

周 武,李鸣雷. 菌渣施用对中国土壤理化性质的影响:基于 Meta 分析[J]. 江苏农业科学,2024,52(2):205–213.  
doi:10.15889/j.issn.1002–1302.2024.02.029

# 菌渣施用对中国土壤理化性质的影响:基于 Meta 分析

周 武<sup>1,2</sup>, 李鸣雷<sup>1,3</sup>

(1. 中国科学院水利部水土保持研究所,陕西杨凌 712100; 2. 中国科学院大学,北京 100049;  
3. 西北农林科技大学水土保持研究所,陕西杨凌 712100)

**摘要:**菌渣作为有机肥不但可以解决因菌渣焚烧或堆积造成的环境污染问题,还可改良土壤、提高土壤生产力。本研究通过 Meta 分析的方法,整合了国内外发表的 27 篇文献的 482 条有效数据,量化分析了土壤理化性质对菌渣施用的响应,以及菌渣处理方式、菌渣碳氮比、菌渣施用方式、菌渣配施比例对土壤理化性质的影响。结果表明,与不施肥处理对比,菌渣施用可显著降低土壤容重,提高直径  $>0.200$  cm 的土壤水稳性团聚体质量分数,减少直径  $<0.025$  cm 的土壤水稳性团聚体质量分数,增加土壤养分含量,小幅提升土壤 pH 值。菌渣施用下土壤重金属含量会少量累积,同时菌渣对土壤有效 Pb、有效 Cd 表现出较强的吸附性。Meta 回归结果显示,菌渣施用下部分土壤理化指标表现出显著的纬度变化特征,低纬度地区的土壤养分更易流失,高纬度地区土壤 Cu、As 含量更易累积。本研究结果可为循环与生态农业背景下化肥减施及高效利用菌渣提高土壤生产力提供参考。

**关键词:**菌渣;土壤;理化性质;Meta 分析

**中图分类号:**S141.5;S153 **文献标志码:**A **文章编号:**1002–1302(2024)02–0205–08

我国是世界上最大的食用菌生产国、消费国和出口国,每年产量巨大,据报道每产出 1 kg 的食用菌,预计有 5 kg 的菌渣产生,大部分菌渣在被废弃或者焚烧的过程中会对周边的环境造成恶劣影响,同时也造成巨大的农业生产资源浪费,因此科学处理菌渣是解决农林废弃物循环利用的关键环节<sup>[1–2]</sup>。菌渣的理化性质与栽培基质的组成密切相关,食用菌的栽培基质主要包括木屑、秸秆、棉籽壳、麸皮、米糠等复合成分,占培养基总量的 98%~99%,其次是硫酸钙、氧化钙、碳酸钙等矿质辅料,占培养基总量的 1%~2%<sup>[3]</sup>。菌丝体在适宜的条件下通过分泌胞外酶降解培养基中的木质素、纤维素、半纤维素以满足自身的生理生化条件,当子实体采收结束之后,剩下的残留物即为菌渣<sup>[4]</sup>。菌渣中含有丰富的菌丝体蛋白、多糖以及未被完全利用的其他组分且结构疏松多孔,是可回收利用的天然有机物

料,目前菌渣资源化利用的途径主要包括:制作食用菌培养基、生产有机肥、制作饲料、降解和吸附土壤污染物、制作生物炭和活性炭、生产沼气等<sup>[5–14]</sup>。

随着我国土壤问题日益突出,利用有机物料进行土壤改良是改善土壤生产力与发展生态农业的重要举措。菌渣作为广泛使用的有机物料,兼具防治土壤侵蚀和土壤退化、修复土壤重金属污染和土壤有机污染、土壤酸化改良和土壤盐碱化改良等多种用途<sup>[15]</sup>。作为有机肥,菌渣能够增加土壤有机质,促进土壤团粒结构形成,调节土壤 pH 值,长期施用菌渣能够改善因过度施用化肥而导致的土壤酸化、土壤板结与肥力资源流失等问题<sup>[16–18]</sup>。作为具有土壤修复功能的有机物料,菌渣可通过吸附作用或菌渣腐殖化与重金属形成稳定结构的配合物来降低重金属的有效性和流动性,和石灰、粉煤灰、沸石、海泡石、膨润土、赤泥、磷酸盐等传统无机钝化剂相比,菌渣具有成本低、环境友好的特点<sup>[19–20]</sup>。但值得关注的是,菌渣施用同样伴随风险,由于不同菌渣的性质差异极大,施用量较高可能会对土壤及作物带来不利影响<sup>[21]</sup>。梁涛等对重庆市不同菌渣的重金属含量进行调查,随机抽取 84 个菌渣样本检测,结果发现部分样品存在 Cd 超标的情况,长期施用可能会造成土壤重金属累积的风险<sup>[22]</sup>。除此之外,菌渣的含盐量通常较高,长期施用可能会导

收稿日期:2023–04–12

基金项目:国家重点研发计划(编号:YFD1600401);中国科学院科技扶贫项目(编号:KFJ–FP–202005);陕西省农业科技创新计划[编号:NYKJ–2022–YL(XN)11]。

作者简介:周 武(1995–),男,四川成都人,硕士研究生,主要从事农林废弃物资源化利用研究。E-mail:zhou102194@163.com。

通信作者:李鸣雷,研究员,主要从事食用菌技术推广研究。E-mail:mlli@nwsuaf.edu.cn。

致土壤含盐量上升,进而对土壤和作物造成危害,因此从土壤物理、土壤养分、土壤重金属等多方面评估菌渣施用对土壤理化性质的影响具有重要意义<sup>[23]</sup>。受限于单个试验点的空间分布和不同菌渣的性质差异,菌渣施用对土壤理化性质的影响需要在更大的空间尺度展开全面讨论。本研究以中国境内多个省份开展的菌渣施用试验数据为样本,对收集到的 27 篇文献数据建立数据库,运用 Meta 分析的方法探究菌渣施用对土壤理化性质的影响,为揭示循环与生态农业背景下菌渣施用的影响和合理施用菌渣提高土壤生产力提供科学指示。

## 1 材料与分析

### 1.1 数据来源

本研究所纳入的文献通过以下数据库检索得到:中国知网(<https://www.cnki.net/>)、Web of Science(<https://www.webofscience.com/>)、Science Direct(<https://www.sciencedirect.com/>)。以“菌渣施用(mushroom residues application)”“土壤理化性质(soil physical and chemical properties)”等关键词进行检索,收集截止于 2023 年以来有关菌渣施用对土壤理化性质影响的相关文献,对初步检索到的相关文献按照以下原则进行筛选:(1)试验地点为中国境内,试验前已测定土壤背景值,试验方式为大田试验且常年耕作;(2)试验须至少设立菌渣施用和不施肥(对照组)2 个处理,每个处理不少于 3 次重复,其他试验条件保持一致;(3)土壤样品采集深度为 0~20 cm 的耕层,栽培试验统计前茬作物采收后的土壤相关理化指标;(4)试验数据可提取内容包括样本均值、样本量、标准差或标准误。根据以上标准将筛选到的文献进行整理分类,建立文献信息数据库,如果文献中的数据形式为统计图,则利用 GetData Graph Digitizer 2.26 对图片进行数字化,最后将符合条件的 27 篇文献的 482 条有效数据进行分类汇总,构成本研究的数据库。

