

中南林业科技大学学报

Journal of Central South University of Forestry & Technology

ISSN 1673-923X，CN 43-1470/S

《中南林业科技大学学报》2026年第7期

Doi:10.14067/j.cnki.1673-923X.2026.07.014

论文标题： 不同城市化强度南昌公园绿地土壤丛枝菌根真菌群落特征

作　　者： 廖桂军，邹庆娴，钟嘉琳，等

收稿日期： 2025-07-14

引文格式： 廖桂军,邹庆娴,钟嘉琳,等.不同城市化强度南昌公园绿地土壤丛枝菌根真菌群落特征[J].中南林业科技大学学报,2026,46(7):143-152.

Liao G J, Zou Q X, Zhong J L, et al. Characteristics of arbuscular mycorrhizal fungal communities in urban park soils under different urbanization intensities in Nanchang[J]. Journal of Central South University of Forestry & Technology,2026,46(7):143-152.

相关论文推荐

Recommended articles

6种外生菌根真菌对长白落叶松幼苗的促生效应

Growth-promoting effects of six ectomycorrhizal fungi on *Larix olgensis* seedlings

接种外生菌根真菌对不同种源栓皮栎幼苗生长和生理特征的影响

Effects of ectomycorrhizal fungi inoculation on the growth and physiological characteristics of *Quercus variabilis* from different provenances

氮沉降对4个树种外生菌根群落结构和酶活性功能的影响

Effects of nitrogen deposition on ectomycorrhizal structure and enzyme activity of four tree species

不同密度对杉木林根际土壤丛枝菌根真菌群落结构及共生格局的影响特征

Effects characteristic of different densities on arbuscular mycorrhizal fungal community structure and symbiotic patterns in rhizosphere soil of *Cunninghamia lanceolata* plantations

接种4种外生菌根真菌对槲树幼苗生长、光合及营养元素含量的影响

Effect of four ectomycorrhizal fungi inoculation on the growth, photosynthesis, and nutrient element content of *Quercus dentata* seedlings

PGPR与外生菌根菌互作对樟子松促生作用及根际微生态环境的影响

PGPR interacts with ectomycorrhizal fungi to promote growth of *Pinus sylvestnis* var. *mongolica* and to effect of rhizosphere microecological environment

Doi:10.14067/j.cnki.1673-923x.2026.07.014
http: //qks.csuft.edu.cn

不同城市化强度南昌公园绿地土壤丛枝菌根真菌群落特征

廖桂军，邹庆娴，钟嘉琳，冉景望，涂佳美，吕欣然，谢思雨，刘　玮，王　琼
（江西农业大学 林学院 / 园林与艺术学院，江西 南昌 330045）

摘　要：【目的】探究城市化背景下公园绿地土壤丛枝菌根（Arbuscular mycorrhizal，AM）真菌群落特征，为南昌市公园的土壤微生物多样性和生态保护提供基础数据支持。【方法】在南昌市建成区内按不透水面面积占比划分（高、中、低）3 个城市化梯度等级，对公园绿地土壤进行取样调查（63 个样方）。使用高通量测序技术检测土壤中 AM 真菌的群落特征，分析 AM 真菌群落的结构组成、Alpha 多样性与 Beta 多样性的差异，通过冗余分析解析 AM 真菌群落与土壤理化性质的相关关系。【结果】南昌市公园绿地的土壤 AM 真菌群落主要包括球囊霉属 *Glomus* 和类球囊霉属 *Paraglomus* 等优势属。Shannon 指数和 Simpson 指数随城市化强度增加呈对数显著提升，分别增加 3.89% 和 1.90%；而 Dominance 指数则呈对数显著降低，降低 44.36%。土壤 pH 值、电导率、有机碳含量、全氮含量与球囊霉属、近明球囊霉属 *Claroideoglomus*、盾巨孢囊霉属 *Scutellopora*、巨孢囊霉属 *Gigaspora* 的丰度呈正相关，全钾含量、土壤含水率、土壤容重与原囊霉属 *Archaeospora*、多样孢囊霉属 *Diversispora*、双型囊霉属 *Ambispora*、盾孢囊霉属 *Cetraspora*、无梗囊霉属 *Acaulospora* 的丰度呈正相关，土壤全磷含量与类球囊霉属 *Paraglomus* 的丰度呈正相关。【结论】随着城市化强度的升高，AM 真菌群落中物种多样性和群落均匀度升高，优势属的地位减弱，而土壤有机碳含量、pH 值、全磷含量、全钾含量等土壤理化因子在影响 AM 真菌群落组成中发挥着关键作用。

关键词：丛枝菌根；真菌群落；城市化强度；公园绿地；南昌市
中图分类号：S714.3　　**文献标志码：**A　　**文章编号：**1673-923X(2026)07-0143-10

Characteristics of arbuscular mycorrhizal fungal communities in urban park soils under different urbanization intensities in Nanchang

Liao Guijun, Zou Qingxian, Zhong Jialin, Ran Jingwang, Tu Jiamei, Lyu Xinran, Xie Siyu, Liu Wei, Wang Qiong

(College of Forestry/Landscape and Art, Jiangxi Agricultural University, Nanchang 330045, Jiangxi, China)

Abstract:【Objective】This study explored the soil arbuscular mycorrhizal (AM) fungal communities in park green spaces under the context of urbanization, aimed to provide foundational data support for the soil microbial diversity and ecological conservation of parks in Nanchang City.【Method】In this study, three urbanization gradient levels (high, medium, and low) were divided according to the proportion of impervious surface area in the built-up area of Nanchang City, and 63 sample plots of park green space soil were sampled and investigated. High-throughput sequencing technology was used to detect the community characteristics of arbuscular mycorrhizal (AM) fungi in the soil, analyze the differences in the structural composition, Alpha diversity and Beta diversity of AM fungal communities, and reveal the correlation between AM fungal communities and soil physicochemical properties through RDA analysis.【Result】The AM fungal communities in the park green spaces of Nanchang City were predominantly composed of dominant genera such as *Glomus* and *Paraglomus*. The Shannon and Simpson indices exhibited a significant logarithmic increase with rising urbanization intensity by 3.89% and 1.90%, whereas the Dominance index showed a significant logarithmic decrease by 44.36%. Soil pH value, electrical conductivity, soil organic carbon content and total nitrogen content were positively correlated with the abundance of genera such as *Glomus*, *Claroideoglomus*, *Scutellospora* and *Gigaspora*; total potassium content, moisture content and soil bulk density

收稿日期（Received）：2025-07-14　　**修订日期**（Revised）：2025-10-30
基金项目：国家自然科学基金项目（32460380）；自然资源部鄱阳湖流域生态保护红线野外科学观测研究站开放课题（JXZSZ2025004）；江西省自然科学基金项目（20242BAB25389）；江西省研究生创新专项资金项目（YC2025-S423）。
第一作者：廖桂军（19979508839@163.com），硕士研究生。
通信作者：王琼（wangqiong881004@163.com），副教授，博士，硕士研究生导师。
引文格式：廖桂军 , 邹庆娴 , 钟嘉琳 , 等 . 不同城市化强度南昌公园绿地土壤丛枝菌根真菌群落特征 [J]. 中南林业科技大学学报 ,2026, 46(7):143-152.
Liao G J, Zou Q X, Zhong J L, et al. Characteristics of arbuscular mycorrhizal fungal communities in urban park soils under different urbanization intensities in Nanchang[J]. Journal of Central South University of Forestry & Technology,2026,46(7):143-152.

were positively correlated with the abundance of genera such as *Archaeospora* and *Diversispora*, and soil total phosphorus content was positively correlated with the abundance of genera such as *Paraglomus*.【Conclusion】With the increase in urbanization intensity, species diversity and community evenness of AM fungi communities increased, while the dominance of the dominant genera weakened. Soil physicochemical factors such as soil organic carbon, pH value, total phosphorus content, and total potassium content play a key role in influencing the composition of AM fungal communities.

