

新疆不同地区野杏内生真菌群落的多样性

陈虹瑾, 施万斌, 王彩霞, 许子言, 马雄, 马荣*

新疆农业大学林学与风景园林学院, 新疆 乌鲁木齐 830052

摘要: 为探究分析我国仅分布在新疆维吾尔自治区的野杏 *Prunus armeniaca* 内生真菌的群落和分布特征, 于 2023 年至 2024 年在伊犁哈萨克自治州新源县吐尔根乡、新源县植物园、霍城县福寿山和昌吉回族自治州的硫磺沟等地区采集健康野杏的叶、芽、枝、树皮等部位, 采用组织分离法进行内生真菌的分离, 结合形态学和 ITS 序列进行菌株的种类鉴定, 同时分析不同地区野杏内生真菌的群落多样性。共分离得到 2 749 株内生真菌, 鉴定为 6 纲、20 目、38 科、64 属, 其中以座囊菌纲 Dothideomycetes 为优势菌纲(IF=88.7%), 优势目为格孢腔菌目 Pleosporales (IF=83.41%), 优势科为座囊菌科 Dothideaceae (69.33%), 以链格孢属 *Alternaria* 为优势属(IF=67.01%); 新源县吐尔根乡、新源县植物园、霍城县福寿山和昌吉硫磺沟 4 个不同样地之间的共有属有 10 个, 特有属依次为 8、14、12 和 6 个。 α 多样性指数分析表明物种多样性最高的样地是吐尔根乡($H'=1.206\pm 0.111$, $D=0.531\pm 0.050$), 最低的是昌吉硫磺沟样地($H'=0.983\pm 0.128$, $D=0.468\pm 0.055$)。基于 β 多样性分析不同样地间的 Bray-Curtis 距离的 P 值显示昌吉硫磺沟与新源县吐尔根乡之间野杏内生真菌群落差异最显著(0.006 4)。本研究结果揭示了野杏内生真菌菌群具有丰富的多样性, 4 个不同样地的野杏内生真菌群落组成、相对多度及优势类群皆存在差异。

关键词: 野杏; 内生真菌群落; 多样性

[引用本文]

陈虹瑾, 施万斌, 王彩霞, 许子言, 马雄, 马荣, 2026. 新疆不同地区野杏内生真菌群落的多样性. 菌物学报, 45(4): 250211
Chen HJ, Shi WB, Wang CX, Xu ZY, Ma X, Ma R, 2026. Diversity of endophytic fungal communities in *Prunus armeniaca* in Xinjiang. Mycosystema, 45(4): 250211

Diversity of endophytic fungal communities in *Prunus armeniaca* in Xinjiang

CHEN Hongjin, SHI Wanbin, WANG Caixia, XU Ziyang, MA Xiong, MA Rong*

College of Forestry and Landscape Architecture, Xinjiang Agricultural University, Urumqi 830052, Xinjiang Uygur Autonomous Region, China

Abstract: The community structure and distribution patterns of endophytic fungi in wild apricot (*Prunus*

资助项目: 新疆维吾尔自治区杰出自然科学基金(2022D01E47)

This work was supported by the Outstanding Natural Science Foundation of Xinjiang Uygur Autonomous Region (2022D01E47).

*Corresponding author. E-mail: xjaumr@sina.com

Received: 2025-07-14; Accepted: 2025-10-07

armeniaca), an endemic species exclusively distributed in Xinjiang Uygur Autonomous Region, northwestern China was investigated. During 2023–2024, healthy plant tissues (leaves, buds, branches, bark) were collected from Turgun Town of Xinyuan County, Xinyuan County Botanical Garden, Fushou Mountain of Huocheng County, and Liuhuanguogou of Changji Hui Autonomous Prefecture. Endophytic fungi were isolated using tissue culture methods and identified through morphological analysis and ITS sequencing. The obtained 2 749 isolates were classified into 6 classes, 20 orders, 38 families, and 64 genera, with Dothideomycetes dominating at the class level (isolation frequency, IF=88.7%), Pleosporales at the ordinal level (IF=83.41%), Dothideaceae at the family level (69.33%), and *Alternaria* at the generic level (IF=67.01%). Ten genera were common to all sampling sites, while endemic genera numbered 8 in Turgun, 14 in Botanical Garden, 12 in Fushou Mountain, and 6 in Liuhuanguogou. α -Diversity was the highest in Turgun (Shannon $H' = 1.206 \pm 0.111$; Simpson $D = 0.531 \pm 0.050$) and lowest in Liuhuanguogou ($H' = 0.983 \pm 0.128$; $D = 0.468 \pm 0.055$). β -Diversity analysis revealed the most significant community divergence between Liuhuanguogou and Turgun (Bray-Curtis $P = 0.006$). These results demonstrate rich taxonomic diversity (64 genera) and distinct regional variations in community composition, relative abundance, and dominant taxa among wild apricot endophytes in Xinjiang.

Keywords: *Prunus armeniaca*; endophytic fungi; diversity analysis

野杏 *Prunus armeniaca* 属于蔷薇科杏属植物, 是世界栽培杏的原生起源物种、第三纪孑遗植物(张加延和张钊 2003), 新疆野杏仅分布于新疆伊犁地区的天山野果林内。近年来, 因环境变化、人为干扰以及野杏的天然更新, 野杏种群繁衍受阻、分布范围内数量减少、病害严重、退化趋势显著, 在伊犁调查各野生果树居群的种群非空间结构, 综合评定目前新疆野杏种群的健康状况为中等偏下, 其整个种群的生存状况较差, 急需开展保育恢复(杨其享等 2022)。

植物内生真菌生长在植物体内的特殊环境中, 在与植物的长期共同进化中寄主与内生菌间形成了互惠的共生关系(Tan & Zou 2001; Clay & Schardl *et al.* 2002; 李聪等 2023; Giger *et al.* 2024), 解析植物内生真菌的种群分布特征对保护植物起着重要的作用(臧威等 2014; 唐官美等 2024)。研究发现橡胶树不同组织内生真菌中子囊菌门占绝对优势(93%), 核心属为刺盘孢属 *Colletotrichum*、间座壳属 *Diaporthe*、镰孢菌属 *Fusarium*、木霉属 *Trichoderma* 和青霉属 *Penicillium* (Kaliane *et al.* 2020); 桫欏叶柄凋落物与活体组织的内生真菌群落存在显著差异, 部分内生真菌可能在宿主组织衰老后转为腐生生活, 参与生态系统物质循环(臧威等 2020)。对 7 个不同产地杜仲 *Eucommia ulmoides* 的树皮

内生真菌群落的研究结果表明, 杜仲树皮内生真菌具有丰富多样性且受产地影响显著(张青青等 2021); 对比云南、贵州、四川和西藏的 48 种水生植物内生真菌发现, 随着海拔升高, 内生真菌分离频率和多样性整体下降(Xu *et al.* 2025)。关于杏树内生真菌的研究, 国内仅有新疆轮台县、乌鲁木齐市、吐鲁番市和伊宁市 4 个地区的 10 个杏树品种的花芽、茎、叶和根 4 种器官中内生真菌群落多样性的研究, 发现真菌类群的组成存在较大差别(白周艳等 2011)。