### 1.2 数据分组

为了保证结果的准确性,每个亚组内的数据点至少在 3 组以上。数据库包含的土壤理化指标主要有:土壤有机质含量、容重、水稳性团聚体(按直径分为大团粒:直径>0.200 cm、中团粒:直径为 0.025~0.200 cm、微团粒:直径<0.025 cm)含量分数、全氮含量、全磷含量、全钾含量、碱解氮含量、有效磷含量、有效钾含量、pH 值;土壤全 Cu、全 Cd、全

Pb、全 Zn、全 As、全 Cr、有效 Pb、有效 Cd 含量。

根据菌渣的处理方式将其分为菌渣直接施用和菌渣腐熟施用 2 个亚组;根据菌渣的碳氮比,将其分为碳氮比<15 和碳氮比>15 2 个亚组;根据菌渣的施用方式将其分为菌渣单施和菌渣化肥配施 2 个亚组;根据菌渣配施比例(按纯氮计算)将其分为配施比例<0.5 和配施比例>0.5 2 个亚组,菌渣配施比例=菌渣总氮含量/(菌渣总氮含量+化肥总氮含量),其中:菌渣总氮含量=菌渣施用量×菌渣含氮百分比,化肥总氮含量=化肥施用量×化肥含氮百分比。

### 1.3 数据分析

纳入研究的数据应包含样本均值 $\bar{X}$ 、样本量  $n$ 、样本标准差  $SD$ ,如果文献中提供标准误  $SE$ ,那么标准差与标准误的转换关系为

$$SD = SE \times \sqrt{n}。 \quad (1)$$

如果土壤 pH 值的测定方法采用的是  $\text{CaCl}_2$  溶液方法测定的,统一将其转换为用水测定的 pH 值<sup>[24]</sup>:

$$\text{pH 值}(\text{H}_2\text{O}) = 1.65 + 0.86\text{pH 值}(\text{CaCl}_2)。 \quad (2)$$

土壤有机质和有机碳指标不一的情况,通过 Bemmelen 指数进行转化,统一将土壤有机碳含量转换为土壤有机质含量<sup>[25]</sup>:

$$\text{SOM} = \text{SOC} \times 1.724。 \quad (3)$$

为了消除不同研究之间试验指标量级上的差异,可以更加直观地比较处理效应,采用响应比作为衡量效应大小的方法:

$$RR_i = \ln(\bar{X}_i/\bar{X}_c) = \ln(\bar{X}_i) - \ln(\bar{X}_c)。 \quad (4)$$

式中: $RR_i$  为第  $i$  个研究的响应比; $\bar{X}_i$  为菌渣施用处理对应指标的平均值; $\bar{X}_c$  为不施肥处理对应指标的平均值。 $RR_i$  的方差由公式(5)计算:

$$V_{RR_i} = S_i^2/N_i \bar{X}_i^2 + S_c^2/N_c \bar{X}_c^2。 \quad (5)$$

式中: $V_{RR_i}$  为第  $i$  个研究响应比的方差; $N_i$ 、 $\bar{X}_i$ 、 $S_i$  分别为菌渣施用处理对应指标的样本量、平均值、标准差; $N_c$ 、 $\bar{X}_c$ 、 $S_c$  为不施肥处理对应指标的样本量、平均值、标准差。

异质性检验结果是选择固定效应模型或随机效应模型计算响应比的参考依据之一,在  $k$  个研究中, $Q$  统计量服从自由度为  $k-1$  的卡方分布,若  $P<0.05$ , $I^2>50\%$ ,则表明各研究间的真实效应不等,可考虑采用随机效应模型计算效应值,因此本研究结合异质性检验结果,选择随机效应模型进行数据合成相对合理,采用 D-L 法计算不同研究间的方差  $\tau^2$ <sup>[26-29]</sup>:

$$W_i = 1/V_{RR_i}; \quad (6)$$

$$RR_w = \sum_{i=1}^n W_i RR_i / \sum_{i=1}^n W_i; \quad (7)$$

$$\tau^2 = \max \{0, [\sum_{i=1}^n W_i (RR_i - RR_w)^2 - (n-1)] / (\sum_{i=1}^n W_i - \sum_{i=1}^n W_i^2 / \sum_{i=1}^n W_i) \}. \quad (8)$$

式中:  $W_i$  为第  $i$  个研究的权重;  $RR_w$  为  $RR_i$  的加权响应比;  $n$  为研究数量;  $\tau^2$  为研究间的方差。最后利用随机效应模型计算  $RR_i$  的加权响应比  $RR$  和标准误差  $SE(RR)$ , 将不同研究间的方差  $\tau^2$  用于重新分配权重:

$$W_i^* = 1/(V_{RR_i} + \tau^2); \quad (9)$$

$$\overline{RR} = \sum_{i=1}^n W_i^* RR_i / \sum_{i=1}^n W_i^*; \quad (10)$$

$$SE(\overline{RR}) = \sqrt{1/\sum_{i=1}^n W_i^*}. \quad (11)$$

式中:  $W_i^*$  为第  $i$  个研究根据随机效应模型计算的权重;  $\overline{RR}$  的 95% 置信区间 (CI) 为:  $\overline{RR} \pm 1.96 SE(\overline{RR})$ , 1.96 为标准正态分布的双尾临界值 ( $P = 0.05$ ), 为了更好地比较处理效应, 将  $\overline{RR}$  转换为百分比: 效应量 ( $\ln RR\%$ ) =  $[\exp(\overline{RR}) - 1] \times 100\%$ 。如果  $\overline{RR}$  的 95% CI 不与零线相交, 则推断真实响应比为零的原假设不成立 ( $P < 0.05$ ), 即对应指标的处理效应是显著的<sup>[30-31]</sup>。

本研究通过计算失安全系数 (Fail-Safe N) 来分析发表偏倚性, 如果  $N$  远远大于样本量 ( $N > 5k + 10$ ), 那么认为纳入研究的分析结果是可靠的<sup>[32]</sup>。采用 Meta 回归的方法研究不同土壤理化指标与各个试验点的纬度、年平均温度 (mean annual temperature, mat)、年平均降水量 (mean annual precipitation, map) 之间的关系, Meta 分析使用软件 OpenMEE 完成。

