

1米深度林地土壤溶解性有机质垂直分布与光谱特征^①

程虎¹, 刘雅静¹, 吴蒙², 李丽¹, 朱长银¹, 韩建刚¹, 阮宏华¹, 张银龙^{1*}, 周东美³, 曹福亮¹

(1 南京林业大学生态与环境学院, 南方现代林业协同创新中心, 南京 210037; 2 六安市生态环境局金寨分局, 安徽六安 237321; 3 南京大学环境学院, 南京 210023)

摘要: 林地土壤有机质是全球碳循环的关键支撑, 尤其是其中活跃碳组分——溶解性有机质(DOM)。为探明林地1 m深度内DOM的总量、光谱组分与性质特征, 强化对林地地下DOM形成、运移与转化的认识, 以人工林(主要树种为栎树和雪松)为模式林地, 采用紫外-可见光光谱和荧光光谱技术, 研究了林地土壤DOM含量及其组分在0–20、20–40、40–60、60–80、80–100 cm土层中的垂直分布特征。结果表明: 林地0–20 cm土层有机碳含量与DOM含量均显著高于其他土层, 尤其是高于80–100 cm土层, 可分别高出4.1倍和2.7倍, 但60–80 cm和80–100 cm土层的DOC/TOC值较高。DOM紫外光谱指数 A_{250}/A_{365} 、 $SUVA_{254}$ 、 $SUVA_{260}$ 和 S_R 值分别介于4.1–20.3、0.3–2.6、0.3–2.5和1.4–8.5, 林地土壤DOM的芳香性、分子量、疏水性随土层深度增加而下降。1 m深度内, 林地土壤DOM的荧光组分表现出明显的垂直分异特征。结合平行因子分析, 林地土壤DOM可识别出5种组分, 包括2种类胡敏酸物质、1种类富里酸物质、1种类色氨酸物质、1种类酪氨酸物质。随土层深度增加, 类胡敏酸和类富里酸物质含量与占比下降, 占比最低为23.7%; 类酪氨酸物质含量与占比增加, 最高可达53.6%。林地土壤DOM的FI、BIX和HIX指数分别介于1.0–1.6、0.6–0.9和0.4–4.7, 表明其由动植物残体等外源输入为主, 随土层深度增加, 其自生源特性逐渐增强, 腐殖化程度逐渐下降。综上, 研究结果揭示了林地土壤DOM的外源性特性、纵向逐级筛分与分解特性, 各土层间DOM含量、组分与性质异质性显著, 为理解林地地下碳收支行为、核算林地地下碳储量及调控林地碳封存提供了数据基础与科学依据。

关键词: 林地土壤; 溶解性有机质; 垂直分布; 阔叶混交林; 光谱特征

中图分类号: S153 文献标志码: A

Vertical Distribution and Spectroscopic Characteristics of Dissolved Organic Matter in Forest Soils Within 1 m Depth

CHENG Hu¹, LIU Yajing¹, WU Meng², LI Li¹, ZHU Changyin¹, HAN Jiangan¹, RUAN Honghua¹, ZHANG Yinlong^{1*}, ZHOU Dongmei³, CAO Fuliang¹

(1 Co-Innovation Center for Sustainable Forestry in Southern China, College of Ecology and the Environment, Nanjing Forestry University, Nanjing 210037, China; 2 Jinzhai Branch of Lu'an Ecological Environment Bureau, Luan, Anhui 237321, China; 3 School of Environment, Nanjing University, Nanjing 210023, China)

