

基于紫外-可见光光谱法研究菌渣不同分解期溶解性有机质的变化特征

程佳欣^{1,2}, 步连燕², 杨 阳², 丁 野², 李勤奋^{1,2*}, 程汉亭^{2*}

1. 黑龙江八一农垦大学农学院, 黑龙江大庆 163711; 2. 中国热带农业科学院环境与植物保护研究所, 海南海口 571101

摘 要: 菌渣作为食用菌栽培后的主要有机废弃物, 其资源化利用对农业可持续发展具有重要意义。溶解性有机质 (DOM) 是菌渣分解过程中的关键活性组分, 其含量与结构演变的动态变化直接影响菌渣还田后的环境效应与肥力释放。目前针对菌渣不同分解期 DOM 系统演变规律的研究尚不明确, 尤其是在 DOM 芳香性、分子量、腐殖化程度等关键理化性质连续变化方面的定量解析不足, 限制了菌渣的资源化高效利用。因此, 本研究以菌渣为研究对象, 通过监测菌渣 DOM 在不同分解期 (第 5、15、30、60 天) 的溶解性有机碳 (DOC) 含量、芳香性、分子量和腐殖化程度的变化趋势, 旨在揭示其动态演变规律。研究采用紫外-可见吸收光谱技术, 对菌渣 DOM 的特征光谱参数进行系统测定分析, 具体参数包括 $SUVA_{254}$ 、 $SUVA_{260}$ 、 $SUVA_{280}$ 、 A_{250}/A_{365} 、 A_{300}/A_{400} 、 α_{355} 和光谱斜率 (S_R), 并结合二维相关光谱 (2D-COS) 进一步解析 DOM 结构的响应顺序。结果表明: 随着菌渣分解期的延长, DOC 含量呈显著下降的趋势, 第 60 天较第 5 天降低 71.05%, 说明菌渣中易降解有机碳组分被微生物优先利用; $SUVA_{254}$ 和 $SUVA_{260}$ 呈先降后升的趋势, 而 $SUVA_{280}$ 先升后降, 表明 DOM 中结构简单的小分子芳香性成分优先被微生物分解; A_{250}/A_{365} 和 A_{300}/A_{400} 在分解过程中逐渐下降, 表明 DOM 分子量和腐殖化程度的提高; 而 α_{355} 显著降低, S_R 值始终小于 1, 说明菌渣 DOM 以外源输入为主导; 同时 2D-COS 分析显示, 芳香族组分 (200 nm) 对分解过程响应最敏感。综上, 本研究揭示了菌渣分解过程中 DOM 结构趋于复杂且稳定的规律, 研究结论为土壤碳固存和菌渣资源化利用提供了理论支撑。未来研究可借助三维荧光和高分辨质谱等技术, 深入解析菌渣 DOM 的组成与转化路径, 并加强其与微生物群落功能的关联分析, 以全面揭示菌渣 DOM 转化的驱动机制与长期生态效应。

关键词: 菌渣; 溶解性有机质; 紫外-可见吸收光谱; 特征光谱参数; 分解过程

中图分类号: S141.4

文献标志码: A

Change Characteristics of Dissolved Organic Matter at Different Decomposition Stages of Mushroom Residue Based on Ultraviolet-visible Spectroscopy

CHENG Jiaxin^{1,2}, BU Lianyan², YANG Yang², DING Ye², LI Qinfen^{1,2*}, CHENG Hanting^{2*}

1. College of Agronomy, Heilongjiang Bayi Agricultural University, Daqing, Heilongjiang 163711, China; 2. Environment and Plant Protection Institute, Chinese Academy of Tropical Agricultural Sciences, Haikou, Hainan 571101, China

Abstract: As the main organic waste after the cultivation of edible fungi, the resource utilization of mushroom residue is of great significance to the sustainable development of agriculture. Dissolved organic matter (DOM) is the key active component in the decomposition process of mushroom residue, and the dynamic changes of its content and structure evolution directly affect the environmental effect and fertility release of mushroom residue after returning to the field.

收稿日期 2025-10-26; 接受日期 2025-11-29

基金项目 中国热带农业科学院国家热带农业科学中心科技创新团队项目 (No. CATASCXTD202524); 海南省自然科学基金项目 (No. 320QN310); 海南省重点研发计划项目 (No. ZDYF2025XDNY124)。

作者简介 程佳欣 (2000—), 女, 硕士研究生, 研究方向: 特色食药菌资源收集与利用。*通信作者 (Corresponding author): 李勤奋 (LI Qinfen), E-mail: qinfenli2005@163.com; 程汉亭 (CHENG Hanting), E-mail: chenghanting@163.com。

At present, the research on the evolution law of DOM system at different decomposition stages of mushroom residue is not clear. Especially, the quantitative analysis on the continuous changes of key physical and chemical properties such as DOM aromaticity, molecular weight and humification degree is insufficient, which limits the efficient resource utilization of mushroom residue. Therefore, this study took mushroom residue as the research object, and aiming to reveal its dynamic evolution law by monitoring the changing trend of DOC content, aromaticity, molecular weight and humification degree of DOM in mushroom residue at different decomposition stages (5th, 15th, 30th and 60th days). In this paper, the characteristic spectral parameters of DOM in mushroom residue were systematically measured and analyzed by UV-Vis absorption spectroscopy, including SUVA₂₅₄, SUVA₂₆₀, SUVA₂₈₀, A_{250}/A_{365} , A_{300}/A_{400} , α_{355} , and spectral slope (S_R), and the response order of DOM structure was further analyzed by combining with two-dimensional correlation spectrum (2D-COS). The results showed that the DOC content decreased significantly with the extension of the decomposition period, and decreased by 71.05% on the 60th day compared with the 5th day, indicating that the easily degradable organic carbon components in the mushroom residue were preferentially utilized by microorganisms. SUVA₂₅₄ and SUVA₂₆₀ decreased at first and then increased, while SUVA₂₈₀ increased at first and then decreased, indicating that the aromatic components with simple structure in DOM were preferentially decomposed by microorganisms. A_{250}/A_{365} and A_{300}/A_{400} gradually decreased during the decomposition process, reflecting the increase of DOM molecular weight and humification degree. α_{355} decreased significantly, and the S_R value was always less than 1, indicating that the DOM of mushroom residue was dominated by external input. 2D-COS analysis showed that the aromatic component (200 nm) was the most sensitive to the decomposition process. To sum up, this study revealed the regular phenomenon that DOM structure tends to be complex and stable in the decomposition process of mushroom residue, which would provide theoretical support for soil carbon sequestration and mushroom residue resource utilization. In the future, with the help of three-dimensional fluorescence and high-resolution mass spectrometry, the composition and transformation path of DOM in mushroom residue could be deeply analyzed, and the correlation analysis between DOM and microbial community function could be strengthened to fully reveal the driving mechanism and long-term ecological effect of DOM transformation of mushroom residue.

