

引用格式: 徐垒, 王继涛, 丁增伟, 等. 复合菌剂施用方式对连作土栽培菜心生长、根系构型及光合特性的影响[J]. 西北植物学报, 2024, 44(10): 1520-1529. [XU L, WANG J T, DING Z W, et al. Effects of compound fungi inoculant application on growth, root configuration, and photosynthetic characteristics of Chinese flowering cabbage cultivated in continuous cropping soil[J]. Acta Botanica Boreali-Occidentalia Sinica, 2024, 44(10): 1520-1529.] DOI: 10.7606/j.issn.1000-4025.20240194

# 复合菌剂施用方式对连作土栽培菜心生长、根系构型及光合特性的影响

徐垒<sup>1</sup>, 王继涛<sup>2</sup>, 丁增伟<sup>3</sup>, 罗媛<sup>1</sup>, 陈启蔚<sup>1</sup>, 叶林<sup>1,3\*</sup>

(1 宁夏大学葡萄酒与园艺学院, 银川 750021; 2 宁夏农业农村厅, 银川 750002; 3 宁夏银川市西夏区农业农村与水务局, 银川 750021)

**摘要** 【目的】考察复合菌剂施用方式对菜心幼苗生长、根系形态及光合特性的影响, 为应用复合菌剂缓解菜心连作障碍提供理论依据。【方法】以菜心品种‘尖叶-70’、连作9年菜心土壤及微生物菌剂为试材, 设置不施(对照)、叶面喷施、土施及叶面喷施+土施复合菌剂4个处理的盆栽试验, 播种30d后观测植株生长、根系构型和叶片光合指标。【结果】各复合菌剂施用方式均能提高幼苗生长指标、根系构型指标以及净光合速率( $P_n$ )、实际光化学效率( $\Phi_{PSII}$ )、光化学淬灭系数( $q_p$ )等光合指标, 降低蒸腾速率( $T_r$ )、胞间 $CO_2$ 浓度( $C_i$ )、非光化学淬灭系数(NPQ)等指标, 并以叶面喷施处理效果最优, 其地上干重、地下干重、根长分别比对照显著增加了128.57%、85.71%、91.81%,  $P_n$ 、 $q_p$ 、 $\Phi_{PSII}$ 分别显著增加了24.55%、22.68%、23.93%, 而 $T_r$ 、 $C_i$ 、NPQ分别显著降低72.73%、20.01%、39.78%。【结论】叶面喷施复合菌剂能有效促进连作菜心幼苗生长, 改善根系构型, 提高植株光合作用效率, 是复合菌剂的最佳施用方式。

**关键词** 菜心; 连作; 复合菌剂; 生长; 根系构型; 光合特性

**中图分类号** S634.5 **文献标志码** A

## Effects of compound fungi inoculant application on growth, root configuration, and photosynthetic characteristics of Chinese flowering cabbage cultivated in continuous cropping soil

XU Lei<sup>1</sup>, WANG Jitao<sup>2</sup>, DING Zengwei<sup>3</sup>, LUO Yuan<sup>1</sup>, CHEN Qiwei<sup>1</sup>, YE Lin<sup>1,3</sup>

(1 College of Wine and Horticulture, Ningxia University, Yinchuan 750021, China; 2 Ningxia Department of Agriculture and Rural Affairs, Yinchuan, 750002, China; 3 Bureau of Agriculture and Rural and Water Affairs of Xixia District, Yinchuan, 750021, China)

**Abstract** [Objective] The study aims to explore the effects of compound fungi inoculant application on the growth, root morphology, and photosynthetic characteristics of Chinese flowering cabbage seedlings, and provide a theoretical basis for the application of compound fungi inoculant to alleviate the obstacle of continuous cropping of Chinese flowering cabbage. [Methods] The Chinese flowering cabbage variety ‘Jianye-70’, with which microbial agents and soil had been continuously cropped for 9 years, were used in pot ex-

收稿日期: 2024-03-28; 修改稿收到日期: 2024-05-30

基金项目: 宁夏回族自治区重点研发计划项目(2021BBF02006); 国家重点研发计划项目(2021YFD1600300)

作者简介: 徐垒(2000-), 男, 在读硕士研究生, 主要从事逆境生理生态研究。E-mail: m19853568090@163.com

\* 通信作者: 叶林, 教授, 主要从事植物生理生态研究。E-mail: yelin.3993@163.com

periments. Four treatments were set up: No compound microbial agents (control), foliar spraying, soil spraying, and foliar spraying plus soil spraying. The plant growth indicators, root system configuration, and leaf photosynthetic characteristics were observed after sowing for 30 days. [Results] Every application method could increase growth indicators, root system conformation, leaf photosynthetic characteristics net photosynthetic rate ( $P_n$ ), actual photochemical efficiency ( $\Phi_{PSII}$ ), and photochemical quenching coefficient ( $q_p$ ) etc., as well as decrease transpiration rate ( $T_r$ ), intercellular carbon dioxide concentration ( $C_i$ ), and non photochemical quenching coefficient (NPQ) etc. Among the application methods, foliar spraying had the best effect. Its above-ground and underground dry weight and root length were significantly increased by 128.57%, 85.71%, and 91.81%.  $P_n$ ,  $q_p$ , and  $\Phi_{PSII}$  were significantly increased by 24.55%, 22.68%, and 23.93%, while  $T_r$ ,  $C_i$ , and NPQ were significantly decreased by 72.73%, 20.01%, and 39.78%, respectively. [Conclusion] Foliar spraying of compound fungi can effectively promote the growth of continuous cropping cabbage seedlings, improve root configuration, enhance plant photosynthetic efficiency, which is the best way of compound fungi application.