Abstract: The forestland soil organic matter is a key support for the global carbon cycle, especially the active carbon component—dissolved organic matter (DOM). The aim of this study is to clarify the total amount, components, and properties of DOM within 1m depth of forestland soil, and to enhance the understanding of the formation, transport, and transformation of DOM in forestland soils. A plantation (main tree species: *Koelreuteria paniculata* and *Cedrus deodara*) was selected as a model forestland, and the UV/visible and fluorescence spectroscopy techniques were used to investigate DOM concentrations and their components in the soil layers of 0–20, 20–40, 40–60, 60–80, and 80–100 cm. The results showed that organic carbon and DOM contents in the 0–20 cm soil layer were significantly higher than those in other soil layers, especially than those in the 80–100 cm soil layers, which were 4.1 times higher for TOC and 2.7 times higher for DOC. However, DOC/TOC ratios were relatively high in the 60–80 cm and 80–100 cm soil layers. The UV spectral indices A_{250}/A_{365} , $SUVA_{254}$, $SUVA_{260}$, and S_R of soil DOM ranged

①基金项目: 国家自然科学基金项目(42477376)和“数字赋能与智慧监管项目”林地生态系统观测项目(JSTCC2400213111)资助。

* 通信作者(ecoenvylz@163.com)

作者简介: 程虎(1994—), 男, 安徽淮北人, 博士, 副教授, 主要从事环境土壤学研究。E-mail: hucheng@njfu.edu.cn

from 4.1 to 20.3, 0.3 to 2.6, 0.3 to 2.5, and 1.4 to 8.5, respectively. The aromaticity, molecular weight, and hydrophobicity of soil DOM decreased with increasing soil depth. Within the 1 m depth, the fluorescence components of soil DOM exhibited distinct vertical differentiation characteristics. Based on parallel factor analysis, five components of soil DOM were identified: two humic-like substances, one fulvic-like substance, one tryptophan-like substance, and one tyrosine-like substance. With increasing soil depth, the contents and proportions of humic-like and fulvic-like substances decreased, with the lowest proportion being 23.7%; in contrast, the content and proportion of tryptophan-like substances increased, reaching up to 53.6%. The FI, BIX, and HIX indices of soil DOM ranged from 1.0 to 1.6, 0.6 to 0.9, and 0.4 to 4.7, respectively, indicating that DOM was mainly exogenous such as derived from plant and animal residues. As soil depth increased, the autochthonous characteristics of DOM gradually strengthened, while the humification degree decreased. In conclusion, the results reveal the exogenous characteristics of forestland soil DOM, its stepwise screening and decomposition characteristics along the vertical profile, and the significant heterogeneity of DOM content, components, and properties among different soil layers, these findings provide a data foundation and scientific basis for understanding the underground carbon behavior of forestlands, calculating the underground carbon storage of forestlands, and regulating carbon sequestration in forestlands.

Key words: Forestland soil; Dissolved organic matter; Vertical distribution; Broadleaf mixed forest; Spectral characteristics

林地生态系统是控制全球碳循环与稳定全球碳收支平衡的核心与关键,同时扮演碳源、碳汇和碳库角色^[1-2]。土壤碳组分在林地生态系统碳循环中发挥极其重要的支撑作用,高度参与乔木、灌木和草本等植被、微生物以及动物的碳行为。溶解性有机质(DOM, dissolved organic matter)是土壤碳组分中最活跃的组分之一,具有高反应活性、高移动性、高复合性等特点,可驱动有机碳转化(矿化、腐殖化)、固定和迁移,以及污染物转化等生物化学过程,是预测生态系统碳收支平衡的关键组分。为明晰林地生态系统内部复杂的碳循环过程,土壤 DOM 组分与性质被视为关键的切入点和突破口,成为当前的研究热点与重点。