Keywords: mushroom residue; dissolved organic matter; ultraviolet-visible absorption spectrum; characteristic spectral parameters; decomposition process

DOI: 10.3969/j.issn.1000-2561.2026.03.018

溶解性有机质 (dissolved organic matter, DOM) 是一类能够通过 0.45 μm 滤膜, 溶于水、酸或碱性溶液的复杂有机分子混合物, 广泛存在于土壤、沉积物、水体及各类有机废弃物中^[1]。尽管 DOM 在环境介质中的含量占比通常仅有 1.0%~6.0%, 但其具有极高的生物化学活性, 是生态系统中物质循环与能量交换的核心载体^[2]。一方面, DOM 参与全球碳循环, 可通过微生物降解释放 CO_2 、 CH_4 等温室气体, 其含量与结构变化直接反映土壤有机碳的动态演变^[3]; 另一方面, DOM 的化学性质 (如芳香性、分子量、官能团组成) 决定了其生态环境效应——亲水性 DOM 可为微生物提供碳源与能量, 调控微生物群落结构^[4], 疏水性 DOM 能与疏水性污染物结合, 而富含羧基、酚羟基的 DOM 则对重金属具有强络合能力, 进而影响污染物的迁移转化^[5]。此外, DOM 还是评价土壤肥力的重要指标, 其动态变化可快速反映农业管理措施对土壤质量的影响。因此, 分析 DOM 含量与化学性质的演变, 对理解生态过程、优化

有机废弃物资源化利用具有重要意义。

菌渣作为食用菌栽培后的主要废弃物, 富含纤维素及腐殖质前体物质, 是农业有机资源循环利用的重要载体。近年来, 菌渣还田、堆肥等资源化再利用技术得到广泛应用, 菌渣在储存、腐熟及应用过程中, 其内部有机质会持续降解并释放 DOM, 且 DOM 的含量与化学性质会随取样时期呈动态变化, 即新鲜菌渣中 DOM 以小分子碳水化合物、氨基酸为主, 腐熟过程中则逐步向大分子腐殖质类物质转化^[6]。已有研究表明, 菌渣分解速率呈现出先快后慢的趋势, 且通过调节碳氮比 (C/N) 和微生物活性, 可进一步影响 DOM 的释放与转化^[7]。然而, 当前针对 DOM 的研究多集中于土壤、水体或传统堆肥体系, 鲜少聚焦菌渣这一特殊有机物料。同时针对不同取样时期 (如新鲜期、腐熟中期、腐熟后期) DOM 动态演变规律的研究也较缺乏, 尤其缺少对其芳香性、腐殖化程度、分子量等关键理化性质连续变化的定量解析, 难以支撑菌渣资源化利用的科学指导。

光谱分析技术是当前表征 DOM 性质的核心手段,其中紫外-可见吸收光谱(UV-Vis)因操作简便、样品无损、信息量大等优势,在 DOM 研究中应用广泛^[8]。该方法无需对样品进行复杂的预处理,通过特征参数可直接揭示 DOM 的关键理化性质。例如, SUVA₂₅₄ 值与 DOM 芳香性呈正相关,其值越高表明芳香族化合物占比越高^[9]; A_{250}/A_{365} 比值可表示分子量大小,比值越大则 DOM 分子量越小^[10];光谱斜率(S)(275~295 nm)与 DOM 光化学反应活性相关,且与平均分子量呈反比^[11]。已有研究证实,UV-Vis 技术可有效解析土壤、污泥等物质中 DOM 的芳香性、腐殖化程度及分子量变化^[12-13],如赵雄威等^[1]利用 UV-Vis 技术分析长期施肥对砖红壤 DOM 的影响,明确了 SUVA₂₅₄、吸光度比值等参数对 DOM 化学性质的表征;谢军等^[14]则通过 UV-Vis 参数揭示了长期施肥下土壤 DOM 分子量与疏水性的演变规律。这些研究为利用 UV-Vis 解析菌渣 DOM 的动态变化提供了可靠的方法支撑。鉴于此,本研究以不同取样时期的菌渣为研究对象,结合紫外-可见光吸收光谱技术,系统探究菌渣从新鲜到腐熟过程中 DOM 含量、芳香性、分子量、腐殖化程度等理化性质的演变规律,通过分析不同分解期菌渣 DOM 的 UV-Vis 特征参数(SUVA₂₅₄、 A_{250}/A_{365} 、 S 值等)差异,揭示菌渣 DOM 的动态演变机制,以期为菌渣资源化利用的环境风险评估与肥力管理措施提供理论依据,同时丰富有机废弃物 DOM 的光谱学研究体系,为类似基质的 DOM 动态研究提供参考。

1 材料与方法

1.1 试验地概况

本研究试验田位于海南省儋州市两院试验场(109°29'47"E, 19°34'54"N),属热带季风岛屿气候,年平均温度为 23.9℃,积温为 8474.3℃,常年降雨量为 1886 mm,雨季主要集中在 5—10 月,占全年降水总量的 79%,极端天气通常为夏季暴雨和春季干旱。试验田为橡胶林地,土壤类型为砖红壤,肥力水平较低,菌渣中的核心养分:有机碳含量为(258.99±8.43)g/kg,总氮含量为(21.03±0.59)g/kg,有效磷含量为(419.97±25.32)mg/kg,铵态氮含量为(2387.56±151.85)mg/kg,硝态氮含量为(886.78±36.27)mg/kg,溶解性有机碳含量为(1916.52±126.30)mg/kg。

1.2 方法

1.2.1 样品采集 试验样品为采集虎奶菇菌核后的菌渣。于 2024 年 4 月开展试验,分别在菌包覆土后的第 5、15、30、60 天进行阶段性采样,采用整体取样混匀法采集菌包样品,每个处理均设置 3 个样品重复。采集后的所有菌渣及时运回实验室,经烘干处理后,去除杂质用于后续试验分析。

1.2.2 DOM 的制备与分析 菌渣 DOM 溶液的提取:参照吴东明等^[15]的方法,称取过 20 目筛风干样品 5.00 g 于 100 mL 离心管中,加入 50 mL 去离子水,避光环境振荡 24 h,12 000 r/min 离心 30 min,取上清液过 0.45 μm 滤膜,得 DOM 溶液,置于 4℃ 避光保存^[16]。采用总碳分析仪测定(德国耶拿公司 Multi N/C 3100 型)DOM 中的溶解性有机碳(DOC)含量。