Keywords: arbuscular mycorrhiza; fungal community; urbanization intensity; park green space; Nanchang City

城市公园是城市生态系统的重要组成部分，具有显著的生态价值。它能有效净化空气、调节局部气候，并为多种动植物提供栖息地，是维护城市生物多样性的关键场所 [1]。此外，公园的绿色植被还能涵养水源、缓解城市内涝，共同构筑起城市的生态屏障 [2]。然而，城市化进程中的土地利用、生态环境变化等问题会限制城市公园生态功能的发挥。土壤作为地球表层系统物质和能量迁移转化的关键节点，其生态功能受到城市化快速发展的严重影响。城市绿地土壤大部分为客土，部分还混有建筑垃圾等杂质 [3]。公园绿地土壤也面临着严峻的挑战 [4]。目前多数研究仍着眼于公园绿地土壤理化性质与空间结构特征 [5-6]，对物种多样性比较丰富的土壤微生物研究较少。而土壤微生物在维持公园绿地土壤生态平衡、促进植物生长和提高土壤肥力等方面发挥着重要作用 [7]。

土壤微生物对土壤的形成和肥力的提升有着显著的贡献，它们能够分解和转化有机物，将其变为植物可以吸收利用的营养成分 [8]。这些微小的生物在生态系统的能量流动与物质循环过程中，扮演着重要的角色，它们参与了碳、氮、硫等多种循环过程，有助于维持元素平衡 [9]，对于维护生态系统的可持续发展具有不可或缺的重要意义。申杰等 [10] 发现上海城市化发展可以显著增加公园土壤微生物群落的丰度和 Alpha 多样性，张旋等 [11] 在包头市公园和闫冰等 [12] 在北京城市公园的研究均发现历史悠久的公园生态系统更加稳定且土壤微生物群落多样性更高。由此可见，公园的土壤微生物多样性会随着城市化水平的提升和建园时间的延长而显著增加，生态系统也更为稳定。

丛枝菌根（Arbuscular mycorrhizal，AM）真菌是土壤微生物的关键组成成员，广泛分布于各类生态环境中且具有丰富的物种多样性、遗传多样性和功能多样性 [13]。而且，AM 真菌能够与 80% ～ 90% 的陆生植物根系形成专性活体营养的互惠共生体 [14]，显著增强宿主植物的病害抗性，在土壤生态改良与植物健康维持中起关键作用 [15]。通过促进土壤团粒结构形成、改良根系构型及提升植物水分吸收效率，AM 真菌可以协同改善土壤理化性质，为植物生长构建适宜微环境 [16]。

南昌市作为江西省的省会城市，城市化进程高速推进。据南昌市统计局官方数据，2012—2022 年城市园林绿地总面积由 8 746 hm^2 增至 15 145 hm^2，城市绿化覆盖率达到 41.25%[17]。尽管南昌市的城市绿化覆盖率总体水平表现良好，但相较于国内其他大中型城市，其整体的绿化水平，特别是在人均绿地面积方面，仍有待进一步提升和完善 [18]。张佛熠等 [19] 前期探究了南昌不同城市化强度土壤粒度组成和分形特征及其影响因素。然而，针对城市发展环境变化下公园绿地土壤微生物群落动态变化的研究较为匮乏。因此，本研究以南昌市不同城市化强度下公园绿地土壤为对象，深入分析土壤 AM 真菌群落特征差异及其与土壤理化性质的相关关系，为公园绿地的生物多样性和生态保护提供基础性数据，并为后期研究城市土壤 AM 真菌的生态功能提供参考。

1 研究材料和方法

1.1 研究区域概况

南昌市地处赣江和抚河的下游，紧邻鄱阳湖西南岸（28°10′ ～ 29°11′N，115°27′ ～ 116°35′E），属于亚热带季风气候，四季分明，雨水充沛。根据《南昌统计年鉴 2022》的记载，南昌市人均公园绿地面积已经高达 13.05 m^2。南昌市目前拥有包括动物园在内的共计 95 个公园，总面积为 1 782 hm^2[20]。在南昌市，公园植物的选择和种植体现了多样化的特点。大型乔木如樟树 *Cinnamomum camphora*、法国梧桐 *Platanus orientalis*、复羽叶栾树 *Koelreuteria bipinnata*、无患子 *Platanus orientalis*、广玉兰 *Platanus orientalis*、雪松 *Cedrus deodara*、水杉 *Metasequoia glyptostroboides*、银杏 *Ginkgo biloba* 等构成了公园的主要绿化骨架。

不透水面（Impervious surface area，ISA）是城市土地利用的主要特征指标之一，已被广泛用于评估城市化水平 [21]。本研究通过阈值分割的方法将南昌市建成区按照 ISA 划分成不同城市化强

度。Landsat-8 是 NASA 发射的观测卫星，其多光谱数据的定标参数和大气顶部反射率反演算法已有较高的精度 [22]。本研究运用光谱混合分析手段对 Landsat-8 遥感影像进行分类，提取出南昌市研究区域内 ISA 的空间分布。将研究区域划分成同样大小的网格单元，计算各网格内 ISA 的比例，作为衡量城市化强度的指标（100 m 缓冲区数据）。将所有网格内的城市化强度划分为 3 个梯度等级，分别为低（ISA ＜ 50%）、中（50% ≤ ISA ＜ 80%）、高（ISA ≥ 80%）[23]。

1.2 土壤样品采集

2023 年 8 月在南昌市建成区内选取 63 个公园样方作为研究区域进行调查与采样。按照 ISA 强度划分标准，不同城市化强度样地数量如下：低城市化地区（编号 L）37 个，中城市化地区（编号 M）16 个，高城市化地区（编号 H）10 个。不同样方间至少间隔 1 km，样方面积均为 400 m^2，每个样方均匀设置 5 个采样点进行取样。采用环刀法，在去除土壤表面约 2 cm 的土壤及杂质后采集地表 0 ～ 20 cm 土壤样品；在每个样方采集 5 份土壤，编号后装入自封袋混合均匀，当场称量鲜质量；将收集的土壤样品放至 −20 ℃低温冰箱中冷藏保存，用于后续土壤 AM 真菌群落结构测定。

