浙 江 农 林 大 学 学 报, 2026, **43**(X): 1−11 https://zlxb.zafu.edu.cn
Journal of Zhejiang A&F University DOI: 10.11833/j.issn.2095-0756.20260279

引用格式: 周慧, 陈德茹, 徐小博, 等. 忍冬枝叶酚酸类成分积累与土壤因子的关联性分析[J]. 浙江农林大学学报, 2026, **43**(X): 1−11. ZHOU Hui, CHEN Deru, XU Xiaobo, *et al*. Correlation between soil factors and accumulation of phenolic acid components in *Lonicera japonica* branches and leaves[J]. *Journal of Zhejiang A&F University*, 2026, **43**(X): 1−11.

忍冬枝叶酚酸类成分积累与土壤因子的关联性分析

周 慧[1]，陈德茹[2]，徐小博[3]，郭 晖[3]，王 峰[4]，朱长春[5]，王广军[4]

（1. 新乡学院 化学与材料工程学院，河南 新乡 453003；2. 浙江农林大学 林学院 (生物科学学院)，浙江 杭州 311300；3. 新乡学院 生物工程学院，河南 新乡 453003；4. 封丘县农业农村局，河南 封丘 453300；5. 封丘县鑫丰农业种植专业合作社，河南 封丘 453300）

摘要：【目的】研究产地土壤环境对忍冬 *Lonicera japonica* 枝叶酚酸类成分积累的影响。**【方法】**采用高通量测序技术分析河南封丘、河北巨鹿、山东平邑 3 个产地忍冬根际土壤微生物群落结构。采用高效液相色谱法测定忍冬枝叶 8 种酚酸类成分质量分数，同时测定 3 个产地土壤化学性质。采用多变量相关分析，考察根际细菌和真菌、土壤性质及忍冬枝叶酚酸类成分之间的相关性。**【结果】**平邑和封丘忍冬枝叶的总酚酸质量分数均显著高于河北巨鹿 ($P<0.05$)。3 个产地的酚酸类成分中绿原酸和异绿原酸 A 质量分数最高。封丘的绿原酸质量分数与平邑差异不显著，但均显著高于巨鹿 ($P<0.05$)。封丘的异绿原酸 A 质量分数显著高于平邑和巨鹿 ($P<0.05$)。3 个产地的土壤化学性质和土壤酶活性均存在显著差异，封丘的土壤有机碳、有机质、碱解氮质量分数以及脲酶活性、蔗糖酶活性均显著高于平邑、巨鹿 ($P<0.05$)。平邑产地根际土壤细菌、真菌群落 Sobs 指数、Chao 1 指数和 Shannon-Wiener 指数均显著高于封丘、巨鹿产地 ($P<0.05$)。封丘和平邑根际土壤真菌优势菌属为镰刀菌属 *Fusarium*，巨鹿根际土壤真菌优势菌属为葡萄孢壳属 *Botryotrichum*。相关分析表明：土壤速效钾、速效磷与枝叶隐绿原酸、咖啡酸、新绿原酸、阿魏酸呈显著正相关，而与绿原酸、异绿原酸 A、异绿原酸 C、酚酸总量均呈显著负相关，土壤蔗糖酶与异绿原酸 B 呈显著正相关 ($P<0.05$)。土壤 pH 与隐绿原酸呈显著正相关，与异绿原酸 C 呈显著负相关 ($P<0.05$)。土壤有机质和有机碳均与异绿原酸 C 呈显著负相关 ($P<0.05$)。土壤速效钾、速效磷、有机碳、碱解氮、pH、蔗糖酶活性是土壤细菌、真菌群落的主要影响因素。细菌群落丰富度指数 Sobs 指数、Chao 1 指数与异绿原酸 B 呈显著负相关，真菌群落丰富度指数 Sobs 指数、Chao 指数与异绿原酸 C 呈显著正相关 ($P<0.05$)。**【结论】**忍冬枝叶酚酸类成分的积累受到土壤化学性质、酶活性及微生物群落的共同影响。图 5 表 4 参 30

关键词：忍冬；枝叶；酚酸类成分；土壤化学性质；微生物群落；高效液相色谱法

中图分类号：S718.5 **文献标志码：**A **文章编号：**2095-0756(2026)00-0001-11

Correlation between soil factors and accumulation of phenolic acid components in *Lonicera japonica* branches and leaves

ZHOU Hui[1]，CHEN Deru[2]，XU Xiaobo[3]，GUO Hui[3]，WANG Feng[4]，ZHU Changchun[5]，WANG Guangjun[4]

（1. School of Chemistry and Materials Engineering, Xinxiang University, Xinxiang 453003, Henan, China; 2. College of Forestry (College of Life Sciences), Zhejiang A&F University, Hangzhou 311300, Zhejiang, China; 3. School of Bioengineering, Xinxiang University, Xinxiang 453003, Henan, China; 4. Agriculture and Rural Bureau of Fengqiu County, Fengqiu 453300, Henan, China; 5. Xinfeng Agricultural Planting Professional Cooperation of Fengqiu County, Fengqiu 453300, Henan, China）

Abstract: ［**Objective**］ The objective is to investigate the effects of soil environment on the accumulation of phenolic acid components in the branches and leaves of *Lonicera japonica* (honeysuckle). ［**Method**］ High-

收稿日期：2026-05-14；修回日期：2026-09-23

基金项目：河南省自然科学基金面上项目 (252300423080)

作者简介：周慧 (ORCID: 0009-0003-2968-6333)，讲师，从事生物资源利用研究。E-mail: 490723954@qq.com。通信作者：王峰 (ORCID: 0009-0008-5917-0844)，高级农艺师，从事农业技术推广。E-mail: 13703437849@163.com

throughput sequencing technology was employed to analyze the microbial community structure in rhizosphere soil of *L. japonica* from three production areas: Fengqiu in Henan, Julu in Hebei, and Linyi in Shandong. The contents of eight phenolic acid compounds in the branches and leaves of *L. japonica* were determined by high-performance liquid chromatography (HPLC), along with measurements of soil chemical properties in these three regions. Multivariate correlation analysis was conducted to investigate the relationships among rhizosphere bacteria and fungi, soil properties, and the phenolic acid components in *L. japonica* branches and leaves.［**Result**］The total phenolic acid content in the branches and leaves of *L. japonica* in Linyi and Fengqiu was significantly higher than that in Julu. Among the phenolic acid components from the three locations, chlorogenic acid and isochlorogenic acid A were the highest. The chlorogenic acid content in Fengqiu was not significantly different from that in Linyi, but both were significantly higher than that in Julu ($P<0.05$). The isochlorogenic acid A content in Fengqiu was significantly higher than that in Linyi and Julu. There were significant differences in soil chemical properties and soil enzyme activity among the three production areas. The contents of soil organic carbon, organic matter, and hydrolyzable nitrogen, as well as urease and sucrase activities in Fengqiu, were significantly higher than those in Linyi and Julu ($P<0.05$). The Sobs, Chao 1, and Shannon-Wiener indices of bacterial and fungal communities in the rhizosphere soil of *L. japonica* in Linyi were significantly higher than those in Fengqiu and Julu. The dominant fungal genus in the rhizosphere soil of Fengqiu and Linyi was *Fusarium*, while that of Julu was *Botryotrichum*. Correlation analysis showed that soil available potassium and available phosphorus contents were significantly positively correlated with cryptochlorogenic acid, caffeic acid, neochlorogenic acid, and ferulic acid, but significantly negatively correlated with chlorogenic acid, isochlorogenic acid A, isochlorogenic acid C, and total phenolic acid. Soil sucrase was significantly positively correlated with isochlorogenic acid B ($P<0.05$). Soil pH was significantly positively correlated with cryptochlorogenic acid but significantly negatively correlated with isochlorogenic acid C ($P<0.05$). Both soil organic matter and organic carbon were significantly negatively correlated with isochlorogenic acid C ($P<0.05$). Soil available potassium, available phosphorus, organic carbon, hydrolyzable nitrogen, pH, and sucrase activity were the main influencing factors of soil bacterial and fungal communities. The bacterial community richness indices (Sobs, Chao 1) were significantly negatively correlated with isochlorogenic acid B, while the fungal community richness indices (Sobs, Chao 1) were significantly positively correlated with isochlorogenic acid C.［**Conclusion**］The accumulation of phenolic acids in the branches and leaves of *L. japonica* is influenced by soil chemical properties, enzyme activities, and microbial communities. [Ch, 5 fig. 4 tab. 30 ref.]