1.2.3 样品 DOM 紫外-可见光光谱及特征参数分析 使用紫外-可见分光光度计扫描 DOM 吸收光谱。以超纯水为空白对照,扫描波长范围为 200~700 nm,波长间隔 1 nm。根据式(1)计算吸收系数(α_λ),特征紫外光谱吸收值(specific UV absorbance, SUVA)按式(2)计算:

$$\alpha_\lambda = 2.303A/b \quad (1)$$

$$\text{SUVA}_\lambda = \alpha_\lambda / \text{DOC} \quad (2)$$

式中, λ 为波长(nm); α_λ 为波长 λ 处的吸收系数(m^{-1}); A 为波长 λ 处的吸光度; b 为光程路径(m);DOC 为溶解性有机碳的浓度(mg/L)。进一步计算以下特征参数:SUVA₂₅₄、SUVA₂₆₀ 和 SUVA₂₈₀ 均为表征 DOM 芳香性的关键参数,分别用于衡量芳香族化合物的含量、疏水性和分子量^[9]; A_{250}/A_{365} 比值与 DOM 的表观分子量大小呈负相关,是评估 DOM 分量分布的常用光谱指标^[10]; A_{300}/A_{400} 比值与 DOM 的腐殖化程度密切相关^[14]; α_{355} 表征有色溶解性有机物(CDOM)的浓度;吸收光谱曲线斜率(S)是某波段的吸收光谱斜率,光谱斜率比值(S_R)是 2 个不同波段 S 值之比。计算公式如下:

$$\alpha_\lambda = \alpha_{\lambda_0} e^{[S(\lambda_0 - \lambda)]} \quad (3)$$

$$S_R = S_{275-295} / S_{350-400} \quad (4)$$

式中, α_λ 为测定波长 λ 的吸收系数, α_{λ_0} 为参照波长的吸收系数。 S_R 则通过 275~295 nm 波段光谱斜率($S_{275-295}$)与 350~400 nm 波段光谱斜率($S_{350-400}$)的比值计算得出,其相对稳定性较好,常被用于表征 DOM 的来源组成与结构变化,且与 DOM 浓度无关^[11]。

1.3 数据处理

采用 Microsoft Excel 2021 软件进行数据整理, 利用 SPSS 27.0 软件进行方差分析、相关性分析与主成分分析, 使用 Origin 2022 软件制图。采用 2D-COS 分析紫外光谱数据, 揭示 DOM 结构动态变化。

2 结果与分析

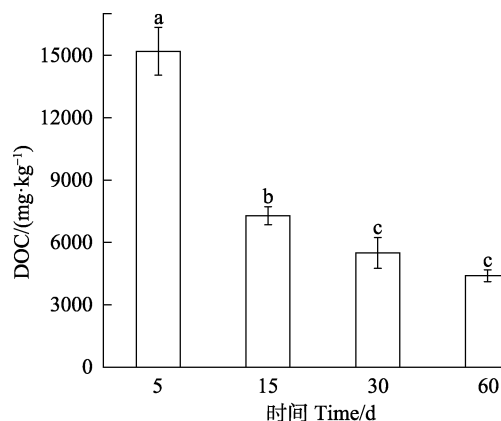
2.1 不同分解期菌渣还田后溶解性有机碳 (DOC) 含量变化

DOC 含量是衡量溶解性有机质 (DOM) “丰度”的最常用指标。由图 1 可知, 随着还田天数的增加, 菌渣中 DOC 含量呈显著下降趋势。在菌渣还田第 5 天时 DOC 含量最高, 为 15 196.67 mg/kg, 与之相比, 还田第 15、30、60 天时, DOC 含量分别降低 52.06%、63.83% 和 71.05%。说明分解时间显著影响 DOC 含量。

2.2 不同分解期菌渣还田后溶解性有机质 (DOM) 紫外-可见吸收光谱曲线特征

紫外-可见吸收光谱能够反映 DOM 的化学组成特征, 并可用于监测 DOM 的动态变化。不同

分解期菌渣 DOM 的紫外-可见吸收光谱特征如图 2 所示, 在不同分解期, 菌渣 DOM 的吸收系数均随波长的增加而减小, 均在短波区域 (200~300 nm) 吸收系数较高, 至 500 nm 波长后吸收系数趋近于 0。同时发现, 随着分解期的延长, 相同波长处的吸收系数呈先下降后上升的趋势。



不同小写字母表示差异显著 ($P < 0.05$)。

Different lowercase letters indicate significant difference ($P < 0.05$).

图 1 不同分解期菌渣中 DOC 含量变化

Fig. 1 Changes of DOC content in mushroom residue at different decomposition stages

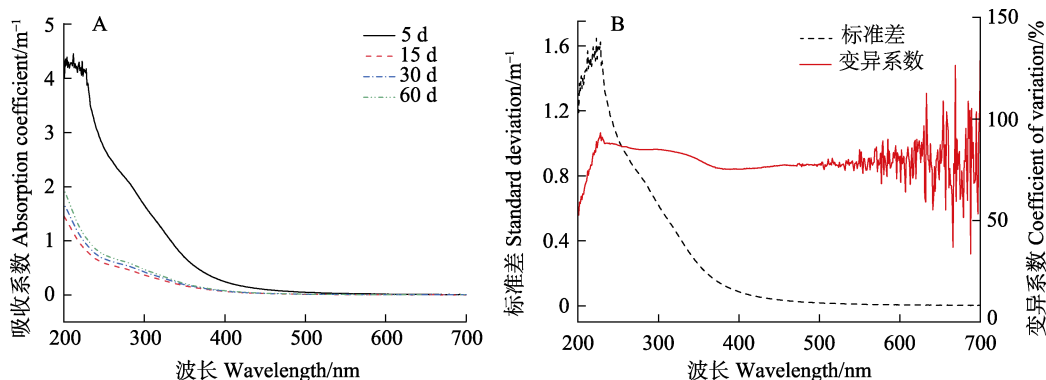


图 2 不同分解期菌渣溶解性有机质的紫外-可见光谱特征

Fig. 2 UV-Vis spectral characteristics of DOM at different decomposition stages of mushroom residue