1.3 土壤理化性质测定

土壤有机碳（Soil organic carbon，SOC）含量测定采用重铬酸钾油浴法，全氮（Total nitrogen，TN）含量测定采用半微量凯氏定氮法，全磷（Total phosphorus，TP）含量测定采用 NaOH 熔融 - 钼锑抗比色法，全钾（Total potassium，TK）含量测定采用 NaOH 熔融 - 火焰光度法，土壤 pH 值以及电导率（Electrical conductivity，EC）测定采用水土质量比为 2.5∶1 电位法，土壤含水率（Moisture content，MC）测定采用 105 ℃烘干法；土壤容重（Soil bulk density，SBD）计算为土壤干质量与环刀容积（100 cm^3）的比值 [24]。

1.4 土壤 AM 真菌群落高通量测序

高通量测序技术是在传统的一代测序技术基础上发展而来的革新性测序方法 [25]。它极大地提高了测序的通量（即单位时间内可以测序的 DNA 或 RNA 样本数量），降低了测序成本，并且保证了测序结果的准确性 [26]。本试验土壤样品 AM 真菌群落高通量测序由北京诺禾致源科技股份有限公司完成。从 5 g 土壤样品中提取 DNA，随后通过琼脂糖凝胶电泳对提取的 DNA 质量进行检测。检测条件设定为 1% 的胶浓度、100 V 的电压和 40 min 的电泳时间。采用 AM 真菌特异性引物，对目标片段进行扩增，所得目标片段的长度为 280 bp。以稀释后的 DNA 为模板，进行 PCR 扩增。完成扩增后，对扩增产物进行凝胶电泳检测，条件设为 2% 的胶浓度、80 V 电压、40 min。通过这一检测过滤出具有特异性片段扩增的有效样本。使用 IlluminaHiSeq 2500 测序平台对有效样本进行双端测序（引物 AMV4.5NF 的序列为 5′-AAGCTCGTTGAATTTCG-3′，引物 AMDGR 的序列为 5′-CCCAACTATCCCTATTAATCAT-3′）。

首先对原始测序数据进行精细预处理，拼接测序不完整的序列片段，并过滤掉不合格数据，从而获得高质量有效数据。随后采用分裂式扩增子降噪算法 2 对高质量有效数据进行降噪处理，进一步纠正错误，提升数据准确性。在此基础上，对降噪后得到的扩增子序列变体（Amplicon sequence variants，ASVs）进行丰度过滤，剔除丰度小于 5 的序列，确保数据集中仅包含代表性较强的有效序列。最终，获得接近 100% 相似度聚类的 ASVs，为后续土壤 AM 真菌群落结构等相关分析提供了可靠的数据基础 [27]。ASVs 指的是通过高通量测序技术对微生物群落中的 DNA 序列进行测定和分析，从而得到每个微生物的扩增子序列变体编号。将每个 ASV 特征序列比对 Nt 数据库，剔除非球囊菌门 *Glomeromycota* 序列；再进入 AM 真菌在线数据库 MaarjAM（https://maarjam.botany.ut.ee/）对剩余代表序列进行 BLAST 比对，明确 AM 真菌物种信息 [28]。同时，进行 ASVs 丰度和 Alpha 多样性等分析，以获取不同组间 AM 真菌绝对丰度和相对丰度、共有和特有 ASVs 信息，得到 Chao1、Shannon、Simpson、Pielou 等多样性指数。

1.5 Alpha 多样性相关指数分析

Observed species 指数（S_{obs}）为样本中实际检测得到的 ASVs 数量，是衡量样品中 ASV 丰富度（Richness，种类丰富度维度）的基础指标。Chao1 指数（S_{chao1}）是基于 Chao1 算法构建的，用于估计样本中实际存在的 ASVs 数目的物种丰富度指数，是反映微生物群落 α- 多样性的核心指标之一，计算公式如下：

$$S_{chao1}=S_{obs}+n_1(n_1-1)/[2(n_2+1)]。\quad (1)$$

式中：S_{chao1} 为估计的 AM 真菌 ASVs 数目，n_1 为只含有 1 条序列的 AM 真菌 ASVs 数目，n_2 为只含有 2 条序列的 AM 真菌 ASVs 数目，2 表示在公式计算中所使用的引物序列数量，即 2 个引物序列。

Simpson 指数（$D_{Simpson}$）和 Shannon 指数（$H_{Shannon}$）的计算方法参考文献 [29]，二者均用于评估样本中 AM 真菌群落的 Alpha 多样性。计算公式如下：

$$D_{Simpson}=\frac{\sum_{i=1}^{S_{obs}} n_i(n_i-1)}{N(N-1)}。\quad（2）$$

$$H_{Shannon}=-\sum_{i=1}^{S_{obs}}\frac{n_i}{N}\ln\frac{n_i}{N}。\quad（3）$$

式中：n_i 表示为第 i 个 ASV 所含的序列数；N 表示所有的序列数。

Dominance 优势度指数（D）的计算公式如下：

$$D=N_{max}/N。\quad（4）$$

式中：N_{max} 为样本中优势 ASVs 的序列数。

Pielou 均匀度指数（E）用于描述 AM 真菌群落中各 ASV 的序列数分布均匀性，其计算公式如下：

$$E=H_{Shannon}/\ln(S)。\quad（5）$$

式中：S 为样本中检测到的 ASVs 总数（物种丰富度）。

1.6 数据处理与分析

本研究利用高通量测序对土壤样本 AM 真菌群落进行结构组成和群落多样性等分析 [30]。通过 SPSS 22.0 软件实施单因素方差分析，借助 Origin 2022 软件绘制百分比堆积柱状图和相关性热图。借助 RStudio 软件进行 Beta 多样性分析，根据不同城市化强度公园绿地土壤 AM 真菌群落 ASVs 信息计算样品间的 Bray-Curtis 距离，并进行 PCoA 分析与 Anosim 组间差异分析。通过 Canoco 5.0 软件完成土壤理化性质与 AM 真菌群落组成数据的冗余分析（Redundancy analysis，RDA）。

2 结果与分析

2.1 土壤理化性质

南昌市不同城市化强度公园绿地土壤的理化性质如表 1、2 所示。根据全国第二次土壤普查养分分级标准 [31]，土壤养分含量可分为 6 个等级：I

表 1 不同城市化强度绿地土壤理化性质 †

Table 1 Soil physicochemical properties of greenspace under different urbanization intensities

城市化强度 Urbanization intensity	pH 值 pH value	SBD /(g·cm^{-3})	MC /%	SOC 含量 SOC content /(g·kg^{-1})	TP 含量 TP content /(g·kg^{-1})	TN 含量 TN content /(g·kg^{-1})	TK 含量 TK content /(g·kg^{-1})
H	6.45±0.17	1.41±0.11	23.14±2.58	18.23±2.94	0.52±0.06	0.97±0.20	9.86±1.34
M	6.52±0.13	1.21±0.12	19.52±2.78	21.45±2.33	0.53±0.05	1.10±0.15	9.67±0.51
L	6.45±0.07	1.30±0.09	20.37±1.68	16.63±1.41	0.50±0.03	1.18±0.08	9.59±0.40

† H. 高城市化；M. 中城市化；L. 低城市化；SBD. 土壤容重；MC. 含水率；SOC. 土壤有机碳；TP. 全磷；TN. 全氮；TK. 全钾。
H. High urbanization; M. Medium urbanization; L. Low urbanization; SBD. Soil bulk density; MC. Moisture content; SOC. Soil organic carbon; TP. Total phosphorus; TN. Total nitrogen; TK. Total potassium.