天山腹地生长着一片亚洲面积最大、最密集原始野生果林, 主要分布于新源县、巩留县和塔城地区境内, 分布面积约 100 km², 对区域生物多样性和生态系统稳定性的维持至关重要(丁吉达等 2023; 尹马泉等 2025)。野杏作为天山野果林重要的建群树种及我国重要的种质资源, 对其健康状况及保护方面的研究至关重要(杨小平 2020)。然而关于野杏的研究主要集中在种质资源开发(董胜君等 2002; 刘娟 2015)、病虫害的诊断防控(Ye *et al.* 2020; 陈帅康等 2023; 刘楚丽等 2023)等。本研究在新疆野杏主要分布区新疆伊犁哈萨克自治州、昌吉回族自治州收集野杏样本, 分析不同地区野杏内生真菌的种类组成及多样性, 为深入了解野杏与内生真菌间的共生关系、野杏内生真菌资源的开发利用和保护奠定研究基础。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

在野杏的主要分布点新疆昌吉回族自治州硫磺沟和新疆伊犁哈萨克自治州的新源县吐尔根乡、新源县植物园和霍城县福寿山开展样品的采集, 样地详细信息见表 1。

1.2 采样方法

在供试的 4 个样地中分别设置一个 10 m × 10 m 的样方, 每个样方内通过五点取样法采集样本, 每个点分别选取样树间距大于 10 m 且胸径基本一致的 5 棵样树, 于 2023 年 11 月–2024 年 12 月的每月初采集野杏的一年生侧枝和主干树皮, 2023 年 11 月–2024 年 3 月的每月初采集杏芽, 2024 年 4 月–2024 年 10 月的每月初采集杏叶, 2024 年 6 月–2024 年 8 月的每月初采集杏果, 每个组织部位选择 20 个样本装入无菌保鲜袋, 4 °C 条件保存(Ye *et al.* 2020)。

1.3 内生真菌的分离和保存

将每次采集到的全部样本进行分离, 操作流程依次为: 自来水冲洗表面的灰尘, 无菌水漂洗 1 min, 75%乙醇漂洗 3 min, 3%次氯酸钠溶液漂洗 10 min, 无菌水漂洗 3 次, 灭菌的滤纸擦净水分后晾干备用。通过无菌水检测法验证表面消毒效果, 取最后一次漂洗用无菌水滴涂于 PDA 培养基上, 在 25 °C 的恒温培养箱中倒置培养 7 d, 观察是否有菌落生成, 若发现有菌落生成, 则证明表面消毒不彻底, 不可使用,

若无, 则证明后续实验所分离得到菌落为内生真菌而非表面附着的真菌(何佳等 2009; 吕佳等 2022)。

内生真菌的分离、纯化及保存: 将已经进行过表面消毒的组织块用手术刀在无菌条件下切割成 0.5 cm × 0.5 cm 的组织块, 每块 PDA 培养基平板放置 5 个组织块, 共 4 个重复, 25 °C 恒温培养, 每日观察, 待能观察到明显菌丝后挑取尖端菌丝到新的 PDA 培养基上, 同时挑取菌丝到含有 20%甘油的离心管中, 于–80 °C 冰箱冷冻保存(Ye *et al.* 2020)。

1.4 分子生物学鉴定和多样性分析

1.4.1 形态学及分子生物学鉴定

形态学鉴定参照《真菌鉴定手册》(魏景超 1979)和《真菌分类学》(邵力平等 1984), 分子生物学鉴定参考范鑫磊(2016)的报道。当特定序列与系统发育相关的参考序列之间的相似性 <95%, 则被认定为未鉴定菌株, >95%且≤97% 则被认定鉴定到属水平, >97%则被认定鉴定到种水平, 而≥99%则被鉴定为同种(Zhou *et al.* 2013), 并在 MycoBank (<http://www.mycobank.org/quicksearch.aspx>)网站中查询最新的真菌分类。

1.4.2 多样性分析

对鉴定到种的菌株按照纲、目、科、属依次进行分类, 内生真菌(属)数量进行多样性分析。研究中的分离频率、多样性指数、优势度指数和丰富度指数采用张青青等(2021)在杜仲内生真菌多样性研究中的方法。

表 1 研究区信息

Table 1 Sample collection point information

编号	详细地点	样地代码	林分类型	海拔
Sample code	Sampling site	Sample site code	Stand composition	Altitude/m
1	新疆昌吉回族自治州硫磺沟地区 Liuhuanggou Area, Changji Hui Autonomous Prefecture, Xinjiang	LHG	野杏纯林 Wild apricot forest	1 215
2	新疆伊犁哈萨克自治州新源县吐尔根乡 Turgun Town, Xinyuan County, Ili Kazakh Autonomous Prefecture, Xinjiang	Terg	野杏、野苹果混交林 Wild apricot and wild apple mixed forest	1 206
3	新疆伊犁哈萨克自治州新源县植物园 Xinyuan County Botanical Garden, Ili Kazakh Autonomous Prefecture, Xinjiang	ZWY	野杏、野苹果、野山楂、野核桃等混交林 Tianshan wild fruit forests	1 341
4	新疆伊犁哈萨克自治州霍城县福寿山 Fushou Mountain, Huocheng County, Ili Kazakh Autonomous Prefecture, Xinjiang	HC	野杏、野苹果、野山楂、野核桃等混交林 Tianshan wild fruit forests	1 248

分离频率(isolation frequency, IF)可比较不同地区野杏内生菌的优势菌群, 计算见公式(1)。

$$IF = \frac{\text{某一属内生真菌的菌株数}}{\text{分离出的总内生真菌数}} \times 100\% \quad (1)$$

利用 Shannon-Wiener 多样性指数(H')和 Simpson 优势度指数(D)评估不同地区野杏内生菌群落多样性。H'指数越大, 说明相应的内生真菌群落多样性越大, 群落复杂程度越高; D 指数正好相反, 其指数越大, 相应内生真菌群落多样性越小, 群落复杂程度越低。公式参考邓文祥等(2019)和张青青等(2021)的报道。

Shannon-Wiener 多样性指数(H'), P_i 指某一内生真菌占全部内生真菌总数的百分数。计算见公式(2)。

$$H' = -\sum_{i=1}^n (P_i)(\ln P_i) \quad (2)$$

Simpson 优势度指数(D), S 表示物种总数, P_i 为属于属/种 i 的个体在全部个体中的比例。计算见公式(3)。

$$D = \sum_{i=1}^s (P_i)^2 \quad (3)$$

Margalef 丰富度指数(R), S 表示物种数, N 表示样本总个体数。计算见公式(4)。

$$R = (S-1) / \ln N \quad (4)$$

Bray-Curtis 距离算法(BC), x_i, y_i 表示不同地区内生真菌群落属的数据。计算见公式(5)。

$$BC = \frac{\sum_{i=1}^n |x_i - y_i|}{\sum_{i=1}^n (x_i + y_i)} \quad (5)$$

通过软件 PAST 5.1 统计检验 ANOSIM 相似性分析吐尔根、霍城、植物园、硫磺沟 4 个样地之间野杏内生真菌群落 Jaccard 相似性系数和 Bray-Curtis 距离。

采用 IBM SPSS Statistics Version 22.0 统计软件进行单因素方差分析(one-way ANOVA), 分析所有野杏内生真菌的 Shannon-Wiener 多样性指数、Simpson 优势度指数、Margalef 丰富度指数在 $P=0.05$ 水平上的显著性。