2.3 不同分解期菌渣 DOM 紫外-可见吸收光谱特征参数

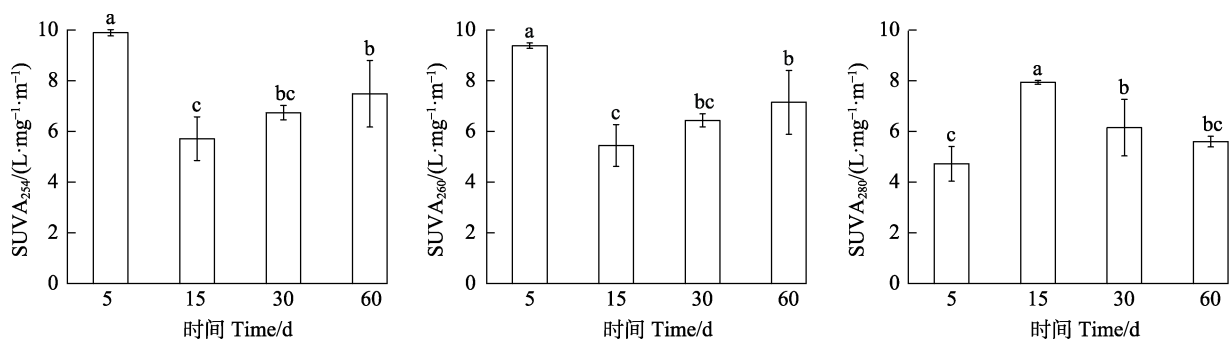
2.3.1 特征性紫外光谱吸收值 不同分解期菌渣的特征紫外光谱吸收值见图 3, 可以发现还田天数对 3 种特征参数均有显著影响, 并且 $SUVA_{254}$ 和 $SUVA_{260}$ 的变化趋势相同, 均呈先降后升的趋势, 而 $SUVA_{280}$ 则表现为先升后降的趋势。

2.3.2 紫外可见光谱吸收比 不同分解期紫外可见光谱吸收比的变化如图 4 所示。 A_{250}/A_{365} 和 A_{300}/A_{400} 均随分解期的延长呈递减的趋势, 说明

DOM 的分子量和腐殖化程度均逐渐上升。

2.3.3 吸收系数 (α_{355}) 不同分解期菌渣 DOM 吸收系数 (α_{355}) 的变化情况如图 5 所示, α_{355} 的变化范围为 35.56~143.06, 且随着分解期的延长逐渐下降。第 15、30、60 天的 α_{355} 相比第 5 天分别显著降低 69.29%、72.03% 和 75.14%, 在分解后期降幅不明显, 逐渐趋于平稳。

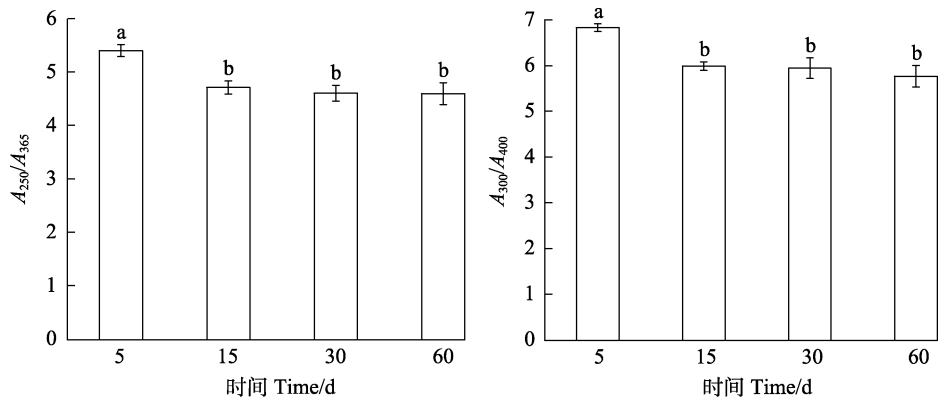
2.3.4 光谱斜率比 (S_R) S_R 主要用于衡量 DOM 的来源和分子量变化情况。不同分解期的 $S_{275-295}$ 、 $S_{350-400}$ 和 S_R 值如表 1 所示。可以发现, 在整个分



不同小写字母表示差异显著 ($P<0.05$)。
Different lowercase letters indicate significant difference ($P<0.05$).

图 3 不同分解期菌渣的光谱吸收值 $SUVA_{254}$ 、 $SUVA_{260}$ 和 $SUVA_{280}$

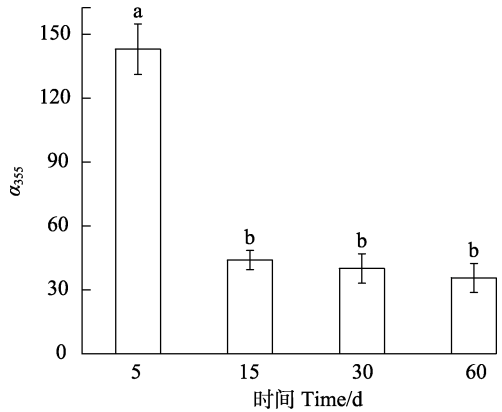
Fig. 3 Spectral absorption values of $SUVA_{254}$, $SUVA_{260}$ and $SUVA_{280}$ of mushroom residue at different decomposition stages



不同小写字母表示差异显著 ($P<0.05$)。
Different lowercase letters indicate significant difference ($P<0.05$).

图 4 不同分解期菌渣的光谱吸收比 A_{250}/A_{365} 和 A_{300}/A_{400}

Fig. 4 Spectral absorption ratios of A_{250}/A_{365} and A_{300}/A_{400} of mushroom residues at different decomposition stages



不同小写字母表示差异显著 ($P<0.05$)。
Different lowercase letters indicate significant difference ($P<0.05$).

图 5 不同分解期菌渣 DOM 的吸收系数

Fig. 5 Absorption coefficient of DOM of mushroom residue at different decomposition stages

解期内, S_R 值均小于 1, 说明还田后 DOM 主要以外源输入为主。

2.4 菌渣 DOM 的特征参数相关性分析

菌渣 DOM 的特征参数相关关系见图 6。由图

表 1 不同分解期菌渣的 S 值与 S_R 值

Tab. 1 S value and S_R value of mushroom residue in different decomposition stages

分解期 Decomposition stage/d	$S_{275-295}$	$S_{350-400}$	S_R
5	0.0107±0.000 28 ^a	0.0210±0.000 07 ^a	0.5093±0.012 41 ^b
15	0.0106±0.000 28 ^a	0.0197±0.000 12 ^b	0.5354±0.015 19 ^{ab}
30	0.0105±0.000 07 ^a	0.0198±0.000 25 ^b	0.5309±0.010 10 ^b
60	0.0112±0.000 60 ^a	0.0197±0.000 30 ^b	0.5696±0.030 34 ^a