## 2 结果与分析

### 2.1 菌渣施用对土壤理化性质的影响

由表 1 可知, 菌渣施用对土壤容重、有机质含量、全氮含量、全磷含量、全钾含量、碱解氮含量、有效磷含量、有效钾含量、pH 值的影响均显著 ( $P < 0.05$ ), 各项指标效应量的 95% CI 均不包含无效假设。菌渣施用能够显著降低土壤容重 ( $-9.1\%$ ), 提高土壤有机质和土壤氮、磷、钾的含量, 其中对土壤有机质的增幅最为显著 ( $37.4\%$ )。菌渣施用能够显著提高土壤的速效养分含量, 对土壤有效钾的增幅最大 ( $31.7\%$ ), 其次是土壤碱解氮 ( $18.7\%$ ),

对土壤有效磷的增幅最小 ( $14.9\%$ )。菌渣施用对土壤 pH 值也有一定的影响, 总体趋势是使得土壤 pH 值小幅上升 ( $1.6\%$ )。菌渣施用可显著提高土壤水稳性大团粒的质量分数 ( $16.5\%$ ), 对土壤水稳性中团粒的增幅不显著 ( $2.6\%$ ), 同时会显著减少土壤水稳性微团粒的质量分数 ( $-8.5\%$ )。菌渣施用使土壤全 Cu、全 Pb、全 Zn 的含量有小幅增加趋势, 增幅分别为  $0.7\%$ 、 $0.6\%$ 、 $0.4\%$ , 土壤全 Cd、全 As、全 Cr 含量的增幅较大, 分别为  $2.8\%$ 、 $10.4\%$ 、 $4.6\%$ ; 菌渣施用能显著降低土壤有效 Pb、有效 Cd 的含量, 与不施用菌渣相比, 分别减少土壤有效 Pb 含量  $7.7\%$ 、减少土壤有效 Cd 含量  $13.9\%$ 。

### 2.2 亚组分析结果

2.2.1 菌渣处理方式对土壤理化性质的影响 菌渣直接施用和菌渣腐熟施用对土壤理化指标的影响均显著 ( $P < 0.05$ )。菌渣直接施用对土壤有机质、碱解氮、有效磷、有效钾含量的增幅分别为  $45.4\%$ 、 $19.4\%$ 、 $19.6\%$ 、 $35.8\%$ , 对土壤有机质含量的增幅比菌渣腐熟施用高  $23.7\%$ , 对土壤碱解氮、有效磷、有效钾含量的增幅分别比菌渣腐熟施用低  $3.9\%$ 、 $59.5\%$ 、 $7.3\%$ , 菌渣腐熟施用对土壤有效磷的提升是菌渣直接施用的 4 倍以上 (图 1-a)。

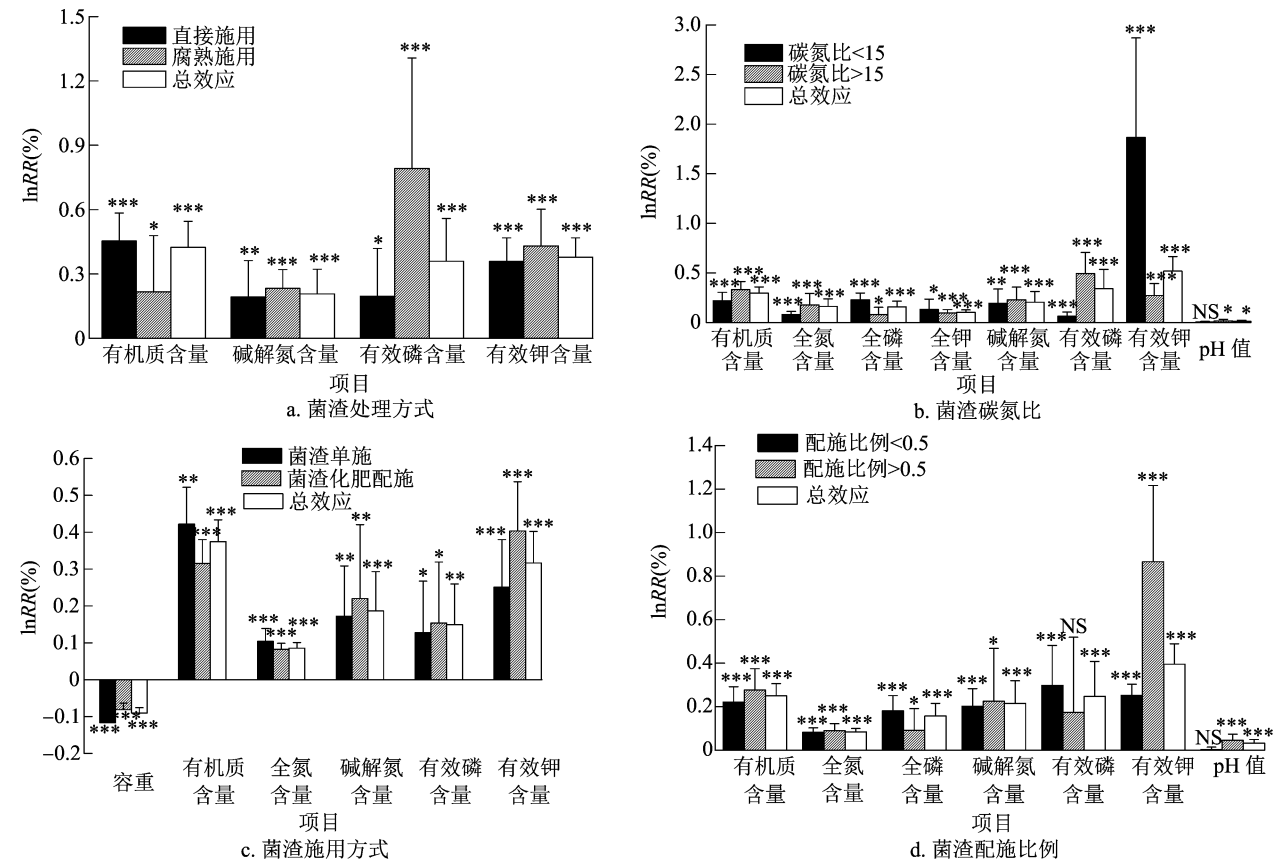
2.2.2 菌渣碳氮比对土壤理化性质的影响 高碳氮比组 (碳氮比  $> 15$ ) 对土壤理化指标的影响均显著 ( $P < 0.05$ ), 低碳氮比组 (碳氮比  $< 15$ ) 对土壤 pH 值的影响不显著 ( $P = 0.161$ ), 其他指标均显著。低碳氮比组对土壤有机质含量、全氮含量、全磷含量、全钾含量、碱解氮含量、有效磷含量、有效钾含量、pH 值的增幅分别为  $21.9\%$ 、 $8.0\%$ 、 $23.0\%$ 、 $13.2\%$ 、 $19.2\%$ 、 $6.4\%$ 、 $186.6\%$ 、 $0.4\%$ , 对土壤全磷、全钾、有效钾含量的增幅分别比高碳氮比组高  $15.1\%$ 、 $3.7\%$ 、 $159.5\%$ , 对土壤有机质含量、全氮含量、碱解氮含量、全磷含量、pH 值的增幅分别比施用高碳氮比组低  $11.2\%$ 、 $9.7\%$ 、 $3.7\%$ 、 $42.9\%$ 、 $1.2\%$ 。低碳氮比组对土壤有效钾含量的增幅是高碳氮比组的近 7 倍, 高碳氮比组对土壤有效磷含量的增幅则是低碳氮比组的近 8 倍 (图 1-b)。