**Key words** Chinese flowering cabbage; continuous cropping; compound bacterial agents; growth; root system configuration; photosynthetic characteristics

菜心 (*Brassica campestris* L. ssp. *chinensis* var. *utilis* Tsen et Lee.) 又名菜薹, 1 年或 2 年生草本植物, 是十字花科芸薹属白菜亚种的一个变种, 是中国特产蔬菜<sup>[1-2]</sup>, 因味美清甜、营养丰富而广受消费者欢迎<sup>[3]</sup>。其中, 宁夏地区因夏季气候干燥冷凉, 日照时间长且昼夜温差大, 从而生产的菜心质地鲜嫩, 口感好, 深受人们喜爱<sup>[4]</sup>。然而由于长期种植品种单一、且复种指数高、化肥施用过量、田间管理不当, 引起严重的土壤连作障碍, 导致作物生长状况变差、病虫害加剧、产量与品质下降和土壤环境污染等<sup>[5]</sup>。

微生物菌剂作为一种新型环保的土壤改良剂, 通过调节土壤中细菌和真菌群落分布, 能有效缓解作物连作障碍<sup>[6]</sup>。目前, 微生物菌剂的施用方式并不统一, 常见有灌根、叶面喷施、土施等。刘雅娜等<sup>[7]</sup>发现微生物菌剂灌根能提高马铃薯产量、光合性能, 改善根系形态。撒晓梅等<sup>[6]</sup>研究表明叶面喷施菌剂改善了土壤微生物群落结构, 提高了土壤养分水平, 进而促进葡萄生长, 并提高产量和生产效益。张东旭等<sup>[8]</sup>报道, 放线菌剂处理增强了晚播小麦的光合能力, 延缓了叶片衰老, 提高了产量, 且叶面喷施菌剂比菌剂包衣处理效果要好。杨肖芳等<sup>[9]</sup>研究发现微生物菌剂土施能促进草莓生长, 增加土壤养分含量和改善微生物群落, 有利于草莓增产和连作障碍的防治, 而且施用复合菌剂处理优于施用单一菌剂处理。杨涛等<sup>[10]</sup>报道不同菌株均具有固氮、提高过氧化物酶活性和硝化能力、提高土壤养分含量, 但不同菌株的效果不同, 其中生枝动胶菌 CBS4 高于其他菌株。可见, 单一菌剂和复合菌剂对作物的促生效果不同, 菌剂的不同施用方式对作物的促生效果也不相同, 明确复合菌剂的高效施用

方式, 对促进作物高产增质具有重要意义。

根系是植物体最先感知土壤环境变化的器官, 对于植物在逆境条件下的适应与生存起至关重要的作用<sup>[11]</sup>。此外, 光合作用的强弱更是直接反映了植物的生长状况。近年来关于微生物菌剂缓解连作障碍作用的研究多集中于土壤理化性质和土壤微生物群落结构及多样性方面<sup>[6, 9-10]</sup>。但鲜有报道复合菌剂的不同施用方式对连作菜心根系形态和光合作用的影响及其之间的联系。因此, 本研究采集大田 9 年连作菜心土壤, 并通过室内试验探讨复合菌剂的不同施用方式对连作栽培下菜心生长、根系构型和光合特性的影响, 以期明确复合菌剂高效施用方式, 为克服菜心连作障碍提供理论依据和技术参考。

## 1 材料和方法

### 1.1 试验地概况

连作 9 年菜心土壤采集于宁夏银川市永宁县李俊镇宁夏悦丰生态农业科技股份有限公司供港菜心生产基地 (38.111 2°N, 106.722°E), 属典型的大陆性干旱半干旱气候, 四季分明, 降雨稀少且多集中在夏季和秋季, 冬季寒冷干燥, 春旱频发, 多年平均降水量 198.19 mm, 多年平均蒸发量 1 186.73 mm<sup>[12]</sup>。土壤基本理化性质: pH 为 8.21, 电导率 0.61 mS/cm, 全氮 0.22 g/kg, 速效氮 1.43 mg/kg, 速效磷 145.53 mg/kg, 速效钾 21.36 mg/kg, 有机质 6.81 g/kg。室内盆栽试验在宁夏大学实训基地 2 号玻璃温室 (38.503 2°N, 106.132 2°E) 进行。

### 1.2 试验材料

供试菜心品种为供港菜心‘尖叶-70’, 种子由宁夏悦丰生态农业科技股份有限公司提供。供试菌剂

为复合微生物,由真核生物科技(山东)有限公司提供,其中有效活菌数为100亿CFU/mL,菌种包含解淀粉芽孢杆菌和侧孢短芽孢杆菌。

### 1.3 试验设计

试验设4个处理:(1)CK,对照,以清水灌溉,单次用量为15 mL/m<sup>2</sup>;(2)T<sub>1</sub>,叶面喷施复合菌剂,单次用量为15 mL/m<sup>2</sup>(复合菌剂公司建议用量);(3)T<sub>2</sub>,土施复合菌剂,单次用量为15 mL/m<sup>2</sup>;(4)T<sub>3</sub>,叶面喷施+土施复合菌剂,单次用量为叶面喷施和土施复合菌剂各7.5 mL/m<sup>2</sup>。试验于2023年6月17日开始,同日进行播种。试验在长0.41 m、宽0.27 m、高0.19 m的盆栽盒中进行,将采集的连作土过筛去除杂质后,每个箱子装8 kg连作土,深度18 cm,每个处理设计5组重复,各处理随机排列。每盆播种20粒菜心种子,当菜心出苗后间苗,保持每盆10株。复合菌剂用清水稀释500倍后施用,用1 L的量筒量取后,分别转移到喷壶和水桶进行喷施和土施。分别在播种后第10,15,20天各施用1次复合菌剂,其他管理措施同常规管理。

### 1.4 测定项目与方法

#### 1.4.1 生长指标

在播种后第30天,每个处理随机选取5株菜心幼苗进行生长指标测量,各指标重复测量5次,剔除最大值和最小值。用精确度为0.1 cm的直尺测量株高;用精确度为0.01 cm的游标卡尺测量茎粗;用精确度为0.1 cm的直尺测量叶片的最大长和最大宽,并通过公式计算叶面积(最大长×最大宽×0.75)<sup>[13]</sup>。将植株分为地上和地下两部分,经3次蒸馏水漂洗后先用吸水纸吸干表面水分,再用精确度为0.01 g的天平称量鲜重,然后将其置于105℃烘箱杀青30 min后,调至60℃烘干至恒重,用精确度为0.01 g的天平称量干重。

#### 1.4.2 根系指标

将根系经3次蒸馏水漂洗后平铺于亚克力透明托盘内,用镊子将每支根分开,不出现根交叉现象,再用Scan Wizard EZ扫描仪(MRS-3200A3L,中晶科技有限公司,上海)扫描根系,万深LA-S根系分析系统(万深科技有限公司,杭州)分析根长、根表面积、根体积、平均直径、连接数、根尖数和分形维数等根系形态学参数。

#### 1.4.3 气体交换参数

在播种后第30天,于9:00—12:00,每组处理分别选取长势相同的5株幼苗,使用Li-6400便携式光合仪(Li-cor公司,美国)对菜心从顶部向下舒

张开的第3片叶进行气体交换参数测定,测定时饱和光强设为1000 μmol/(m<sup>2</sup>·s),温度控制在(25±1)℃,叶室湿度控制在55%~60%,设置CO<sub>2</sub>浓度为400 μmol/mol,记录蒸腾速率T<sub>r</sub>、净光合速率P<sub>n</sub>、胞间CO<sub>2</sub>浓度C<sub>i</sub>、气孔导度G<sub>s</sub>,并计算瞬时水分利用效率WUEi(P<sub>n</sub>/T<sub>r</sub>)<sup>[14]</sup>。