注: 不同小写字母表示差异显著 ($P<0.05$)。

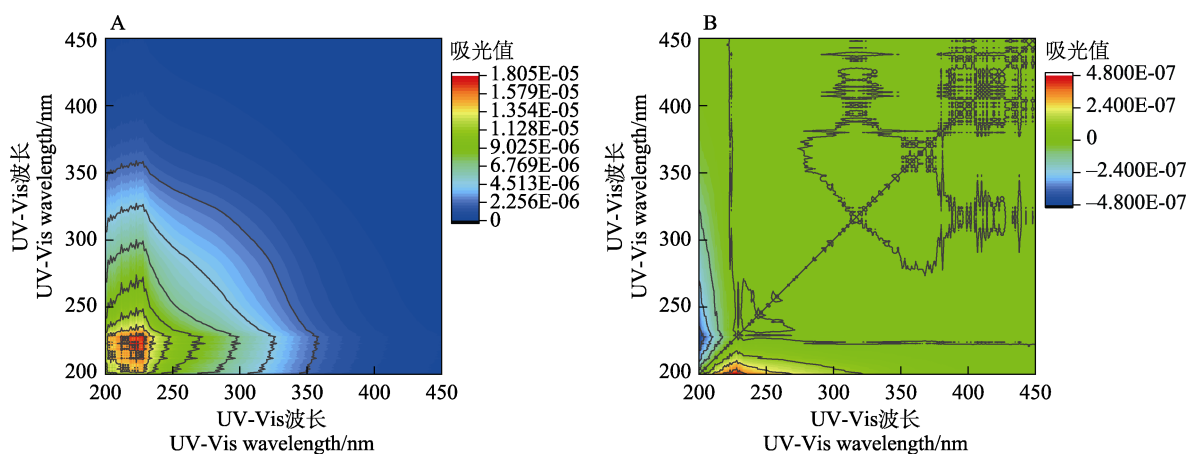
Note: Different lowercase letters indicate significant difference ($P<0.05$).

6 可知, DOC 与 DOM 芳香性 ($SUVA_{254}$ 和 $SUVA_{260}$)、分子量 (A_{250}/A_{365})、腐殖化程度 (A_{300}/A_{400}) 及 CDOM (α_{355}) 特征参数均呈极显著正相关 ($P<0.01$), 与 S_R 呈显著负相关 ($P<0.05$)。 $SUVA_{254}$ 与 $SUVA_{260}$ 、 $SUVA_{280}$ 、 α_{355} 呈极显著正相关 ($P<0.01$), 与 A_{250}/A_{365} 和 A_{300}/A_{400} 呈显著正相关 ($P<0.05$)。 $SUVA_{260}$ 与其他特征参

数的相关性和 $SUVA_{254}$ 相同。 A_{250}/A_{365} 与 A_{300}/A_{400} 、 α_{355} 均呈极显著正相关 ($P<0.01$), A_{300}/A_{400} 与 α_{355} 呈极显著正相关 ($P<0.01$), 但与 S_R 呈显著负相关 ($P<0.05$)。 α_{355} 也与 S_R 呈显著负相关 ($P<0.05$)。

2.5 二维相关分析

为了进一步揭示菌渣 DOM 化学结构对不同分解期的响应速度。将紫外可见光光谱数据中 200~450 nm 区域进行二维相关分析处理 (2D-COS), 获得它们的同步 (图 7A)、异步 (图 7B) 谱图。由 UV-Vis 谱图可知, 不同分解期下, 响应最大的是 200、250、300 nm 组分, 响应顺序为 200 nm>300 nm>250 nm。



A: 同步谱图; B: 异步谱图。
A: Synchronous spectrogram; B: Asynchronous spectrogram.

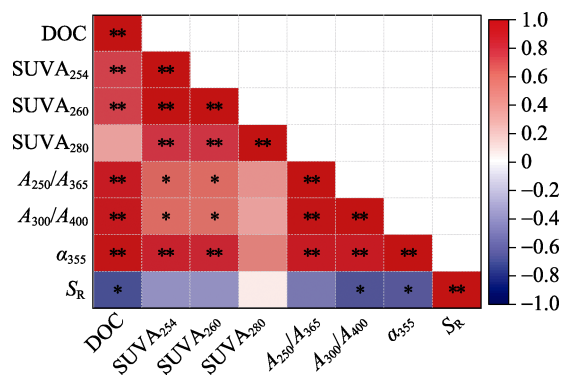
图 7 二维相关光谱图

Fig. 7 Two-dimensional correlation spectrum

3 讨论

3.1 菌渣分解过程中 DOM 含量与组成的动态变化规律

溶解性有机碳 (DOC) 是 DOM 碳库量化的核心指标^[17]。本研究中, 菌渣还田后 DOC 含量随分解时间延长呈显著下降趋势, 在第 60 天时 DOC 含量较第 5 天降低 71.05%, 这与前人研究结果一致^[18-19]。菌渣作为复杂有机物料, 其 DOC 的释放与转化强烈依赖于分解阶段和微生物活动^[20]。DOC 含量的快速下降主要发生在分解前期 (5~15 d), 这与微生物对易降解小分子有机碳 (如还原糖) 的优先利用有关^[21]。在分解后期, 大分子有机碳 (如木质素) 难以被分解利用, 导致 DOC 含量下降缓慢。



*表示显著相关 ($P<0.05$); **表示极显著相关 ($P<0.01$)。

* indicates significant correlation ($P<0.05$); ** indicates extremely significant correlation ($P<0.01$).

图 6 菌渣 DOC 与特征参数的相关性

Fig. 6 Correlation between DOC of mushroom residue and characteristic parameters

3.2 DOM 理化性质的光谱学解析

紫外-可见吸收光谱显示, 在不同分解期, 菌渣 DOM 的吸收系数均随波长的增加而减小, 这是因为短波区域 (200~300 nm) 存在芳香族化合物的 $\pi\rightarrow\pi^*$ 电子跃迁^[22], 菌渣 DOM 中富含的腐殖质前体物质在该吸收波长范围内具有强吸收, 导致吸收系数高^[23], 而波长 >400 nm 的吸收则由共轭结构驱动, 腐殖质前体物质共轭结构少, 因此在长波区域的吸收逐渐下降并趋近于 0^[24]。同时, 菌渣 DOM 的芳香性成分含量 ($SUVA_{254}$) 和疏水性 ($SUVA_{260}$) 先降后升, 而分子量 ($SUVA_{280}$) 的变化趋势相反。这是由于在还田分解前期 (5~15 d), DOM 中结构简单的小分子芳香性成分优先被微生物分解^[25], 芳香性成分快速下降。