土壤 DOM 主要来源于林地植被及其枯枝落叶等有机体:植被释放根系分泌物复合成 DOM,植被残体直接分解释放 DOM,或腐殖质类物质生物化学转化释放 DOM。微生物、土壤动物的环境行为也会贡献 DOM,且与地上植被高度相关。地上植被类型(如优势树种)直接影响土壤 DOM 总量、组分与性质。此外,土壤 DOM 的组成与结构受环境因子(土壤 pH、温度、海拔高度等)影响较大,具有明显的地域异质性^[3]。与其他陆地生态系统不同,林木生物量大,地下根系深度可达数米,造成不同深度有机碳累积与转化的差异,尤其是 1 m 深度土壤有机碳^[4-5]。纵向空间上,有机碳的不均匀分布和根系/微生物活跃度的不均匀性会影响土壤 DOM 的差异化分布。深层土壤(通常指地面 20 cm 以下)储存着全球 70% 以上的有机碳,性质较为活跃,且对全球增温等极为敏感,对全球碳循环影响巨大^[6]。然而,林地 1 m 深度土壤中

最为活跃的有机质组分 DOM 总量、光谱组分与性质垂直分布特征等鲜有报道。

基于以上,本研究以国家山水工程南水北调东线区域江苏省淮安市人工林(种植树种为雪松与栎树)为研究对象,分层采集 1 m 深度(0~20、20~40、40~60、60~80、80~100 cm)土壤样品,利用土壤紫外-可见光谱和三维荧光光谱特征表征不同深度林地土壤 DOM 的组分与性质差异,揭示林地生态系统土壤碳组分垂直空间分布特征,为理解林地土壤碳行为过程、评估其碳封存潜力和调控其碳循环等提供数据与理论基础。

1 材料与方法

1.1 样品采集与分析

采样地为江苏省淮安市清江浦区黄码镇乔木林地(阔叶混交林, 33°56'64"N, 119°15'28"E)。采样点分别设置于栎树、雪松树冠下方,各采样点之间间隔 15 m,林下草本植物主要为龙葵、麦冬、酢浆草、天名精、紫花地丁、乌菖莓、加拿大一枝黄花。

土壤样品采集时间为 2024 年 11 月 3 日,用土钻按 0~20、20~40、40~60、60~80、80~100 cm 土层分层重复采集多个样点。土样在室内自然风干,去除杂物,研磨过筛后备用。

土壤有机碳(TOC)采用重铬酸钾氧化-硫酸亚铁滴定法测定,用于定量土壤有机质含量。

土壤 DOM 的提取:称取 5 g 过 2 mm 尼龙筛的土壤,置于 50 mL 离心管中,添加 30 mL 去离子水(土水质量比为 1:6),25 °C 条件下避光恒温振荡 60 min,离心 20 min(4 000 r/min),取水土混合

溶液过 0.45 μm 滤膜, 得到土壤 DOM 溶液。

土壤溶解性有机碳(DOC)测定: 稀释提取得到的土壤 DOM 溶液, 使样品 DOM 浓度控制在小于 10 mg/L, 基于总有机碳分析仪(OI Analytical, Aurora 1030, 美国)测定溶液中有机碳含量, 即为 DOC, 用于定量土壤 DOM 含量。检测过程所用气体为纯氧, 配备纯水、5% 磷酸溶液和 4.2% 过硫酸钠溶液, 测定耗时 8 min。

土壤 DOM 紫外与三维荧光光谱测定: DOM 提取液采用紫外-可见光分光光度计(UV-2450, SHIMADZU, 日本)进行扫描, 波长范围为 200~800 nm, 波长间隔为 1 nm, 以超纯水作为空白对照。三维荧光光谱(Three-dimensional excitation emission matrix, 3D-EEM)采用三维荧光扫描光谱仪(Aqualog, HORIBA Instruments Inc., 美国)进行分析, 以氙灯为激发光源, 信噪比 >20 000 : 1。激发波长(Ex)范围为 240~600 nm, 扫描间隔为 3 nm。发射波长(Em)范围为 210~616 nm, 采用电制冷 CCD 检测器, 扫描间隔为 3.35 nm。采用 SOLO+MIA 8.6.1 软件(Eigenvector Research, Inc., 美国)进行平行因子分析(PARAFAC)。