Key words: *Lonicera japonica*; branches and leaves; phenolic acid components; soil chemical properties; microbial community; high-performance liquid chromatography (HPLC)

金银花为忍冬科 Caprifoliaceae 植物忍冬 *Lonicera japonica* 的干燥花蕾或早花[1]，具有广泛的应用价值，其传统产区主要在山东、河南和河北等地[2]，主要含有黄酮类、酚酸类、环烯醚萜苷类等化学成分[3]。金银花中的酚酸类成分质量分数是金银花品质的重要控制指标之一[4]，具有抗氧化、抑菌消炎及调节免疫力[5]等作用。忍冬枝叶与金银花的活性成分相似，质量分数也差异不大[6]。忍冬枝叶提取物具有抑菌、抗炎等作用[7]，且忍冬枝叶资源丰富，价格远低于金银花，在中药替抗饲料、功能性食品开发等领域具有广泛的应用前景和较高的经济效益，已广受行业关注。

中药材的品质特征与生长环境，特别是土壤因子存在显著关联性[8]。土壤因子一直都是药用植物次生代谢作用机制的研究热点。ZHENG 等[9]在研究丹参 *Salvia miltiorrhiza* 时发现，土壤 pH、有效氮和有效磷是影响植物药用成分的主要因素。ZHOU 等[10]研究铁皮石斛 *Dendrobium officinale* 时发现，无孢蜡壳

菌科 Serendipitaceae 能刺激类黄酮化合物的积累。余高等[11] 研究发现，蔗糖酶活性、酸性磷酸酶活性、有机质质量分数、速效磷质量分数以及 pH 等土壤因子会对黄精 *Polygonatum sibiricum* 根茎品质产生影响。

目前，关于药用植物有效成分与土壤因子相关性的研究已在丹参[13]、三七 *Panax notoginseng*[14]、当归 *Angelica sinensis*[15] 等多种药材中开展。针对忍冬枝叶的相关研究多聚焦于少数土壤因子与单一有效成分的关系，缺乏对多土壤因子与多有效成分间综合关联的系统分析，且研究区域多集中在个别产区。基于此，本研究以河南封丘、山东平邑和河北巨鹿 3 个产地的忍冬枝叶及根际土壤为研究对象，通过对土壤化学性质、土壤酶活性及土壤微生物群落和忍冬枝叶酚酸类成分质量分数进行相关分析，探讨土壤因子与忍冬枝叶酚酸类成分质量分数之间的关联性，并通过冗余分析探讨忍冬枝叶酚酸类成分质量分数的关键影响因素。本研究可为调控忍冬枝叶有效成分，提高忍冬枝叶药材质量稳定性，促进忍冬枝叶的利用提供数据支撑。

1　材料与方法

1.1　研究区概况

忍冬枝叶分别采摘于河南省封丘县 (34.53~35.14°N，114.14~114.46°E)、河北省巨鹿县 (37.12~37.43°N，114.84~115.21°E)、山东省平邑县 (35.12~35.72°N，117.42~117.93°E)。

1.2　仪器与试剂

绿原酸、新绿原酸、隐绿原酸、咖啡酸、阿魏酸、异绿原酸 A、异绿原酸 B 和异绿原酸 C 标准品 (北京索莱宝公司)，纯度≥98%。乙腈、甲酸 (Fisher 化学试剂公司)，色谱纯级。所用水为超纯水，其他试剂均采用分析纯。

高效液相色谱仪 (岛津仪器有限公司，LC620-A)、高速多功能粉碎机 (上海净信实业发展有限公司，500 g 直立式)、电子分析天平 (SARTORIUS，Cubis® III)、电子恒温不锈钢水浴锅 (上海一恒科学技术有限公司，HWS-12)、恒温干燥箱 (深圳市森宇仪器设备有限公司，DZF6020)、恒温培养箱 (上海一恒科学技术有限公司，LHS-100CH)、水平振荡器 (苏州市国飞实验室仪器有限公司，FZD-4)、紫外可见分光光度计 (河南精谱检测设备有限公司，JP-AKB2800A)、Thermal Cycler PCR 仪 (BIO-RAD 公司，T100)、pH 计 (浙江美仪智能传感技术有限公司，SUP-PH6.3)、JY600C 电泳仪 (北京君意东方电泳设备有限公司，JY600C) 。E. Z. N. A.® Soil DNA Kit DNA 抽提试剂盒 (Omega 公司) 。Illumina Nextseq 2000 高通量测序由上海美吉生物医药科技有限公司完成。

1.3　样品处理

忍冬枝叶和土壤均采集于 2025 年 11 月 5 日，经封丘县农业农村局王广军研究员鉴定，所采集的忍冬样品均为人工栽培品种‘直立型大毛花’‘Tomentosa’。

采样时，在每块样地随机设置 6 个样方 (3 m×3 m)，每个样方内随机选取 5 株，采集枝叶 (枝样品占 60%)，混合后带回实验室，用蒸馏水洗净，自然阴干至恒量，分别粉碎，过 60 目筛，备用。根际土采用抖根法取样，先在地表以下 0~20 cm 处寻找忍冬细根，用预先消毒的铲子除去表土，抖掉与根系结合较为松散的土壤与其他杂物，再收集附着在植物根系表面 2~3 nm 的根际土壤。均匀混合土壤样品，将收集好的土壤样品干冰运输带回实验室于−80 ℃ 冰箱保存。将收集到的土壤样品分为 3 份：一份用于提取 DNA，进行高通量测序；另 2 份分别用于测定土壤化学性质和土壤酶活性。

1.4　土壤化学性质测定

土壤化学性质参考《土壤农化分析》[16] 测定。采用 pH 计测定土壤 pH；有机质采用重铬酸钾外加热法测定；碱解氮采用碱解扩散法测定；速效钾通过乙酸铵浸提-火焰光度法测定；有机碳采用燃烧氧化-滴定法测定；速效磷采用碳酸氢钠浸提-钼锑抗比色测定。

1.5　酚酸类成分测定

采用本实验室前期关于金银花中酚酸类成分的检测方法测定[17]。

1.6　土壤酶活性测定

测定方法参考鲁如坤的《土壤农业化学分析法》[18]。脲酶活性通过苯酚钠-次氯酸钠比色法测定；蔗糖酶活性采用 3,5-二硝基水杨酸法测定；酸性磷酸酶活性采用对硝基苯磷酸二钠法测定。