而随着分解期的延长,土壤中的微生物会逐渐分解结构复杂的大分子芳香性成分,将其转化为结构较简单的芳香性成分^[26],导致其含量上升,因此, $SUVA_{254}$ 值先降后升^[27]。这也可以解释 $SUVA_{260}$ 出现相同趋势的原因^[28]。由于结构简单的疏水成分(小分子芳香族化合物)优先被分解,转化为亲水性的有机酸,导致短期内疏水性下降^[29]。后期结构复杂的芳香族化合物被分解,疏水性回升^[30]。同时,由于前期小分子芳香族组分的优先分解和大分子组分的遗留,芳香族分子量上升^[31],后期大分子被分解成小分子组分,导致芳香族化合物分子量下降,所以 $SUVA_{280}$ 先升后降^[32]。

本研究表明,菌渣 DOM 的分子量和腐殖化程度均随菌渣的分解逐渐上升。这是由于分解前期微生物优先利用易降解的小分子组分^[33],分解后期木质素和纤维素等不易分解的大分子组分逐渐积累导致分子量上升^[34],腐殖化程度提高^[35],这与 DOC 含量变化的研究结果一致^[36]。

α_{355} 随分解期的延长逐渐降低,且在第 15 天出现显著下降,降幅达到 69.29%,而在分解后期降幅不显著,这也是小分子组分优先被分解利用引发的结果。同时 CDOM 是 DOC 的重要组成部分, α_{355} 与 DOC 的研究结果一致,具有类似的变化趋势^[37-39]。

3.3 DOM 结构动态的二维相关光谱解析

二维相关光谱(2D-COS)分析显示,在 200~450 nm 范围内,200 nm 处的响应最强,说明芳香族组分对分解过程最为敏感,其结构变化领先于其他发色团^[40]。250 nm 和 300 nm 处亦表现出显著响应,可能与木质素衍生物的转化有关^[41]。2D-COS 有效揭示了菌渣 DOM 结构演变的时序机制,为了解其转化路径提供了光谱学依据^[42-43]。

3.4 菌渣 DOM 的农业应用价值与环境意义

菌渣 DOM 在分解过程中的动态演变,对其农业应用价值与环境效应具有明确的指导意义。本研究结果表明,菌渣 DOM 的组成与结构随分解期发生规律性变化,共同证实 DOM 的组成与结构趋于复杂且稳定。这意味着腐熟后期的菌渣 DOM 难以被快速分解,其养分释放缓慢,但作为稳定的碳源,能有效促进土壤团聚结构形成,改善土壤物理性质^[44-46]。

基于上述演变规律,菌渣还田的农业实践应依据目标进行精准管理。若以短期供肥为主要目

的,建议使用腐熟前期的菌渣,以便快速补充土壤有效碳源与养分;若以长效改土与固碳为核心目标,则推荐使用充分腐熟的菌渣。因此,在实际应用中需结合外源养分调控,以实现改良土壤与供应养分的平衡^[47],并可根据需要配施速效化肥,以平衡作物全生育期内“短期供肥”与“长期改土”的双重需求。

菌渣 DOM 的这种定向转化特征,在环境层面亦产生积极影响。其向稳定化组分的演变有利于增强土壤碳固存能力,减少有机碳的矿化损失,从而降低温室气体排放潜力。同时,菌渣作为农业废弃物的资源化循环利用,本身符合绿色农业与循环经济发展理念,能够减少环境污染,实现农业生态系统的物质高效循环与可持续发展。

3.5 研究局限性与未来展望

尽管紫外-可见光谱在 DOM 结构表征中具有优势,但其对非生色团组分的检测能力有限,可能低估 DOM 组成的多样性^[48-49]。未来研究可结合三维荧光光谱、傅里叶变换离子回旋共振质谱(FT-ICR MS)等高通量技术,从分子层面深入解析菌渣 DOM 的组成与转化路径^[50-51]。同时,加强 DOM 演化与微生物群落功能基因的关联分析,将有助于揭示其转化的微生物驱动机制,并为菌渣还田的长期生态效应评估提供科学依据^[52-53]。

参考文献

- [1] 赵雄威, 吴东明, 李勤奋, 王旭, 陈森. 基于紫外-可见光谱法研究长期不同施肥对砖红壤溶解性有机质化学性质的影响[J]. 光谱学与光谱分析, 2022, 42(10): 3210-3216. ZHAO X W, WU D M, LI Q F, WANG X, CHEN M. Response of dissolved organic matter chemical properties to long-term different fertilization in latosol: insight from ultra-violet-visible spectroscopy[J]. Spectroscopy and Spectral Analysis, 2022, 42(10): 3210-3216. (in Chinese)
- [2] HE C, YI Y B, HE D, CAI R H, CHEN C M, SHI Q. Molecular composition of dissolved organic matter across diverse ecosystems: preliminary implications for biogeochemical cycling[J]. Journal of Environmental Management, 2023, 344: 118559.
- [3] 刘翥, 杨玉盛, 朱锦懋, 谢锦升, 司友涛. 中亚热带森林转换对土壤可溶性有机质数量与光谱学特征的影响[J]. 生态学报, 2015, 35(19): 6288-6297. LIU Z, YANG Y S, ZHU J M, XIE J S, SI Y T. Effects of forest conversion on quantities and spectroscopic characteristics of soil dissolved organic matter in subtropical China[J].