2.2.3 菌渣施用方式对土壤理化性质的影响 菌渣单施与菌渣配施对土壤理化性质的影响均显著 ( $P < 0.05$ )。菌渣单施对土壤容重、有机质含量、全氮含量、碱解氮含量、有效磷含量、有效钾含量的增幅分别为  $-12\%$ 、 $42\%$ 、 $10\%$ 、 $17\%$ 、 $13\%$ 、 $25\%$ , 对土壤有机质、全氮含量的增幅分别比菌渣化肥配施高

表 1 菌渣施用于土壤理化性质的总体特征

变量	效应量及 95% 置信区间	森林图	样本量
容重	-9.1 [-10.6, -7.5]		13 ***
有机质含量	37.4 [31.8, 43.1]		111 ***
全氮含量	8.6 [7.1, 10.0]		25 ***
全磷含量	13.7 [8.9, 18.5]		14 ***
全钾含量	10.1 [7.4, 12.8]		8 ***
碱解氮含量	18.7 [8.9, 29.4]		14 ***
有效磷含量	14.9 [6.9, 22.9]		23 *
有效钾含量	31.7 [23.6, 39.6]		30 ***
pH 值	1.6 [0.1, 3.1]		28 *
大团粒质量分数	16.5 [7.3, 26.6]		25 ***
中团粒质量分数	2.6 [-2.4, 7.9]		24
微团粒质量分数	-8.5 [-11.9, -5.0]		51 ***
全 Cu 含量	0.7 [0.1, 1.4]		14 *
全 Cd 含量	2.8 [1.6, 3.9]		31 ***
全 Pb 含量	0.6 [0.4, 0.9]		31 ***
全 Zn 含量	0.4 [0.2, 0.7]		14 ***
全 As 含量	10.4 [6.4, 14.6]		11 ***
全 Cr 含量	4.6 [3.0, 6.3]		6 ***
有效 Pb 含量	-7.7 [-13.1, -2.0]		10 **
有效 Cd 含量	-13.9 [-22.1, -4.9]		10 **

注: \* 表示  $P < 0.05$ , \*\* 表示  $P < 0.01$ , \*\*\* 表示  $P < 0.001$ ,表 2 同;虚线表示  $\ln RR\% = 0$ 。



\* 表示  $P < 0.05$ , \*\* 表示  $P < 0.01$ , \*\*\* 表示  $P < 0.001$ , NS 表示亚组效应不显著

图1 亚组分析结果

10%、2%,对土壤容重、碱解氮含量、有效磷含量、有效钾含量的增幅比菌渣化肥配施低 4%、5%、2%、15%。(图 1-c)。

2.2.4 菌渣配施比例对土壤理化性质的影响 菌渣配施比例 <0.5 时对土壤 pH 值的影响不显著 ( $P=0.577$ ),对其他理化指标的影响均显著 ( $P<0.05$ ),菌渣配施比例 >0.5 时对土壤理化指标的影响均显著。菌渣配施比例 <0.5 时对土壤有机质含量、全氮含量、全磷含量、碱解氮含量、有效磷含量、有效钾含量、pH 值的增幅分别为 15.4%、6.2%、11.3%、12.6%、13.8%、20.2%、-0.8%,对土壤全磷、有效磷的增幅比菌渣配施比例 >0.5 时分别高 11.3%、13.8%,对土壤有机质含量、全氮含量、碱解氮含量、有效磷含量、有效钾含量、pH 值的增幅比菌渣配施比例 >0.5 时分别低 12.3%、2.8%、9.9%、3.6%、4.5%、66.4%、5.3%(图 1-d)。

2.3 菌渣施用下纬度、年平均降水量和年平均温度与土壤理化性质的关系

Meta 回归结果显示,菌渣施用下土壤容重、有机质、全氮、碱解氮、有效钾、全 Pb、全 Zn 的效应量与纬度的关系不显著,土壤水稳性中团粒和微团粒、全磷、全钾、有效磷、全 Cu、全 As 的效应量与纬度存在显著的正相关关系,土壤水稳性大团粒、pH 值的效应量与纬度存在显著的负相关关系(表 2)。菌渣施用下土壤容重、水稳性大团粒的效应量与年平均温度呈显著的正相关关系,土壤 pH 值的效应量与年平均温度的关系不显著;土壤水稳性中团粒和微团粒、全磷、全钾、有效磷、全 Cu、全 As 的效应量与年平均温度呈显著的负相关关系。土壤水稳性大团粒、pH 值的效应量与年平均降水量呈显著的正相关关系,土壤水稳性中团粒和微团粒、全磷、有效磷、全 As 的效应量与年平均降水量呈显著的负相关关系,土壤容重、全钾、全 Cu 的效应量与年平均降水量的关系不显著(图 2、图 3)。

3 讨论

3.1 菌渣施用对土壤容重、土壤团聚体的影响

土壤容重是土壤重要的肥力指标之一,它是土壤孔隙结构、保水能力的集中反映<sup>[33]</sup>。菌渣施用能显著降低土壤容重的原因主要有 2 点:一是菌渣自身质地较轻、孔隙度较大,因此投入到土壤中会降低土壤容重,二是菌渣养分丰富能够提高土壤微生物数量和土壤酶活性,在土壤微生物的作用下通过腐

表 2 纬度与土壤理化指标效应量的关系

因变量 (lnRR%)	回归模型	样本量	r <sup>2</sup>	P 值
容重	y = 0.012x - 0.527	13	0.000 0	0.466 0
大团粒质量分数	y = -0.119x + 5.092	25	0.549 1	<0.01 **
中团粒质量分数	y = 0.585x - 12.548	24	1.000 0	<0.001 ***
微团粒质量分数	y = 0.022x - 0.785	51	0.260 7	<0.01 **
有机质含量	y = -0.002x + 0.401	63	0.009 4	0.202 0
全氮含量	y = -0.001x + 0.227	28	0.047 8	0.180 0
全磷含量	y = 0.134x - 3.972	14	0.446 0	0.008 0 **
全钾含量	y = 0.085x - 2.490	8	0.385 0	0.037 2 *
碱解氮含量	y = 0.178	17	0.000 0	0.995 0
有效磷含量	y = 0.037x - 0.888	23	0.633 2	<0.001 ***
有效钾含量	y = -0.022x + 0.982	23	0.052 3	0.098 5
pH 值	y = -0.003x + 0.137	28	0.469 3	<0.001 ***
全 Cu 含量	y = 0.028x - 0.769	14	0.532 9	<0.001 ***
全 As 含量	y = 0.025x - 0.686	11	0.787 4	<0.001 ***
全 Pb 含量	y = -0.019x + 0.373	11	0.227 0	0.090 4
全 Zn 含量	y = 0.086x - 2.093	6	0.240 2	0.108 0