1.7 土壤微生物测定

使用 E.Z.N.A.® soil DNA kit 试剂盒抽提土壤微生物群落总基因组 DNA，对 16S rRNA 基因 V3~V4 可变区进行聚合酶链式反应 (PCR) 扩增使用上游引物 338F 和下游引物 806R，对真菌的 ITS1 和 ITS2 区进行 PCR 扩增使用上游引物 ITS1F 和下游引物 ITS2。扩增程序：95 ℃ 预变性 3 min，27 个循环 (95 ℃ 变性 30 s，55 ℃ 退火 30 s, 72 ℃ 延伸 30 s)，然后 72 ℃ 稳定延伸 10 min，最后在 4 ℃ 保存。

使用 NEXTFLEX Rapid DNA-Seq Kit 对纯化后的 PCR 产物构建测序文库。质检合格的文库利用 Illumina Nextseq 2000 平台进行高通量测序，由上海美吉生物医药科技有限公司完成。

1.8 数据处理

1.8.1 *根际土壤微生物数据处理* 原始数据通过质控、去噪、拼接、去嵌合体、聚类等处理后获得有效数据。基于有效数据，使用 Qiime2 流程中的 DADA2 插件对质控拼接之后的优化序列进行降噪处理，优化数据，获得扩增子序列变异体 (amplicon sequence variant，ASV) 代表序列和丰度信息，用于后续生物信息学分析。

采用 mothur 软件计算 Chao 1 指数、Shannon-Wiener 指数等 α 多样性指数等，并通过 R 语言 (version 3.3.1) 实现可视化展示；基于 Bray-Curtis 距离的主坐标分析法 (PCoA) 结合 ANOSIM/Adonis 方法，对不同菌群间的微生物群落整体差异进行评估，并通过群落柱状图，直观展示群落物种的分布情况。

1.8.2 *土壤化学性质及忍冬枝叶酚酸类成分数据处理* 所有数据分析均在 R (v3.6.3)环境下进行。采用 SPSS 27.0 软件进行单因素方差分析 (ANOVA)，比较不同产地忍冬土壤理化特性、酶活性及枝叶酚酸类成分的差异显著性，并利用 Excel 2019 软件制表。利用“stats”包中的 cor 函数进行 Pearson 相关性分析，揭示土壤因子与酚酸类成分之间的相关关系。利用“vegan”包进行冗余分析，探究影响酚酸类成分的关键土壤因子。

2 结果与分析

2.1 忍冬枝叶酚酸类成分质量分数分析

由表 1 可知：不同产地忍冬枝叶酚酸类成分质量分数存在差异。平邑和封丘的总酚酸差异不显著，分别为 61.390 和 61.410 mg·g^{-1}，但均显著高于巨鹿 (P＜0.05)。3 个产地的绿原酸和异绿原酸 A 质量分数最高。封丘的绿原酸质量分数与平邑差异不显著，但均显著高于巨鹿 (P＜0.05)。封丘的异绿原酸 A 为 20.643 mg·g^{-1}，显著高于平邑和巨鹿 (P＜0.05)。巨鹿的阿魏酸质量分数为 0.690 mg·g^{-1}，显著高于平邑和封丘 (P＜0.05)。平邑的异绿原酸 C 质量分数为 9.900 mg·g^{-1}，显著高于封丘和巨鹿 (P＜0.05)。

表 1 不同产地忍冬枝叶 8 种酚酸类成分

Table 1 Contents of 8 phenolic acids in branches and leaves of *L. japonica* from different habitats

产地	酚酸类成分/(mg·g^{-1})								
	绿原酸	异绿原酸A	阿魏酸	异绿原酸B	新绿原酸	咖啡酸	隐绿原酸	异绿原酸C	酚酸总量
平邑	27.320±0.010 a	20.550±0.010 b	0.640±0.010 b	1.940±0.010 b	0.585±0.002 b	0.338±0.001 b	0.111±0.001 c	9.900±0.010 a	61.390±0.020 a
巨鹿	26.989±0.004 b	20.380±0.010 c	0.690±0.010 a	1.920±0.010 c	0.620±0.010 a	0.350±0.001 a	0.128±0.001 a	9.696±0.003 c	60.780±0.010 b
封丘	27.326±0.003 a	20.643±0.001 a	0.630±0.010 c	2.010±0.010 a	0.572±0.005 b	0.328±0.001 c	0.115±0.001 b	9.789±0.005 b	61.410±0.010 a

说明：不同小写字母表示同一成分在不同产地间差异显著 (P＜0.05)。

2.2 土壤化学性质分析

由表 2 可知：3 个产地的土壤化学性质存在显著差异。巨鹿的土壤速效钾质量分数显著高于封丘和平邑 (P＜0.05)，为 307.37 mg·kg^{-1}。巨鹿土壤速效磷质量分数显著高于平邑和封丘 (P＜0.05)，为 50.46 mg·kg^{-1}。封丘的土壤有机碳、有机质及碱解氮质量分数均显著高于平邑、巨鹿 (P＜0.05)。封丘和巨鹿的土壤均呈现中性偏弱碱性，平邑土壤样品呈现中性。

2.3 土壤酶活性分析

如表 2 所示：3 个产地的土壤酶活性呈现出显著的地域特点，且各酶活性的产地优势特征存在明显分化。封丘的脲酶活性为 0.025 mg·g^{-1}·h^{-1}，显著高于巨鹿和平邑 (P＜0.05)。蔗糖酶活性与脲酶活性呈

表 2　不同产地土壤化学性质与酶活性

Table 2　Soil physical and chemical properties in different producing areas

产地	速效钾/(mg·kg^{-1})	速效磷/(mg·kg^{-1})	有机碳/(g·kg^{-1})	有机质/(g·kg^{-1})	碱解氮/(mg·kg^{-1})	pH	脲酶活性/(mg·g^{-1}·h^{-1})	蔗糖酶活性/(mg·g^{-1}·h^{-1})	酸性磷酸酶活性/(μg·g^{-1}·h^{-1})
平邑	102.75±2.37 c	11.80±1.17 c	6.29±0.29 c	10.85±0.49 c	48.53±0.81 c	6.85±0.35 b	0.011±0.01 c	0.056±0.005 c	70.05±7.53 b
巨鹿	307.37±1.25 a	50.46±1.46 a	12.33±0.33 b	21.26±0.56 b	74.67±0.81 b	8.33±0.22 a	0.023±0.08 b	0.098±0.020 b	87.08±21.11 a
封丘	138.11±4.70 b	32.58±1.02 b	12.93±0.05 a	22.29±0.09 a	93.33±1.62 a	8.11±0.39 a	0.025±0.09 a	0.142±0.000 a	63.81±19.08 c

说明：不同小写字母表示同一土壤理化指标或酶活性在不同产地间差异显著。

现出一致的产地差异趋势，封丘为优势产地，活性为 0.142 mg·g^{-1}·h^{-1}，显著高于巨鹿和平邑 (P<0.05)。巨鹿土壤酸性磷酸酶活性为 87.08 μg·g^{-1}·h^{-1}，显著高于封丘和平邑 (P<0.05)。

2.4　根际土壤微生物分析

2.4.1　α 多样性分析　对 3 个产地忍冬根际土壤进行细菌 16S 和真菌 ITS 高通量测序，不同产地的土壤样品获得的有效序列数差异明显。3 组样品细菌有效序列数为 48 313~70 058 条。ASV 代表序列经对比鉴定得到 41 门 105 纲 233 目 377 科 769 属的土壤细菌物种信息。3 组样品真菌有效序列数为 40 910~75 419 条。ASV 代表序列经对比鉴定得到 16 门 44 纲 105 目 238 科 470 属的土壤真菌物种信息。

α 多样性分析可以反映出微生物群落的丰富度和多样性。由表 3 可知：平邑产地忍冬根际土壤细菌群落 Sobs 指数、Chao 1 指数和 Shannon-Wiener 指数均显著高于封丘、巨鹿产地 (P<0.05)。根际土壤真菌多样性结果与细菌多样性结果相似，平邑产地忍冬根际土壤真菌群落 Sobs 指数、Chao 1 指数和 Shannon-Wiener 均显著高于封丘、巨鹿产地 (P<0.05)。

