网络出版时间:2026-03-13 DOI:10.13207/j.jnwafu.2026.09.017

万寿菊轮作对半夏连作障碍的改善作用

武宝琴[1,2,3],郭清毅[1,2,3],黄浩翔[1,2,3],寇明红[1,2,3],苏雨[1,2,3],万阳[1,2,3],张延红[1,2,3]

(1 甘肃中医药大学 药学院,甘肃 兰州 730000;2 天然药用种质资源挖掘与新品种选育协同创新中心,甘肃 兰州 730000;
3 甘肃中医药大学 杏林百草园,甘肃 兰州 730000)

[摘 要] 【目的】探究万寿菊(*Tagetes erecta*)轮作对半夏(*Pinellia ternata*)连作障碍的改善作用,为优化半夏栽培模式及缓解半夏连作障碍提供科学依据。【方法】设置半夏连作及半夏与万寿菊轮作2种处理,采用常规方法测定不同处理半夏的生长生理指标、土壤养分含量和土壤酶活性,利用Illumina高通量测序技术测定不同处理半夏根际土壤微生物的群落结构及多样性,并对不同种植模式下半夏根际土壤环境因子与微生物群落进行相关性分析。【结果】①与半夏连作相比,万寿菊轮作显著促进了半夏的生长生理,半夏的出苗率、叶面积、株高和产量分别显著提高91.87%,41.30%,29.87%和101.51%($P<0.05$);叶片净光合速率、气孔导度、胞间CO_2浓度、蒸腾速率和相对叶绿素含量分别显著提高了20.12%,100.00%,19.96%,48.77%和18.35%($P<0.05$)。②与半夏连作相比,万寿菊轮作后半夏根际土壤pH、养分含量和土壤酶活性显著提高,其中土壤pH、全氮、全钾和有机质含量分别显著提高6.60%,26.96%,6.35%,6.54%($P<0.05$),土壤脲酶、蔗糖酶、多酚氧化酶活性分别提高了80.22%,14.73%和64.79%。③与半夏连作相比,万寿菊轮作后半夏根际土壤微生物群落结构发生重构,细菌的多样性和丰富度均显著提升,但真菌差异不显著。在门水平上,放线菌门、酸杆菌门和担子菌门的相对丰度分别提高10.47%,33.37%和116.41%;假单胞菌门和子囊菌门的相对丰度分别降低6.48%和1.83%。在属水平上,节杆菌属的相对丰度提高22.20%,类诺卡氏菌属和鞘氨醇单胞菌属的相对丰度分别降低13.22%和11.08%。④相关性分析结果表明,厚壁菌门、蓝细菌门相对丰度均与土壤全磷含量呈显著正相关;黏球菌门相对丰度与土壤脲酶活性呈显著正相关;子囊菌门、捕虫霉门相对丰度均与土壤pH、土壤脲酶活性呈显著正相关,但与土壤全氮含量呈显著负相关。【结论】万寿菊轮作通过提高根际土壤养分含量、增强土壤酶活性以及优化土壤微生物群落结构而改善根际土壤生态功能,缓解半夏连作障碍,促进半夏生长及产量增加。

[关键词] 半夏栽培;万寿菊;连作障碍;轮作模式;微生物群落结构

[中图分类号] S567.23+9 [文献标志码] A [文章编号] 1671-9387(2026)09-0171-10

Improvement effect of *Tagetes erecta* rotation on continuous cropping obstacle of *Pinellia ternata*

WU Baoqin[1,2,3],GUO Qingyi[1,2,3],HUANG Haoxiang[1,2,3],KOU Minghong[1,2,3],
SU Yu[1,2,3],WAN Yang[1,2,3],ZHANG Yanhong[1,2,3]

(1 *College of Pharmacy,Gansu University of Chinese Medicine,Lanzhou,Gansu* 730000,*China*;2 *Collaborative Innovation Center of Natural Medicine Germplasm Resources Discovering and New Cultivars Breeding,Lanzhou,Gansu* 730000,*China*;
3 *Xinglin Baicao Garden,Gansu University of Chinese Medicine,Lanzhou,Gansu* 730000,*China*)

Abstract:【Objective】This study aimed to investigate the improvement effect of *Tagetes erecta* rotation on continuous cropping obstacle of *Pinellia ternata*,to provide a scientific basis for optimizing *P. ternata* cultivation

[收稿日期] 2025-07-05 [修回日期] 2025-11-18
[基金项目] 甘肃省重点研发计划项目(25YFFA045)
[作者简介] 武宝琴(1997—),女,甘肃庆阳人,在读硕士,主要从事不同轮作模式对半夏连作障碍的缓解效应研究。E-mail:Wubq708@163.com
[通信作者] 郭清毅(1976—),女,陕西蒲城人,副教授,博士,主要从事生态农业与中药材栽培研究。E-mail:gqingyi242047@163.com

and alleviating continuous cropping obstacles.【Method】Two treatments were designed: continuous cropping of *Pinellia ternata*, and rotation of *Pinellia ternata* with *Tagetes erecta*. Conventional methods were employed to determine the growth physiological indicators, soil nutrients content, and soil enzyme activities of *P. ternata* under different treatments. Illumina high-throughput sequencing technology was used to determine the community structure and diversity of soil microorganism. Furthermore, correlation analysis was conducted between rhizosphere soil environmental factors and microbial communities under different species patterns of *P. ternata*.【Result】①Compared with the continuous cropping treatment of *P. ternata*, the crop rotation with *T. erecta* significantly promoted the growth and physiology of *P. ternata*. The emergence rate, leaf area, plant height, and yield increased significantly by 91.87%, 41.30%, 29.87%, and 101.51%, respectively ($P<0.05$). The leaf net photosynthetic rate, stomatal conductance, intercellular CO_2 concentration, transpiration rate, and SPAD increased significantly by 20.12%, 100.00%, 19.96%, 48.77%, and 18.35%, respectively ($P<0.05$). ②Compared with the continuous cropping treatment with *P. ternata*, the *T. erecta* rotation treatment significantly increased soil pH, nutrient content, and enzyme activities in the rhizosphere soil of *P. ternata*. Specifically, pH and the contents of total nitrogen, total potassium, organic matter increased significantly by 6.60%, 26.96%, 6.35%, and 6.54%, respectively ($P<0.05$). Similarly, the activities of soil urease, soil sucrase, and soil polyphenol oxidase increased by 80.22%, 14.73%, and 64.79%, respectively ($P<0.05$). ③Compared with continuous cropping of *P. ternata*, crop rotation with *T. erecta* restructured the rhizosphere microbial community. Specifically, the diversity and richness of bacteria increased significantly, whereas no significant differences were observed in fungi. At the phylum level, the relative abundances of Actinomycetota, Acidobacteriota, and Basidiomycota increased by 10.47%, 33.37%, and 116.41%, respectively, whereas the relative abundances of Pseudomonadota and Ascomycota decreased by 6.48% and 1.38%, respectively. At the genus level, the relative abundance of the genus *Arthrobacter* increased by 22.20%, while the relative abundances of the genera *Nocardioides* and *Sphingomonas* decreased by 13.22% and 11.08%, respectively. ④Correlation analysis revealed significant positive correlations of Bacillota and Cyanobacteria with total soil phosphorus content, and of Myxococcota with soil urease. Ascomycota and Zoopagomycota were significantly positively correlated with soil pH and soil urease activity, and significantly negatively correlated with total soil nitrogen content.【Conclusion】*T. erecta* rotation alleviates the continuous cropping obstacles of *P. ternata* by increasing soil nutrient content, enhancing soil enzyme activities, and optimizing the rhizosphere microbial community structure, thereby improving soil ecological function and ultimately promoting plant growth and yield.