1.2 数据处理与分析

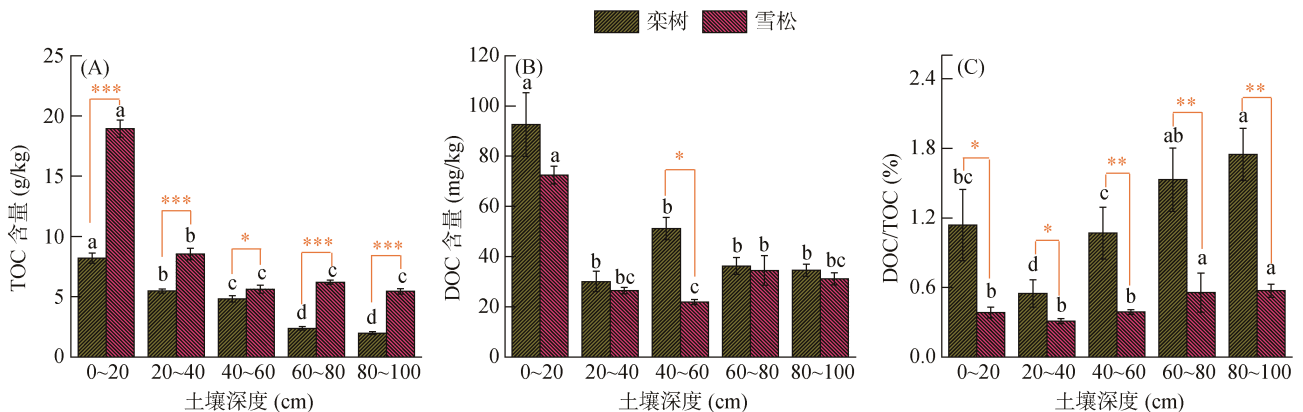
使用 Excel 2021 和 SPSS 22.0 软件对紫外-可见吸收光谱和三维荧光光谱数据进行参数计算和数据处理。采用单因素方差分析中的 Duncan 多重比较检

验不同处理间差异显著性。采用 Origin 8.5 进行图形绘制。

2 结果与讨论

2.1 不同深度林地土壤有机质与溶解性有机质含量

不同树种下不同土壤深度土壤 TOC 含量分异性较大, 雪松树下土壤 TOC 含量介于 5.4~18.9 g/kg, 栎树树下土壤 TOC 含量介于 2.0~8.2 g/kg(图 1A)。从垂直分布来看, 雪松与栎树树下表层土壤 TOC 含量均显著高于深层土壤($P<0.05$), 呈现出 0~20 cm>20~40 cm>40~60 cm>60~80 cm>80~100 cm, 有机碳积累主要集中在表层土壤。林地 0~20 cm 土层可涵盖有机质层与淋溶层等, 大量的枯枝落叶在表层土壤中分解或腐殖化, 形成表层高有机碳含量特征。不同树种, 其树龄、枯枝落叶及灌草生物量等均影响其林下表层土壤有机碳含量。这与 De Feudis 等^[7]的研究结果相似, 林地表层土壤, 尤其是有机质层, 有机碳含量远高于淋溶层、淀积层等更深层次土壤。因此, 评估林地土壤有机碳储量时, 应结合其不同深度有机碳分布特征。由于林地土壤有机碳含量垂直分层较为明显, 未来可在土壤剖面分层的基础上, 分层次分析土壤有机碳含量, 进而精准评估林地碳储量等。



(图中误差线为标准误($n=3$), 不同小写字母表示同一树种下不同土层间差异显著($P<0.05$), *, **, ***分别表示同一土层下不同树种间差异在 $P<0.05$ 、 $P<0.01$ 、 $P<0.001$ 水平显著; 下同)

图 1 不同深度林地土壤 TOC 含量(A)、DOC 含量(B)和 DOC/TOC 比值(C)

Fig. 1 TOC (A) and DOC (B) contents, and ratios of DOC/TOC (C) of forest soils in different depths