表 3　不同产地土壤微生物 α 多样性指数

Table 3　α diversity index of soil microorganisms in different producing areas

项目	细菌			真菌		
	Sobs指数	Chao 1指数	Shannon-Wiener指数	Sobs指数	Chao 1指数	Shannon-Wiener指数
平邑	1 583.00±47.29 a	1 584.58±48.58 a	6.87±0.02 a	537.67±35.13 a	540.08±34.68 a	4.51±0.13 a
封丘	1 108.67±53.26 c	1 108.69±53.29 c	6.49±0.13 b	395.67±75.05 b	395.78±74.86 b	4.12±0.87 a
巨鹿	1 401.00±7.26 b	1 402.36±36.31 b	6.65±0.05 b	410.00±31.61 b	411.16±31.31 b	4.28±0.15 a
F	79.761	79.593	16.123	6.993	7.258	0.430
P	0	0	0.004	0.027	0.025	0.669

说明：不同小写字母表示多样性指数在不同产地间差异显著 (P<0.05)。

2.4.2　β 多样性分析　各样品细菌和真菌在 ASV 水平上，采用基于 Bray-curtis 距离的主坐标分析 (principal co-ordinates analysis，PCoA) 对比不同产地土壤微生物群落结构差异 (图 1)。可见：3 个产地的细菌群落可明显分开，并且 3 个产地的真菌群落也出现了明显分离。表明 3 个产地的微生物群落结构具有明显的产地特异性。

2.4.3　物种组成分析　不同产地忍冬土壤细菌和真菌群落门水平物种组成分析见图 2。由图 2 可见：3 个产地的细菌门水平群落组成相对丰度略有差异。封丘、巨鹿细菌群落相对丰度占比前 5 位的从高到低均为变形菌门 Pseudomonadota、酸杆菌门 Acidobacteriota、放线菌门 Actinomycetota、厚壁菌门 Bacillota、绿弯菌门 Chloroflexota。平邑细菌群落占比前 5 位的是变形菌门、酸杆菌门、放线菌门、绿弯菌门、拟杆菌门 Bacteroidota。在门水平真菌群落组成在不同产地的相对丰度差异同样略有差异，封丘、平邑的真菌群落相对丰度占比前 5 位的分别是子囊菌门 Ascomycota、担子菌门 Basidiomycota、被孢霉门 Mortierellomycota、Fungi_phy_Incertae_sedis 和罗兹菌门 Rozellomycota。巨鹿的真菌群落占比前 5 位的是子囊菌门、担子菌门、被孢霉门、Fungi_phy_Incertae_sedis 和球囊菌门 Glomeromycota。

不同产地忍冬土壤细菌和真菌群落属水平物种组成分析见图 3。由图 3 可见：在属水平上细菌群落组成在不同产地的相对丰度变化较大。在封丘，细菌群落相对丰度占比前 5 位的从高到低分别是未分类维西纳米杆菌目 norank_o_Vicinamibacterales (4.61%)、未分类维西纳米杆菌科 norank_f_Vicinamibacteraceae

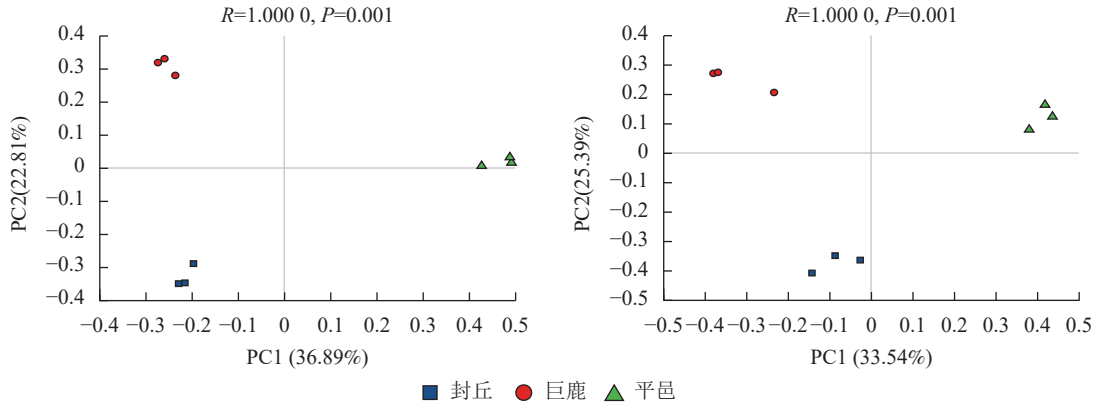


图 1 不同产地的细菌 (A)、真菌 (B) 群落主坐标分析

Figure 1 PCoA analysis of bacterial (A) and fungal (B) communities from different habitats

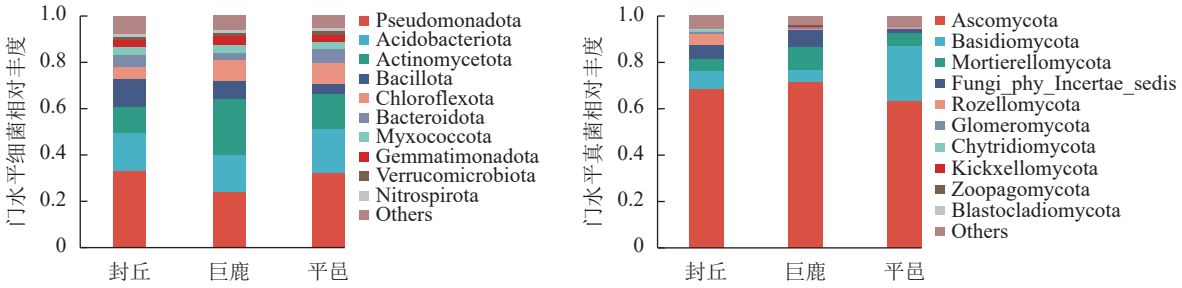


图 2 门水平根际土壤细菌 (A) 和真菌 (B) 的相对丰度

Figure 2 Relative abundance of bacteria (A) and fungi (B) in rhizosphere soil at phylum level