表 2 土壤养分分级统计表

Table 2 Soil nutrient grading statistics

养分指标 Nutrient index	城市化强度 Urbanization intensity	样方数量 Number of quadrats					
		Ⅰ级Ⅰ grade	Ⅱ级Ⅱ grade	Ⅲ级Ⅲ grade	Ⅳ级Ⅳ grade	Ⅴ级Ⅴ grade	Ⅵ级Ⅵ grade
SOC 含量 SOC content	高城市化	3	5	1	1	0	0
	中城市化	6	3	6	0	0	1
	低城市化	7	12	7	5	3	3
TN 含量 TN content	高城市化	1	1	2	3	1	2
	中城市化	2	2	4	3	3	2
	低城市化	2	9	12	6	6	2
TP 含量 TP content	高城市化	0	1	2	5	2	0
	中城市化	1	0	3	9	3	0
	低城市化	1	2	7	12	14	1
TK 含量 TK content	高城市化	0	1	0	2	7	0
	中城市化	0	0	0	4	12	0
	低城市化	0	0	2	12	22	1

级（极丰富）、II 级（丰富）、III 级（较丰富）、IV 级（适量）、V 级（贫乏）和 VI 级（极贫乏）。南昌不同城市化公园绿地土壤大部分属于微酸性，土壤容重适中而含水率偏低。本研究区域的 SOC 含量实测波动范围较大，为 2.24 ～ 37.94 g/kg（均值见表 1），高城市化样地中 80.00% 为 I ～ II 级、中城市化样地中 93.75% 为 I ～ III 级、低城市化样地中 70.27% 为 I ～ III 级。本研究中实测 TP 含量为 0.17 ～ 1.01 g/kg，高城市化样地中 80.00% 为 I ～ IV 级、中城市化样地中 81.25% 为 I ～ IV 级、低城市化样地中 59.46% 为 I ～ IV 级。本研究中实测 TN 含量为 0.22 ～ 2.38 g/kg，且不同城市化样地土壤中各个 TN 分级均有分布，高城市化样地中 40.00% 为 I ～ III 级、中城市化样地中 50.00% 为 I ～ III 级、低城市化样地中 62.16% 为 I ～ III 级。本研究中实测 TK 含量为 4.83 ～ 20.28 g/kg，高城市化样地中 30.00% 为 I ～ IV 级、中城市化样地中 25.00% 为 I ～ IV 级、低城市化样地中 37.84% 为 I ～ IV 级。

2.2　土壤 AM 真菌属水平分类学组成分析

不同城市化强度公园绿地土壤样品的 AM 真菌群落组成不同，空间异质性较大（图 1 ～ 2）。球囊霉属和类球囊霉属在高城市化公园绿地土壤的 AM 真菌群落占比分别为 42% 和 20%，在中城市化公园绿地土壤的 AM 真菌群落占比分别为 38% 和 21%，在低城市化程度公园绿地土壤的 AM 真菌群落占比分别为 39% 和 24%。各城市化强度公园绿地土壤均以球囊霉属为第 1 优势种属，且在高城市化样地中的优势地位最明显。

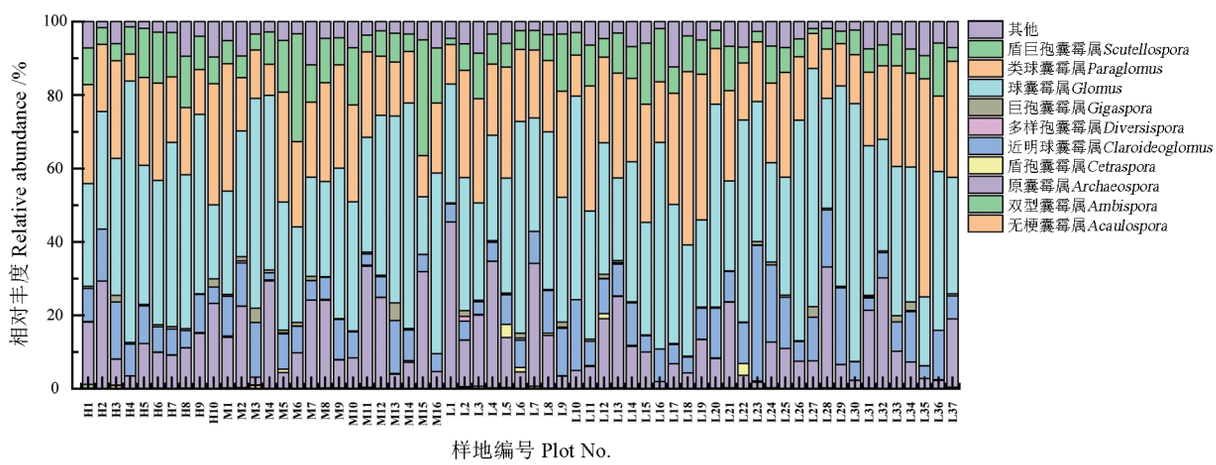


图 1　城市公园绿地土壤 AM 真菌群落组成

Fig. 1　Community composition of soil AM fungi in green spaces of urban parks

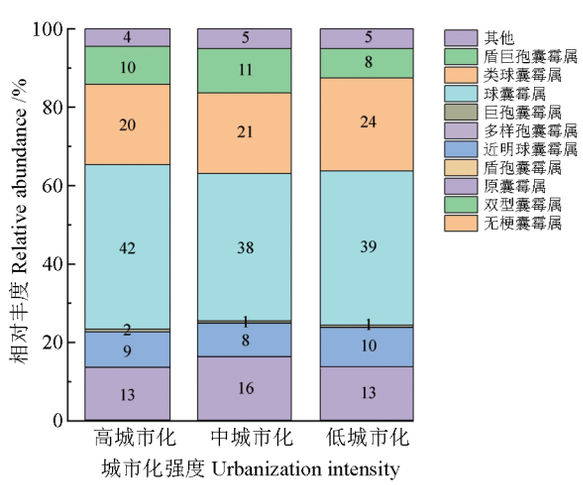


图 2　不同城市化强度土壤 AM 真菌群落组成

Fig. 2　Community composition of soil AM fungi under different urbanization intensities

2.3　土壤 AM 真菌群落物种聚类分析

不同城市化强度公园绿地土壤样品间相对丰度较高的属各不相同（图 3）。高城市化强度公园绿地土壤样品中，球囊霉属、双型囊霉属、无梗囊霉属的丰度在样品间相对较高。中城市化强度

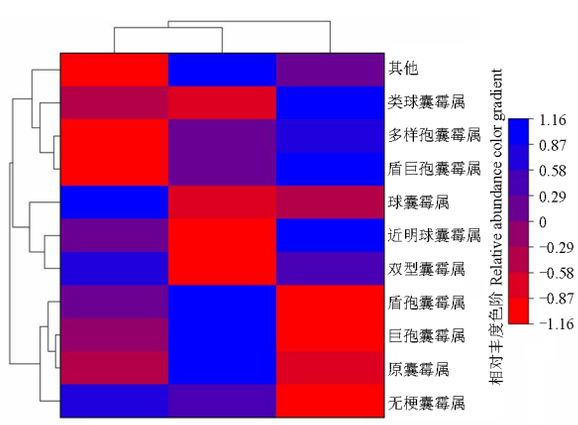


图 3　不同城市化强度土壤 AM 真菌群落物种丰度聚类热图

Fig. 3　Heat map of clustered species abundance of AM fungal communities in soils under different urbanization intensities