不同地区野杏分离得到内生真菌群落结构组成、分离频率、丰度均具有一定差异。对稀有类群、常见类群、优势类群的定义: 某菌群占整体菌群的百分比 $\leq 1\%$ 为稀有类群, $1\% \sim 10\%$ 为常见类群, $\geq 10\%$ 为优势类群(庞雄飞和尤民生 1996)。

2 结果与分析

2.1 野杏内生真菌的群落组成

连续 14 个月从 4 个样地的野杏树上共收集到 3 840 份样本, 分离得到 2 749 株内生真菌, 鉴定出 6 纲、20 目、38 科、64 属真菌。隶属于座囊菌纲 Dothideomycetes、锤舌菌纲 Leotiomyces、蘑菇纲 Agaricomycetes、散囊菌纲 Eurotiomyces、盘菌纲 Pezizomycetes、粪壳菌纲 Sordariomycetes。其中座囊菌纲为优势菌纲, 共分离到 2 443 株, 占菌株总数的 88.7%; 格孢腔菌目 Pleosporales 为优势目, 占菌株总数的 83.41%; 座囊菌科 Dothideaceae 为优势科, 占菌株总数的 69.33%; 优势属为 *Alternaria*, 占菌株总数的 67.01% (图 1)。

2.2 不同样地野杏内生真菌群落优势度划分

2.2.1 伊犁新源县吐尔根乡野杏内生真菌群落优势度划分

从伊犁新源县吐尔根乡野杏样地中共分离得到 795 株内生真菌, 占总分离频率的 28.92%, 鉴定为 28 属, *Alternaria* (65.28%) 为优势属(图 1); 常见属 11 个: 亚隔孢壳属 *Didymella* (6.54%)、附球菌属 *Epicoccum* (5.53%)、枝孢霉属 *Cladosporium* (3.77%)、小穴壳属 *Dothiorella* (2.39%)、镰孢菌属 *Fusarium* (2.26%)、嗜果刀孢菌属 *Wilsonomyces* (1.89%)、曲霉属 *Aspergillus* (1.63%)、壳囊孢属 *Cytospora* (1.51%)、小球蕈菌属 *Microsphaeropsis* (1.38%)、假茎点霉属 *Nothophoma* (1.13%) 和茎点霉属 *phoma* (1.13%)。其余 16 个属均为稀有属(图 2)。

2.2.2 伊犁新源县植物园野杏内生真菌群落优势度划分

伊犁新源县植物园样本中共鉴定出 32 属, 共 644 株菌, 占总分离频率的 23.43%。*Alternaria* 为优势属, 分离频率为 66.93% (图 1); 常见属 9 个: *Epicoccum* (7.45%)、*Cladosporium* (5.43%)、*Aspergillus* (3.57%)、*Monilinia* (2.64%)、*Didymella* (2.48%)、*Fusarium* (1.40%)、壳二孢属 *Ascochyta* (1.24%)、*Nothophoma* (1.24%) 和 *Wilsonomyces* (1.24%); 其余 22 个属为稀有属(图 3)。

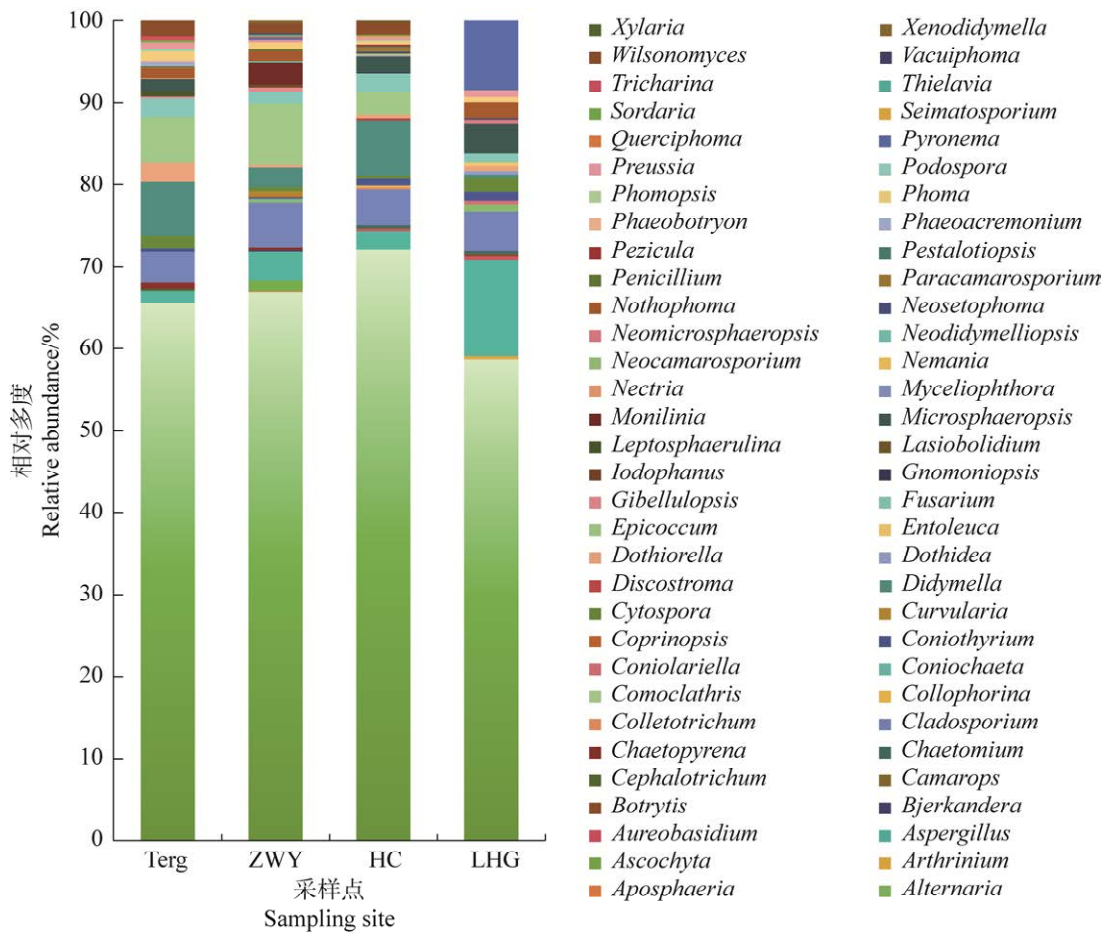


图 1 在属水平上不同地区野杏内生真菌群落组成和相对多度 Terg: 新源县吐尔根乡; ZWY: 新源县植物园; HC: 霍城县福寿山; LHG: 昌吉回族自治州硫磺沟; 下同

Fig. 1 Composition and relative abundance of endophytic fungal communities in *Prunus armeniaca* in different regions at the genus level. Terg: Turgun Town, Xinyuan County; ZWY: Xinyuan County Botanical Garden; HC: Fushou Mountain, Huocheng County; LHG: Liuhuanggou Area, Changji Hui Autonomous Prefecture. The same below.