殖化作用形成腐殖质,可改善土壤团粒结构从而间接降低土壤容重<sup>[34-37]</sup>。低纬度地区土壤容重的降低幅度较小,可能的原因是这些地区温度和降水量较高,菌渣分解较快,残留的菌渣逐渐减少,同时部分不稳定的有机胶结物被破坏,导致土壤团粒结构受损(图 2-a)。陈玉真等通过田间试验研究菌渣施用下茶园土壤团聚体的分布特征,结果发现菌渣施用会增加土壤水稳性大团粒(>0.20 cm)的质量分数,减少水稳性微团粒(<0.025 cm)的质量分数<sup>[38]</sup>,本研究的结果与之一致。土壤团聚体的粒级分布同时受土壤肥力、气候条件等多种因素的影响,菌渣施用下温度和降水量较高的低纬度地区对土壤水稳性大团粒的增幅更加显著(图 2-c、图 2-d),而温度和降水量较低的高纬度地区土壤水稳性中团粒和微团粒的增幅更大(图 2-e 至图 2-h)。

3.2 菌渣施用对土壤养分的影响

腐熟处理的菌渣对土壤速效养分的增加十分显著(图 1-a),菌渣经过腐熟处理后有机质含量下降,碱解氮、有效磷、有效钾的释放更加充分,微生物丰度增加,pH 值小幅上升,因此菌渣的处理方式对土壤理化性质的影响较大<sup>[39]</sup>。有研究表明,菌渣等有机物料的碳氮比与其矿化速率呈反比,菌渣碳氮比低时菌渣分解速率较快,低碳氮比组(碳氮比 <15)处理下土壤中残留的有机质和高碳氮比组(碳氮比 >15)相比相对较少(图 1-b),特别对土

壤有效钾的提升十分显著<sup>[40]</sup>。菌渣施用方式对土壤肥力的影响有所差异(图 1-c),菌渣化肥配施更有利于土壤微生物对菌渣碳素的转化分解,因此土壤有机质、土壤全氮的增幅低于菌渣单施,土壤碱解氮、有效磷、有效钾的增幅高于菌渣单施<sup>[41]</sup>。菌渣直接施用或菌渣配施比例 > 0.5 时,土壤有机质的增幅较大,其原因主要是菌渣直接施用或比例较高时分解速率较慢,菌渣配施比例如果超过土壤的矿化速率,耕作结束后土壤中残余菌渣量较多,有机质会不断积

累,从而提高土壤中的有机质含量<sup>[42]</sup>。菌渣配施比例 < 0.5 时,土壤有机质的增幅较小,但土壤全磷、有效磷的增加更显著,因此菌渣的施用比例并不是越高越好(图 1-d)。菌渣施用下土壤全磷、全钾、有效磷受气候条件的影响较大,在高纬度地区土壤的微生物活性低于低纬度地区,菌渣的养分释放缓慢,土壤中积累的全磷、全钾、有效磷随之增加(图 3-a 至图 3-f),而低纬度地区温度、降水量较高,淋溶作用加强,土壤中的养分积累逐渐减少<sup>[43]</sup>。

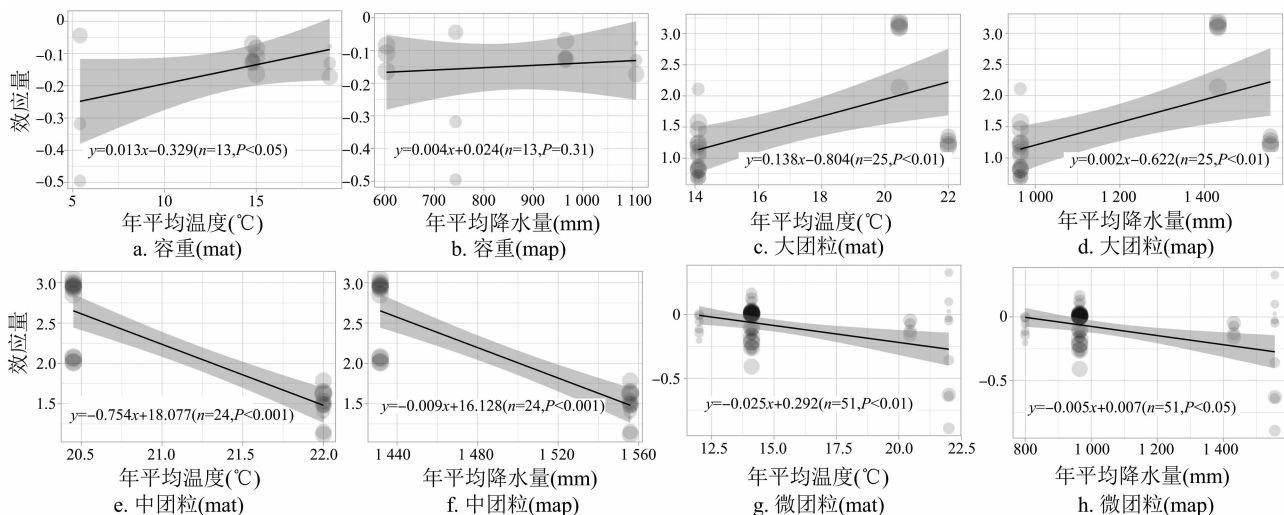


图2 菌渣施用下土壤物理指标效应量与年平均温度、年平均降水量的关系

### 3.3 菌渣施用对土壤 pH 值的影响

菌渣对土壤 pH 值具有一定的调节作用,总体趋势是使得土壤 pH 值小幅上升(表 1)。菌渣在酸化土壤改良和盐碱土改良中均有应用,在调节土壤酸碱度的机制中,菌渣残留的酸碱缓冲成分和土壤微生物承担着重要作用<sup>[44-45]</sup>。在调节土壤酸化中,因为食用菌培养基中通常会添加各种矿质元素,例如  $\text{CaSO}_4$ 、 $\text{MgSO}_4$ 、 $\text{CaCO}_3$  等,菌渣施用下可增加土壤中的交换性  $\text{Ca}^{2+}$ 、 $\text{Mg}^{2+}$  含量,从而达到中和土壤酸性的目的<sup>[46]</sup>。在调节土壤盐碱化中,谢修鸿等研究发现菌渣施用量与土壤中的交换性  $\text{Na}^+$  呈显著负相关关系,施用菌渣可用于改善盐碱土的性质,但由于菌渣的含盐量较高,过多的施用菌渣可能会造成土壤的盐分累积,继而造成不利影响,因此过多的施用菌渣可能会进一步加深土壤盐碱化<sup>[47]</sup>。温度和降水量较高的低纬度地区,较强的淋溶作用会导致土壤交换性阳离子的大量流失,进而导致土壤酸化<sup>[48]</sup>。随着纬度的增加土壤 pH 值的增幅逐渐降低,甚至表现为负效应,菌渣施用对温度和降水量较高的低纬度地区土壤 pH 值的提升更显著(图 3-