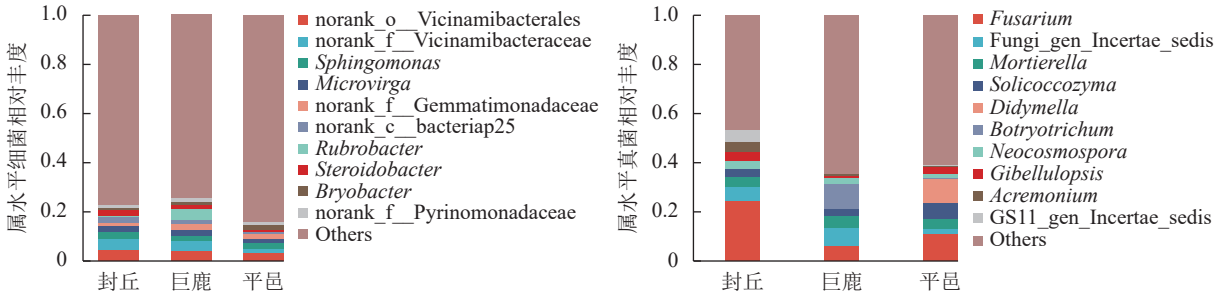


图 3 属水平根际土壤细菌 (A) 和真菌 (B) 的相对丰度

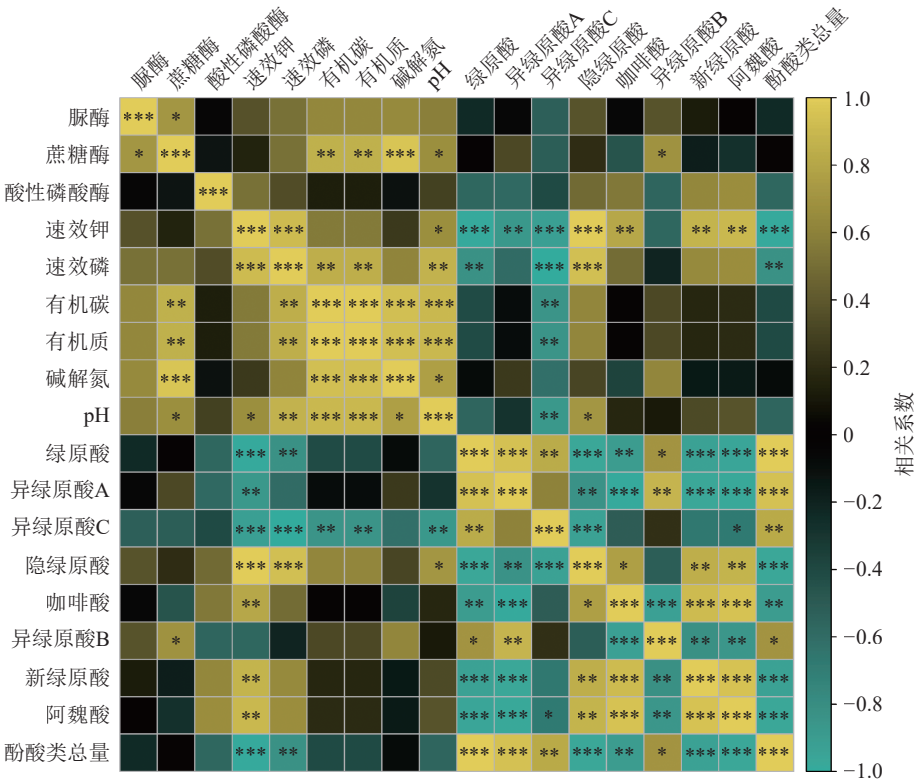
Figure 3 Relative abundance of bacteria (A) and fungi (B) in rhizosphere soil at genus level

(4.48%)、鞘氨醇单胞菌属 *Sphingomonas* (2.65%)、bacteriap25 纲未分类类群 norank_c_bacteriap25 (2.28%)、微枝形杆菌属 *Microvirga* (2.31%)；在巨鹿，分别为未分类维西纳米杆菌科 (4.24%)、红色杆菌属 *Rubrobacter* (4.20%)、未分类维西纳米杆菌目 (3.89%)、芽单胞杆菌科未分级类群 norank_f_Gemmatimonadaceae (2.56%)、微枝形杆菌属 *Microvirga* (2.31%)；在平邑，分别为未分类维西纳米杆菌科 (3.29%)、鞘氨醇单胞菌属 (2.27%)、芽单胞杆菌科未分级类群 (2.14%)、苔藓杆菌属 *Bryobacter* (2.02%)、未分类维西纳米杆菌科 (1.73%)。3 个产地真菌群落组成相对丰度变化差异较大。在封丘，真菌群落相对丰度占比前 5 位的从高到低分别是镰刀菌属 *Fusarium* (24.43%)、真菌属分类地位未定类群 Fungi_gen_Incertae_sedis (5.66%)、GS11 类群属级分类地位未定 GS11_gen_Incertae_sedis (4.86%)、被孢霉属 *Mortierella* (4.16%)、枝顶孢属 *Acremonium* (3.97%)；在巨鹿，分别为葡萄孢壳属 *Botryotrichum* (10.04%)、真菌属分类地位未定类群 (7.37%)、镰刀菌属 (6.07%)、被孢霉属 (4.70%)、索氏酵母属 *Solicoccozyma* (3.07%)；在平邑，分别为镰刀菌属 (10.93%)、双球壳霉属 *Didymella* (10.07%)、索氏酵母属 (6.30%)、被孢霉属 (4.38%)、拟球束孢属 *Gibellulopsis* (2.67%)。

2.5 土壤环境与忍冬酚酸类成分积累相关性

2.5.1 土壤理化因子及酶活性与忍冬枝叶酚酸类成分相关分析 为探究土壤酶活性、土壤化学性质与忍

冬枝叶酚酸类成分的关联性，进行了 Pearson 相关性分析并绘制热图。相关性分析结果 (图 4) 表明：土壤速效钾、速效磷质量分数与隐绿原酸、咖啡酸、新绿原酸、阿魏酸呈极显著正相关 ($P<0.01$)，与绿原酸、异绿原酸 A、异绿原酸 C、酚酸总量质量分数均呈极显著负相关 ($P<0.01$)，蔗糖酶与异绿原酸 B 呈显著正相关 ($P<0.05$)。pH 与隐绿原酸呈显著正相关 ($P<0.05$)，与异绿原酸 C 呈极显著负相关 ($P<0.05$)。土壤有机质和有机碳均与异绿原酸 C 呈极显著负相关 ($P<0.01$)。这表明忍冬枝叶酚酸成分的积累受到了特定土壤养分的显著影响。



*. $P<0.05$；**. $P<0.01$；***. $P<0.001$。

图 4　不同产地忍冬枝叶酚酸类成分与土壤特征之间的相关性

Figure 4　Correlation between the content of phenolic acids in *L. japonicae* flos and soil characteristics in different producing areas

2.5.2　*土壤微生物与土壤理化性质相关分析*　采用冗余分析 (redundancy analysis，RDA) 研究土壤微生物与土壤理化性质之间的关系，结果表明：忍冬根际土壤化学性质对细菌群落和真菌群落结构有显著性影响 (表 4)。土壤各理化因子对土壤细菌 ASV 群落的影响顺序从大到小依次为速效钾、速效磷、有机碳、碱解氮、pH、蔗糖酶活性。土壤各理化因子对土壤真菌 ASV 群落的影响顺序从大到小依次为速效磷、速效钾、有机碳、pH、碱解氮、蔗糖酶活性。

2.5.3　*土壤微生物与忍冬枝叶酚酸类成分相关分析*　采用线性回归分析研究土壤微生物群落的 α 多样性与忍冬枝叶酚酸类成分之间的关系。由图 5 可知：细菌群落丰富度指数 Sobs 指数、Chao 1 指数与异绿原酸 B 呈显著负相关 ($P<0.05$)。真菌群落丰富度指数 Sobs 指数、Chao 1 指数与异绿原酸 C 呈显著正相关 ($P<0.05$)。