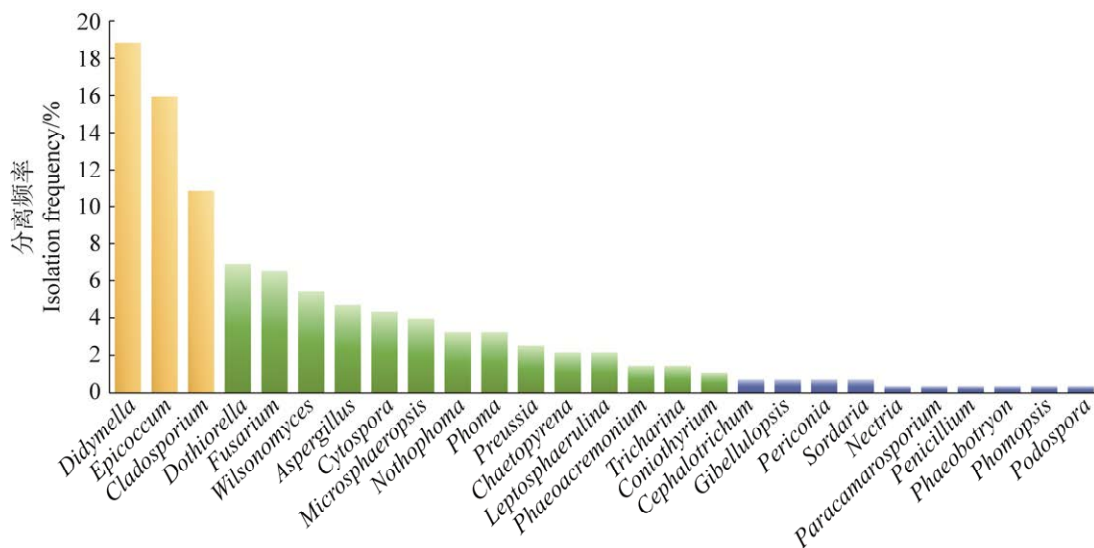


图 2 新源县吐尔根乡野杏内生真菌群落优势度划分

Fig. 2 The dominance classification of endophytic fungal communities in *Prunus armeniaca* from Turgun Town, Xinyuan County.

2.2.3 伊犁霍城县福寿山野杏内生真菌群落优势度划分

霍城县福寿山野杏样本中共鉴定出 31 属, 共 860 株菌, 占总分离频率的 31.28%。其中 *Alternaria* (72.09%) 为优势属(图 1); 常见属 7 个: *Didymella* (6.86%)、*Cladosporium* (4.41%)、*Epicoccum* (2.67%)、*Fusarium* (2.33%)、*Aspergillus* (2.21%)、*Microsphaeropsis* (1.86%) 和 *Wilsonomyces* (1.63%); 其余 23 个属为稀有属(图 4)。

2.2.4 昌吉硫磺沟野杏内生真菌群落优势度划分

昌吉硫磺沟野杏样本中共鉴定出 23 属, 共 464 株菌, 占总分离频率的 16.88%。其中 *Alternaria*

(58.62%) 和 *Aspergillus* (11.85%) 为优势属(图 1-LHG); 常见属 7 个: 火丝菌属 *Pyronema* (8.41%)、*Cladosporium* (4.74%)、*Microsphaeropsis* (3.66%)、*Nothophoma* (1.94%)、*Cytospora* (1.72%)、斜孢壳菌属 *Coniothyrium* (1.08%) 和 *Fusarium* (1.08%); 其余 14 个属为稀有属(图 5)。

2.3 不同样地野杏内生真菌特有属和共有属特征分析

2.3.1 不同样地野杏内生真菌共有属的分布情况

基于属水平上不同样地野杏样本中内生真菌群落的 Upset 图分析可知(图 6), 从新源县吐尔根乡、新源县植物园、霍城县福寿山、昌吉硫

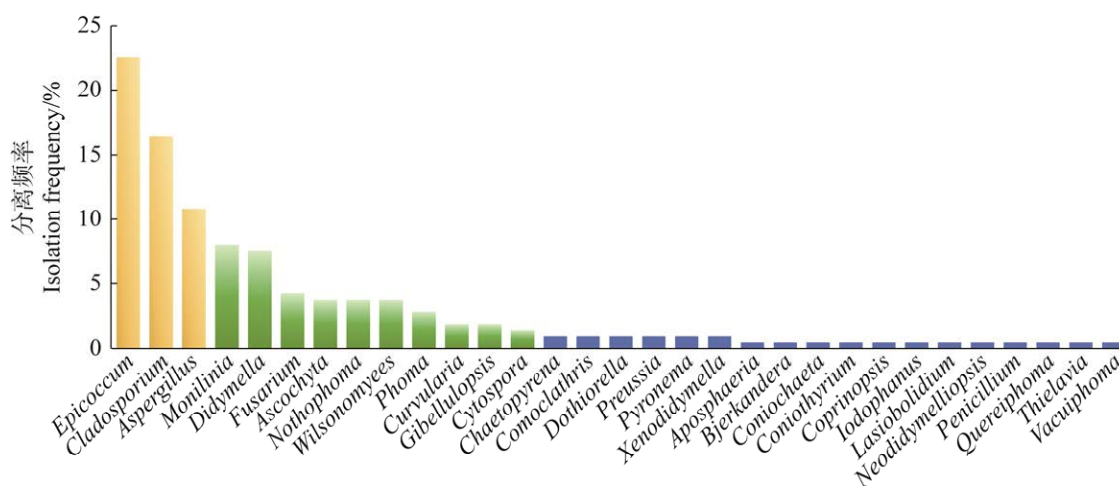


图 3 新源县植物园内生真菌群落优势度划分

Fig. 3 The dominance classification of endophytic fungal communities in *Prunus armeniaca* from botanical garden, Xinyuan County.

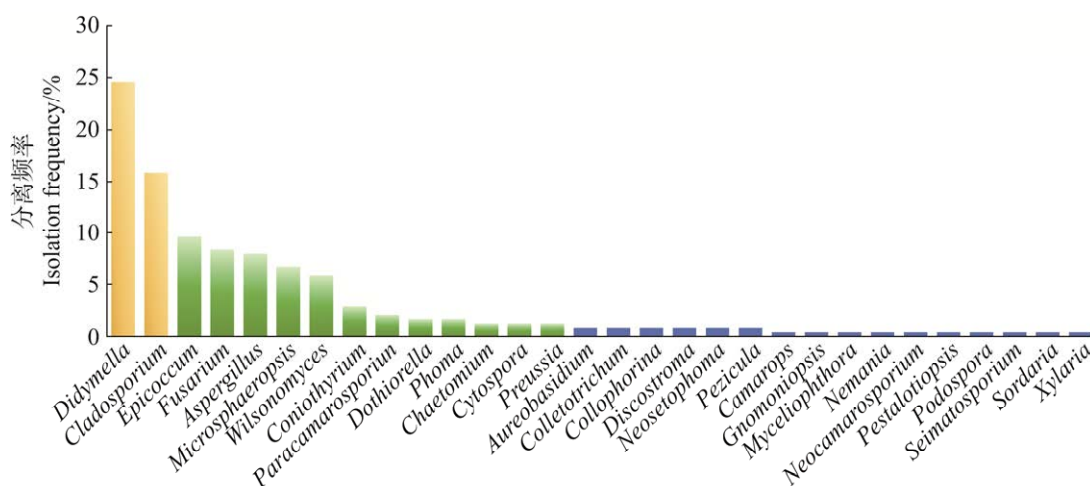


图 4 霍城县福寿山内生真菌群落优势度划分

Fig. 4 The dominance classification of endophytic fungal communities in *Prunus armeniaca* from Fushou Mountain, Huocheng County.