g 至图 3-h)。

### 3.4 菌渣施用对土壤重金属的影响

本研究发现菌渣施用会显著增加土壤全 Cd、全 As、全 Cr 的含量,小幅增加土壤全 Cu、全 Pb、全 Zn 的含量,增加幅度是否达到污染标准需要进一步评估。同时菌渣施用能显著降低土壤有效 Pb、有效 Cd、有效 Zn 的含量(表 2)。菌渣施用下土壤重金属含量增加可能是菌渣中残留的重金属所致,菌渣可通过直接吸附作用或腐殖化产生腐殖质与重金属发生配位作用钝化重金属,尤其是对土壤有效 Cu、有效 Cd、有效 Pb、有效 Zn 具有强有力的吸附作用<sup>[49-50]</sup>。菌渣虽然对土壤有效态重金属具有良好的钝化作用,但是随着腐解过程的进行,其吸附效应会逐渐减弱,因此菌渣用于土壤重金属污染修复时需要考虑其长效性<sup>[51]</sup>。菌渣施用下纬度与土壤全 Cu、全 As 的增幅呈显著的正相关关系( $P < 0.001$ ),土壤全 Cu 受年平均温度的影响较大,土壤全 As 同时受年平均温度和年平均降水量的影响(图 3-i 至图 3-l),因此在高纬度地区施用菌渣需要防控土壤全 Cu、全 As 的累积,需要根据当地的气

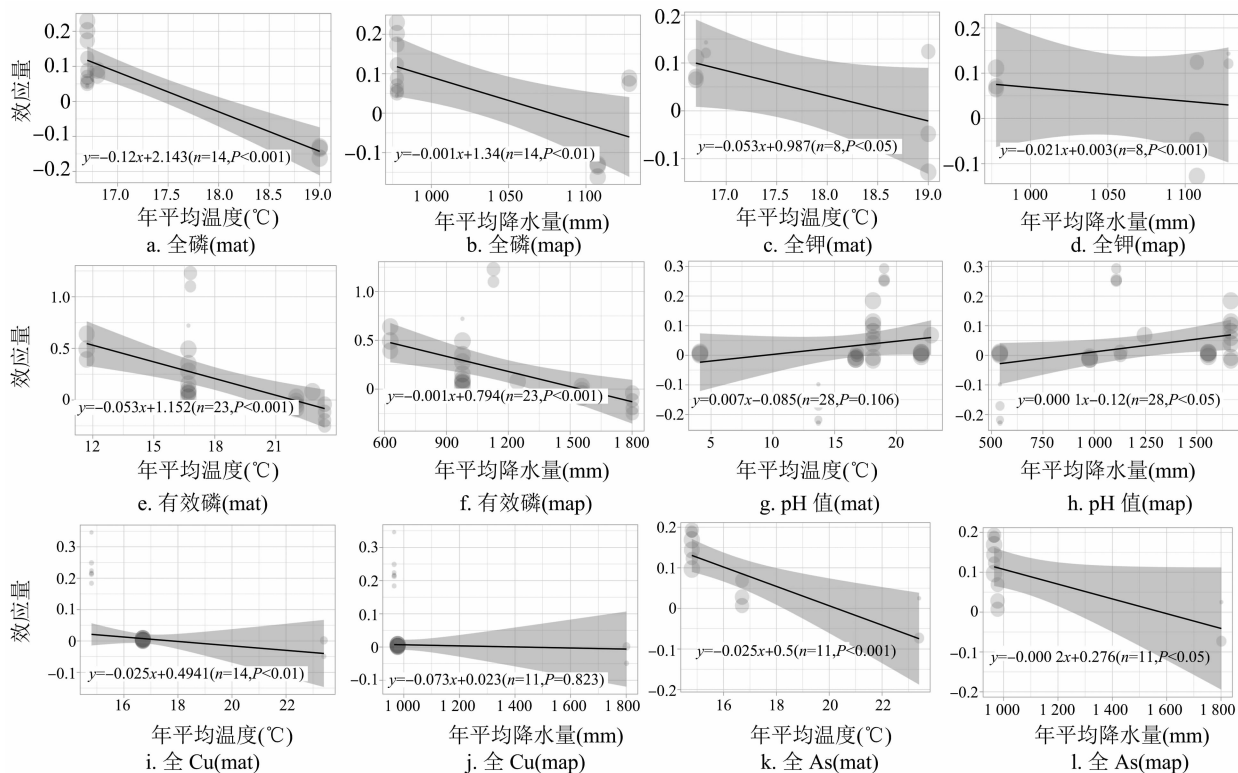


图3 菌渣施用下土壤化学指标效应量与年平均温度、年平均降水量的关系

候条件以及菌渣和土壤的理化性质制定施用方案。

#### 4 结论

本研究通过 Meta 分析量化研究了菌渣施用对我国土壤理化性质的影响,整合分析了土壤理化性质对菌渣施用的响应,以及菌渣处理方式、菌渣碳氮比、菌渣施用方式、菌渣配施比例对土壤理化性质的影响,同时研究了菌渣施用下不同地区的纬度、年平均温度、年平均降水量与土壤理化性质的关系,得出以下结论:(1)本研究发现菌渣施用能显著降低土壤容重、增加直径  $>0.2$  cm 的水稳性团聚体质量分数、减少直径  $<0.025$  cm 的水稳性团聚体质量分数。菌渣施用可增加土壤养分,小幅提升土壤 pH 值,腐熟施用、配施比例小于 0.5 时更有利于提升土壤的速效养分;菌渣直接施用、碳氮比  $>15$ 、单施或高配施比例时土壤有机质的积累较多。菌渣施用会显著增加土壤全 Cu、全 Cd、全 Pb、全 Zn、全 As、全 Cr 的含量,其中对土壤全 Cd、全 As、全 Cr 的增幅较大,对土壤全 Cu、全 Pb、全 Zn 的增幅较小,同时菌渣施用可显著降低土壤有效 Cd、有效 Pb 的含量。(2)本研究发现部分土壤理化指标表现出显著的纬度变化特征,土壤水稳性中团粒和微团粒、全磷、

全钾、有效磷、全 Cu、全 As 的效应量与纬度存在显著的正相关关系,土壤水稳性大团粒和 pH 值的效应量与纬度存在显著的负相关关系。在温度和降水量较高的低纬度地区菌渣施用更有利于土壤水稳性大团粒的形成,但同时土壤养分的流失也更加严重。在温度和降水量较低的高纬度地区土壤中 Cu 和 As 的残留量更多,如施用菌渣需要评估其长效影响。