#### 1.4.4 叶绿素荧光参数

在播种后第30天,使用紧凑型多通道连续监测荧光仪(Micro-PAM,WALZ公司,德国)测定叶绿素荧光参数。先将叶片暗处理0.5 h,各处理重复测定5次,取其平均值。其中,测定指标包括PS II潜在光化学效率(F<sub>v</sub>/F<sub>m</sub>)、光化学淬灭系数(q<sub>P</sub>)、非光化学淬灭系数(NPQ)、实际光化学效率(Φ<sub>PSII</sub>)<sup>[15]</sup>。

#### 1.4.5 复合菌剂施用效果的综合评价

采用主成分分析将菜心幼苗生长、根系和光合性能的23个指标进行降维后,用隶属函数法进行各处理复合菌剂施用效果的综合评价<sup>[16]</sup>。

各处理综合指标隶属函数值为:

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

式中:X<sub>i</sub>为主成分因子的值(观测值);X<sub>max</sub>和X<sub>min</sub>分别为主成分因子(观测值)的最大值和最小值。

权重计算公式为:

$$W_i = C / \sum_{i=1}^n C_i, i = 1, 2, 3, \dots, n \quad (2)$$

式中:W<sub>i</sub>为权重;C<sub>i</sub>为经主成分分析所得相关指标第i个综合指标的贡献率。

综合评价(D)计算公式为:

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

### 1.5 数据分析

用Excel 2021整理数据,用IBM SPSS Statistics 26软件采用单因素方差分析(one-way ANOVA)和最小显著差异法(LSD)比较不同数据组间的差异显著性(P<0.05),用Pearson相关性分析各指标间相关关系的显著性,使用Origin 2022绘图。

## 2 结果与分析

### 2.1 复合菌剂施用方式对菜心幼苗生长和根系构型指标的影响

#### 2.1.1 株高和茎粗

表1表明,各施用复合菌剂处理均能够不同程度促进菜心幼苗株高和茎粗增长,但各复合菌剂施用方式的生长程度不同,T<sub>1</sub>和T<sub>3</sub>处理增幅均达到显著水平。其中,与CK相比,T<sub>1</sub>和T<sub>3</sub>处理株高分

别显著增加了 23.87%和 15.48%,其茎粗分别显著增加了 17.73%和 14.89%,而  $T_2$  与  $T_3$  处理之间均无显著性差异。

### 2.1.2 叶片数和叶面积

从表 1 可知,复合菌剂施用方式对连作菜心幼苗叶片数无显著性影响,各处理叶片数都为 4 片,而对叶面积有不同程度促进作用,但仅  $T_1$  处理增幅达到显著水平( $P<0.05$ )。其中, $T_1$ 、 $T_2$  和  $T_3$  处理叶面积分别比 CK 增加了 45.96%、16.02% 和 32.63%,而  $T_1$ 、 $T_2$  和  $T_3$  处理之间无显著性差异。

### 2.1.3 地上和地下部干、鲜重

各复合菌剂施用方式均不同程度增加了菜心幼苗地上和地下部干、鲜重,但施用方式间的增长程度不同,均表现为  $T_1>T_3>T_2>CK$ (表 1);与 CK 相比,除  $T_2$  处理地上鲜重及其地上、地下干重外, $T_1$ — $T_3$  处理菜心幼苗其余地上和地下部干、鲜重均显著增加( $P<0.05$ )。其中,地上和地下鲜重在  $T_1$  处

理下比 CK 分别显著增加了 58.47%和 158.33%,在  $T_3$  处理下则分别显著增加了 58.47%和 158.33%;地上和地下部干重在  $T_1$  处理下分别比 CK 显著增加了 128.57%、85.71%,在  $T_3$  处理下则分别显著增加 71.43%、28.57%。

### 2.1.4 根系构型

各复合菌剂施用方式均对菜心幼苗根系构型指标产生不同程度促进作用,但各施用方式的增加幅度不同,并表现为  $T_1>T_3>T_2>CK$ (表 2)。其中,与 CK 相比, $T_1$  处理幼苗的根长、根表面积、根体积、平均直径、连接数、根尖数和分形维数, $T_2$  处理幼苗的根长和连接数, $T_3$  处理幼苗的根长、根体积和连接数均显著增加,即菜心幼苗根系构型指标根长和连接数在  $T_1$ 、 $T_2$  和  $T_3$  处理下均比 CK 显著增加,根长分别增加了 91.82%、54.21%和 76.15%,连接数分别增加了 41.55%、20.42%和 22.62%( $P<0.05$ )。

表 1 不同复合菌剂施用方式下菜心幼苗生长指标

Table 1 The growth index of Chinese flowering cabbage seedlings under different composite fungicide application

处理 Treatment	株高(PH) Plant height/cm	茎粗(SD) Stem diameter/mm	叶片数(LN) Leaf number	叶面积(LA) Leaf area/cm <sup>2</sup>
CK	12.40±0.277c	2.82±0.193b	4.00±0.000a	9.07±0.869b
$T_1$	15.36±0.581a	3.32±0.058a	4.00±0.000a	13.23±1.213a
$T_2$	13.26±0.353bc	3.16±0.068ab	4.00±0.000a	10.52±1.054ab
$T_3$	14.32±0.600ab	3.24±0.108a	4.00±0.000a	12.03±0.722ab
处理 Treatment	地上鲜重(AF) Aboveground fresh weight/g	地上干重(AD) Aboveground dry weight/g	地下鲜重(UF) Underground fresh weight/g	地下干重(UD) Underground dry weight/g
CK	1.180±0.186c	0.070±0.015c	0.072±0.013c	0.014±0.005c
$T_1$	1.870±0.444a	0.160±0.040a	0.186±0.047a	0.026±0.008a
$T_2$	1.264±0.211bc	0.098±0.019bc	0.140±0.012b	0.016±0.005bc
$T_3$	1.346±0.255ab	0.120±0.025b	0.168±0.013ab	0.018±0.004b

注:CK 表示不施复合菌剂对照, $T_1$  表示叶面喷施复合菌剂, $T_2$  表示土施复合菌剂, $T_3$  表示叶面喷施+土施复合菌剂。同列不同小写字母表示处理之间在 0.05 水平存在显著性差异( $P<0.05$ )。下同。

Note: CK denotes no application of composite fungus,  $T_1$  denotes foliar spraying of composite fungus,  $T_2$  denotes soil application of composite fungus, and  $T_3$  denotes foliar spraying + soil application of composite fungus. Different normal letters within same column indicate significant difference among treatments at 0.05 level ( $P<0.05$ ). The same as below.