Key words: *Pinellia ternata* cultivation; *Tagetes erecta*; continuous cropping obstacles; crop rotation pattern; microbial community structure

半夏(*Pinellia ternata*)是我国传统中药材,具有燥湿化痰、降逆止呕等功效[1],被广泛应用于多个经典方剂中,如半夏泻心汤、小青龙汤等。随着中药现代化进程的推进,半夏的市场需求逐年攀升,种植面积持续扩大。然而,长期单一化种植模式导致半夏连作障碍问题日益严重,表现为产量下降、品质降低、病害加剧等[2]。研究表明,连作3年以上的田块,半夏产量下降30%~50%,其块茎总灰分含量增加15%~20%,浸出物含量显著降低[3]。连作条件下,半夏根系分泌的酚酸类物质(如香草酸、阿魏酸)在土壤中积累,引发自毒效应,同时土壤病原真菌(如镰刀菌属)增殖加剧了病害发生[4]。目前,针对连作障碍的调控策略主要包括土壤改良、生物防治及轮作制度优化。但现有方法存在诸多局限性,如氯化苦熏蒸破坏了土壤微生物多样性,生物炭添加成本高且可能引发土壤pH失衡,丛枝菌根真菌(AMF)接种田间成功率低等。此外,尽管已有研究探索了药用植物与化感作物的轮作模式,但针对半夏的轮作研究仍局限于传统作物组合,缺乏对土壤酶活性及微生物群落结构的系统性解析[5-10]。

万寿菊(*Tagetes erecta*)是菊科一年生草本植物,具有显著的化感作用。研究表明,万寿菊与烟草等作物轮作可优化土壤微生物群落,增加有益菌数量,减少有害菌群数量,有效缓解连作障碍[11]。

万寿菊根系分泌的α-三联噻吩、噻吩类化合物及黄酮类物质可抑制病原菌孢子萌发和菌丝生长，降低土传病害发生率[12]。此外，万寿菊残体分解后释放的化感物质可激活土壤酶活性，促进有机质矿化，改善土壤养分有效性[13]。然而，现有研究多聚焦于万寿菊与蔬菜作物轮作方面，对其与药用植物尤其是半夏的适配性及作用机制尚未见研究报道。因此，本研究以山东菏泽的半夏为试验材料，研究万寿菊轮作对半夏生长生理、根际土壤养分、酶活性及微生物群落结构的影响，初步阐明万寿菊轮作对半夏根际土壤功能的影响机制，为半夏的科学栽培提供技术支撑，推动半夏产业绿色转型。

1　材料与方法

1.1　试验材料

半夏块茎来源于山东菏泽，经甘肃中医药大学杨扶德教授鉴定为天南星科半夏属半夏；万寿菊苗来源于河南南阳，经甘肃中医药大学杨扶德教授鉴定为菊科万寿菊属万寿菊。

1.2　试验区概况

试验区位于甘肃中医药大学杏林百草园试验基地（35.946 6° N，104.171 9° E），该基地位于甘肃省中部，地处青藏高原向黄土高原过渡地带，平均海拔 1 844 m，属温带大陆性气候，年平均气温 9.7 ℃，年降水量 360.8 mm，无霜期 120 d，前茬作物为党参。

1.3　试验设计

本试验设计 2 个处理，分别为半夏连作和半夏与万寿菊轮作（即万寿菊轮作），试验随机区组排列，每个处理面积为 6 m^2（2 m×3 m），试验设置 3 次重复。试验周期为 2022 年 4 月至 2024 年 9 月，连作处理连续 3 年种植半夏，轮作处理于 2023 年换茬种植万寿菊，2024 年复种半夏。半夏块茎播种量为 0.37 kg/m^2，株行距均为 5 cm，覆土 10 cm，万寿菊株距 20 cm，各处理均按照《半夏生态种植技术规程》进行水肥管理，且第二年轮作万寿菊与半夏管理保持一致，保证各个小区水肥条件一致。

1.4　土壤样品采集及处理

2024 年在半夏倒苗期，采用五点取样法采集半夏根际土壤样品。具体操作如下：首先将半夏根系周围的松散土壤轻轻抖落，然后使用软毛刷仔细收集黏附在半夏根表面的土壤，即为根际土样品。将收集好的土样分成 2 份，其中一份土样装入自封袋，迅速放入－80 ℃冰箱保存，用于后续微生物群落测序分析；另一份土样自然晾干，筛去杂质，用于土壤养分含量及酶活性的测定。

1.5　测定指标及方法

1.5.1　*半夏生长生理指标的测定*　在 2024 年半夏生长周期内，进行出苗率、叶面积、株高、相对叶绿素含量、光合参数及产量测定。具体方法如下：出苗率于出苗后每 2 d 记录一次，出苗率＝（最大出苗数量/播种种子数）×100%；在半夏倒苗前，采用游标卡尺测量叶长、叶宽和株高，叶面积＝$K\times L\times W$（K 为叶面积系数 0.666，L 为叶长，W 为叶宽）；在半夏生长旺盛期，分别使用 LI-6400 型便携式光合测量系统和 spad-502 仪测定光合参数和叶绿素相对含量；产量在半夏采收期进行现场测定，并折算产量。

1.5.2　*土壤养分含量与酶活性的测定*　土壤 pH 采用电位法[14]测定；土壤有机质含量采用重铬酸钾容量法-外加热法[15]测定；土壤全磷含量采用碱熔-钼锑抗分光光度法[16]测定；土壤全氮含量采用凯氏定氮法[17]测定；土壤全钾含量采用碱熔-原子吸收分光光度计法[18]测定；土壤脲酶、蔗糖酶和多酚氧化酶活性均采用北京盒子生工科技有限公司酶活检测试剂盒测定。