#### 参考文献:

- [1] 薛龙飞,李 鹏,曹明宏. 中国食用菌出口贸易特征及波动原因分析[J]. 世界农业,2014(9):115-120.
- [2] Karen N F, Changkook R, Vida N S, et al. The reuse of spent mushroom compost and coal tailings for energy recovery: comparison of thermal treatment technologies[J]. Bioresource Technology, 2009, 100(1):310-315.
- [3] 郭 远,宋 爽,高 琪,等. 食用菌菌渣资源化利用进展[J]. 食用菌学报,2022,29(2):103-114.
- [4] Buswell J A, Cai Y J, Chang S T, et al. Lignocellulolytic enzyme profiles of edible mushroom fungi[J]. World Journal of Microbiology and Biotechnology, 1996, 12(5):537-542.
- [5] 张 亭,韩建东,李 瑾,等. 食用菌菌渣综合利用与研究现状[J]. 山东农业科学,2016,48(7):146-150.
- [6] 盛鹏飞,桑羽希,王建立,等. 工厂化食用菌菇渣理化性状和安全性评价[J]. 北京农学院学报,2017,32(3):42-45.
- [7] 韩建东,孙敬国,孙瑞祥,等. 工厂化生产金针菇菌渣栽培糙皮侧

- 耳的应用分析[J]. 中国食用菌,2019,38(1):27-31.
- [8] Hu Q, Wei Z, Wang H. Agaricus bisporus residue compost and its fertilizer efficiency[J]. Journal of Agro-Environment Science,2011,30(9):1902-1909.
- [9] 盛清凯, 宫志远, 陶海英. 金针菇菌渣在肉羊育肥中的应用[J]. 饲料博览,2011(3):1-3.
- [10] Law W M, Lau W N, Lo K L, et al. Removal of biocide pentachlorophenol in water system by the spent mushroom compost of *Pleurotus pulmonarius*[J]. Chemosphere,2003,52(9):1531-1537.
- [11] Chang B V, Hsu F Y, Liao H Y. Biodegradation of three tetracyclines in swine wastewater[J]. J Environ Sci Health B,2014,49(6):449-55.
- [12] 柴丽娜, 李红艳, 王朝旭, 等. 聚吡咯改性废菌渣活性炭的制备及其吸附水中  $\text{SO}_4^{2-}$  性能[J]. 化工环保,2022,42(2):210-218.
- [13] 刘蕊, 高玮, 张文静, 等. 菌渣生物炭负载四氧化三铁催化降解罗丹明 B[J]. 无机盐工业,2023,55(4):111-119.
- [14] 秦文弟, 甘福丁, 徐铁纯, 等. 食用菌菌渣产沼气潜力测定[J]. 贵州农业科学,2014,42(11):237-239.
- [15] 王良梅, 黄松杉, 郑光耀, 等. 菌渣作为土壤调理剂资源化利用的研究进展[J]. 土壤通报,2016,47(5):1273-1280.
- [16] Lou Z M, Zhu J, Wang Z X, et al. Release characteristics and control of nitrogen, phosphate, organic matter from spent mushroom compost amended soil in a column experiment[J]. Process Safety and Environmental Protection,2015,98:417-423.
- [17] Ju X T, Kou C L, Christie P, et al. Changes in the soil environment from excessive application of fertilizers and manures to two contrasting intensive cropping systems on the North China Plain[J]. Environmental Pollution,2007,145(2):497-506.
- [18] Liang L Z, Zhao X Q, Yi X Y, et al. Excessive application of nitrogen and phosphorus fertilizers induces soil acidification and phosphorus enrichment during vegetable production in Yangtze River Delta, China[J]. Soil Use and Management,2013,29(2):161-168.
- [19] Wang R G, Guo J K, Xu Y M, et al. Evaluation of silkworm excrement and mushroom dreg for the remediation of multiple heavy metal/metalloid contaminated soil using pakchoi[J]. Ecotoxicology and Environmental Safety,2016,124:239-247.
- [20] Futalan C M, Kan C C, Dalida M L, et al. Comparative and competitive adsorption of copper, lead, and nickel using chitosan immobilized on bentonite[J]. Carbohydr Polym,2011,83(2):528-536.
- [21] Medina E, Paredes C, Pérez M, et al. Spent mushroom substrates as component of growing media for germination and growth of horticultural plants[J]. Bioresource Technology,2009,100(18):4227-4232.
- [22] 梁涛, 胡留杰, 张涛, 等. 重庆市食用菌菌渣养分与重金属含量分析[J]. 植物营养与肥料学报,2022,28(4):715-725.
- [23] 张秀珍, 刘秉儒, 章家恩, 等. 施用双孢蘑菇菌渣条件下不同开垦年限土壤理化性质与养分特性变化[J]. 中国农学通报,2012,28(15):78-82.
- [24] Biederman L A, Harpole W S. Biochar and its effects on plant productivity and nutrient cycling: a meta-analysis[J]. GCB Bioenergy,2013,5(2):202-214.
- [25] Liu S W, Zhang Y J, Zong Y J, et al. Response of soil carbon dioxide fluxes, soil organic carbon and microbial biomass carbon to biochar amendment: a meta-analysis[J]. GCB Bioenergy,2016,8(2):392-406.
- [26] 肖婧, 徐虎, 蔡岸冬, 等. 生物质炭特性及施用管理措施对作物产量影响的整合分析[J]. 中国农业科学,2017,50(10):1827-1837.
- [27] 周赓, 杜岩功. Meta 分析氮肥对我国秋季大白菜产量的影响及调控因素解析[J]. 安徽农业科学,2020,48(20):160-162.
- [28] Kolbe R H, Cooper H M. Integrating research: a guide for literature reviews[J]. Journal of Marketing Research,1991,28(3):380-381.
- [29] 薛楠, 秦超英. Meta 分析中关于总体效应量的区间估计[J]. 纺织高校基础科学学报,2013,26(2):253-255,264.
- [30] Zhou L Y, Zhou X H, Shao J J, et al. Interactive effects of global change factors on soil respiration and its components: a meta-analysis[J]. Global Change Biology,2016,22(9):3157-3169.
- [31] 杨家伟, 白彤硕, 吴彬, 等. 秸秆还田对中国农田土壤节肢动物数量及多样性影响的整合分析[J]. 生态学报,2023,43(5):2013-2023.
- [32] 刘国辉, 买文选, 田长彦. 施用有机肥对盐碱土的改良效果: Meta 分析[J]. 农业资源与环境学报,2023,40(1):86-96.
- [33] Cihacek L J, Foss L A, Jacobson K A. Comparison of soil sampling devices for soil bulk density determination for carbon sequestration monitoring[J]. Communications in Soil Science and Plant Analysis,2015,46(2):180-184.
- [34] Aruf M, Ilyas M, Riaz M, et al. Biochar improves phosphorus use efficiency of organic-inorganic fertilizers, maize-wheat productivity and soil quality in a low fertility alkaline soil[J]. Field Crops Research,2017,214:25-37.
- [35] Li J, Zhao B Q, Li X Y, et al. Effects of long-term combined application of organic and mineral fertilizers on microbial biomass, soil enzyme activities and soil fertility[J]. Agricultural Sciences in China,2008,7(3):336-343.
- [36] 栗方亮, 张青, 王煌平, 等. 定位施用菌渣对稻田土壤团聚体中碳氮含量的影响[J]. 土壤,2017,49(1):70-76.
- [37] 李建欣, 葛桂民, 申爱民, 等. 菌渣有机肥对设施土壤微生物、酶活性及黄瓜品质和产量的影响[J]. 中国瓜菜,2022,35(8):57-61.
- [38] 陈玉真, 王峰, 吴志丹, 等. 施用菌渣对茶园土壤团聚体分布的影响[J]. 茶叶学报,2017,58(3):121-126.
- [39] 董雪梅, 王菲, 王延锋, 等. 菌渣分解复合菌系 HM-7 在黑木耳菌渣堆肥发酵中的应用[J]. 食用菌,2023,45(2):56-59.
- [40] 李俊良, 韩琅丰, 江荣凤, 等. 碳、氮比对有机肥料氮素释放和植物吸氮的影响[J]. 中国农业大学学报,1996,1(5):57-62.
- [41] 李春越, 苗雨, 薛英龙, 等. 长期施肥黄土旱塬农田土壤-微生物-植物系统碳氮磷生态化学计量特征[J]. 生态学报,2022,42(1):370-378.
- [42] 丁雪丽, 韩晓增, 乔云发, 等. 农田土壤有机碳固存的主要影响因素及其稳定机制[J]. 土壤通报,2012,43(3):737-744.