- Acta Ecologica Sinica, 2015, 35(19): 6288-6297. (in Chinese)
- [4] FENG X J, SIMPSON A J, SIMPSON M J. Chemical and mineralogical controls on humic acid sorption to clay mineral surfaces[J]. Organic Geochemistry, 2005, 36(11): 1553-1566.
- [5] 朱宁美, 崔兵, 刘东萍, 于会彬, 高红杰, 郑昭佩. 典型城市河流底泥溶解性有机质与重金属响应机制研究[J]. 环境工程技术学报, 2021, 11(6): 1092-1101.
- ZHU N M, CUI B, LIU D P, YU H B, GAO H J, ZHENG Z P. Response mechanism of dissolved organic matter and heavy metals in sediments of typical urban rivers[J]. Journal of Environmental Engineering Technology, 2021, 11(6): 1092-1101. (in Chinese)
- [6] 时聪慧, 张瑞昌, 朱书法, 李欣彤, 周新全, 张宁, 荣亮, 杨丽珍, 魏学锋. 好氧堆肥污泥农用后溶解性有机质释放特征[J]. 光谱学与光谱分析, 2024, 44(4): 1011-1017.
- SHI C H, ZHANG R C, ZHU S F, LI X T, ZHOU X Q, ZHANG N, RONG L, YANG L Z, WEI X F. Characteristics of dissolved organic matter released from aerobic composted municipal sludge after the agriculture use[J]. Spectroscopy and Spectral Analysis, 2024, 44(4): 1011-1017. (in Chinese)
- [7] 栗方亮, 王煌平, 张青, 王利民, 安梦鱼, 罗涛. 室内恒温条件下稻田土壤中菌渣的分解过程及 CO₂ 释放特征[J]. 中国生态农业学报, 2017, 25(2): 267-275.
- LI F L, WANG H P, ZHANG Q, WANG L M, AN M Y, LUO T. Decomposition process and CO₂ release characteristics of spent mushroom substrate in paddy soils[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2017, 25(2): 267-275. (in Chinese)
- [8] WEISHAAR J L, AIKEN G R, BERGAMASCHI B A, FRAM M S, FUJII R, MOPPER K. Evaluation of specific ultraviolet absorbance as an indicator of the chemical composition and reactivity of dissolved organic carbon[J]. Environmental Science & Technology, 2003, 37(20): 4702-4708.
- [9] D'ANDRILLI J, SILVERMAN V, BUCKLEY S, ROSARIO-ORTIZ F L. Inferring ecosystem function from dissolved organic matter optical properties: a critical review[J]. Environmental Science & Technology, 2022, 56(16): 11146-11161.
- [10] 陈昭宇, 李思悦. 三峡库区城镇化影响下河流 DOM 光谱特征季节变化[J]. 环境科学, 2021, 42(1): 195-203.
- CHEN Z Y, LI S Y. Seasonal variation of DOM spectral characteristics of rivers with different urbanization levels in the three gorges reservoir area[J]. Environmental Science, 2021, 42(1): 195-203. (in Chinese)
- [11] HELMS J R, STUBBINS A, RITCHIE J D, MINOR E C, KIEBER D J, MOPPER K. Absorption spectral slopes and slope ratios as indicators of molecular weight, source, and photobleaching of chromophoric dissolved organic matter[J]. Limnology and Oceanography, 2008, 53(3): 955-969.
- [12] 王涵, 刘宗岳, 窦圣龙, 刘畅, 窦九九, 刘钰钦, 陈森. 不同施肥处理下砖红壤溶解性有机质含量和光谱特性的剖面分布特征[J]. 土壤, 2025, 57(5): 1013-1024.
- WANG H, LIU Z Y, DOU S L, LIU C, DOU J J, LIU Y Q, CHEN M. Profile distribution characteristics of latosol dissolved organic matter content and spectral properties under differed fertilization treatments[J]. Soils, 2025, 57(5): 1013-1024. (in Chinese)
- [13] 杜春朝, 梁以豪, 倪才英, 蒋志忠, 傅雪军. 稻虾共作土壤溶解性有机质光谱特征及其与土壤交换态镉的关系[J]. 中国生态农业学报(中英文), 2025, 33(8): 1517-1528.
- DU C Z, LIANG Y H, NI C Y, JIANG Z Z, FU X J. Spectral characteristics of dissolved organic matter in rice-shrimp co-cropping soils and their relationships with soil exchangeable cadmium[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2025, 33(8): 1517-1528. (in Chinese)
- [14] 谢军, 赵亚南, 陈轩敬, 王珂, 徐春丽, 李丹萍, 张跃强, 王定勇, 石孝均. 长期不同施肥对土壤溶解性有机质含量及其结构特征的影响[J]. 光谱学与光谱分析, 2018, 38(7): 2250-2257.
- XIE J, ZHAO Y N, CHEN X J, WANG K, XU C L, LI D P, ZHANG Y Q, WANG D Y, SHI X J. Effect on soil DOM content and structure characteristics in different soil layers by long-term fertilizations[J]. Spectroscopy and Spectral Analysis, 2018, 38(7): 2250-2257. (in Chinese)
- [15] 吴东明, 邓晓, 李怡, 陈耀华, 武春媛. 土壤溶解性有机质的提取与特性分析研究进展[J]. 江苏农业科学, 2019, 47(3): 6-11.
- WU D M, DENG X, LI Y, CHEN Y H, WU C Y. Research progress on extraction and characteristic analysis of soil dissolved organic matter[J]. Jiangsu Agricultural Sciences, 2019, 47(3): 6-11. (in Chinese)
- [16] GHANI A, DEXTER M, PERROTT K W. Hot-water extractable carbon in soils: a sensitive measurement for determining impacts of fertilisation, grazing and cultivation[J]. Soil Biology and Biochemistry, 2003, 35(9): 1231-1243.
- [17] ZSOLNAY A, BAIGAR E, JIMENEZ M, STEINWEG B, SACCOMANDI F. Differentiating with fluorescence spectroscopy the sources of dissolved organic matter in soils subjected to drying[J]. Chemosphere, 1999, 38(1): 45-50.
- [18] 雷琬莹, 滕培基, 盛明, 王博, 李娜. 黑土区不同种类有机物料腐解过程中的溶解性有机质特征[J]. 应用生态学报, 2025, 36(2): 513-525.
- LEI W Y, TENG P J, SHENG M, WANG B, LI N. Characteristics of dissolved organic matter during decomposition of different organic materials in the black soil region of north-