1.5.3　*土壤微生物多样性的测定*　根据 MP-soil 土壤 DNA 提取试剂盒说明书完成土样 DNA 的提取，使用 NanoDrop2000 测定 DNA 浓度和纯度。以提取的 DNA 为模板，使用携带 Barcode 序列的引物 338F（序列：5′-ACTCCTACGGGAGGCAGCAG-3′）和 806R（序列：5′-GGACTACHVGGGTWTC-TAAT-3′）扩增细菌 16S rRNA 基因的 V3－V4 可变区，采用引物 ITS1F（序列：5′-CTTGGTCATT-TAGAGGAAGTAA-3′）和 ITS2R（序列：5′-GC-TGCGTTCTTCATCGATGC-3′）扩增真菌 ITS 的 ITS1 区。PCR 反应体系（20 μL）为：5× TransStart FastPfu 缓冲液 4 μL，2.5 mmol/L dNTPs 2 μL，上游引物（5 μmol/L）0.8 μL，下游引物（5 μmol/L）0.8 μL，TransStart FastPfu DNA 聚合酶 0.4 μL，模板 DNA 10 ng，用无菌水补足至 20 μL。PCR 反应条件为：95 ℃预变性 3 min；95 ℃变性 30 s，55 ℃退火 30 s，72 ℃延伸 30 s，27 个循环；72 ℃终延伸 10 min，4 ℃条件下保存。对 PCR 扩增片段进行纯化和定量分析后，送至上海美吉生物医药科技有限公司采用 PE300 方法进行 Illumina 高通量测序。

1.6 数据处理与分析

采用Excel 2019和IBM SPSS Statistics 25进行数据处理与分析,采用mothur[19]软件(http://www.mothur.org/wiki/Calculators)计算Alpha多样性指数(Chao 1指数、香农指数等);采用LEfSe分析(Linear discriminant analysis Effect Size)[20](LDA>2且$P<0.05$)确定不同处理门水平、属水平相对丰度显著差异的微生物类群;采用Pearson相关系数分析半夏根际土壤养分含量、土壤酶活性与土壤微生物群落的相关性。

2 结果与分析

2.1 万寿菊轮作对半夏生长生理的影响

由表1可知,与半夏连作处理相比,万寿菊轮作对半夏的生长有显著提升作用。其中万寿菊轮作处理半夏的出苗率、叶面积、株高和产量分别为65.37%、11.77 cm^2、10.87 cm和4 861.35 kg/hm^2,较半夏连作处理分别提高了91.87%,41.30%,29.87%和101.51%。

表1 万寿菊轮作对半夏生长的影响

Table 1 Effects of *Tagetes erecta* rotation on the growth of *Pinellia ternata*

处理 Treatment	出苗率/% Emergence rate	叶面积/cm^2 Leaf area	株高/cm Plant height	产量/($kg \cdot hm^{-2}$) Yield
半夏连作 *Pinellia ternata* continuous cropping	34.07±0.54 b	8.33±0.59 b	8.37±0.16 b	2 412.50±6.31 b
万寿菊轮作 *Tagetes erecta* rotation	65.37±0.42 a	11.77±0.33 a	10.87±0.08 a	4 861.35±7.04 a

注:同列数据后不同小写字母表示不同处理差异显著($P<0.05$)。下表同。

Note: Different lowercase letters after data in the same column indicate significant differences between treatments ($P<0.05$). The same below.

由表2可知,与半夏连作处理相比,万寿菊轮作处理半夏的净光合速率(P_n)、气孔导度(G_s)、胞间CO_2浓度(C_i)、蒸腾速率(T_r)及叶绿素相对含量(SPAD值)分别显著提高了20.12%,100.00%,19.96%,48.77%和18.35%。上述结果表明万寿菊轮作能显著促进半夏生长并增强其光合能力,这与已有研究认为连作会影响作物的营养生长并降低作物的光合速率,而轮作可缓解抑制效应的结论[21]相符。

表2 万寿菊轮作对半夏光合生理的影响

Table 2 Effects of *Tagetes erecta* rotation on the photosynthetic physiology of *Pinellia ternata*

处理 Treatment	P_n/($\mu mol \cdot m^{-2} \cdot s^{-1}$)	G_s/($mmol \cdot s^{-1}$)	C_i/($\mu mol \cdot mol^{-1}$)	T_r/($\mu mol \cdot m^{-2} \cdot s^{-1}$)	SPAD值 SPAD value
半夏连作 *Pinellia ternata* continuous cropping	10.34±0.23 b	0.09±0.01 b	197.00±6.08 b	1.62±0.06 b	41.37±1.15 b
万寿菊轮作 *Tagetes erecta* rotation	12.42±0.08 a	0.18±0.01 a	236.33±3.51 a	2.41±0.05 a	48.96±0.49 a

2.2 万寿菊轮作对半夏根际土壤养分含量及酶活性的影响

由表3可知,与半夏连作处理相比,万寿菊轮作后半夏根际土壤pH及有机质、全氮、全钾含量分别显著提高了6.60%,6.54%,26.96%和6.35%($P<0.05$),但土壤全磷含量无显著变化。

表3 万寿菊轮作对半夏根际土壤养分含量的影响

Table 3 Effects of *Tagetes erecta* crop rotation on rhizosphere soil nutrients content of *Pinellia ternata*

处理 Treatment	pH	有机质含量/($g \cdot kg^{-1}$) OM content	全氮含量/($g \cdot kg^{-1}$) TN content	全磷含量/($g \cdot kg^{-1}$) TP content	全钾含量/($g \cdot kg^{-1}$) TK content
半夏连作 *Pinellia ternata* continuous cropping	6.06±0.02 b	45.43±1.28 b	1.15±0.00 b	0.30±0.01 a	11.49±0.15 b
万寿菊轮作 *Tagetes erecta* rotation	6.46±0.01 a	48.40±1.28 a	1.46±0.00 a	0.29±0.01 a	12.22±0.10 a

不同种植模式下半夏根际土壤酶活性如表4所示。由表4可知,与半夏连作处理相比,万寿菊轮作后半夏根际土壤脲酶活性和多酚氧化酶活性分别显著增加了80.22%和64.79%;蔗糖酶活性虽增加了14.73%,但与半夏连作处理差异不显著。上述结果表明,万寿菊轮作对半夏根际土壤全氮、全钾、有机质含量有显著提高作用,还能改善因半夏连作而导致的土壤酸化,并可增强土壤酶活性。