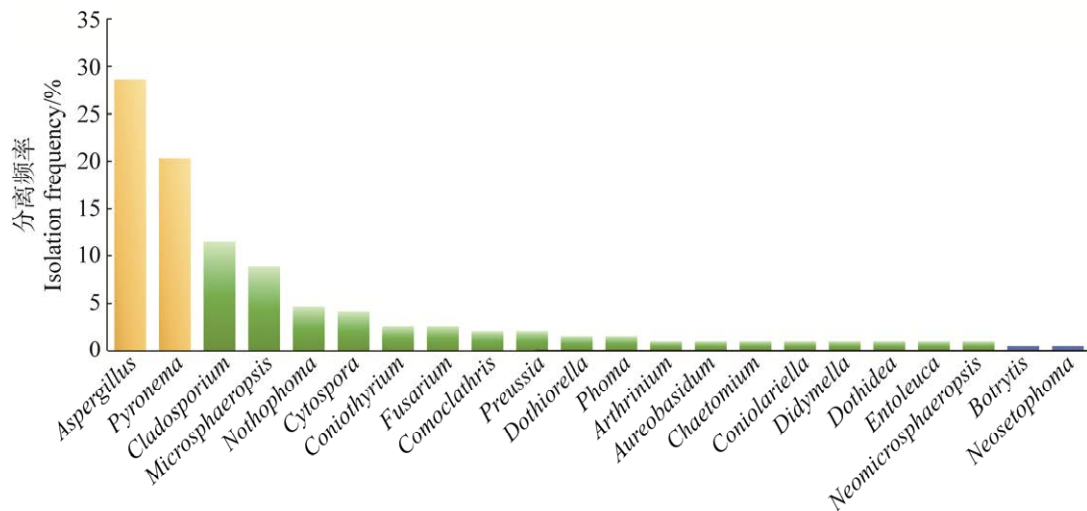


图 5 昌吉硫磺沟内生真菌群落优势度划分

Fig. 5 Dominance classification of endophytic fungal communities in *Prunus armeniaca* from Liuhuanggou, Changji.

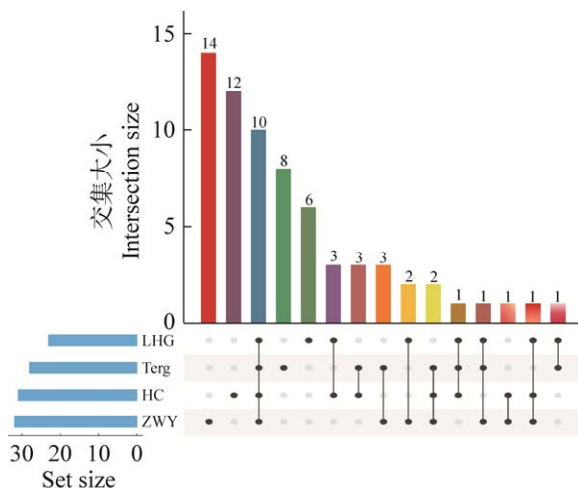


图 6 在属水平上不同地区野杏样本中内生真菌群落的 Upset 图

Fig. 6 Upset diagram of endophytic fungal communities of *Prunus armeniaca* at the genus level in different regions.

磺沟野杏样本中各分离得到内生真菌属一级的数量分别为 27、31、30 和 22 个。4 个样地同时存在的共有属为 10 个，即 *Alternaria*、*Aspergillus*、*Cladosporium*、*Coniothyrium*、*Cytospora*、*Didymella*、小穴壳属 *Dothiorella*、*Fusarium*、*Phoma*、光黑壳属 *Preussia*。昌吉硫磺沟与新源县吐尔根乡之间的共有属 12 个；霍城县福寿山和新源县植物园之间的共有属 12 个；新源县吐尔根乡与霍城县福寿山之间的共有属 16 个；昌吉硫磺沟与霍城县福寿山之间的共有属 14 个。

仅在新源县吐尔根乡、新源县植物园、霍城县

福寿山之间分布的共有属有 2 个，*Epicoccum* 和 *Wilsonomyce*；仅在吐尔根、霍城、硫磺沟地区之间的有 1 个共有属，*Microsphaeropsis*；仅在吐尔根、植物园、硫磺沟地区之间的有 1 个共有属，假茎点霉属 *Nothophoma*。

仅在昌吉硫磺沟与霍城县福寿山分布的共有属有 3 个，分别为短梗霉属 *Aureobasidium*、毛壳菌属 *Chaetomium*、新刺毛茎点霉属 *Neosetophoma*；仅在吐尔根地区与霍城县福寿山分布的共有属有 3 个，分别为 *Paracamarosporium*、柄孢壳菌属 *Podospora*、粪壳菌属 *Sordaria*。仅在新源县吐尔根乡与新源县植物园分布的共有属有 3 个，分别为 *Chaetopyrena*、拟球束孢属 *Gibellulopsis*、青霉属 *Penicillium*；仅在新源县植物园与昌吉硫磺沟分布的共有属有 2 个，分别为 *Comoclathris*、*Pyronema*。

2.3.2 不同样地野杏内生真菌特有属的分布情况

不同地区样地之间特有属与共有属及内生真菌的群落组成与分布存在明显差异(图 6)。4 个样地中新源县植物园样地的野杏内生真菌群落特有属的种类最多，达 14 种，分别是 *Aposphaeria*、壳二孢属 *Ascochyta*、烟管菌属 *Bjerkandera*、锥毛壳属 *Coniochaeta*、拟鬼伞属 *Coprinopsis*、弯孢霉属 *Curvularia*、碘光盘菌属 *Iodophanus*、*Lasiobolidium*、链核盘菌属 *Monilinia*、*Neodidymelliopsis*、*Querciphoma*、梭孢壳菌属

Thielavia、*Vacuiphoma*、*Xenodidymella*。

霍城县福寿山样地的野杏内生真菌群落含有 12 个特有属, 分别为多柱壳菌属 *Camarops*、炭疽菌属 *Colletotrichum*、*Collophorina*、圆盘座壳属 *Discostroma*、拟日规壳菌属 *Gnomoniopsis*、黄霉菌属 *Myceliophthora*、炭垫菌属 *Nemania*、*Neocamarosporium*、拟盘多毛孢属 *Pestalotiopsis*、无柄盘菌属 *Pezicula*、散盘端毛孢 *Seimatosporium*、炭角菌属 *Xylaria*。

新源县吐尔根乡样地的野杏内生真菌群落含有 8 个特有属, 分别为细基束梗孢菌属 *Cephalotrichum*、小光壳属 *Leptosphaerulina*、丛赤壳菌属 *Nectria*、黑团孢属 *Periconia*、*Phaeoacremonium*、*Phaeobotryon*、拟茎点霉属 *Phomopsis*、毛团状盘菌属 *Tricharina*。

特有属最少的是昌吉硫磺沟的野杏内生真菌群落, 包含有 6 个特有属, 分别为节菱孢属 *Arthrinium*、葡萄孢属 *Botrytis*、*Coniolaria*、座囊菌属 *Dothidea*、*Entoleuca*、*Neomicrosphaeropsis*。