公园绿地土壤样品中，盾巨孢囊霉属、巨孢囊霉属、原囊霉属的丰度在样品间相对较高。低城市化强度公园绿地土壤样品中，类球囊霉属、多样孢囊霉属、盾孢囊霉属、近明球囊霉属的丰度在样品间相对较高。随着城市化强度的升高，无梗囊霉属的相对丰度逐渐升高，其优势地位逐渐增强；而多样孢囊霉属、盾孢囊霉属的相对丰度逐渐降低，其优势地位逐渐减弱。

2.4 土壤 AM 真菌群落 Alpha 多样性分析

本研究通过分析 Shannon 指数、Simpson 指数、Chao1 指数、Observed species 指数、Dominance 优势度指数和 Pielou 均匀度指数，评估南昌不同城市化强度下公园绿地土壤 AM 真菌群落多样性变化，结果如图 4 所示。Simpson 指数和 Shannon 指数随城市化强度增加呈显著增长趋势，分别增加 3.89% 和 1.90%（$P < 0.05$），表明随着城市化强度升高，公园绿地土壤 AM 真菌群落物种多样性持续增加。Chao1 指数、Pielou 均匀度指数和 Observed species 指数随城市化程度升高而升高（$P > 0.05$），而 Dominance 指数随城市化强度增加呈显著降低趋势，降低 44.36%（$P < 0.05$）。

2.5 土壤 AM 真菌群落 Beta 多样性分析

根据不同城市化强度公园绿地土壤 AM 真菌群落 ASVs 信息计算样品间的 Bray-Curtis 距离，并进行 PCoA 分析与 Anosim 组间差异分析，结果如图 5 所示。其中细菌群落的第 1 坐标轴（PCoA1）

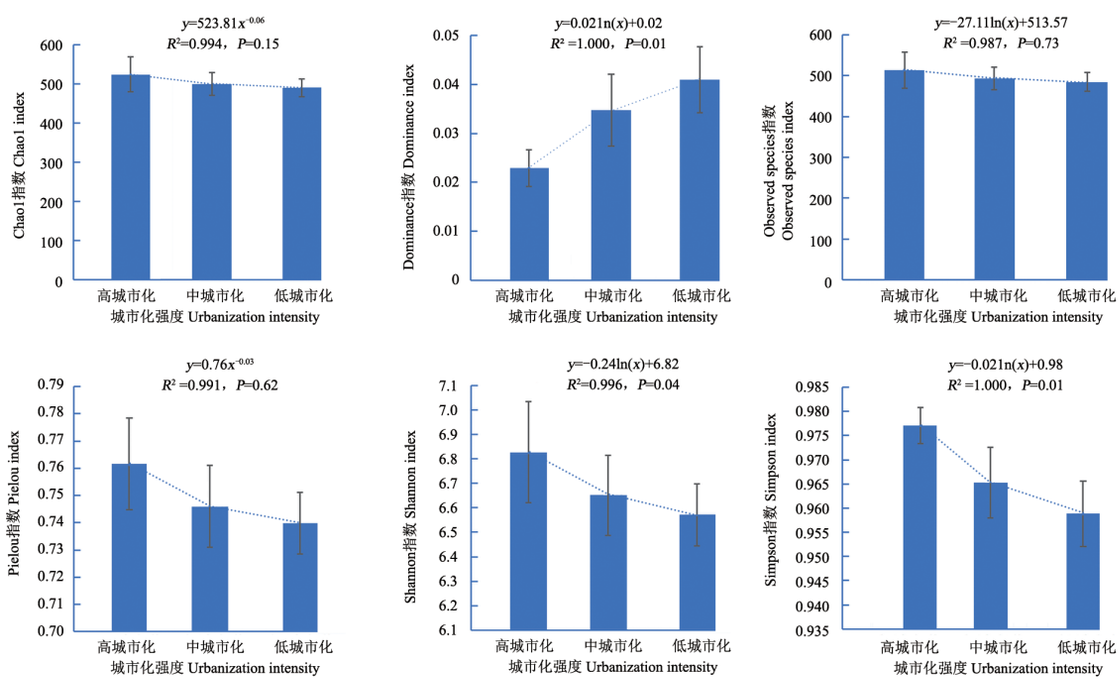


图 4 不同城市化强度土壤 AM 真菌群落 Alpha 多样性

Fig. 4 Alpha diversity of AM fungal communities in soils under different urbanization intensities

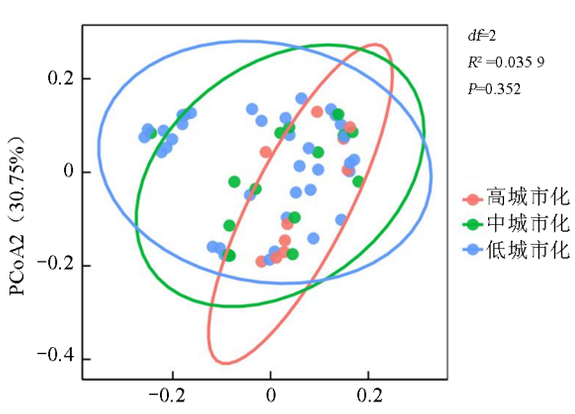


图 5 不同城市化强度土壤 AM 真菌群落 PCoA 分析

Fig. 5 PCoA analysis of AM fungal communities in soils under different urbanization intensities

（39.83%）和第 2 坐标轴（PCoA2）（30.75%）共解释 70.58% 的变异，各个处理样地点大部分重合。同时，进行 PERMANOVA（adonis）检验，R^2=0.035 9，P=0.352，结果表明所研究的 3 个组别微生物群落结构间不存在显著差异。如表 3 所示，各个城市化分组之间的组内差异大于组间差异（$R < 0$）且统计不具有显著性（$P > 0.05$）。

2.6 AM 真菌群落组成特征与土壤理化性质的相关关系

RDA 分析表明（图 6），高城市化样地中球囊霉属为优势属，中城市化样地中原囊霉属为优势属，低城市化样地中类球囊霉属为优势属。球

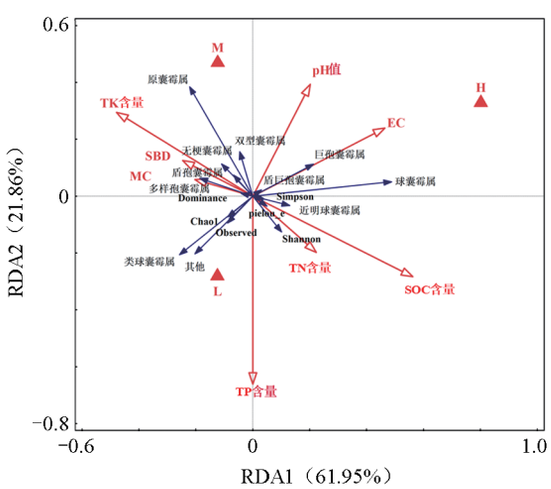
囊霉属、近明球囊霉属、盾巨孢囊霉属、巨孢囊霉属的丰度与 pH 值、EC、SOC 含量、TN 含量等土壤指标呈正相关，双型囊霉属、原囊霉属、多样孢囊霉属、盾孢囊霉属、无梗囊霉属的丰度与 TK 含量、MC、SBD 等土壤指标呈正相关，类球囊霉属的丰度与 TP 含量等土壤指标呈正相关。

表 3　Anosim 组间差异分析 †

Table 3　Anosim groupwise difference analysis

分组 Group	*R*	*P*
H-M	−0.047 0	0.761
H-L	−0.010 0	0.520
M-L	−0.040 4	0.928

† H-M. 高 - 中城市化；H-L. 高 - 低城市化；M-L. 中 - 低城市化。
H-M. High-medium urbanization; H-L. High-low urbanization; M-L. Medium-low urbanization.