- east China[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2025, 36(2): 513-525. (in Chinese)
- [19] REN L H, YAN B H, AWASTHI M K, ZHANG J C, HUANG H L, ZHANG L H, LUO L. Accelerated humification and alteration of microbial communities by distillers' grains addition during rice straw composting[J]. Bioresource Technology, 2021, 342: 125937.
- [20] QIAN X, BI X H, XU Y F, YANG Z W, WEI T T, XI M J, LI J H, CHEN L D, LI H Z, SUN S J. Variation in community structure and network characteristics of spent mushroom substrate (SMS) compost microbiota driven by time and environmental conditions[J]. Bioresource Technology, 2022, 364: 127915.
- [21] WANG X Y, LIANG C, MAO J D, JIANG Y J, BIAN Q, LIANG Y T, CHEN Y, SUN B. Microbial keystone taxa drive succession of plant residue chemistry[J]. The ISME Journal, 2023, 17: 748-757.
- [22] TRAINA S J, NOVAK J, SMECK N E. An ultraviolet absorbance method of estimating the percent aromatic carbon content of humic acids[J]. Journal of Environmental Quality, 1990, 19(1): 151-153.
- [23] KORSHIN G V, LI C W, BENJAMIN M M. Monitoring the properties of natural organic matter through UV spectroscopy: a consistent theory[J]. Water Research, 1997, 31(7): 1787-1795.
- [24] PEURAVUORI J, PIHLAJA K. Molecular size distribution and spectroscopic properties of aquatic humic substances[J]. Analytica Chimica Acta, 1997, 337(2): 133-149.
- [25] KALBITZ K, SOLINGER S, PARK J H, MICHALZIK B, MATZNER E. Controls on the dynamics of dissolved organic matter in soils: a review[J]. Soil Science, 2000, 165(4): 277-304.
- [26] MARSCHNER B, KALBITZ K. Controls of bioavailability and biodegradability of dissolved organic matter in soils[J]. Geoderma, 2003, 113(3/4): 211-235.
- [27] MCDOWELL W H. Dissolved organic matter in soils-future directions and unanswered questions[J]. Geoderma, 2003, 113(3/4): 179-186.
- [28] MCKNIGHT D M, BOYER E W, WESTERHOFF P K, DORAN P T, KULBE T, ANDERSEN D T. Spectrofluorometric characterization of dissolved organic matter for indication of precursor organic material and aromaticity[J]. Limnology and Oceanography, 2001, 46(1): 38-48.
- [29] KAISER K, GUGGENBERGER G. The role of DOM sorption to mineral surfaces in the preservation of organic matter in soils[J]. Organic Geochemistry, 2000, 31(7/8): 711-725.
- [30] QUALLS R G, HAINES B L. Biodegradability of dissolved organic matter in forest throughfall, soil solution, and stream water[J]. Soil Science Society of America Journal, 1992, 56(2): 578-586.
- [31] HAUTALA K, PEURAVUORI J, PIHLAJA K. Measurement of aquatic humus content by spectroscopic analyses[J]. Water Research, 2000, 34(1): 246-258.
- [32] CHIN Y P, AIKEN G, O'LOUGHLIN E. Molecular weight, polydispersity, and spectroscopic properties of aquatic humic substances[J]. Environmental Science & Technology, 1994, 28(11): 1853-1858.
- [33] GUGGENBERGER G, ZECH W. Dissolved organic carbon in forest floor leachates: simple degradation products or humic substances?[J]. Science of the Total Environment, 1994, 152(1): 37-47.
- [34] STEVENSON F J. Humus chemistry: genesis, composition, reactions[J]. Soil Science, 1982, 135(2): 129-130.
- [35] ZECH W, SENESI N, GUGGENBERGER G, KAISER K, LEHMANN J, MIANO T M, MILTNER A, SCHROTH G. Factors controlling humification and mineralization of soil organic matter in the tropics[J]. Geoderma, 1997, 79(1/4): 117-161.
- [36] KIRK T K, FARRELL R L. Enzymatic "combustion": the microbial degradation of lignin[J]. Annual Review of Microbiology, 1987, 41: 465-505.
- [37] HUGUET A, VACHER L, RELEXANS S, SAUBUSSE S, FROIDEFOND J M, PARLANTI E. Properties of fluorescent dissolved organic matter in the Gironde Estuary[J]. Organic Geochemistry, 2009, 40(6): 706-719.
- [38] JAFFE R, MCKNIGHT D M, MAIE N, CORY R M. Spatial and temporal variations in DOM composition in ecosystems: the importance of long-term monitoring of optical properties[J]. Journal of Geophysical Research Atmospheres, 2008, 113: G04032.
- [39] MURPHY K R, STEDMON C A, GRAEBER D, BRO R. Fluorescence spectroscopy and multi-way techniques. PARAFAC[J]. Analytical Methods, 2013, 5(23): 6557-6566.
- [40] CHEN W, QIAN C, LIU X Y, YU H Q. Two-dimensional correlation spectroscopic analysis on the interaction between humic acids and TiO₂ nanoparticles[J]. Environmental Science & Technology, 2014, 48(19): 11119-11126.
- [41] HUR J, LEE B M. Characterization of binding site heterogeneity for copper within dissolved organic matter fractions using two-dimensional correlation spectroscopy[J]. Chemosphere, 2011, 83(11): 1603-1611.
- [42] CHEN W, WESTERHOFF P, LEENHEER J A, BOOKSH K. Fluorescence excitation-emission matrix regional integration to quantify spectra for dissolved organic matter[J]. Environmental Science & Technology, 2003, 37(24): 5701-5710.

- [43] YAN M, KORSHIN G V. Comparative examination of effects of binding of different metals on chromophores of dissolved organic matter[J]. *Environmental Science & Technology*, 2014, 48(17): 10291-10298.
- [44] LAL R. Soil carbon sequestration impacts on global climate change and food security[J]. *Science*, 2004, 304(5677): 1623-1627.
- [45] SIX J, CONANT R T, PAUL E A, PAUSTIAN K. Stabilization mechanisms of soil organic matter: implications for C-saturation of soils[J]. *Plant and Soil*, 2002, 241(2): 155-176.
- [46] SCHMIDT M W, TORN M S, ABIVEN S, DITTMAR T, GUGGENBERGER G, JANSSENS I A, KLEBER M, KÖGEL-KNABNER I, LEHMANN J, MANNING D A, NANNIPIERI P, PASSE D P, WEINER S, TRUMBORE S E. Persistence of soil organic matter as an ecosystem property[J]. *Nature*, 2011, 478(7367): 49-56.
- [47] 王伟霞, 张之麒, 李淑格, 吴少杰, 李福后. 食用菌菌渣资源化利用研究进展[J]. *现代园艺*, 2023, 46(13): 59-61.
WANG W X, ZHANG Z Q, LI S G, WU S J, LI F H. Research progress on resource utilization of edible fungus residue[J]. *Contemporary Horticulture*, 2023, 46(13): 59-61.
- [48] NEBBIOSO A, PICCOLO A. Molecular characterization of dissolved organic matter (DOM): a critical review[J]. *Analytical and Bioanalytical Chemistry*, 2013, 405(1): 109-124.
- [49] HERTKORN N, BENNER R, FROMMBERGER M, SCHMITT-KOPPLIN P, WITT M, KAISER K, KETTRUP A, HEDGES J I. Characterization of a major refractory component of marine dissolved organic matter[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 2006, 70(12): 2990-3010.
- [50] STUBBINS A, LAPIERRE J F, BERGGREN M, PRAIRIE Y T, DITTMAR, GIORGIO P A. What's in an EEM? Molecular signatures associated with dissolved organic fluorescence in boreal Canada[J]. *Environmental Science & Technology*, 2014, 48(18): 10598-10606.
- [51] KELLERMAN A M, KOTHAWALA D N, DITTMAR T, TRANVIK L J. Persistence of dissolved organic matter in lakes related to its molecular characteristics[J]. *Nature Geoscience*, 2015, 8(6): 454-457.
- [52] JANSSON J K, HOFMOCKEL K S. Soil microbiomes and climate change[J]. *Nature Reviews Microbiology*, 2020, 18(1): 35-46.
- [53] TRIVEDI P, LEACH J E, TRINGE S G, SA T, SINGH B K. Plant-microbiome interactions: from community assembly to plant health[J]. *Nature Reviews Microbiology*, 2020, 18(11): 607-621.