表 2 不同复合菌剂施用方式下菜心幼苗根系构型指标

Table 2 The root conformation of Chinese flowering cabbage seedlings under different composite fungicide application

处理 Treatment	根长(RL) Root length/mm	根表面积(RA) Root surface area/cm <sup>2</sup>	根体积(RV) Root volumetric/cm <sup>3</sup>	平均直径(RD) Average diameter/mm	连接数(CN) Number of connections	根尖数(TN) Root tip number	分形维数(FD) Root fractal dimension
CK	41.66±4.85c	17.99±3.63b	1.05±0.26c	1.13±0.03b	210.67±53.80c	47.33±5.13b	1.47±0.08b
$T_1$	79.91±2.12a	42.85±7.87a	3.05±0.02a	1.59±0.11a	470.33±24.34a	67.00±12.12a	1.63±0.06a
$T_2$	64.24±4.70b	23.61±4.61b	1.32±0.06bc	1.23±0.17b	308.00±66.01b	57.00±6.56ab	1.51±0.03b
$T_3$	73.38±4.89ab	23.98±1.44b	1.67±0.55b	1.25±0.19b	400.67±7.23a	58.04±5.34ab	1.53±0.02b

## 2.2 复合菌剂施用方式对菜心幼苗叶片气体交换参数的影响

各复合菌剂施用方式处理均使菜心幼苗叶片净光合速率( $P_n$ )、瞬时水分利用效率(WUEi)不同程度提高,而使蒸腾速率( $T_r$ )、胞间  $CO_2$  浓度( $C_i$ )和气孔导度( $G_s$ )不同程度降低,但只有  $T_1$  处理各指标变化幅度均达显著水平, $T_2$  和  $T_3$  处理仅部分指标变化显著(表 3)。其中, $T_1$ 、 $T_2$  和  $T_3$  处理菜心幼苗叶片  $P_n$  均显著高于 CK( $P < 0.05$ ),增幅分别为 24.55%、51.29%和 32.67%, $T_2$  处理又显著高于

$T_1$ 、 $T_3$  处理; $T_1$ 、 $T_2$  和  $T_3$  处理叶片 WUEi 分别比 CK 增加了 377.89%、245.20%和 55.33%, $T_1$  和  $T_2$  处理与 CK 有显著性差异,也显著高于  $T_3$  处理;幼苗叶片  $T_r$ 、 $C_i$  和  $G_s$  均表现为  $T_1 < T_2 < T_3 < CK$ ,在  $T_1$  处理下均比 CK 显著降低( $P < 0.05$ ),降幅分别为 72.73%、20.01%、77.08%,而在  $T_2$  和  $T_3$  处理下多与 CK 无显著差异。

以上结果说明不同复合菌剂施用方式均有效提高了菜心幼苗叶片净光合速率和瞬时水分利用效率。

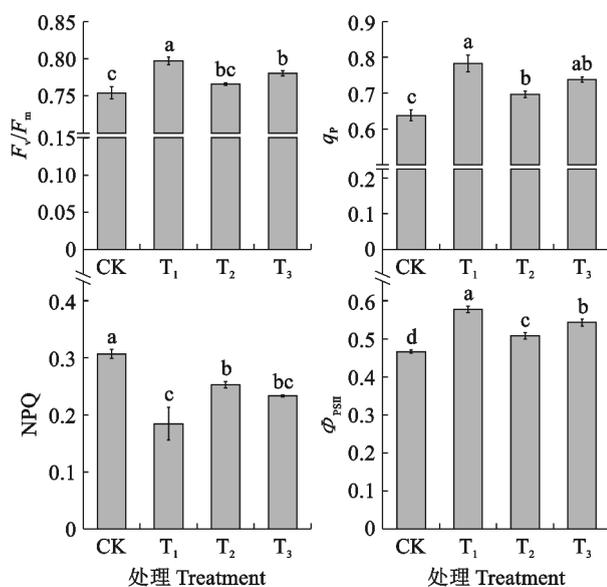
表 3 不同复合菌剂施用方式下菜心幼苗叶片气体交换参数

Table 3 The gas exchange parameters in leaves of Chinese flowering cabbage seedlings under different composite fungicide application

处理 Treatment	净光合速率 $P_n$ / [ $\mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ ]	蒸腾速率 $T_r$ / [ $\text{mmol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ ]	气孔导度 $G_s$ / [ $\text{mmol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ ]	胞间 $CO_2$ 浓度 $C_i$ / ( $\mu\text{mol}/\text{mol}$ )	瞬时水分利用效率 WUEi
CK	5.05±0.13c	0.011±0.002a	0.48±0.096a	361.79±3.23a	492.54±83.68b
$T_1$	6.29±0.41b	0.003±0.001c	0.11±0.017b	289.40±9.86b	2353.79±317.06a
$T_2$	7.64±0.15a	0.006±0.002bc	0.30±0.100ab	320.95±28.39ab	1700.27±354.14a
$T_3$	6.70±0.17b	0.009±0.000ab	0.44±0.053a	356.89±1.24a	765.06±38.22b

## 2.3 复合菌剂施用方式对菜心幼苗叶片叶绿素荧光参数的影响

各复合菌剂施用方式均有效提高了菜心幼苗叶片叶绿素荧光参数潜在光化学效率( $F_v/F_m$ )、光化学淬灭系数( $q_p$ )和实际光化学效率( $\Phi_{PSII}$ ),有效降低了非光化学淬灭系数(NPQ),且大多达到显著水平;各叶绿素荧光参数在施用方式间的变化幅度不同, $F_v/F_m$ 、 $q_p$ 、 $\Phi_{PSII}$  均表现为  $T_1 > T_3 > T_2 > CK$ ,NPQ 则表现为  $T_1 < T_3 < T_2 < CK$ (图 1)。其中,与 CK 相比,除  $T_2$  处理的  $F_v/F_m$  与相应 CK 无显著差异外, $T_1$ — $T_3$  处理叶片的各叶绿素荧光参数均与 CK 差异显著, $T_1$  处理的  $F_v/F_m$ 、 $q_p$ 、 $\Phi_{PSII}$  较 CK 分别显著增加了 5.70%、22.68%、23.93%,而其 NPQ 则比 CK 显著降低 39.78%( $P < 0.05$ ); $T_1$  处理的各参数均与  $T_2$  处理存在显著差异,其  $F_v/F_m$ 、 $\Phi_{PSII}$  也与  $T_3$  处理有显著差异,而  $T_2$  与  $T_3$  处理之间仅在  $\Phi_{PSII}$  存在显著差异。以上结果说明施用复合菌剂可提高 PSII 反应中心的开放程度,促进光合色素对光能的吸收能力,有效提高 PSII 初始光能捕获效率以及 PSII 反应中心的光能转换效率,同时增强植物光合系统的保护作用。