H. 高城市化；M. 中城市化；L. 低城市化。红色箭头为土壤理化性质，蓝色箭头为 AM 真菌群落组成特征。
H. High urbanization; M. Medium urbanization; L. Low urbanization. Red arrows indicate soil physicochemical properties; blue arrows indicate the characteristics of AM fungal community composition.

图 6　不同城市化 AM 真菌群落与土壤因子的 RDA 分析

Fig. 6　Redundancy analysis of AM fungal communities and soil factors under different urbanization intensities

3　讨　论

3.1　不同城市化强度公园绿地土壤 AM 真菌群落分布特征

南昌不同城市化强度的公园绿地土壤 AM 真菌群落均以球囊霉属为第 1 优势属，类球囊霉属为第 2 优势属。该结果与 Ji 等 [32] 在林地等生态系统的研究结果相似，表明球囊霉属作为 AM 真菌群落的优势属具有较强的生态适应能力 [33]。随着城市化强度的升高，AM 真菌群落的 Dominance 优势度指数随之降低，而 Pielou 均匀度指数逐渐升高；因此，在低城市化强度的公园绿地土壤 AM 真菌群落中，球囊霉属的优势地位更加突出，而弱势种群随着城市化强度升高而逐渐消失。

城市化通常伴随着人口和产业的集聚，这导致城市范围和规模的扩大，以及乡村地区的转变。在这种转变过程中，城市的生态环境、土壤性质等都可能发生变化，这为 AM 真菌提供了不同的生存条件。在城市化进程中，人类活动对土壤和地下水的干扰增加，这也可能影响到 AM 真菌的生存和分布。例如，城市污水灌溉、地下水的过度开采等，都可能导致土壤中 AM 真菌群落结构发生变化，使得 AM 真菌的优势属地位更加突出 [34]。

3.2　不同城市化强度公园绿地土壤 AM 真菌群落多样性的差异

本研究发现随着城市化强度的升高，公园绿地土壤的 AM 真菌群落多样性指数呈显著升高趋势，而优势度指数显著降低，即群落分布更加均匀而优势种群的优势地位逐渐减弱。其原因可能是高城市化强度下公园绿地土壤异质性增加、植物群落多样化、微生物种间互作重构及人为干扰类型改变，共同稀释了球囊霉属的资源竞争与生态位优势，使 AM 真菌稀有种得以繁衍，最终表现为群落优势度指数显著降低。申杰等 [10] 在上海不同梯度城市公园的研究也有相似的发现，即城市发展到一定程度上可以显著增加土壤微生物群落物种多样性。但也有研究发现，城市土壤微生物多样性显著低于自然生态系统或郊区土壤 [35]。这些不一致的研究结果说明，城市化造成的环境变化会影响土壤微生物的群落组成，而影响趋势受人为因素和自然因素共同调控 [36]。

本研究发现不同城市化分组之间的差异不显著且组内差异大于组间差异。该现象可能主要源于城市建设过程中人类活动对城市景观的高强度和高频率干扰，导致众多城市生态因子发生了显著变化，使得城市化对南昌市公园绿地土壤 AM 真菌群落的影响被掩盖。由于 AM 真菌对环境变化具有较高的敏感性，这些生态因子的变化直接或间接地对 AM 真菌的生长状况产生了深远影响 [37]。城市化过程中，一些适应力强的 AM 真菌种类得到了更好的生存环境和发展空间，从而在一定程度上提高了 AM 真菌群落的生物多样性。同时，城市化也可能引入一些新的真菌物种从而增加公园绿地土壤真菌多样性，比如通过城市绿化、园艺活动或土壤改良等方式 [38]。因此，城市化强度升高导致 AM 真菌群落多样性升高的原因可能是不同环境因素间的相互作用，包括人类活动对环

境和微生物群落的影响，以及土壤和生态环境的变化等。

3.3 土壤 AM 真菌群落特征的驱动因素

城市化进程总是伴随着环境因子的变化，而不同的 AM 真菌对环境的适应能力不同 [39]。土壤理化性质因子与 AM 真菌多样性之间的关系可能因立地条件与植被类型的变化而改变 [40-41]。本研究表明，较高的 SOC 含量、TN 含量、pH 值环境有利于球囊霉属、近明球囊霉属、盾巨孢囊霉属等的繁衍。陈梁荠等 [42] 在砂生槐 *Sophora moorcroftiana* 根际土壤中发现盾巨孢囊霉属的丰度随 SOC 含量增加而降低，而近明球囊霉属的丰度则随 SOC 含量增加而升高。这也印证了不同的立地条件与不同的植物类型下同一种 AM 菌属的环境适应性也可能发生改变。本研究结果进一步表明，原囊霉属、多样孢囊霉属等更适应 SBD、MC、TK 含量较高的土壤环境，而类球囊霉属在 TP 含量较高的区域更具优势。李淑慧等 [43] 通过冗余分析发现，土壤 pH 值、TP 含量是影响 AM 真菌群落结构的关键因子，类球囊霉属的丰度与土壤 TP 含量呈正相关。因此，不同 AM 真菌类群对土壤理化因子的适应性存在差异，同一 AM 菌属的环境适应性也并非恒定。

4 结 论

南昌市公园绿地的土壤 AM 真菌群落主要包括球囊霉属、类球囊霉属、近明球囊霉属、巨孢囊霉属、盾巨孢囊霉属、双型囊霉属、盾孢囊霉属、原囊霉属、多样孢囊霉属、隔球囊霉属、无梗囊霉属等。南昌市不同城市化强度区域公园绿地的土壤均以球囊霉属为优势属，且占 AM 真菌群落的 38% ～ 42%，这进一步验证了球囊霉属在南昌市公园绿地土壤中的重要地位。高城市化强度的公园绿地土壤 AM 真菌群落内物种丰富度最大，但优势属的地位减弱。随着城市化进程的不断深入，土壤理化性质与 AM 真菌群落之间的关联表现出高度的复杂性与特异性。SOC、TP、TK 含量等土壤因子在其中起关键作用，而高城市化区域需要较高的 SOC 和 TN 含量才能驱动 AM 真菌多样化。本研究通过分析南昌市公园绿地土壤 AM 真菌群落在不同城市化强度下的差异，揭示了城市化进程对城市绿地生态系统的深刻影响，不仅为探索城市化过程中土壤微生物群落的变化提供了新的视角，还为未来城市绿地的生态管理和环境修复提供了科学依据。

参考文献：

[1] 谭玛丽 , 张健 , 魏彩霞 . 城市公园 - 城市生物多样性契机 - 原生乡土植被覆盖城市指导原则 [J]. 中国园林 ,2011,27(7):63-67.
Tan M L, Zhang J, Wei C X. Urban parks: a chance for biodiversity in cities-guiding principles for cities with former native forest cover[J]. Chinese Landscape Architecture,2011,27(7):63-67.