2.4 不同样地之间野杏内生真菌的 α 多样性

不同样地野杏内生真菌群落 Shannon-Wiener 指数从高到低依次为新源县吐尔根乡(1.206)>新源县植物园(1.015)>霍城县福寿山(0.988)>昌吉硫磺沟(0.983); Simpson 指数从高到低依次为新源县吐尔根乡(0.531)>新源县植物园(0.477)>昌吉硫磺沟(0.468)>霍城县福寿山(0.425); 丰富度指数从高到低依次为新源县吐尔根乡(1.468)>新源县植物园(1.254)>霍城县福寿山(1.197)>昌吉硫磺沟(1.141)。Shannon-Wiener 指数和 Simpson 指数分析可知, 新源县吐尔根乡的内生真菌群落多样性和优势度最大, 昌吉硫磺沟的内生真菌群

落多样性和优势度最小; Magalef 指数分析得出, 新源县吐尔根乡的内生真菌群落丰富度最大, 昌吉硫磺沟的内生真菌群落丰富度最小。此外, 新源县吐尔根乡、新源县植物园、霍城县福寿山和昌吉硫磺沟 4 个样地之间的野杏内生真菌群落的 Shannon-Wiener 指数(H')、Simpson 指数(D)、Magalef 指数(R)未观察到显著性差异(表 2)。

2.5 不同样地野杏内生真菌的相似性分析

对野杏内生真菌群落的分布区新源县吐尔根乡、新源县植物园、霍城县福寿山和昌吉硫磺沟进行两两比较发现不同样地之间野杏内生真菌群落均具有差异(表 3)。通过 Bray-Curtis 距离值 *P* 值对新源县吐尔根乡、新源县植物园、霍城县福寿山和昌吉硫磺沟的野杏内生真菌群落进行两两比较后发现昌吉硫磺沟样地与新源县吐尔根乡样地的 *P* 值为 0.006 4、其与霍城县福寿山的 *P* 值为 0.01, 内生真菌群落之间存在显著性差异。其他地区之间的内生真菌群落之间有一定的差异, 但不显著, 如昌吉硫磺沟与新源县植物园的野杏内生真菌群落的 *P* 值(0.138 4)<新源县植物园与霍城县福寿山的 *P* 值(0.475)<新源县吐尔根乡与新源县植物园的 *P* 值(0.723 8)<新源县吐尔根乡与霍城县福寿山的 *P* 值(0.875 8)。

3 讨论

本研究从新疆 4 个野杏样地共分离获得 2 749 株内生真菌, 分属于 6 纲 20 目 38 科 64 属。优势菌纲为 Dothideomycetes, 优势目为 Pleosporales, 优势科为座囊菌科 Dothideaceae, 优势属为链格孢属。链格孢属的分离率最高与前期的研究一致, 白周艳等(2011)从新疆 10 个栽培

表 2 不同地区野杏内生真菌多样性指数

Table 2 Diversity indices of endophytic fungi in *Prunus armeniaca* from different regions

样地	真菌属数	多样性指数	优势度指数	丰富度指数
Sampling site	No. of genera	Diversity index	Advantage index	Richness index
Terg	29	1.206±0.111 9 a	0.531±0.050 a	1.486±0.144 a
ZWY	32	1.015±0.087 a	0.477±0.044 a	1.254±0.126 a
HC	31	0.988±0.110 a	0.425±0.051 a	1.197±0.137 a
LHG	23	0.983±0.128 a	0.468±0.055 a	1.141±0.171 a

注: 多样性指数平均值(标准误差, 差异性), 数据后小写字母表示处理间在 $\alpha = 0.05$ 水平的差异显著性

Note: Diversity index is expressed as average of diversity index (standard error, difference); Lowercase letters following the data indicate significant differences among treatments at $\alpha = 0.05$ level.

表 3 不同地区野杏内生真菌群落 Bray-Curtis 距离
Table 3 Bray-Curtis distance of endophytic fungal communities in *Prunus armeniaca* from different regions

样地	Terg	ZWY	HC	LHG
Sampling sites				
Terg	1			
ZWY	0.723 8	1		
HC	0.875 8	0.475	1	
LHG	0.006 4	0.138 4	0.01	1

注: 表中数据对角线以上为 Bray-Curtis 距离的 P -value, $P < 0.05$ 表示组间之间存在显著差异

Note: The data above the diagonal in the table represent the P -values of the Bray-Curtis distance; P -value < 0.05 indicates that a significant difference exists among groups.

杏品种中共分离到 35 属内生真菌, 其中链格孢属的分离率最高; 此外, 链格孢属在新疆盐生植物黑果枸杞不同组织(花、叶、果、茎和根)的内生真菌组成中和黑沙蒿嫩枝与成熟枝内生真菌中均为优势属(顾美英等 2022; 乌吉斯古冷等 2022), 进一步表明链格孢属在植物内生真菌中占据优势地位。

前人研究表明植物内生真菌的丰度、多样性和物种组成与温度、湿度、光照、地理位置、周围植被等宿主生境条件密切相关(张青青等 2021), 真菌群落组成随着水分和生境的变化, 真菌丰富度和群落组成与多样性显著正相关(梁钰镁等 2023), 与海拔梯度呈负相关(Xu *et al.* 2025)。本研究中伊犁新源县和霍城县的 3 个样地位于天山山脉西部的伊犁河谷, 气候条件湿润, 被誉为“塞外江南”, 水汽较北疆其他地区充沛且植物种类丰富(羊海军等 2003; 杨其享等 2022)。而昌吉硫磺沟样地则以风蚀地貌为主, 属于典型的大陆性干旱气候, 植被总体稀疏(金淑聪 2007)。本研究中植物种类丰富且雨水丰沛的伊犁新源县吐尔根乡样地指数最高(H' =1.206±0.1119, D =0.531±0.050), 环境相对干旱的昌吉硫磺沟野杏纯林的指数最低, 表明优势真菌群落的多样性受所处微环境的影响。

通过 β 多样性指数能够体现不同地区之间内生菌群落的差异。白周艳等(2011)研究发现气候条件相差较大的北疆伊宁和南疆轮台的杏树内生真菌的相似性最低(C_s =0.44); 本研究还发现昌吉硫磺沟与伊犁新源县吐尔根乡的内生真菌群落极不相似且相似性最小(0.008 1), Bray-Curtis 距

离的 P 值显示内生真菌群落差异最显著(0.006 4), 再次验证不同样地之间的内生真菌群落结构差异与地区间的气候等环境因子密切相关。

此外, 本研究也发现受传统分离方法、培养基成分、样本采集方法、培养方式等因素的影响, 并不是所有的内生真菌都能人工培养(Amann & Ludwig 1995; Zheng *et al.* 2021)。后续的研究中可以基于时间序列观察真菌分布的季节动态和年际变化(Giger *et al.* 2024), 探讨不同真菌属在生态系统中的功能角色, 全面解析内生真菌与其他微生物群落的相互作用(Clay & Schardl 2002)。为深入解答内生真菌在野杏体内分布特征提供科学依据, 助力野杏保护实践。