不同小写字母表示不同处理间差异显著( $P < 0.05$ )。

图 1 不同复合菌剂施用方式下菜心幼苗叶片叶绿素荧光参数

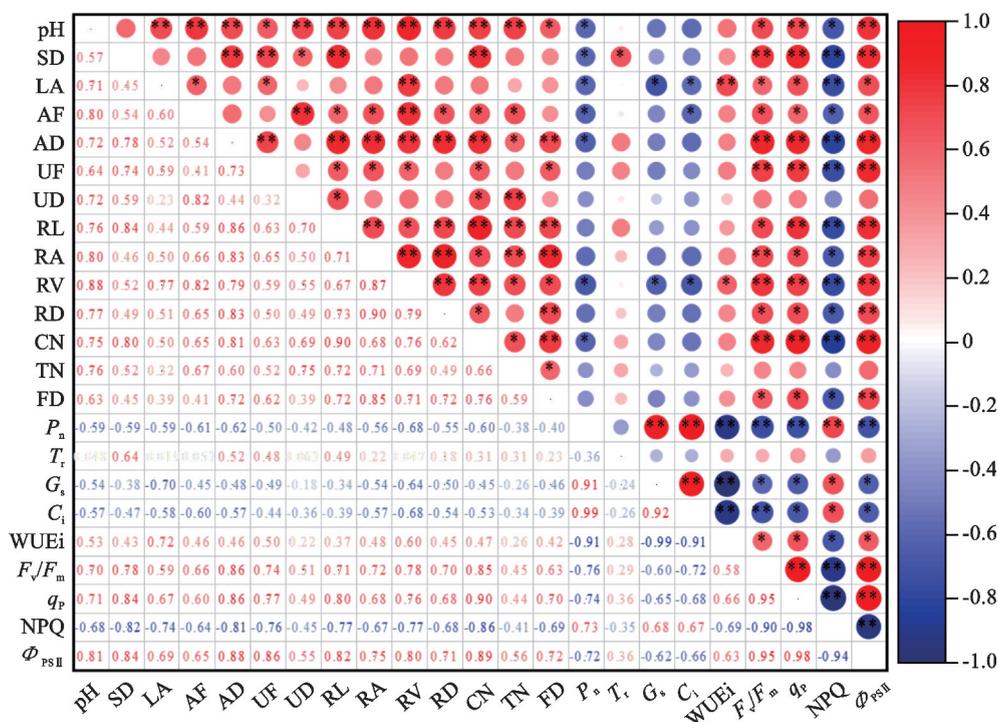
Different lowercase letters indicate significant difference among different treatments at 0.05 level.

Fig. 1 The chlorophyll fluorescence parameters in leaves of Chinese flowering cabbage seedlings under different composite fungicide application

## 2.4 复合菌剂施用方式下菜心幼苗相关指标的相关性分析

利用双变量 Pearson 相关系数法对不同复合菌剂施用方式下菜心幼苗生长、根系构型和光合性能的 23 个指标性状的相对值进行相关性分析,结果(图 2)表明,不同复合菌剂施用方式下菜心幼苗各指标之间的相关程度不同。其中, $P_n$  和  $C_i$  的正相关性最强( $r=0.99$ ), $q_p$  和  $\Phi_{PSII}$  正相关性次之( $r=0.98$ ),而  $G_s$  和  $WUE_i$  的负相关性最强( $r=-0.99$ ),

$q_p$  和 NPQ 负相关性次之( $r=-0.98$ )。地上部鲜重与株高、地下部干重、总根体积呈极显著正相关( $P<0.01$ ),相关系数分别为 0.80、0.82 和 0.82,而与叶面积、根长、总根表面积、平均直径、连接数、根尖数、 $F_v/F_m$ 、 $q_p$  和  $\Phi_{PSII}$  呈显著正相关( $P<0.05$ ),相关系数分别为 0.60、0.59、0.66、0.65、0.65、0.67、0.66、0.60 和 0.65,与  $P_n$ 、 $C_i$  和 NPQ 呈显著负相关( $P<0.05$ ),相关系数分别为 -0.61、-0.60 和 -0.64。



\* 和 \*\* 分别表示在 0.05 和 0.01 水平显著相关。红色表示正相关,蓝色表示负相关。

图 2 不同复合菌剂施用方式下菜心幼苗相关指标的相关系数热图

\* and \*\* indicates significant correlation at the 0.05 and 0.01 levels, respectively.

Red color indicates positive correlation and blue color indicates negative correlation.

Fig. 2 Thermogram of correlation coefficients of relevant indicators of Chinese flowering cabbage seedlings under different compound fungicide application

## 2.5 复合菌剂施用效果的综合评价

采用主成分分析法,将菜心幼苗生长、根系构型和光合性能的 23 个指标分为 3 个主成分(表 4)。第 1 主成分主要包括  $\Phi_{PSII}$ 、 $q_p$ 、地下部鲜重、 $F_v/F_m$ 、根连接数、株高和根体积,第 2 主成分包括  $C_i$ 、 $G_s$  和  $T_r$ ,第 3 主成分包括地上部鲜重和根体积。第 1、2、3 主成分特征值分别为 15.621、2.374 和 1.646,贡献率分别为 67.918%、10.324% 和 7.158%,三者累计贡献率达到 85.399%。

根据式(1)得到 3 个主成分的各处理隶属函数值;结合 3 个主成分的贡献率,由式(2)得到 3 个主成分的权重,然后利用式(3)得到各复合菌剂施用处理的隶属函数综合评价值。隶属函数综合评价值越大,说明复合菌剂的施用方式越佳。结果(表 5)显示, $T_1$ 、 $T_2$  和  $T_3$  处理均能在不同程度上促进菜心幼苗生长发育、改善根系构型和增强光合性能,综合评价结果为  $T_1 > T_3 > T_2 > CK$ ,即叶面喷施复合菌剂方式( $T_1$ )的施用效果最佳。