[2] 郑淼 , 郭毅 , 辛如洁 , 等 . 多因素干扰下森林公园枯落物水文效应 [J]. 水土保持学报 ,2022,36(3):115-121.
Zheng M, Guo Y, Xin R J, et al. Hydrological effects of litter in forest parks under multi[J]. Journal of Soil and Water Conservation,2022,36(3):115-121.

[3] Baloch M Y J, Zhang W J, Sultana T, et al. Utilization of sewage sludge to manage saline-alkali soil and increase crop production: is it safe or not?[J]. Environmental Technology & Innovation,2023,32:103266.

[4] 张佛熠 , 蔡昌永明 , 钟嘉琳 , 等 . 城市化对绿地土壤团聚体稳定性及有机碳含量的影响 : 以江西省南昌市为例 [J]. 环境科学 ,2024, 45(11):6538-6545.
Zhang F Y, Cai C Y M, Zhong J L, et al. Impacts of urbanization on soil aggregate stability and organic carbon content in urban greenspaces: a case study of Nanchang City, Jiangxi Province[J]. Environmental Science,2024,45(11):6538-6545.

[5] 韩继刚 , 骆玉珍 , 张维维 . 上海典型城市生态廊道的土壤真菌多样性 [J]. 园林 ,2024,41(4):34-41.
Han J G, Luo Y Z, Zhang W W. Soil fungal diversity in the typical urban ecological corridors in Shanghai[J]. Landscape Architecture Academic Journal,2024,41(4):34-41.

[6] 冯悦怡 , 胡潭高 , 张力小 . 城市公园景观空间结构对其热环境效应的影响 [J]. 生态学报 ,2014,34(12):3179-3187.
Feng Y Y, Hu T G, Zhang L X. Impacts of structure characteristics on the thermal environment effect of city parks[J]. Acta Ecologica Sinica,2014,34(12):3179-3187.

[7] Yang J Y, Cen C H, Wang W Z, et al. Alterations in carbon and nitrogen cycling mediated by soil microbes due to the conversion of karst mountainous forests into urban parks[J]. Catena,2024,245:108339.

[8] 彭辉 , 周红敏 , 张弓乔 , 等 . 不同林龄红豆树土壤真菌群落组成和多样性 [J]. 中南林业科技大学学报 ,2021,41(11):129-135.
Peng H, Zhou H M, Zhang G Q, et al. Composition structure and diversity of soil fungi community in *Ormosia hosiei* plantations at different ages[J]. Journal of Central South University of Forestry & Technology,2021,41(11):129-135.

[9] Wu H W, Cui H L, Fu C X, et al. Unveiling the crucial role of

soil microorganisms in carbon cycling: a review[J]. Science of the Total Environment,2024,909:168627.

[10] 申杰 , 张维维 , 韩继刚 . 城市化梯度下上海公园土壤微生物群落分布特征及关键驱动因素 [J]. 生态学杂志 ,2025,44(10):3169-3177.
Shen J, Zhang W W, Han J G. Distribution characteristics and key driving factors of soil microbial communities in Shanghai parks along an urbanization gradient[J]. Chinese Journal of Ecology,2025,44(10):3169-3177.

[11] 张旋 , 杜薇 , 徐颖 , 等 . 包头市半干旱型森林公园土壤细菌多样性与功能 [J]. 生物多样性 ,2022,30(7):193-204.
Zhang X, Du W, Xu Y, et al. Soil bacterial diversity and function in semi-arid forest parks in Baotou City[J]. Biodiversity Science,2022,30(7):193-204.

[12] 闫冰 , 李俊生 , 陆晴 , 等 . 北京城市公园绿地土壤微生物群落碳源代谢活性特征 [J]. 环境科学研究 ,2019,32(9):1567-1574.
Yan B, Li J S, Lu Q, et al. Soil microbial carbon metabolic activity of green-land of urban park in Beijing[J]. Research of Environmental Sciences,2019,32(9):1567-1574.

[13] 孔凡美 , 史衍玺 , 冯固 , 等 .AM 菌对三叶草吸收、累积重金属的影响 [J]. 中国生态农业学报 ,2007,15(3):92-96.
Kong F M, Shi Y X, Feng G, et al. Effects of arbuscular mycorrhizal fungi on heavy metal tolerance of clover in contaminated soil[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture,2007,15(3):92-96.

[14] Ledford W C, Silvestri A, Fiorilli V, et al. A journey into the world of small RNAs in the arbuscular mycorrhizal symbiosis[J]. New Phytologist,2023,242:1534-1544.

[15] 黄雨轩 , 李晓跃 , 张林平 , 等 . 油茶根际 AM 真菌群落对不同季节、土层和品种的响应 [J]. 中南林业科技大学学报 , 2023,43(1):84-95.
Huang Y X, Li X Y, Zhang L P, et al. Responses of AM fungi diversity in *Camellia oleifera* rhizosphere to season, soil depth and cultivar types[J]. Journal of Central South University of Forestry & Technology,2023,43(1):84-95.

[16] 罗双 , 王邵军 , 兰梦杰 , 等 . 丛枝菌根真菌与白枪杆共生对喀斯特石漠化土壤碳组分含量时空动态的影响 [J]. 植物研究 , 2025,45(3):419-432.
Luo S, Wang S J, Lan M J, et al. Effects of the symbiosis between arbuscular mycorrhizal fungi and *Fraxinus malacophylla* on spatiotemporal dynamics of carbon component content in karst rocky desertification soils[J]. Bulletin of Botanical Research, 2025,45(3):419-432.

[17] Deng Y, Shao Z F, Dang C Y, et al. Assessing urban wetlands dynamics in Wuhan and Nanchang, China[J]. Science of the Total Environment,2023,901:165777.

[18] Lee C C, Nie C F. Place-based policy and green innovation: evidence from the national pilot zone for ecological conservation in China[J]. Sustainable Cities and Society,2023,97:104730.

[19] 张佛熠 , 承勇 , 阳雅荧 , 等 . 南昌不同城市化强度土壤粒度组成和分形特征及其影响因素 [J]. 土壤 ,2023,55(5):1138-1145.
Zhang F Y, Cheng Y, Yang Y Y, et al. Particle size composition, fractal characteristics and influencing factors of soils with different urbanization intensities in Nanchang[J]. Soil, 2023,55(5):1138-1145.

[20] Deng X C, Zhou Y C, Sun N. Study on the evaluation of urban park landscape pattern index and its driving mechanisms in Nanchang City[J]. Sustainability,2024,16:4132.