作者贡献

陈虹瑾: 实验实施、论文构思及撰写、数据分析; 施万斌、马雄: 参与实验及样品采集; 王彩霞、许子言: 参与实验; 马荣: 研究指导、论文构思及指导。

利益冲突声明

该研究不存在任何潜在利益冲突的商业或财务关系。

[REFERENCES]

- Amann RI, Ludwig W, 1995. Phylogenetic identification and in situ detection of individual microbial cells without cultivation. *Microbiological Reviews*, 59(1): 143-169
- Bai ZY, Wang XW, Ma R, Tian CM, 2011. Analysis on diversity of endophytic fungi from wild apricot (*Armeniaca* Mill.) in Xinjiang. *Journal of Xinjiang Agricultural University*, 34(4): 321-327 (in Chinese)
- Chen SK, Xiao M, Dlinur, Sun TQ, Aierxiding A, Ma R, 2023. Indoor fungicide screening and identification of antagonistic strains against *Wilsonomyces carpophilus*. *Journal of Fruit Science*, 40(10): 2229-2240 (in Chinese)
- Clay K, Schardl C, 2002. Evolutionary origins and ecological consequences of endophyte symbiosis with grasses. *The American Naturalist*, 160(S4): S99-S127
- Deng WX, Zhao ML, Li YM, Wang ZL, Zhang K, Zhan FD, 2019. Diversity of endophytic fungi associated with *Bletilla striata* roots. *Mycosystema*, 38(11): 1907-1917 (in Chinese)
- Ding JD, Pu Z, Tang F, Tian YQ, 2023. Spatial and temporal

- evolution of land use in the distribution area of Tianshan wild fruit forest. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 39(31): 96-105 (in Chinese)
- Dong SJ, Wen JX, Lu CY, Chen JH, Liu QG, Jin L, 2022. Association analysis with SSR markers and mining elite allelic variation of economic traits of *Armeniaca vulgaris*. *Nonwood Forest Research*, 40(2): 71-82 (in Chinese)
- Fan XL, 2016. Phylogeny and taxonomy of *Cytospora* in Yellow River Region of China. PhD Dissertation, Beijing Forestry University, Beijing. 1-119 (in Chinese)
- Giger GH, Ernst C, Richter I, Gassler T, Field CM, Sintsova A, Kiefer P, Gbelein CG, Guillaume GO, Scherlach K, 2024. Inducing novel endosymbioses by implanting bacteria in fungi. *Nature*, 635(8038): 415-422
- Gu MY, Zhang ZD, Tang GM, Gulinisha S, Zhang LJ, Zhu J, Tang QY, Chu M, Ghenijan O, Outikuer M, Xu WL, 2022. Community composition and ecological function of endophytic fungi in different tissues of *Lycium ruthenicum*. *Mycosystema*, 41(8): 1254-1267 (in Chinese)
- He J, Liu XJ, Zhao QM, Chen J, 2009. Isolation of endophytes from *Pseudolarix kaempferi* Gord. *Food Science*, 30(15): 180-183 (in Chinese)
- Jin SC, 2007. Reconstruction and ecological remediation of mining subsidence of Liuhuanguo coal mine area in Changji. *Arid Environmental Monitoring*, 21(3): 149-151 (in Chinese)
- Kaliane SA, Vanessa NB, Tomás GRV, Tiago SL, Janaina LA, Braz THJ, Hanna LAM, Olinto LP, Eduardo SGM, Marisa VQ, 2020. Diversity and distribution of endophytic fungi in different tissues of *Hevea brasiliensis* native to the Brazilian Amazon forest. *Mycological Progress*, 19(10): 1057-1068
- Li C, Wu YH, Yao QZ, 2023. Composition and diversity of culturable endophytic fungal community in roots of two larch species in Inner Mongolia. *Mycosystema*, 42(5): 1045-1062 (in Chinese)
- Liang YM, Duan XT, Gao Y, Wang N, Meng ZJ, Han YL, 2023. Fungal community composition of *Salix psammophila* sand barriers at different slope positions and its influencing factors. *Mycosystema*, 42(7): 1485-1494 (in Chinese)
- Liu CL, Lu HL, Chen HJ, Sun HT, Ma R, 2023. The kinds and activities of main enzymes in the pathogenic process of shot hole disease caused by *Wilsonomyces carpophilus* in *Prunus armeniaca*. *Journal of Fruit Science*, 40(4): 747-756 (in Chinese)
- Liu J, 2015. Analysis of genetic diversity and establishment of core collection of apricot germplasm resources in Xinjiang. PhD Dissertation, Xinjiang Agricultural University, Urumqi. 1-145 (in Chinese)
- Lü J, Luo B, Qian JP, Zhang JW, Gao YT, Yang Q, 2022. Diversity of endophytic fungi from *Cinnamomum cassia* and their antagonism to the pathogen of *C. cassia* branch blight in Guangdong, South China. *Mycosystema*, 41(3): 435-449 (in Chinese)
- Pang XF, You MS, 1996. Community ecology of insects. China Agriculture Press, Beijing. 77-103 (in Chinese)
- Shao LP, Shen RX, Zhang SX, Xiang CT, Tan SS, 1984. Taxonomy of fungi. China Forestry Press, Beijing. 1-346 (in Chinese)
- Tan RX, Zou WX, 2001. Endophytes: a rich source of functional metabolites. *Natural Product Reports*, 18(4): 448-459
- Tang GM, Zhang L, Wei Y, Fu J, Chen HQ, Zhang XQ, Mei WL, Dai HF, Guo ZY, 2024. Alkaloid secondary metabolites from a plant endophytic fungus *Purpureocillium lilacinum*. *Mycosystema*, 43(4): 230282 (in Chinese)
- Wei JC, 1979. Fungal identification manual. Shanghai Science and Technical Publishers, Shanghai. 1-780 (in Chinese)
- Wujisiguleng, Kang P, Hu JP, Pan YQ, Zhou Y, Ma R, Peng YY, Liu JL, 2022. Difference in endophyte community structure between young and mature branches of *Artemisia ordosica*. *Microbiology China*, 49(2): 569-582 (in Chinese)
- Xu RJ, Hyde KD, Li JN, *et al.* (more than 20 authors), 2025. Lignicolous freshwater fungi of the pan Qinghai-Xizang Plateau, China. *Fungal Diversity*, 133: 23-234
- Yang HJ, Cui DF, Xu Z, Lin PJ, 2003. Analysis on the components and resource situation of seed plants in the wild fruit forest in Tianshan Mountain in China. *Journal of Plant Resources and Environment*, 12(2): 39-45 (in Chinese)
- Yang QX, Liu LQ, Qin W, Diao YQ, Zhao ZJ, Wu R, Zhang B, 2022. Population structure characteristics and health evaluation of *Armeniaca vulgaris* Lam. *Chinese Journal of Ecology*, 41(1): 9-17 (in Chinese)
- Yang XP, 2020. Age structure and ecological vulnerability assessment of key species populations in western Tianshan wild fruit forest. MS Thesis, Xinjiang Agricultural University, Urumqi. 1-72 (in Chinese)
- Ye SH, Jia HY, Cai GF, Tian CM, Ma R, 2020. Morphology, DNA phylogeny, and pathogenicity of *Wilsonomyces carpophilus* isolate causing shot-hole disease of *Prunus divaricata* and *Prunus armeniaca* in wild-fruit forest of western Tianshan Mountains, China. *Forests*, 11(3): 319
- Yin MQ, Yuan XL, Gao DG, Cao JQ, Cai JW, Xu LP, 2025. Analysis of fruit quality traits of 3 hawthorn fruits in the