3　讨论

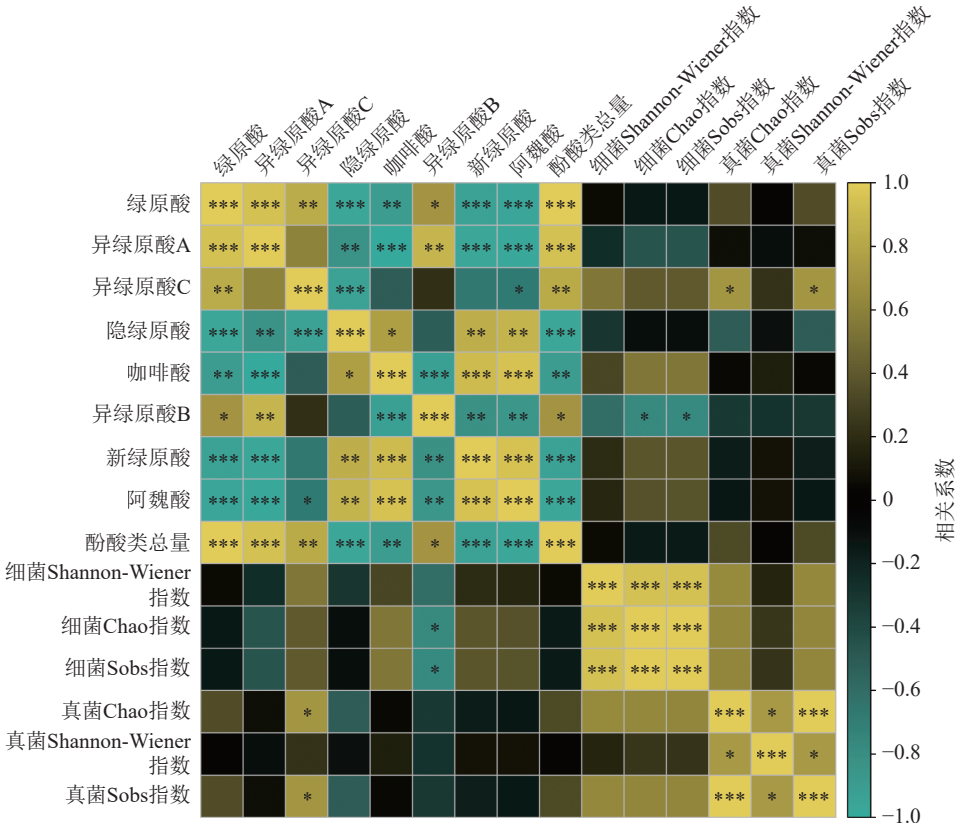
研究表明，药用植物的品质受到光照、栽培技术[19]、环境因素[20] 等的显著影响。金银花作为常用的大宗药材，具有巨大的药用价值。忍冬枝叶具有与金银花相似的活性成分，且产量高于金银花，但存在应用范围较窄的情况[21−22]。基于此，本研究以河南封丘、河北巨鹿、山东平邑 3 个产地忍冬枝叶为研究对象，系统分析了不同产地忍冬枝叶中 8 种酚酸类成分的差异性，并从土壤化学性质、土壤酶活性和土壤微生物群落 3 个层面，探究土壤因子与忍冬枝叶酚酸类成分积累的相关性。

忍冬枝叶的有效活性成分主要有酚酸、黄酮及挥发油等[23]。本研究发现：平邑与封丘产地忍冬枝叶

表 4 土壤微生物群落组成与土壤理化因子的 RDA 分析

Table 4 RDA analysis of microbial community composition and soil physical and chemical factors

土壤因子	细菌				真菌			
	RDA1	RDA2	R^2	P	RDA1	RDA2	R^2	P
速效钾	0.119 36	−0.992 85	0.998 0	0.001	0.227 40	0.973 80	0.757 6	0.009
速效磷	−0.287 62	−0.957 75	0.990 3	0.003	−0.011 31	0.999 94	0.864 3	0.003
有机碳	−0.740 39	−0.672 18	0.967 5	0.016	−0.337 58	0.941 30	0.750 8	0.010
有机质	−0.740 39	−0.672 18	0.967 5	0.016	−0.337 56	0.941 30	0.750 8	0.010
碱解氮	−0.923 22	−0.384 26	0.945 7	0.005	−0.598 44	0.801 17	0.607 7	0.035
pH	−0.586 90	−0.809 66	0.840 8	0.021	0.045 37	0.998 97	0.657 7	0.032
脲酶	−0.653 50	−0.757 79	0.329 8	0.295	−0.401 96	0.915 66	0.495 1	0.095
蔗糖酶	−0.957 11	−0.289 72	0.876 8	0.005	−0.583 31	0.812 25	0.556 4	0.061
酸性磷酸酶	0.483 25	−0.875 48	0.300 4	0.352	0.850 21	0.526 45	0.622 2	0.058



*. $P<0.05$；**. $P<0.01$；和***. $P<0.001$。

图 5 土壤微生物 α 多样性指数与忍冬枝叶酚酸类成分相关性

Figure 5 Correlation between soil microbial α diversity index and phenolic acid components of *L. japonica*

总酚酸质量分数显著高于巨鹿，且绿原酸、异绿原酸 A 为主要优势成分。赵秋晨等[24]在检测忍冬叶 6 种酚酸类成分时发现，绿原酸质量分数最高，其次是异绿原酸 A。说明绿原酸与异绿原酸 A 是金银花枝叶最具代表性的活性成分。本研究表明，封丘产地异绿原酸 A 质量分数最高，平邑产地异绿原酸 C 质量分数最高，巨鹿产地阿魏酸质量分数相对较高，表明忍冬枝叶酚酸类成分积累具有明显的产地特异性。这种差异可能与产地土壤环境、海拔及气候等的差异密切相关。

土壤理化性质是影响药用植物次生代谢产物积累的重要基础条件[25]。本研究发现：土壤速效钾、速效磷质量分数与忍冬枝叶隐绿原酸、咖啡酸、新绿原酸、阿魏酸质量分数呈显著正相关，与绿原酸、异绿原酸 A、异绿原酸 C、酚酸总量质量分数均呈显著负相关，pH 与隐绿原酸呈显著正相关，与异绿原酸 C 呈显著负相关。秦露等[25]研究发现，土壤理化性质与板蓝根 *Iscais indigotica* 主要活性成分有一定

的相关性。土壤酶活性直接反映土壤养分转化与代谢强度。本研究中，封丘产地土壤脲酶与蔗糖酶活性显著高于巨鹿、平邑，而巨鹿产地酸性磷酸酶活性最高。相关性分析表明：土壤蔗糖酶与异绿原酸 B 呈显著正相关。

根际微生物是药用植物微生态系统的核心组成部分，对植物生长及次生代谢具有重要调控作用[26]。本研究中 α 多样性结果显示，平邑产地根际细菌与真菌的 Sobs 指数、Chao 1 指数、Shannon-Wiener 指数均显著高于封丘和巨鹿，说明平邑产地根际微生物群落丰富度与多样性更高。PCoA 分析表明：3 个产地细菌与真菌群落结构可明显区分，进一步证实产地是塑造根际微生物群落结构的重要因素。在门水平上，3 个产地优势菌群均以变形菌门、酸杆菌门、子囊菌门为主，符合药用植物根际微生物群落的一般构成规律；在属水平上，封丘与平邑以镰刀菌属为优势真菌属，巨鹿以葡萄孢壳属为优势真菌属，群落组成差异显著，这种差异可能是导致不同产地金银花品质分化的微生物原因之一。

土壤化学性质和酶活性是土壤微生物群落变化的重要因素，它们之间的联系也十分密切[27]。此外，微生物数量的增加，能够加速土壤有机质的腐殖化，增强微生物对碳氮的利用，导致土壤中碳氮减少，进而限制土壤酶活性[28]。土壤因子与微生物相关性分析表明：土壤速效钾、速效磷、有机碳、碱解氮质量分数以及 pH 和蔗糖酶活性是影响根际细菌与真菌群落结构的关键因子，说明土壤化学性质与酶活性共同驱动根际微生物群落的构建与演替。这与黎志鹏等[29] 的研究结论相一致。进一步相关性分析显示，细菌群落丰富度指数 Sobs 指数、Chao 1 指数与异绿原酸 B 呈显著负相关。真菌群落丰富度指数 Sobs 指数、Chao 1 指数与异绿原酸 C 呈显著正相关，与关佳莉等[30] 研究黄芪 *Astragalus membranaceus* 时发现的 Chao 1 指数和 Shannon-Wiener 指数与总黄酮、毛蕊异黄酮质量分数呈显著正相关的结论一致。表明根际微生物多样性越高，越有利于酚酸类成分的积累。

