2014, 65(5): 1229-1240.

[37] 吴立群, 蔡志欢, 张桂莲, 等. 低温对不同耐冷性水稻品种秧苗生理特性及根尖解剖结构的影响[J]. 中国农业气象, 2018, 39(12): 805-813.

WU L Q, CAI Z H, ZHANG G L, *et al.* Effects of low temperature on physiological characteristics of rice seedlings with different cold tolerance and anatomical structure of root tip [J]. *Chinese Journal of Agrometeorology*, 2018, 39(12): 805-813.