表 4 各综合指标系数及贡献率

Table 4 Coefficient and contribution rate of each comprehensive index

指标 Index	主成分 1 Principal component 1	主成分 2 Principal component 2	主成分 3 Principal component 3
株高 Plant height	0.920	0.120	0.272
茎粗 Stem diameter	0.820	0.195	-0.480
叶面积 Leaf area	0.799	0.098	0.224
地上部分鲜重 Aboveground fresh weight	0.837	0.114	0.401
地下部分鲜重 Underground fresh weight	0.935	0.109	-0.176
地上部分干重 Aboveground dry weight	0.838	0.187	-0.242
地下部分干重 Underground dry weight	0.742	0.399	0.214
根长 Root length	0.895	0.240	-0.245
总根表面积 Total root surface area	0.899	0.030	0.257
总根体积 Total root volume	0.905	-0.110	0.300
平均直径 Average root diameter	0.862	0.070	0.236
连接数 Number of connections	0.921	0.158	-0.102
根尖数 Tip number	0.808	0.352	0.087
分形维数 Root fractal dimension	0.844	0.188	0.125
蒸腾速率 $T_r$	-0.668	0.703	0.076
净光合速率 $P_n$	0.408	0.076	-0.782
胞间 $CO_2$ 浓度 $C_i$	-0.580	0.768	-0.015
气孔导度 $G_s$	-0.625	0.743	-0.041
瞬时水分利用效率 WUEi	0.735	-0.275	0.043
潜在光化学效率 $F_v/F_m$	0.935	0.015	-0.031
光化学淬灭系数 $q_p$	0.955	0.016	-0.141
非光化学淬灭系数 NPQ	-0.807	0.341	0.189
实际光化学效率 $\Phi_{PSII}$	0.965	0.006	-0.114
特征值 Eigen values	15.621	2.374	1.646
贡献率 Contribution/%	67.918	10.324	7.158
累计贡献率 Cumulative contribution/%	67.918	78.241	85.399

表 5 各处理综合指标值、权重、隶属函数值、D 值及综合评价

Table 5 The comprehensive indicator values, index weight, membership function value, D values, and comprehensive evaluation of each treatment

处理 Treatment	主成分 1 Principal component 1	主成分 2 Principal component 2	主成分 3 Principal component 3	$U(X_1)$	$U(X_2)$	$U(X_3)$	D	综合评价 Comprehensive evaluation
CK	-1.272	0.069	1.019	0.109	0.644	0.778	0.182	4
T <sub>1</sub>	1.371	-0.469	0.780	0.841	0.484	0.704	0.731	1
T <sub>2</sub>	-0.204	-0.401	-0.994	0.405	0.504	0.152	0.383	3
T <sub>3</sub>	0.106	0.800	-0.805	0.491	0.862	0.211	0.494	2
权重 Weight				0.795	0.121	0.084		

### 3 讨论

苗期是菜心整个生长周期中的关键阶段,幼苗

株高、叶片、根系生长均会受到连作抑制。根系作为直接与连作土壤接触的器官,对植株生长起到关键的调控作用<sup>[17]</sup>。良好的根系可以促进养分的吸收

与利用,从而增加作物的产量<sup>[18]</sup>。姚阳阳等<sup>[19]</sup>研究发现叶面喷施复合菌剂能促进当归植株生长,显著增加株高、茎粗、不定根数、主根长和单株鲜重,降低根腐病的发生率。李宁等<sup>[20]</sup>在对草莓的研究中发现,叶面喷施菌剂可以提高草莓叶片的光合色素含量、根冠比、土壤碱解氮和速效磷含量。这与本研究结果相似,叶面喷施复合菌剂改善了菜心的根系构型,显著提高了根长、根表面积、根体积、平均直径、连接数、根尖数和分形维数。可能是因为叶面喷施的菌株可以从叶片表皮进入茎部组织,向薄壁组织和中央维管束系统扩展迁移,并通过中央维管束系统从植物体内向根部转移,而菌株对病毒有拮抗作用,抑制病原菌的繁殖,为根系生长营造了一个良好的环境条件<sup>[21]</sup>。而且,有研究表明叶片喷施复合菌剂也能增强过氧化氢酶、过氧化物酶、超氧化物歧化酶、多胺氧化酶、二胺氧化酶和多酚氧化酶的活性,提高细胞的抗氧化能力,维持细胞膜的稳定,提高细胞分裂素及赤霉素水平,从而加快根系细胞的分裂分化,进而改善根系构型<sup>[19]</sup>。

光合作用是植物体内极为重要的代谢过程,光合作用的强弱对于植物生长、产量及其抗逆性都具有十分重要的影响,因而可用光合作用作为判断植物生长和抗逆性强弱的指标<sup>[22]</sup>。研究表明,喷施菌剂可以显著提高小麦旗叶大小和气体交换参数,提高棉花叶片叶绿素含量,增强光合速率,提高植株对养分吸收量,促进养分向生殖器官中积累<sup>[23-24]</sup>。姚阳阳等研究发现叶面喷施复合菌剂能提高当归净光合速率、气孔导度、胞间 CO<sub>2</sub> 浓度和蒸腾速率,提高草莓叶片的光合色素含量<sup>[19]</sup>。这与本研究结果相似,本研究发现叶面喷施菌剂显著提高了菜心叶片的净光合速率和叶绿素荧光参数。这可能是因为叶

面喷施菌剂可以增强植物细胞的抗氧化能力,促进新陈代谢,增加叶片的面积和叶绿素含量,从而提高了光合作用效率<sup>[19]</sup>。

产量与苗期生长状况直接相关,因此促进苗期健壮生长是增加产量的关键因素<sup>[25]</sup>。岳明灿等<sup>[26]</sup>研究发现喷施微生物菌剂的樱桃番茄产量最高,并提高了果实品质,以及土壤有机质含量和土壤微生物的生物量碳、氮含量。据报道,叶面喷施复合菌剂能促进当归植株生长,增加生物量,显著提高株高、茎粗和单株鲜重<sup>[19]</sup>,能使番茄产量提升 19% 以上<sup>[27]</sup>。另外,叶面喷施黄腐酸微生物菌剂也能提高棉花的产量,并且改善其品质<sup>[24]</sup>。本试验中叶面喷施复合菌剂显著增加了菜心株高、茎粗、叶面积和地上地下部干、鲜重,表明施用复合菌剂对菜心生长具有显著促进作用。这与前人相关研究结果相似,可能是因为叶面喷施菌剂通过提高土壤养分含量,加快植株对土壤中养分的吸收,降低植物根部病害的发生,提高光合作用效率,加快植物有机物的合成,最终提高作物产量和品质<sup>[24,27]</sup>。