4　结论

土壤速效钾、速效磷质量分数与忍冬枝叶隐绿原酸、咖啡酸、新绿原酸、阿魏酸呈显著正相关，与绿原酸、异绿原酸 A、异绿原酸 C、酚酸总量质量分数均呈显著负相关，土壤蔗糖酶活性与忍冬枝叶异绿原酸 B 呈显著正相关。土壤细菌群落丰富度指数 Sobs 指数、Chao 1 指数与忍冬枝叶异绿原酸 B 呈显著负相关。土壤真菌群落丰富度指数 Sobs 指数、Chao 1 指数与忍冬枝叶异绿原酸 C 呈显著正相关。忍冬枝叶酚酸类成分的积累并非由单一土壤因子决定，而是土壤化学性质、土壤酶活性与根际微生物群落三者协同作用的结果。本研究结果可为金银花产区土壤改良、施肥管理及根际微生态调控提供参考。

5　参考文献

[1] 国家药典委员会. 中华人民共和国药典: 一部[S]. 北京: 中国医药科技出版社, 2025: 32−231. Chinese Pharmacopoeia Commission. *Pharmacopoeia of the People's Republic of China*, *Volume Ⅰ*[S]. Beijing: The Medicine Science and Technology Press of China, 2025: 32−231.

[2] ZHANG Jie, YU Xiao, YANG Ran, *et al*. Quality evaluation of *Lonicerae japonicae* Flos from different origins based on high-performance liquid chromatography (HPLC) fingerprinting and multicomponent quantitative analysis combined with chemical pattern recognition[J]. *Phytochemical Analysis*, 2024, **35**(4): 647−663. DOI: 10.1002/pca.3319.

[3] 颜世超, 刘春红. 金银花的化学成分与药理作用研究进展[J]. 中医药信息, 2025, **42**(5): 84−88. YAN Shichao, LIU Chunhong. Research progress on the chemical components and pharmacological effects of *Lonicera japonica* Thunb.[J]. *Information on Traditional Chinese Medicine*, 2025, **42**(5): 84−88. DOI: 10.19656/j.cnki.1002-2406.20250515.

[4] CAI Zhichen, WANG Chengcheng, CHEN Cuihua, *et al*. Quality evaluation of *Lonicerae japonicae* Flos and *Lonicerae* Flos based on simultaneous determination of multiple bioactive constituents combined with multivariate statistical analysis[J]. *Phytochemical Analysis*, 2021, **32**(2): 129−140. DOI: 10.1002/pca.2882.

[5] GOLUBEV D, ZEMSKAYA N, SHEVCHENKO O, *et al*. Honeysuckle extract (*Lonicera pallasii* L.) exerts antioxidant properties and extends the lifespan and healthspan of *Drosophila melanogaster*[J]. *Biogerontology*, 2022, **23**(2): 215−235. DOI: 10.1007/s10522-022-09954-1.

[6] 仉劲, 王建华, 房信胜, 等. 不同采收期忍冬花和叶中四种多酚成分的动态变化研究[J]. 时珍国医国药, 2014, **25**(8): 1985−1987. ZHANG Jin, WANG Jianhua, FANG Xinsheng, *et al*. Dynamic changes of four kinds of polyphenol contents

from flowers and leaves of *Lonicera japonica* Thunb. at different collecting periods[J]. *Lishizhen Medicine and Materia Medica Research*, 2014, **25**(8): 1985−1987. DOI: 10.3969/j.issn.1008-0805.2014.08.079.

[7] 李瑞国, 王彩君. 忍冬不同器官绿原酸提取及抑菌作用[J]. 时珍国医国药, 2012, **23**(5): 1196−1197. LI Ruiguo, WANG Caijun. Extraction of chlorogenic acid from different organs of *Lonicera japonica* Thunb. and its bacteriostasis[J]. *Lishizhen Medicine and Materia Medica Research*, 2012, **23**(5): 1196−1197. DOI: 10.3969/j.issn.1008-0805.2012.05.067.

[8] 刘芯瑜, 李婉云, 陈彩霞, 等. 土壤健康与药用植物生长及品质形成关系研究进展[J]. 中草药, 2026, **57**(1): 375−389. LIU Xinyu, LI Wanyun, CHEN Caixia, *et al*. Research progress on relationship between soil health and growth and quality formation of medicinal plants[J]. *Chinese Traditional and Herbal Drugs*, 2026, **57**(1): 375−389. DOI: 10.7501/j.issn.0253-2670.2026.01.034.

[9] ZHENG Xin, CHEN Wenjing, LI Xianen, *et al*. Effects of environmental factors and genotype on performance, soil physicochemical properties and endophytic fungi of *Salvia miltiorrhiza*[J]. *Rhizosphere*, 2025, **33**: 101031. DOI: 10.1016/j.rhisph.2025.101031.

[10] ZHOU Dongyu, HOU Mengyan, LENG Chunyan, *et al*. Deciphering the root microbiome and its relationship with active compound accumulation in medicinal *Dendrobium officinale* (Orchidaceae) from different regions[J]. *Industrial Crops and Products*, 2025, **226**: 120692. DOI: 10.1016/j.indcrop.2025.120692.

[11] 余高, 王海, 莫忠妹, 等. 不同生境黄精根茎品质特性及根际土壤环境驱动因子[J]. 河南农业科学, 2023, **52**(12): 57−68. YU Gao, WANG Hai, MO Zhongmei, *et al*. Rhizome quality characteristics of *Polygonatum rhizoma* in different habitats and driving factors in rhizosphere soil environment[J]. *Journal of Henan Agricultural Sciences*, 2023, **52**(12): 57−68. DOI: 10.15933/j.cnki.1004-3268.2023.12.007.

[12] 薛焱, 王同智, 刘欣媛, 等. 不同生态环境对冷蒿总黄酮积累的影响[J]. 中成药, 2021, **43**(11): 3231−3234. XUE Yan, WANG Tongzhi, LIU Xinyuan, *et al*. Effects of different ecological environments on the accumulation of total flavonoids in *Artemisia frigida*[J]. *Chinese Traditional Patent Medicine*, 2021, **43**(11): 3231−3234. DOI: 10.3969/j.issn.1001-1528.2021.11.058.

[13] 李绍建, 李雪梦, 杨瑾, 等. 根际促生菌田间施用对丹参连作障碍的缓解效果[J/OL]. 江苏农业科学, 2026-04-02. https://link.cnki.net/urlid/32.1214.S.20260401.0958.006. LI Shaojian, LI Xuemeng, YANG Jin, *et al*. Alleviation of continuous cropping obstacles in *Salvia miltiorrhiza* through field application of rhizosphere growth-promoting bacteria [J/OL]. *Jiangsu Agricultural Sciences*, 2026-04-02. https://link.cnki.net/urlid/32.1214.S.20260401.0958.006.

[14] 刘子豪, 夏青, 王梦琦, 等. 不同产地三七皂苷累积差异及其与土壤病原真菌的关系[J]. 土壤, 2025, **57**(1): 114−123. LIU Zihao, XIA Qing, WANG Mengqi, *et al*. The accumulation differences of Sanqi ginseng saponins in different producing areas and their relationships with soil fungal pathogens[J]. *Soils*, 2025, **57**(1): 114−123. DOI: 10.13758/j.cnki.tr.2025.01.013.