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.  
doi:10.15889/j.issn.1002-1302.2024.02.030

# 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

张翔宇<sup>1</sup>,陈晓芳<sup>2</sup>,柳敏<sup>1</sup>,成忠均<sup>1</sup>,李恒谦<sup>1</sup>,查钦<sup>1</sup>

(1.毕节市中药研究所,贵州毕节 551700;2.毕节医学高等专科学校,贵州毕节 551700)

**摘要:**解析不同轮作年限半夏土壤丛枝菌根真菌群落多样性与环境因子的相关性,为利用土壤环境因子调控 AMF 组成与丰度,提高半夏栽培效益提供参考。采用不同年限轮作半夏种植土壤为材料,通过高通量测序和生物信息学分析土壤丛枝菌根真菌群落多样性,并结合环境因子进行相关性分析。结果表明,AMF 的多样性和丰度均随着轮作时间的延长而增加,5 个样地的 15 个土壤样品中共注释到了 12 个科、14 个属、63 个种的 AMF 类群,球囊霉属 (*Glomus*)、近明球囊霉属 (*Claroideoglomus*) 为优势类群,占总序列数的 91.65%;在优势菌群中,球囊霉属的相对丰度与 ACP 活性极显著负相关,与 TK 含量显著负相关,近明囊霉属的相对丰度与 OM 含量显著负相关,与 TK 含量、CAT 活性、PPO 活性显著或极显著正相关;非优势菌群中,未分类的球囊霉门的相对丰度与 URE 活性极显著正相关,与 pH 值极显著负相关,多孢囊霉属 (*Diversispora*) 的相对丰度与 pH 值极显著正相关,与 AN 含量极显著负相关;不同菌群与土壤理化性质和酶活性的关联性差异较大,不同轮作年限土壤环境因子对半夏土壤中 AMF 群落组成和多样性影响较大。

**关键词:**半夏;轮作;丛枝根真菌;环境因子;多样性;相关性

**中图分类号:**S567.23<sup>+</sup>9.01;S182 **文献标志码:**A **文章编号:**1002-1302(2024)02-0213-08

中药材半夏 [*Pinellia ternate* (Thunb.) Breit.] 具

有燥湿化痰、降逆止呕、消痞散结的功效<sup>[1]</sup>。半夏在我国为广泛分布种,自然居群不径相同。产地沿革考证其产区有陕西、山东、江苏、湖北等地<sup>[2]</sup>。如今我国半夏种植主产区为甘肃、河北、贵州、湖北等省,贵州赫章是主要半夏种植产区之一<sup>[3]</sup>,所产半夏个大粒圆、色白粉足<sup>[4-5]</sup>。

植物和土壤微生物之间的相互作用是连接生态系统的键<sup>[6]</sup>。土壤微生物量是土壤活性的重要标志<sup>[7]</sup>。植物为土壤微生物提供一定的营养,促进两者协同进化。土壤微生物可分解有机物并被植物吸收<sup>[6]</sup>。土壤微生物重要组成部分丛枝菌根

收稿日期:2023-02-08

基金项目:国家科技支撑计划(编号:2015BAI05B03);贵州省人才基地项目(编号:RCJD2020-21);贵州省高层次创新型人才项目(编号:毕科人才合字[2021]05号);毕节市揭榜挂帅项目(编号:毕科合重大专项字[2021]3号);毕节市科技局联合基金项目(编号:毕科联合字 yz[2021]5号)。

作者简介:张翔宇(1986—),男,贵州道真人,硕士,副研究员,研究方向为药用植物资源工程。E-mail:304626335@qq.com。

通信作者:陈晓芳,硕士,副教授,研究方向为特色资源分子生物学,E-mail:672409415@qq.com;查钦,硕士,副研究员,研究方向为药用植物资源开发与利用,E-mail:914282286@qq.com。

[43] Zheng M H, Zhou Z H, Luo Y Q, et al. Global pattern and controls of biological nitrogen fixation under nutrient enrichment: a meta-analysis[J]. Global Change Biology, 2019, 25(9): 3018-3030.

[44] 陈雯雯,申卫收,韩成,等.施用不同配比菇渣、熟牛粪对酸性土壤质量和花生产量的影响[J].中国土壤与肥料,2014(1): 69-74.

[45] 朱小平,刘微,高书国,等. NaCl 胁迫下施用有益微生物菌糠对豌豆生长及结瘤的影响[J].河北科技师范学院学报,2004,18(1):20-22.

[46] 曹健,杨秋,赫新洲,等.有机肥对红葱生长和产量及土壤肥力的影响[J].中国农学通报,2011,27(16):266-272.

[47] 谢修鸿,李玉.姬松茸菌糠改良苏打盐碱土对土壤化学性质及牧草生长的影响[J].吉林农业大学学报,2010,32(5):

518-522.

[48] Lucas R W, Klaminder J, Futter M N, et al. A meta-analysis of the effects of nitrogen additions on base cations: implications for plants, soils, and streams[J]. Forest Ecology and Management, 2011, 262(2):95-104.

[49] 蒋元继,唐亚,刘本洪,等.香菇菌渣吸附水溶液中重金属铅的研究[J].西南农业学报,2010,23(5):1615-1619.

[50] 张海波,闫洋洋,程红艳,等.菌糠生物炭对土壤铅镉形态及甜菜生长的影响[J].山西农业大学学报(自然科学版),2021,41(1):103-112.

[51] 韩佳益,王雨阳,赵庆杰,等.不同腐解阶段羊粪与海藻有机肥对 Pb(II) 的吸附[J].农业环境科学学报,2021,40(9):1904-1914.