## 4 结 论

微生物复合菌剂可以有效缓解菜心连作障碍,其中叶面喷施复合菌剂效果最好,显著增加了幼苗株高、茎粗、叶面积和鲜重,改善了根系构型,显著改善率叶片光合性能,其地上干重、地下干重、根长分别比对照显著增加了 128.57%、85.71%、91.81%,净光合速率、光化学淬灭系数和实际光化学效率分别显著增加了 24.55%、22.68% 和 23.93%。气体交换参数之间的正负相关性极强,其中净光合速率与胞间 CO<sub>2</sub> 浓度的正相关关系最强,气孔导度与 WUEi 负相关性最强,相关系数分别为 0.99 和 -0.99。

## 参考文献:

[1] 曾小玲,赵瑞丽,钟开勤,等. 菜心 SOD 基因的克隆及其在低温条件下的表达分析[J]. 西北植物学报, 2019, 39(2): 218-225.  
ZENG X L, ZHAO R L, ZHONG K Q, et al. Cloning and expression analysis of SOD genes of *Brassica campestris* L. ssp. *chinensis* (L.) var. *utilis* Tsen et Lee under low temperature[J]. *Acta Botanica Boreali-Occidentalia Sinica*, 2019, 39(2): 218-225.

[2] 张艳,黎庭耀,沈卓,等. 杂交一代菜薹新品种‘粤翠 2 号’菜心[J]. 园艺学报, 2023, 50(增刊 1): 45-46.  
ZHANG Y, LI T Y, SHEN Z, et al. A new hybrid flowering Chinese cabbage ‘Yuecui 2’[J]. *Acta Horticulturae Sinica*,

2023, 50(Suppl. 1): 45-46.

[3] 李光光,张华,郑岩松,等. 菜薹新品种‘油绿 703’菜心[J]. 园艺学报, 2023, 50(增刊 1): 53-54.  
LI G G, ZHANG H, ZHENG Y S, et al. A new flowering Chinese cabbage cultivar ‘Youlü 703’[J]. *Acta Horticulturae Sinica*, 2023, 50(Suppl. 1): 53-54.

[4] ZHANG H Y, CUN Y H, WANG J J, et al. Acetylsalicylic acid and salicylic acid alleviate postharvest leaf senescence in Chinese flowering cabbage (*Brassica rapa* var. *parachinensis*) [J]. *Postharvest Biology and Technology*, 2022, 194: 112070.

[5] TAN G, LIU Y J, PENG S G, et al. Soil potentials to resist continuous cropping obstacle: Three field cases[J]. *Environ-*

- mental Research*, 2021, 200: 111319.
- [6] 撒晓梅, 李明. 不同施肥处理对‘赤霞珠’葡萄根际土壤养分和真菌群落的影响[J]. 微生物学通报, 2023, 50(11): 4876-4893. SA X M, LI M. Different fertilization treatments affect rhizosphere soil nutrients and fungal communities of ‘Cabernet Sauvignon’ grapes [J]. *Microbiology China*, 2023, 50(11): 4876-4893.
- [7] 刘雅娜, 李袁凯, 王金莲, 等. 不同微生物菌剂对马铃薯的促生作用研究[J]. 干旱区资源与环境, 2023, 37(9): 136-143. LIU Y N, LI Y K, WANG J L, *et al.* Effects of different microbial agents on the growth of potato [J]. *Journal of Arid Land Resources and Environment*, 2023, 37(9): 136-143.
- [8] 张东旭, 胡丹珠, 闫金龙, 等. 放线菌剂使用方法对晚播冬小麦生长及光合性状的影响[J]. 麦类作物学报, 2023, 43(11): 1457-1466. ZHANG D X, HU D Z, YAN J L, *et al.* Effects of different application methods of actinomycetes on growth and photosynthetic characteristics of late-sown winter wheat [J]. *Journal of Triticeae Crops*, 2023, 43(11): 1457-1466.
- [9] 杨肖芳, 郭瑞, 姚燕来, 等. 微生物菌剂对连作地块草莓生长、土壤养分及微生物群落的影响[J]. 核农学报, 2023, 37(6): 1253-1262. YANG X F, GUO R, YAO Y L, *et al.* Effects of microbial agents on plant growth, soil fertility and microbial communities under continuous cropping strawberry [J]. *Journal of Nuclear Agricultural Sciences*, 2023, 37(6): 1253-1262.
- [10] 杨涛, 姚阳阳, 王治业, 等. 复合菌剂调控连作当归根围土壤养分及对产量的影响[J]. 微生物学通报, 2022, 49(7): 2648-2660. YANG T, YAO Y Y, WANG Z Y, *et al.* Effects of complex bacterium inoculants on rhizosphere soil nutrients and yield of *Angelica sinensis* in continuous cropping [J]. *Microbiology China*, 2022, 49(7): 2648-2660.
- [11] ZHANG R, WANG C, TENG W Z, *et al.* Accumulation and distribution of fertilizer nitrogen and nodule-fixed nitrogen in soybeans with dual root systems [J]. *Agronomy*, 2020, 10(3): 397.
- [12] 金建新, 丁一民, 孙振源, 等. 基于SWAP-IES的旱区春小麦长势和产量模拟[J]. 农业工程学报, 2023, 39(11): 66-76. JIN J X, DING Y M, SUN Z Y, *et al.* Numerical simulation of spring wheat growth and yield in arid areas based on SWAP-IES [J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2023, 39(11): 66-76.
- [13] 赵成凤, 杨梅, 李红杰, 等. 叶面喷施褪黑素对干旱及复水下玉米光合特性和抗氧化系统的影响[J]. 西北植物学报, 2021, 41(9): 1526-1534. ZHAO C F, YANG M, LI H J, *et al.* Effect of foliar spraying melatonin on photosynthesis and antioxidant system of maize leaves under drought stress and rewatering [J]. *Acta Botanica Boreali-Occidentalia Sinica*, 2021, 41(9): 1526-1534.
- [14] 刘德政, 卢山, 高坤奥, 等. 大田和旱棚环境下小麦旗叶气孔性状变异及其与光合参数的关系[J]. 麦类作物学报, 2024, 44(3): 360-369. LIU D Z, LU S, GAO S A, *et al.* Variations of flag leaf and stomatal traits of wheat in field and drought shed environment [J]. *Journal of Triticeae Crops*, 2024, 44(3): 360-369.
- [15] 陈霞, 王习政, 苏文娟, 等. 嫁接方法与套袋处理对山苍子生长、光合特性及叶绿素荧光特征的影响[J]. 西北农林科技大学学报(自然科学版), 2024, 52(3): 51-61. CHEN X, WANG X Z, SU W J, *et al.* Effects of grafting methods and bagging on growth, photosynthetic and chlorophyll fluorescence characteristics of *Litsea cubeba* [J]. *Journal of Northwest A&F University (Natural Science Edition)*, 2024, 52(3): 51-61.
- [16] 陈海雁, 黄荣, 赵亮, 等. Cp2-EPS对盐胁迫下紫花苜蓿苗期形态及光合特性的影响[J]. 草地学报, 2024, 32(1): 229-238. CHEN H Y, HUANG R, ZHAO L, *et al.* Effects of Cp2-EPS on the morphology and photosynthesis characteristics of alfalfa seedlings under salt stress [J]. *Acta Agrestia Sinica*, 2024, 32(1): 229-238.
- [17] 贺玉洁, 张智韬, 巴亚岚, 等. 基于Sentinel-2卫星数据的灌区农田土壤水盐协同反演[J]. 农业工程学报, 2023, 39(19): 111-121. HE Y J, ZHANG Z T, BA Y L, *et al.* Synergistic inversion of water and salt in irrigated agricultural soils based on Sentinel-2 [J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2023, 39(19): 111-121.
- [18] 彭云霞, 王国祥, 蔡子平, 等. 腐植酸水溶肥对柴胡(*Bupleurum chinense*)幼苗生长及其生理特性的影响[J]. 中国中药杂志, 2024, 49(7): 1802-1808. PENG Y X, WANG G X, CAI Z P, *et al.* Effects of humic acid water-soluble fertilizer on growth and physiological characteristics of *Bupleurum chinense* seedlings [J]. *China Journal of Chinese Materia Medica*, 2024, 49(7): 1802-1808.
- [19] 姚阳阳, 杨涛, 王引权, 等. 两类根际复配促生菌剂对当归生长、生理特征及药效成分的影响[J]. 中国实验方剂学杂志, 2022, 28(8): 131-138. YAO Y Y, YANG T, WANG Y Q, *et al.* Effect of two kinds of compound rhizosphere growth-promoting bacteria on growth, physiological characteristics and pharmacodynamic components of *Angelica sinensis* radix [J]. *Chinese Journal of Experimental Traditional Medical Formulae*, 2022, 28(8): 131-138.
- [20] 李宁, 刘颖, 刘益克, 等. 植物提取液对连作草莓生长、产量及土壤的影响[J]. 河北农业大学学报, 2023, 46(5): 63-68. LI N, LIU Y, LIU Y K, *et al.* Effects of plant extractions on strawberry growth, yield and soil under continuous cropping [J]. *Journal of Hebei Agricultural University*, 2023, 46(5): 63-68.
- [21] 沙月霞, 隋书婷, 曾庆超, 等. 贝莱斯芽孢杆菌E69预防稻瘟病等多种真菌病害的潜力[J]. 中国农业科学, 2019, 52(11): 1908-1917. SHA Y X, SUI S T, ZENG Q C, *et al.* Biocontrol potential of *Bacillus velezensis* strain E69 against rice blast and other