[21] 钟嘉琳 , 李心 , 刘玮 , 等 . 南昌城市化强度对森林植被特征和景观格局指数的影响 [J]. 生态学杂志 ,2024,43(8):2285-2294.
Zhong J L, Li X, Liu W, et al. Effects of urbanization intensity on forest vegetation characteristics and landscape pattern indices in Nanchang[J]. Chinese Journal of Ecology,2024,43(8):2285-2294.

[22] Zhang L, Zhang M, Wang Q. Monitoring of subpixel impervious surface dynamics using seasonal time series Landsat 8 OLI imagery[J]. Ecological Indicators,2023,154:110772.

[23] Wang Q, Zhang D, Zhou W, et al. Urbanization led to a decline in glomalin-soil-carbon sequestration and responsible factors examination in Changchun, northeastern China[J]. Urban Forestry & Urban Greening,2020,48:126506.

[24] 江彬 , 毕银丽 , 申慧慧 , 等 . 氮营养与 AM 真菌协同对玉米生长及土壤肥力的影响 [J]. 江苏农业学报 ,2017,33(2):327-332.
Jiang B, Bi Y L, Shen H H, et al. Synergetic effects of arbuscular mycorrhizal fungus and nitrogen on maize growth and soil fertility[J]. Jiangsu Journal of Agricultural Sciences,2017,33(2):327-332.

[25] Pai J A, Satpathy A T. High-throughput and single-cell T cell receptor sequencing technologies[J]. Nature Methods,2021,18(8):881-892.

[26] Goodwin S, Mcpherson J D, Mccombie W R. Coming of age: ten years of next-generation sequencing technologies[J]. Nature Reviews Genetics,2016,17:333-351.

[27] 梁鹏飞 , 郭全恩 , 曹诗瑜 , 等 . 盐渍化土壤改良剂对草坪根际土壤细菌群落多样性的影响 [J]. 土壤 ,2023,55(1):140-146.
Liang P F, Guo Q E, Cao S Y, et al. Effects of salinized soil amendments on diversity of bacterial community in turfgrass rhizosphere[J]. Soils,2023,55(1):140-146.

[28] Větrovský T, Kolařík ová Z, Lepinay C, et al. GlobalAMFungi: a global database of arbuscular mycorrhizal fungal occurrences from high-throughput sequencing metabarcoding studies[J]. New phytologist,2023,240:2151-2163.

[29] Xiao X, Zhang Y L, Zhou Z A, et al. Response of sediment microbial communities to different levels of PAC contamination and exposure time[J]. Science of the Total Environment,2023,861:160683.

[30] Yan K, Dong Y F, Gong Y B, et al. Climatic and edaphic factors affecting soil bacterial community biodiversity in different forests of China[J]. Catena,2021,207:105675.

[31] 董金龙 , 徐烨红 , 全智 , 等 . 中国设施种植土壤可持续利用的难点与应对策略 [J]. 土壤学报 ,2024,61(6):1467-1480.
Dong J L, Xu Y H, Quan Z, et al. The obstacles and countermeasures of soil sustainability in protected horticulture in China[J]. Acta Pedologica Sinica,2024,61(6):1467-1480.

[32] Ji L, Yang Y C, Yang N, et al. Seasonal variation of diversity and co-occurrence patterns of arbuscular mycorrhizal fungal communities in mixed broadleaf-conifer forests[J]. Applied Soil Ecology,2021,158:103782.

[33] Huang Z, Zhao F, Wang M, et al. Soil chemical properties and geographical distance exerted effects on arbuscular mycorrhizal fungal community composition in pear orchards in Jiangsu Province, China[J]. Applied Soil Ecology,2019,142:18-24.

[34] Baldrian P, López-Mondéjar R, Kohout P. Forest microbiome and global change[J]. Nature Reviews Microbiology, 2023,21:487-501.

[35] Sun H, Santalahti M, Pumpanen J, et al. Fungal community shifts in structure and function across a boreal forest fire chronosequence[J]. Applied and Environmental Microbiology, 2015,81(22):7869-7880.

[36] 敖金成 , 徐天养 , 王加春 , 等 . 土壤肥力状况对植烟土壤微生物区系的影响 [J]. 江西农业学报 ,2022,34(2):122-126.
Ao J C, Xu T Y, Wang J C, et al. Effects of soil fertility conditions on microflora of tobacco-planting soil[J]. Acta Agriculturae Jiangxi, 2022,34(2):122-126.

[37] Tian B L, Pei Y C, Huang W, et al. Increasing flavonoid concentrations in root exudates enhance associations between arbuscular mycorrhizal fungi and an invasive plant[J]. The ISME Journal,2021,15:1919-1930.

[38] Lin L T, Chen Y, Qu L Y, et al. Cd heavy metal and plants, rather than soil nutrient conditions, affect soil arbuscular mycorrhizal fungal diversity in green spaces during urbanization[J]. Science of the Total Environment,2020,726:138594.

[39] 王雯颖 , 徐宝珠 , 胡佳瑶 , 等 . 锰矿区大叶胡枝子灌丛土壤的丛枝菌根真菌多样性 [J]. 生态学报 ,2024,44(12):5269-5279.
Wang W Y, Xu B Z, Hu J Y, et al. Diversity of arbuscular mycorrhizal fungi in the soil of *Lespedeza davidii* scrub in manganese mining area[J]. Acta Ecologica Sinica,2024,44(12):5269-5279.

[40] 孙向伟 , 王晓娟 , 陈牧 , 等 . 生态环境因子对 AM 真菌孢子形成与分布的作用机制 [J]. 草业学报 ,2011,20(1):214-221.
Sun X W, Wang X J, Chen M, et al. Effects of eco-environmental factors on the production and distribution of arbuscular mycorrhizal fungal spores[J]. Acta Prataculturae Sinica, 2011,20(1):214-221.

[41] 李雪静 , 徐天乐 , 陈保冬 , 等 . 荒漠和草原生态系统丛枝菌根真菌多样性和群落结构 [J]. 生态学杂志 ,2017,36(10):2734-2743.
Li X J, Xu T L, Chen B D, et al. Diversity and community structure of arbuscular mycorrhizal fungi in desert and steppe ecosystems[J]. Chinese Journal of Ecology,2017,36(10):2734-2743.

[42] 陈梁荠 , 曾晓敏 , 喻志 , 等 . 青藏高原特有植物砂生槐根际土壤丛枝菌根真菌群落特征 [J]. 植物科学学报 ,2025,43(6):727-738.
Chen L Q, Zeng X M, Yu Z, et al. Characteristics of arbuscular mycorrhizal fungal communities in the rhizosphere soil of *Sophora moorcroftiana* Baker, a plant endemic to the Qinghai-Xizang Plateau[J]. Plant Science Journal,2025,43(6):727-738.

[43] 李淑慧 , 郭寰 , 季生连 , 等 . 柴达木盆地不同地区枸杞根际土壤丛枝菌根真菌群落组成 [J]. 东北林业大学学报 ,2025,53(5):106-115.
Li S H, Guo H, Ji S L, et al. Composition of arbuscular mycorrhizal fungal community in the rhizosphere soil of *Lycium barbarum* different regions of the Qaidam basin[J]. Journal of Northeast Forestry University,2025,53(5):106-115.

[本文编校：张雨朦]