表 4　万寿菊轮作对半夏根际土壤酶活性的影响

Table 4　Effects of *Tagetes erecta* crop rotation on rhizosphere soil enzyme activities of *Pinellia ternata*　U/g

处理 Treatment	脲酶活性 Urease activity	蔗糖酶活性 Sucrase activity	多酚氧化酶活性 Polyphenol oxidance activity
半夏连作 *Pinellia ternata* continuous cropping	237.90±18.53 b	9.03±0.11 a	4.09±0.53 b
万寿菊轮作 *Tagetes erecta* rotation	428.75±2.26 a	10.36±1.18 a	6.74±0.82 a

2.3　万寿菊轮作对半夏根际土壤微生物群落多样性的影响

覆盖率反映测序结果的准确性,由表5可知,所有样本测序数据的覆盖率均超过98%,表明结果可靠。香农指数反映土壤微生物群落的多样性,Sobs指数、Ace指数和Chao 1指数反映土壤微生物群落的丰富度。由表5可知,与半夏连作处理相比,万寿菊轮作处理半夏根际土壤细菌的多样性和丰富度显著提升。其中万寿菊轮作处理半夏根际土壤细菌的Sobs指数、香农指数、Ace指数和Chao 1指数较半夏连作处理分别显著提高了4.10%,1.60%,7.72%和7.62%,表明轮作显著增加了土壤细菌群落的丰富度和多样性。

由表6可知,与半夏连作处理相比,万寿菊轮作处理半夏根际土壤真菌的Sobs指数和Chao 1指数稍有下降,但差异不显著;Ace指数显著提高了3.49%($P<0.05$);香农指数显著降低。表明万寿菊轮作提高了半夏根际土壤真菌群落的丰富度,但降低了其多样性。

表 5　万寿菊轮作对半夏根际土壤细菌 Alpha 多样性的影响

Table 5　Effects of *Tagetes erecta* crop rotation on bacterial Alpha diversity in the rhizosphere soil of *Pinellia ternata*

处理 Treatment	Sobs 指数 Sobs index	香农指数 Shannon index	Ace 指数 Ace index	Chao1 指数 Chao1 index	覆盖率/% Coverage
半夏连作 *Pinellia ternata* continuous cropping	2 591.33±7.64 b	6.25±0.04 b	3 028.15±61.62 b	3 007.13±70.41 b	98.63
万寿菊轮作 *Tagetes erecta* rotation	2 697.67±18.56 a	6.35±0.03 a	3 261.95±29.31 a	3 236.41±49.49 a	98.47

表 6　万寿菊轮作对半夏根际土壤真菌 Alpha 多样性的影响

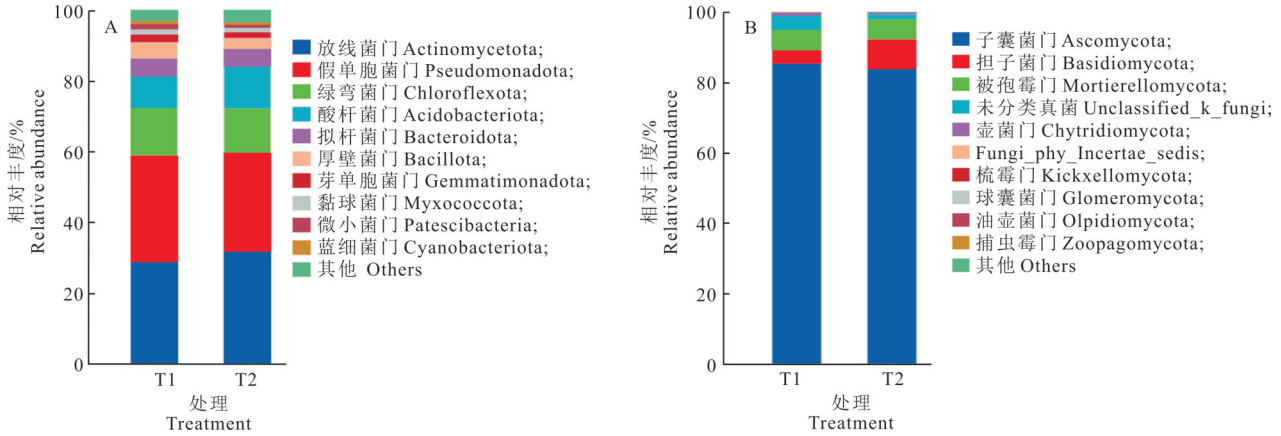
Table 6　Effects of *Tagetes erecta* crop rotation on fungal Alpha diversity in the rhizosphere soil of *Pinellia ternata*

处理 Treatment	Sobs指数 Sobs index	香农指数 Shannon index	Ace 指数 Ace index	Chao 1指数 Chao1 index	覆盖率/% Coverage
半夏连作 *Pinellia ternata* continuous cropping	537.33±16.80 a	3.94±0.07 a	552.98±7.40 b	585.39±29.09 a	99.84
万寿菊轮作 *Tagetes erecta* rotation	503.67±27.30 a	3.35±0.32 b	572.28±6.86 a	573.92±11.90 a	99.84

2.4　万寿菊轮作对半夏根际土壤细菌和真菌群落结构的影响

2.4.1　*万寿菊轮作对半夏根际土壤细菌和真菌在门水平结构的影响*　由图1-A可知,半夏根际土壤主要优势细菌门包括放线菌门(Actinomycetota)、假单胞菌门(Pseudomonadota)、绿弯菌门(Chloroflexo)、酸杆菌门(Acidobacteriota)、拟杆菌门(Bacteroidota)等。与半夏连作处理相比,万寿菊轮作处理显著改变了半夏根际土壤细菌群落的组成结构。其中放线菌门和酸酐菌门的相对丰度分别增加了10.47%和33.37%,表明轮作对这2类细菌有明显的促进作用。假单胞菌门、绿弯菌门和拟杆菌门的相对丰度分别降低8.27%,6.48%和2.55%,表明轮作可能在一定程度上抑制了这些菌群的生长。

由图1-B可知,半夏根际土壤主要优势真菌门包括子囊菌门(Ascomycota)、担子菌门(Basidiomycota)、被孢霉门(Mortierellomycota)、未分类真菌及壶菌门(Chytridiomycota)等,其中子囊菌门为第一优势菌门,其相对丰度超过80%。与半夏连作处理相比,万寿菊轮作处理半夏根际土壤子囊菌门的相对丰度下降了1.83%,但差异不显著;担子菌门的相对丰度显著上升116.41%。表明轮作对半夏根际土壤真菌群落的结构特别是担子菌门具有显著的调控作用。



T1. 半夏连作;T2. 万寿菊轮作。下图同。

T1. *Pinellia ternata* continuous crocropping; T2. *Tagetes erecta* rotation. The same below.