- fungal diseases[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2019, 52(11): 1908-1917.
- [22] 于雪泽, 郭王子杰, 宋红. Zn 胁迫下玉蝉花的耐性和富集转运[J]. *草业科学*, 2024, 41(1): 67-76.  
YU X Z, GUO-WANG Z J, SONG H. The tolerance and enrichment transport of zinc in *Iris ensata* under zinc stress[J]. *Pratacultural Science*, 2024, 41(1): 67-76.
- [23] 易军, 符慧娟, 李星月, 等. 光合菌剂对弱光照生态区小麦光合特性和产量的影响[J]. *麦类作物学报*, 2022, 42(8): 1039-1045.  
YI J, FU H J, LI X Y, *et al.* Effect of photosynthetic bacteria on photosynthetic characteristics and yield of wheat in ecological area with low-light[J]. *Journal of Triticeae Crops*, 2022, 42(8): 1039-1045.
- [24] 吕冬青, 张铭谷, 马玉增, 等. 黄腐酸对蒜套棉制度下棉花产量品质及土壤性状的影响[J]. *水土保持学报*, 2020, 34(2): 222-230.  
LÜ D Q, ZHANG M G, MA Y Z, *et al.* Effect of fulvic acid on cotton growth and soil chemical properties in a garlic-cotton intercropping system[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2020, 34(2): 222-230.
- [25] 楚光红, 章建新, 王聪, 等. 幼苗期摘心对高产春大豆根系生长和产量的影响[J]. *干旱地区农业研究*, 2021, 39(2): 102-110.  
CHU G H, ZHANG J X, WANG C, *et al.* Effects of topping at seedling stage on root growth and yield of high-yield spring soybean[J]. *Agricultural Research in the Arid Areas*, 2021, 39(2): 102-110.
- [26] 岳明灿, 王志国, 陈秋实, 等. 减施化肥配施微生物菌剂对番茄产质量和土壤肥力的影响[J]. *土壤*, 2020, 52(1): 68-73.  
YUE M C, WANG Z G, CHEN Q S, *et al.* Effects of reduction of chemical fertilizer combined with application of microbial agents on growth and soil fertility of cherry tomato[J]. *Soils*, 2020, 52(1): 68-73.
- [27] 何伟, 许建军, 杨华, 等. 复合微生物菌剂‘宁盾’在新疆加工番茄田间应用效果[J]. *新疆农业科学*, 2018, 55(11): 2042-2050.  
HE W, XU J J, YANG H, *et al.* Study of the field application effect of compound microbial inoculum ‘Ningdun’ on processing tomatoes in Xinjiang[J]. *Xinjiang Agricultural Sciences*, 2018, 55(11): 2042-2050.

## 《西北植物学报》国际数据库及平台收录情况

《西北植物学报》2024 年度先后被荷兰《文摘与引文数据库》(Scopus)、瑞典开放存取期刊目录(DOAJ)、中国开放获取期刊数据库(China Open Access Journal, COAJ)及 SciEngine(科学引擎)出版平台收录,对进一步扩大期刊的国际传播范围、提升期刊的国际影响力具有重要意义。截至目前本刊已被以下国际权威数据库收录:

荷兰《文摘与引文数据库》(Scopus)

瑞典开放存取期刊目录(Directory of Open Access Journal, DOAJ)

美国化学文摘社(Cheical Abstracts Service, CAS)

中国开放获取期刊数据库(China Open Access Journal, COAJ)

科技期刊世界影响力指数报告(World Journal Clout Index, WJCI)

美国《生物学文摘预评》(Biological Abstracts, BA)

英国《国际农业与生物中心文摘》(Center for Agriculture and Bioscience International, CABI)

俄罗斯《文摘杂志》(Abstracts Journal, AJ)

SciEngine(科学引擎)出版平台(<https://www.sciengine.com/ABBOS/home>)