- wild fruit forest of Tianshan Mountains. *Non-wood Forest Research*, 43(1): 242-254 (in Chinese)
- Zang W, Krua LSN, Shen C, Du ZN, Sun X, Sun JQ, Fu JW, 2020. Species diversity and community composition of endophytic fungi from *Alsophila spinulosa*. *Mycosystema*, 39(4): 731-742 (in Chinese)
- Zang W, Sun X, Sun JQ, Yu WX, Wang XS, Yin JX, Sun RQ, 2014. Diversity and community structure of endophytic fungi from *Taxus chinensis* var. *mairei*. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 25(7): 2071-2078 (in Chinese)
- Zhang JY, Zhang Z, 2003. *Flora of China. Prunus armeniaca*. China Forestry Publishing House, Beijing. 1-626 (in Chinese)
- Zhang QQ, Dong CB, Liang ZQ, Han YF, 2021. Community composition and diversity of culturable endophytic fungi in bark of *Eucommia ulmoides* from different regions of China. *Mycosystema*, 40(10): 2685-2699 (in Chinese)
- Zheng H, Qiao M, Xu J, Yu Z, 2021. Culture-based and culture-independent assessments of endophytic fungal diversity in aquatic plants in southwest China. *Frontiers in Fungal Biology*, 2: 692549
- Zhou SL, Yan SZ, Wu ZY, Chen SL, 2013. Detection of endophytic fungi within foliar tissues of *Camellia oleifera* based on rDNA ITS sequences. *Mycosystema*, 32(5): 819-830
- [附中文参考文献]**
- 白周艳, 王晓炜, 马荣, 田呈明, 2011. 新疆杏树(*Armeniaca Mill.*)内生真菌多样性分析. *新疆农业大学学报*, 34(4): 321-327
- 陈帅康, 肖木, 迪丽努尔, 孙添琦, 艾尔西丁·阿巴斯, 马荣, 2023. 嗜果刀孢菌的室内药剂筛选及拮抗菌的种类鉴定. *果树学报*, 40(10): 2229-2240
- 邓文祥, 赵漫丽, 李永梅, 王自林, 张坤, 湛方栋, 2019. 白及根部内生真菌多样性研究. *菌物学报*, 38(11): 1907-1917
- 丁吉达, 蒲智, 唐芳, 田永强, 2023. 天山野果林分布区土地利用时空演变图谱研究. *中国农学通报*, 39(31): 96-105
- 董胜君, 温佳星, 卢彩云, 陈建华, 刘权钢, 金玲, 2022. 野杏经济性状 SSR 关联分析及优异等位变异挖掘. *经济林研究*, 40(2): 71-82
- 范鑫磊, 2016. 中国黄河流域壳囊孢属的分类和系统学研究. 北京林业大学博士学位论文, 北京. 1-119
- 顾美英, 张志东, 唐光木, 古丽尼沙·沙依木, 张丽娟, 朱静, 唐琦勇, 楚敏, 艾尼江·尔斯满, 欧提库尔·玛合木提, 徐万里, 2022. 黑果枸杞不同组织内生真菌群落组成及生态功能分析. *菌物学报*, 41(8): 1254-1267
- 何佳, 刘笑洁, 赵启美, 陈钧, 2009. 植物内生真菌分离方法的研究. *食品科学*, 30(15): 180-183
- 金淑聪, 2007. 昌吉硫磺沟矿区地表沉陷区的土地整治与生态恢复. *干旱环境监测*, 21(3): 149-151
- 李聪, 乌有汗, 姚庆智, 2023. 内蒙古地区两种落叶松根系可培养内生真菌群落组成与多样性. *菌物学报*, 42(5): 1045-1062
- 梁钰镁, 段晓婷, 高永, 王宁, 蒙仲举, 韩彦隆, 2023. 不同坡位处沙柳沙障真菌群落组成及其影响因素. *菌物学报*, 42(7): 1485-1494
- 刘楚丽, 鲁海龙, 陈虹瑾, 孙洪涛, 马荣, 2023. 嗜果刀孢菌在野杏叶片致病过程中主要酶的种类及活性分析. *果树学报*, 40(4): 747-756
- 刘娟, 2015. 新疆杏种质资源遗传多样性及核心种质构建. 新疆农业大学博士学位论文, 乌鲁木齐. 1-145
- 吕佳, 罗碧, 钱家萍, 张嘉雯, 高育婷, 杨全, 2022. 广东肉桂内生真菌多样性及其抗肉桂枝枯病菌初步研究. *菌物学报*, 41(3): 435-449
- 庞雄飞, 尤民生, 1996. *昆虫群落生态学*. 北京: 中国农业出版社. 77-103
- 邵力平, 沈瑞祥, 张素轩, 项存梯, 谭松山, 1984. *真菌分类学*. 北京: 中国林业出版社. 1-346
- 唐官美, 张丽, 韦媛, 付姣, 陈惠琴, 张雪晴, 梅文莉, 戴好富, 郭志勇, 2024. 植物内生真菌 *Purpureocillium lilacinum* 的生物碱类次级代谢产物. *菌物学报*, 43(4): 230282
- 魏景超, 1979. *真菌鉴定手册*. 上海: 上海科学技术出版社. 1-780
- 乌吉斯古冷, 康鹏, 胡金鹏, 潘雅清, 周月, 马蓉, 彭伊扬, 刘建利, 2022. 荒漠植物黑沙蒿嫩枝与成熟枝内生菌群落结构差异. *微生物学通报*, 49(2): 569-582
- 羊海军, 崔大方, 许正, 林培钧, 2003. 中国天山野果林种子植物组成及资源状况分析. *植物资源与环境学报*, 12(2): 39-45
- 杨其享, 刘立强, 秦伟, 刁永强, 赵忠晶, 乌仁其米格, 张博, 2022. 新疆野杏种群结构特征与健康评价. *生态学杂志*, 41(1): 9-17
- 杨小平, 2020. 西天山野果林的关键种种群年龄结构与生态脆弱性评价. 新疆农业大学硕士学位论文, 乌鲁木齐. 1-72
- 尹马泉, 原晓露, 高丹格, 曹佳琪, 蔡俊文, 徐丽萍, 2025. 天山野果林 3 个山楂品种果实品质性状的比较. *经济林研究*, 43(1): 242-254
- 臧威, Krua LSN, 沈赤, 杜贞娜, 孙翔, 孙剑秋, 傅建伟, 2020. 孑遗植物桫欏内生真菌的多样性与群落组成. *菌物学报*, 39(4): 731-742
- 臧威, 孙翔, 孙剑秋, 于文喜, 王雪松, 尹军霞, 宋瑞清, 2014. 南方红豆杉内生真菌的多样性与群落结构. *应用生态学报*, 25(7): 2071-2078
- 张加延, 张钊, 2003. *中国果树志·杏卷*. 北京: 中国林业出版社. 1-626
- 张青青, 董醇波, 梁宗琦, 韩燕峰, 2021. 不同产地杜仲树皮可培养内生真菌群落组成和多样性. *菌物学报*, 40(10): 2685-2699