图 1 万寿菊轮作对半夏根际土壤细菌(A)和真菌(B)在门水平的影响

Fig. 1 Effects of *Tagetes erecta* crop rotation on bacterial(A) and fungal(B) communities at the phylum level in the rhizosphere soil of *Pinellia ternata*

2.4.2 万寿菊轮作对半夏根际土壤细菌和真菌在属水平结构的影响 由图 2-A 可知,半夏连作和万寿菊轮作处理半夏根际土壤中的主要优势细菌属有节杆菌属(*Arthrobacter*)、类诺卡氏菌属(*Nocardioides*)、鞘氨醇单胞菌属(*Sphingomonas*)等;与半夏连作处理相比,万寿菊轮作处理半夏根际土壤节杆菌属的相对丰度提高了 22.20%,但类诺卡氏菌属和鞘氨醇单胞菌属的相对丰度分别降低 13.22% 和 11.08%。上述结果表明,不同种植模式对半夏根际土壤细菌群落结构在属水平上具有明显影响,尤其对节杆菌属等特定类群存在选择性富集或抑制效应。

由图 2-B 可知,半夏根际土壤的主要优势真菌属有多孢菌属(*Plectosphaerella*)、链格孢属(*Alternaria*)、碘孢属(*Iodophanus*)等;与半夏连作处理相比,万寿菊轮作处理半夏根际土壤链格孢属的相对丰度显著提升,而碘孢属的相对丰度显著降低。上述结果表明,万寿菊轮作对半夏根际土壤真菌群落结构有显著影响,尤其对潜在病原类群具有重要的调控作用。

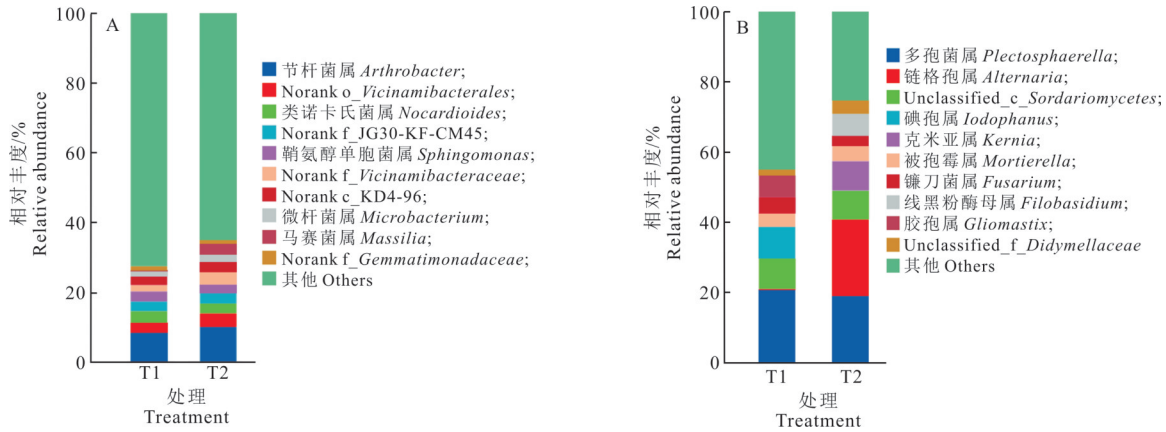


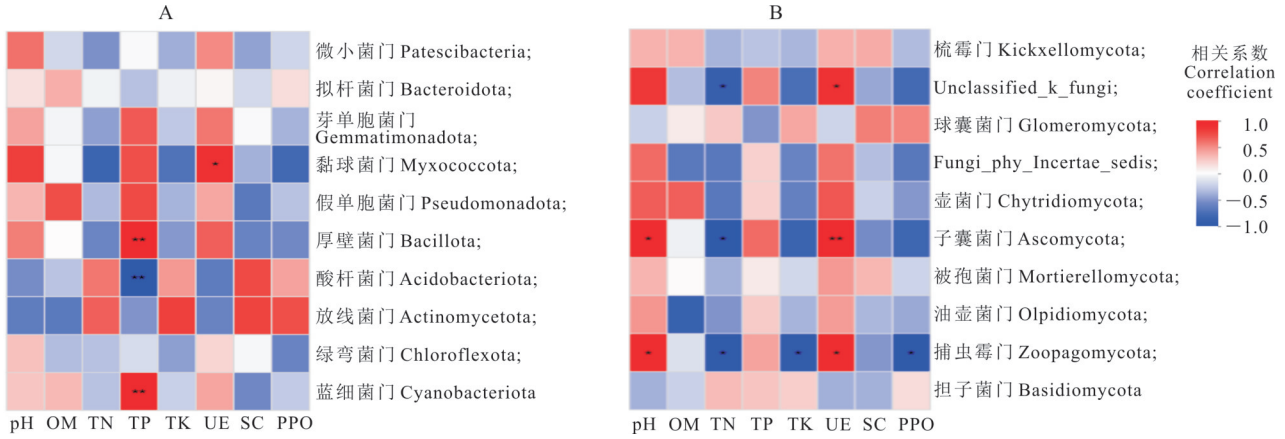
图 2 万寿菊轮作对半夏根际土壤细菌(A)和真菌(B)在属水平结构的影响

Fig. 2 Effects of *Tagetes erecta* crop rotation on bacterial(A) and fungal(B) communities at the genus level in the rhizosphere soil of *Pinellia ternata*

2.5 万寿菊轮作模式下半夏根际土壤养分含量、酶活性与门水平微生物群落结构的相关性

万寿菊轮作模式下半夏根际土壤养分含量、酶活性与门水平微生物群落结构的相关性分析结果如图 3 所示。由图 3-A 可知,厚壁菌门和蓝细菌门相对丰度与土壤全磷含量呈显著正相关;黏球菌门相对丰度与土壤脲酶活性呈显著正相关;酸杆菌门相对丰度与土壤全磷含量呈显著负相关。由图 3-B 可知,子囊菌门、捕虫霉门相对丰度与土壤 pH、土壤脲酶活性呈显著正相关,但与土壤全氮含量呈显著

负相关。上述结果表明，万寿菊轮作通过重塑半夏根际土壤微生物群落结构，特别是富集有益功能菌群并抑制病原菌群，从而促进土壤健康。



OM. 有机质含量；TN. 全氮含量；TP. 全磷含量；TK. 全钾含量；UE. 脲酶活性；SC. 蔗糖酶活性；PPO. 多酚氧化酶活性。*. $P<0.05$；**. $P<0.01$。

OM. Organic matter content; TP. Total nitrogen content; TP. Total phosphorus content; TK. Total potassium content; UE; Urease activity; SC. Sucrase activity; PP. Polyphenol oxidase activity. *. $P<0.05$; **. $P<0.01$.