[15] 曲鲲跃, 张建旭, 何春雨, 等. 当归连作对土壤微生态及自身发育影响及防治策略的研究进展[J]. 北方园艺, 2026(10): 107−112. QU Kunyue, ZHANG Jianxu, HE Chunyu, *et al*. Research progress on continuous cropping obstacles and sustainable cultivation strategies for *Angelica sinensis*[J]. *Northern Horticulture*, 2026(10): 107−112. DOI: 10.11937/bfyy.20253312.

[16] 鲍士旦. 土壤农化分析[M]. 3 版. 北京: 中国农业出版社, 2008: 1−114. BAO Shidan. *Soil Agrochemical Analysis*[M]. 3rd ed. Beijing: China Agriculture Press, 2008: 1−114.

[17] 徐小博, 徐萍, 司志敏, 等. 基于酚酸类成分评价不同品种金银花枝和叶的利用价值[J]. 食品工业科技, 2024, **45**(19): 247−255. XU Xiaobo, XU Ping, SI Zhimin, *et al*. Evaluation of the utilization value of different germplasm of *Lonicera japonica* thunb branches and leaves based on phenolic acid components[J]. *Science and Technology of Food Industry*, 2024, **45**(19): 247−255. DOI: 10.13386/j.issn1002-0306.2023100033.

[18] 鲁如坤. 土壤农业化学分析方法[M]. 北京: 中国农业科技出版社, 2000. LU Rukun. *The Analysis Method of Soil Agricultural Chemistry*[M]. Beijing: China Agricultural Science and Technology Press, 2000.

[19] RADMAN S, NICOLA S, KACJAN-MARSIC N, *et al*. Editorial: modern cultivation techniques for medicinal plants: impact on yield and secondary metabolite production[J]. *Frontiers in Plant Science*, 2026, **17**: 1823253. DOI: 10.3389/fpls.2026.1823253.

[20] VENKATASAI N N, SHETTY D N, VINAY C M, *et al*. A comprehensive review of factors affecting growth and secondary

metabolites in hydroponically grown medicinal plants[J]. *Planta*, 2025, **261**(3): 48. DOI: 10.1007/s00425-025-04619-y.

[21] 马美杰, 王静芳, 郭润发, 等. 金银花及其枝叶提取物对炎症动物模型干预作用研究[J]. 工业微生物, 2025, **55**(3): 70−72. MA Meijie, WANG Jingfang, GUO Runfa, *et al*. Study on the intervention effects of extracts from *Lonicera japonica* flowers and aerial parts on inflammatory animal models[J]. *Industrial Microbiology*, 2025, **55**(3): 70−72. DOI: 10.3969/j.issn.1001-6678.2025.03.023.

[22] 杨振钰, 任丽华, 刘迪, 等. 金银花新品种‘华金 7 号’光合特性、产量及药材质量研究[J]. 中药材, 2025, **48**(8): 1886−1891. YANG Zhenyu, REN Lihua, LIU Di, *et al*. Study on photosynthetic characteristics, yield and medicinal material quality of *Lonicera japonica* new variety ‘Huajin 7’[J]. *Journal of Chinese Medicinal Materials*, 2025, **48**(8): 1886−1891. DOI: 10.13863/j.issn1001-4454.2025.08.003.

[23] 马涵玉, 钱琪, 牛丽颖. 基于文献计量学的金银花研究现状与热点分析[J]. 药物评价研究, 2022, **45**(7): 1426−1434. MA Hanyu, QIAN Qi, NIU Liying. Current status and hotspot of *Lonicera japonica* Flos research based on bibliometrics[J]. *Drug Evaluation Research*, 2022, **45**(7): 1426−1434. DOI: 10.7501/j.issn.1674-6376.2022.07.026.

[24] 赵秋晨, 管仁伟, 张才波, 等. 基于 12 种活性成分动态变化对不同采收期忍冬叶的质量评价[J]. 中草药, 2025, **56**(17): 6370−6377. ZHAO Qiuchen, GUAN Renwei, ZHANG Caibo, *et al*. Quality evaluation of *Lonicerae japonicae* leaves at different harvest periods based on dynamic variation of 12 active ingredients[J]. *Chinese Traditional and Herbal Drugs*, 2025, **56**(17): 6370−6377. DOI: 10.7501/j.issn.0253-2670.2025.17.025.

[25] 秦露, 李健, 耿燕楠, 等. 基于 HPLC 指纹图谱不同产地板蓝根主要活性成分与其根际土壤理化性质的相关性研究[J]. 中草药, 2024, **55**(6): 2077−2084. QIN Lu, LI Jian, GENG Yannan, *et al*. Correlation between main active components of isatidis radix from different producing areas and physicochemical properties of its rhizosphere soil based on HPLC fingerprint[J]. *Chinese Traditional and Herbal Drugs*, 2024, **55**(6): 2077−2084. DOI: 10.7501/j.issn.0253-2670.2024.06.029.

[26] 代阳, 杨清, 牛丽丽, 等. 黄精和黄芩不同种植模式的根系分泌物对土壤微生物的影响[J]. 东北林业大学学报, 2025, **53**(11): 103−113. DAI Yang, YANG Qing, NIU Lili, *et al*. The effect of root exudates from *Polygonatum sibiricum* and *Scutellaria baicalensis* under different planting modes on soil microorganisms[J]. *Journal of Northeast Forestry University*, 2025, **53**(11): 103−113. DOI: 10.3969/j.issn.1000-5382.2025.11.012.

[27] 刘洋鸿, 范付华, 袁丛军. 不同马尾松林药复合种植对土壤理化性质和微生物的影响[J]. 东北林业大学学报, 2026, **54**(3): 37−45, 56. LIU Yanghong, FAN Fuhua, YUAN Congjun. Effects of different compound planting patterns of *Pinus massoniana* forest and medicinal plants on soil physicochemical properties and microorganisms[J]. *Journal of Northeast Forestry University*, 2026, **54**(3): 37−45, 56. DOI: 10.13759/j.cnki.dlxb.2026.03.003.

[28] 邢学霞, 付迪, 黎建强, 等. 凋落物输入变化对云南松林土壤微生物数量和酶活性的影响[J]. 西北农林科技大学学报(自然科学版), 2023, **51**(3): 62−70. XING Xuexia, FU Di, LI Jianqiang, *et al*. Effects of alteration in litter inputs on soil microbial population and enzyme activity in *Pinus yunnanensis* forest[J]. *Journal of Northwest A&F University* (*Natural Science Edition*), 2023, **51**(3): 62−70. DOI: 10.13207/j.cnki.jnwafu.2023.03.007.

[29] 黎志鹏, 毕华兴, 管凝, 等. 黄土区典型林地土壤养分-酶活性-微生物多样性差异分析[J]. 浙江农林大学学报, 2026, **43**(2): 370−380. LI Zhipeng, BI Huaxing, GUAN Ning, *et al*. Differential analysis of soil nutrient-enzyme activity-microbial diversity in typical woodland in loess area[J]. *Journal of Zhejiang A&F University*, 2026, **43**(2): 370−380. DOI: 10.11833/j.issn.2095-0756.20250224.

[30] 关佳莉, 丛悦, 徐媛媛, 等. 不同种植模式下黄芪根际环境与活性成分相关性研究[J]. 中草药, 2025, **56**(12): 4399−4409. GUAN Jiali, CONG Yue, XU Yuanyuan, *et al*. Correlation between rhizosphere environment and contents of active components of Astragali *Radix* from different cropping modes[J]. *Chinese Traditional and Herbal Drugs*, 2025, **56**(12): 4399−4409. DOI: 10.7501/j.issn.0253-2670.2025.12.022.