图 3　万寿菊轮作模式下半夏根际土壤养分含量、酶活性与门水平细菌（A）和真菌（B）群落结构的相关性

Fig. 3　Correlation of rhizosphere soil nutrients, enzyme activities, and bacterial (A) and fungal (B) phylum-level community structure in *Pinellia ternata* under *Tagetes erecta* rotation

3　讨　论

3.1　万寿菊轮作对半夏生长生理的影响

已有研究表明，建立合理的栽培模式能有效改良杭白菊根际土壤肥力、优化微生物群落结构，进而促进作物的生长发育并提高产量[22]。本研究结果表明，万寿菊轮作能显著提升半夏的出苗率、叶面积、株高和产量，并明显改善其光合性能，这与袁洪超等[23]关于轮作可缓解连作障碍的结论一致。已有研究表明，轮作棉花[24]和胡麻[25]等可提高作物的净光合速率等光合参数。在本研究中，万寿菊轮作后半夏净光合速率等光合参数显著增加，表明光合作用的增强并非气孔限制所致。因此，万寿菊轮作通过改善土壤理化性质、优化微生物群落结构等多重途径，促进了半夏的生长生理，提高了半夏产量。

3.2　万寿菊轮作对半夏根际土壤理化性质和酶活性的影响

作为一项重要的农艺措施，轮作能够显著提升土壤养分含量[26]。酶作为驱动土壤养分循环的关键催化剂，其活性直接反映了土壤养分转化能力的强弱[27]。其中土壤蔗糖酶和多酚氧化酶参与有机质的降解过程[28]，土壤脲酶则直接参与氮元素的转化过程，催化尿素水解[29]。本研究结果显示，万寿菊轮作处理半夏根际土壤有机质、全氮、全钾含量和土壤酶活性均显著高于半夏连作处理，这与前人的研究结果[30-31]一致，其机制可能是万寿菊轮作增强半夏根际土壤酶活性，进而促进了根际土壤养分的转化与积累。

3.3　万寿菊轮作对半夏根际土壤微生物群落多样性与结构的影响

土壤微生物在土壤生态系统中扮演着重要角色，包括促进土壤养分转化[32]、参与土壤有机质形成[33]及土壤健康与生物调控[34]等，对植物的生长发育和养分吸收具有促进作用。本研究结果显示，与半夏连作相比，万寿菊轮作虽未显著改变半夏根际土壤微生物的整体菌群结构，但其相对丰度发生了明显变化。在门水平上，万寿菊轮作显著提高了放线菌门、酸杆菌门、被孢霉门和担子菌门等有益菌门的相对丰度，而假单胞菌门等潜在有害菌门的相对丰度下降。这些变化对半夏根际微生态环境产生了多方面积极的影响。据相关文献报道，放线菌门与酸杆菌门对植物的健康具有重要作用，其中放线菌门具有生物防治作用，可提升植物的抗逆性[35-36]；酸杆菌门可通过促进营养元素循环而优化植物根际土壤环境[37]。在属水平上，万寿菊轮作致使节杆菌属的相对丰度显著增加。作为一种常见的有益菌，节杆菌属可有效抑制土传病原菌（如镰刀菌属）的生长[38]。这些微生物群落结构的优化，共同构建了有利于半夏生长的健康根际微生态

环境。

相关性分析表明,在细菌群落中,厚壁菌门和蓝细菌门相对丰度与土壤全磷含量呈显著正相关,表明其在磷素活化中起关键作用。其中厚壁菌门中的多种菌属具有溶磷能力,能够通过分泌有机酸促进难溶性磷转化为可溶性磷[39]。酸杆菌门相对丰度与全磷含量呈显著负相关,这与其作为寡营养型细菌,更适应低磷环境的生态策略有关[40]。此外,黏球菌门相对丰度与土壤脲酶活性呈显著正相关,表明黏球菌可通过调控土壤微生物群落结构,间接增强尿素水解脲酶活性[41]。在真菌群落方面,子囊菌门、捕虫霉门相对丰度与土壤pH和脲酶活性呈显著正相关,与土壤全氮含量呈显著负相关,说明子囊菌门在低氮土壤中通过提升脲酶活性来获取氮源,以此获得竞争优势[42]。

4 结 论

万寿菊轮作促进了半夏的生长,提高了半夏产量,同时也提高了半夏根际土壤全氮、全钾、有机质含量和土壤脲酶、蔗糖酶、多酚氧化酶活性,增加了半夏根际土壤微生物细菌的多样性和丰富度,使有益菌相对丰度增加,有害菌相对丰度减少,有效缓解了半夏连作障碍。

[参考文献]

[1] 陈华鑫,赵文霞,刘晓彦. 半夏及其药对研究进展[J/OL]. 中华中医药学刊,2025:1-12.(2025-05-12). https://link.cnki.net/urlid/21.1546.R.20250512.0918.002.
CHEN H X,ZHAO W X,LIU X Y. Research progress of pinelliae rhizoma and its drug pairs[J/OL]. Chinese Archives of Traditional Chinese Medicine,2025:1-12.(2025-05-12). https://link.cnki.net/urlid/21.1546.R.20250512.0918.002.

[2] 赵源,邓蓉,黄钧. 半夏连作障碍成因及防治研究进展[J]. 应用与环境生物学报,2022,28(4):1102-1108.
ZHAO Y,DENG R,HUANG J. Research advances on causes and prevention for the continuous scropping obstacle of *Pinellia ternata*[J]. Chinese Journal of Applied and Environmental Biology,2022,28(4):1102-1108.

[3] 刘诗蓉,王红兰,孙辉,等. 半夏连作对根际土壤微生物群落的影响研究[J]. 中草药,2022,53(4):1148-1155.
LIU S R,WANG H L,SUN H,et al. Effects of continuous cropping of *Pinellia ternata* on rhizospheres' microbial community[J]. Chinese Traditional and Herbal Drugs,2022,53(4):1148-1155.

[4] 万子玉,李巧,赖月月,等. 半夏酚酸类化感物质积累规律研究[J]. 生态毒理学报,2021,16(6):335-344.
WAN Z Y,LI Q,LAI Y Y,et al. Accumulation and secretion of pinellitic acid allelochemicals in *Pinellia ternata*(Thunb.)Breit[J]. Asian Journal of Ecotoxicology,2021,16(6):335-344.

[5] 徐筋燕,何晓兰,邵明灿,等. 不同种植模式对栝楼根际土壤微生物群落多样性的影响[J]. 南方农业学报,2024,55(4):920-931.
XU J Y,HE X L,SHAO M C,et al. Effects of different planting patterns on microbial community diversity in rhizosphere soil of *Trichosanthes kirilowii* Maxim[J]. Journal of Southern Agriculture,2024,55(4):920-931.

[6] 于海权,于宏蕊,刘思宇,等. 人参-桔梗等轮作对参后地土壤微生态的影响[J/OL]. 吉林农业大学学报,2023:1-12.(2023-06-25). https://doi.org/10.13327/j.jjlau.2021.0127.
YU H Q,YU H R,LIU S Y,et al. Effects of ginseng *Platycodon* grandiflorum rotation on soil microecology in ginseng field[J/OL]. Journal of Jilin Agricultural University,2023:1-12.(2023-06-25). https://doi.org/10.13327/j.jjlau.2021.0127.

[7] 张晓波. 生物炭施用对菊花连作土壤性质及其生长的影响[J]. 江苏农业科学,2024,52(22):162-167.
ZHANG X B. Effects of biochar application on soil properties and growth of chrysanthemum under continuous cropping[J]. Jiangsu Agricultural Sciences,2024,52(22):162-167.

[8] 秦绍龙,祁桥伟,刘杰,等. 氯氧消毒剂对设施土壤生物学性质的影响[J]. 西北农林科技大学学报(自然科学版),2019,47(10):106-112.
QIN S L,QI Q W,LIU J,et al. Effect of chlorine-oxygen disinfectant on biological properties of facility soil[J]. Journal of Northwest A&F University(Natural Science Edition),2019,47(10):106-112.

[9] 张翔宇,陈晓芳,柳敏,等. 半夏轮作土壤丛枝菌根真菌多样性与环境因子相关性研究[J]. 江苏农业科学,2024,52(2):213-220.
ZHANG X Y,CHEN X F,LIU M,et al. Correlation between arbuscular mycorrhiza fungi diversity and environmental factors in rotation soil of *Pinellia ternata*[J]. Jiangsu Agricultural Sciences,2024,52(2):213-220.

[10] 何志贵. 半夏连作障碍发生机制与轮作修复研究[D]. 陕西杨凌:西北农林科技大学,2019.
HE Z G. Mechanism of continuous cropping obstacles and crop rotation restoration in *Pinellia ternata*[D]. Yangling,Shaanxi:Northwest A&F University,2019.

[11] 黎妍妍,冯吉,王林,等. 万寿菊-烟草轮作调理植烟土壤细菌群落结构的作用[J]. 中国烟草科学,2021,42(1):14-19.
LI Y Y,FENG J,WANG L,et al. Effects of marigold-tobacco rotation on bacterial community structure in tobacco rhizosphere soil[J]. Chinese Tobacco Science,2021,42(1):14-19.

[12] 黎妍妍,彭五星,张婷,等. 万寿菊秸秆堆肥在缓解烟草连作障碍中的作用[J]. 南方农业学报,2022,53(2):451-459.
LI Y Y,PENG W X,ZHANG T,et al. Effects of marigold straw compost on alleviating continuous cropping obstacles of tobacco[J]. Journal of Southern Agriculture,2022,53(2):451-459.

[13] 刘皓．改良处理对连作色素万寿菊产量及土壤环境的影响[D]．乌鲁木齐：新疆农业大学，2022.
LIU H. Effects of improved treatment on yield and soil environment of continuous cropping pigment marigold[D]. Urumqi: Xinjiang Agricultural University, 2022.

[14] 中华人民共和国农业部．土壤检测：第2部分 土壤pH的测定：NY/T1121.2—2006[S]．北京：中国农业出版社，2006.
Ministry of Agriculture of the People's Republic of China. Soil testing: Part 2 method for determination of soil pH: NY/T 1121.2—2006[S]. Beijing: China Agriculture Press, 2006.

[15] 中华人民共和国农业部．土壤检测：第6部分 土壤有机质的测定：NY/T 1121.6—2006[S]．北京：中国农业出版社，2006.
Ministry of Agriculture of the People's Republic of China. Soil testing: Part 6 method for determination of soil organic matter: NY/T 1121.6—2006[S]. Beijing: China Agriculture Press, 2006.

[16] 国家林业局．森林土壤磷的测定：LY/T 1232—2015[S]．北京：中国标准出版社，2016.
State Forestry Administration of the People's Republic of China. Determination of total phosphorus in forest soil: LY/T 1232—2015[S]. Beijing: Standards Press of China, 2016.

[17] 国家林业局．森林土壤氮的测定：LY/T 1228—2015[S]．北京：中国标准出版社，2015.
State Forestry Administration of the People's Republic of China. Nitrogen determination methods of forest soils: LY/T 1228—2015[S]. Beijing: Standards Press of China, 2015.

[18] 国家林业局．森林土壤钾的测定：LY/T 1234—2015[S]．北京：中国标准出版社，2016.
State Forestry Administration of the People's Republic of China. Potassium determination methods of forest soils: LY/T 1234—2015[S]. Beijing: Standards Press of China, 2016.

[19] SCHLOSS P D, WESTCOTT S L, RYABIN T, et al. Introducing mothur: open-source, platform-independent, community-supported software for describing and comparing microbial communities[J]. Applied and Environmental Microbiology, 2009, 75(23): 7537-7541.

[20] ALSHAWAQFEH M, BASHAIREH A, SERPEDIN E, et al. Consistent metagenomic biomarker detection via robust PCA[J]. Biology Direction, 2017, 12(1): 4.

[21] 杜光辉，赵银鸿，李蛟男，等．工业大麻-辣椒轮作对辣椒生长和生理特性的影响[J]．热带作物学报，2023，44(8)：1644-1651.
DU G H, ZHAO Y H, LI J N, et al. Effects of industrial hemp-chili pepper rotation on the growth and physiological characteristics of chili pepper[J]. Chinese Journal of Tropical Crops, 2023, 44(8): 1644-1651.

[22] 孙健，叶玲珍，汪传宝，等．轮作模式对杭白菊生长、品质和根际土壤环境的影响[J/OL]．浙江农业学报，2025：1-12(2025-10-15). https://link.cnki.net/urlid/33.1151.s.20251015.1111.002.
SUN J, YE L Z, WANG C B, et al. Effects of rotation patterns on growth, quality and rhizosphere soil environment of *Chrysanthemum morifolium* Ramat. cv. Hangbaiju[J/OL]. 2025: 1-12 (2025-10-15). https://link.cnki.net/urlid/33.1151.s.20251015.1111.002.

[23] 袁洪超，郭凤霞，陈垣，等．高寒区轮作模式对当归田土壤特性及药材产量的影响[J]．草业学报，2018，27(10)：183-193.
YUAN H C, GUO F X, CHEN Y, et al. Effect of crop rotation patterns on field soil properties and medicinal material yield for *Angelicae sinensis* in alpine regions[J]. Acta Prataculturae Sinica, 2018, 27(10): 183-193.

[24] 张占琴，王建江，颉健辉，等．轮作倒茬对棉花光合性能的影响[J]．干旱地区农业研究，2022，40(2)：38-46.
ZHANG Z Q, WANG J J, XIE J H, et al. Photosynthetic characteristics of cotton under crop rotation conditions[J]. Agricultural Research in the Arid Areas, 2022, 40(2): 38-46.

[25] 王海娣，高玉红，吴兵，等．轮作模式对旱地胡麻光合生理特性及其产量的影响[J]．中国油料作物学报，2024，46(1)：155-165.
WANG H D, GAO Y H, WU B, et al. Effects of crop rotation patterns on photosynthetic physiological parameters and yield of oilseed flax in dryland[J]. Chinese Journal of Oil Crop Sciences, 2024, 46(1): 155-165.

[26] 赵春夺，李玉娥，刘友杰，等．轮作与连作对烟草根际土壤养分、酶活性及微生物群落结构的影响[J]．生物技术通报，2025，41(4)：312-322.
ZHAO C D, LI Y E, LIU Y J, et al. Effects of rotating cropping and continuous cropping on soil nutrients, enzyme activities and microbial community structure of rhizosphere soil in tobacco[J]. Biotechnology Bulletin, 2025, 41(4): 312-322.

[27] 申浩，吴卫，侯凯，等．不同施肥水平对川半夏产量和有效成分的影响研究[J]．中国中药杂志，2011，36(8)：963-967.
SHEN H, WU W, HOU K, et al. Effect of different fertilizing levels on yields and efficiency components of *Pinellia ternata* from Sichuan[J]. China Journal of Chinese Materia Medica, 2011, 36(8): 963-967.

[28] 张华东，李侨，周少梁，等．砂管灌与有机肥对土壤蔗糖酶活性及骏枣品质的影响[J]．节水灌溉，2024(10)：60-67.
ZHANG H D, LI Q, ZHOU S L, et al. Effects of sand tube irrigation and organic fertilizer on soil sucrase activity and Jujube quality[J]. Water Saving Irrigation, 2024(10): 60-67.

[29] RANA M A, MAHMOOD R, ALI S. Soil urease inhibition by various plant extracts[J]. PLoS ONE, 2021, 16(10): e0258568.

[30] 周丹，韦雪娇，李开阳，等．紫苏轮作对半夏连作根际土壤微生物群落结构、功能及理化性质的影响[J]．江苏农业科学2025，53(12)：235-249.
ZHOU D, WEI X J, LI K Y, et al. Effects of perilla rotation on microbial community structure, function and physicochemical properties of rhizosphere soil in *Pinellia ternata* continuous cropping[J]. Jiangsu Agricultural Sciences, 2025, 53(12): 235-249.

[31] QIN J H, BIAN C S, DUAN S G, et al. Effects of different rotation cropping systems on potato yield, rhizosphere microbial

community and soil biochemical properties[J]. Frontiers Plant Science,2022,13:999730.

[32] WANG X Y,YAO B,YANG H L,et al. Microbial drivers of soil C:N:P stoichiometry dynamics during ecological restoration in sandy ecosystems[J]. Applied Soil Ecology,2025,213:106321.

[33] ZHANG Q L,LI X J,CHEN G S,et al. Straw tissues quality influence the formation pathways of soil organic carbon via living microbes or microbial necromass in a Mollisols,Northeast China[J/OL]. Journal of Integrative Agriculture,2025,(2025-09-22). https:/doi. org/10. 1016/j. jia. 2025. 09. 020.

[34] 孔亚丽,秦华,朱春权,等. 土壤微生物影响土壤健康的作用机制研究进展[J]. 土壤学报,2024,61(2):331-347.
KONG Y L,QIN H,ZHU C Q,et al. Research progress on the mechanism by which soil microorganisms affect soil health [J]. Acta Pedological Sinica,2024,61(2):331-347.

[35] XIE P,HUANG K R,DENG A H,et al. The diversity and abundance of bacterial and fungal communities in the rhizosphere of *Cathaya argyrophylla* are affected by soil physicochemical properties[J]. Frontiers in Microbiology,2023,14:1111087.

[36] 矣小鹏,何永宏,施竹凤,等. 烟蒜轮作植烟土壤微生物群落多样性对养分限制的响应特征[J]. 西南农业学报,2025,38(3):441-453.
YI X P,HE Y H,SHI Z F,et al. Response characteristics of microbial community diversity to nutrient limitation in tobacco-garlic rotation soil[J]. Southwest China Journal of Agricultural Sciences,2025,38(3):441-453.

[37] GRAZIELLY M D D V,JESSICA M,SELENE M D A G U D,et al. Biodegradation of azo dye-containing wastewater by activated sludge:a critical review[J]. World J Microbiol Biotechnol,2021,37(6):101.

[38] ROYCHOWDHURY M,STERNHAGEN J,XIN Y,et al. Evolution of pathogenicity in obligate fungal pathogens and allied genera[J]. PeerJ,2022,10: e13794.

[39] PIOTR K,BLISS U F,MARCIN G,et al. Mixed growth of Salix species can promote phosphate-solubilizing bacteria in the roots and rhizosphere[J]. Front Microbiology,2022,13:1006722.

[40] 肖健,韦星璇,杨尚东,等. 间作西瓜对甘蔗产量效益和根际土壤理化性质及微生态的影响[J]. 作物学报,2023,49(2):526-538.
XIAO J,WEI X X,YANG S D,et al. Effects of intercropping with watermelons on cane yields,soil physicochemical properties and micro-ecology in rhizospheres of sugarcanes[J]. Acta Agronomica Sinica,2023,49(2):526-538.

[41] 董璐,王立新. 生物炭与不同芽孢杆菌配施对万寿菊基质性质及微生物群落组成的影响[J]. 北方园艺,2023(17):61-69.
DONG L,WANG L X. Effects of biochar combined with different *Bacillus* on matrix properties and microbial community composition of *Tagetes erecta*[J]. Northern Horticulture,2023(17):61-69.

[42] LING N,WANG T,KUZYAKOV Y. Rhizosphere bacteriome structure and functions[J]. Nature Communications,2022,13:836.

(责任编辑:陈丽)