不同树种下不同深度土壤 DOC 含量如图 1B 所示。雪松树下不同深度土壤 DOC 含量介于 21.9~72.5 mg/kg, 栎树树下不同深度土壤 DOC 含量介于 30.1~92.6 mg/kg。与土壤有机碳(TOC)垂直分布不同, 栎树树下各深度土壤 DOC 含量均高于雪松树下。0~20 cm 土层 DOC 含量显著高于其他深度土层($P<$

0.05), 可高出 62.5 mg/kg, 这与 Meng 等^[8]对林地土壤 DOM 的研究结果一致; 与 Gu 等^[9]对林地土壤 DOC 的研究结果部分一致, 其研究发现, 年降水量、海拔高度、温度、优势树种、植被覆盖度、树龄、微生物活性等均影响 DOC 的垂直分布。Huang 等^[10]研究了农田土壤 0~20 cm 与 20~40 cm 土层的 DOM 分布特

征,发现不施肥或仅秸秆还田条件下,下层土壤 DOM 含量显著高于表层,与本研究结果相反;在施用化肥条件下,下层土壤 DOM 含量显著低于表层,与本研究结果一致,表明人为活动显著影响土壤 DOM 的垂直分布。此外,与农田土壤相比,本研究的林地土壤 DOC 含量较高,高强度作物生产不利于有机碳的保留。与土壤 TOC 含量垂直分布不同,DOC 含量未随土层深度增加而下降,雪松树下 40~60 cm 土层 DOC 含量最低,栎树树下 20~40 cm 土层 DOC 含量最低。土壤有机质是 DOM 形成的前驱体,但不是唯一来源。枯枝落叶分解与腐殖化过程可释放 DOM,微生物与植物也可直接分泌小分子有机酸、糖类等 DOM,从而造成不同深度土层 DOM 的不规律性分布。乔木根系与灌草根系深度的差异会放大不同土层 DOM 的异质性^[6]。精准预估不同深度土层 DOM 含量将是未来的研究重点。

DOC/TOC 比值常被用于评估土壤碳库的转化能力与稳定性。栎树树下土壤 DOC/TOC 比值介于 0.5%~1.7%;雪松树下土壤 DOC/TOC 比值介于 0.3%~0.6%(图 1C)。林地深层土壤(如 60~80 cm 与 80~100 cm)DOC/TOC 比值显著高于其他土层($P<0.05$)。

栎树树下各深度土壤 DOC/TOC 比值均显著高于雪松树下。与农田土壤(20~40 cm)相比,林地土壤 DOC/TOC 比值相对较小,其碳周转过程较慢^[10]。从 TOC 含量、DOC 含量和 DOC/TOC 比值可以看出,雪松树下土壤有机质含量高,且 DOM 占比低,更有助于碳封存。从土层深度分析,深层土壤(如 80~100 cm)DOM 占比高,需重点关注其碳行为。

2.2 不同深度林地土壤溶解性有机质紫外-可见光光谱特征

栎树树下不同深度土壤 DOM 的 A_{250}/A_{365} 值介于 4.1~20.3,呈现先升高后下降的趋势(图 2A)。其中,0~20 cm 和 20~40 cm 土层 DOM 的 A_{250}/A_{365} 值显著性低于 60~80 cm 和 80~100 cm 土层($P<0.05$)。 A_{250}/A_{365} 值越低,其 DOM 的芳香性越高^[11]。栎树树下深层土壤(如 60~80 cm)的 DOM 芳香性较表层土壤(如 0~20 cm)低。雪松树下土壤表现出相似的结果,其中 40~60 cm 和 80~100 cm 土层 DOM 的芳香性显著性低于其他土层($P<0.05$)。芳香性低的 DOM 更易被微生物转化。此结果侧面证明了深层土壤对全球气候变化等更为敏感。DOM 具有一定的流动性,尤其是低芳香性组分,其水溶解度较高,更易纵向迁移至土层

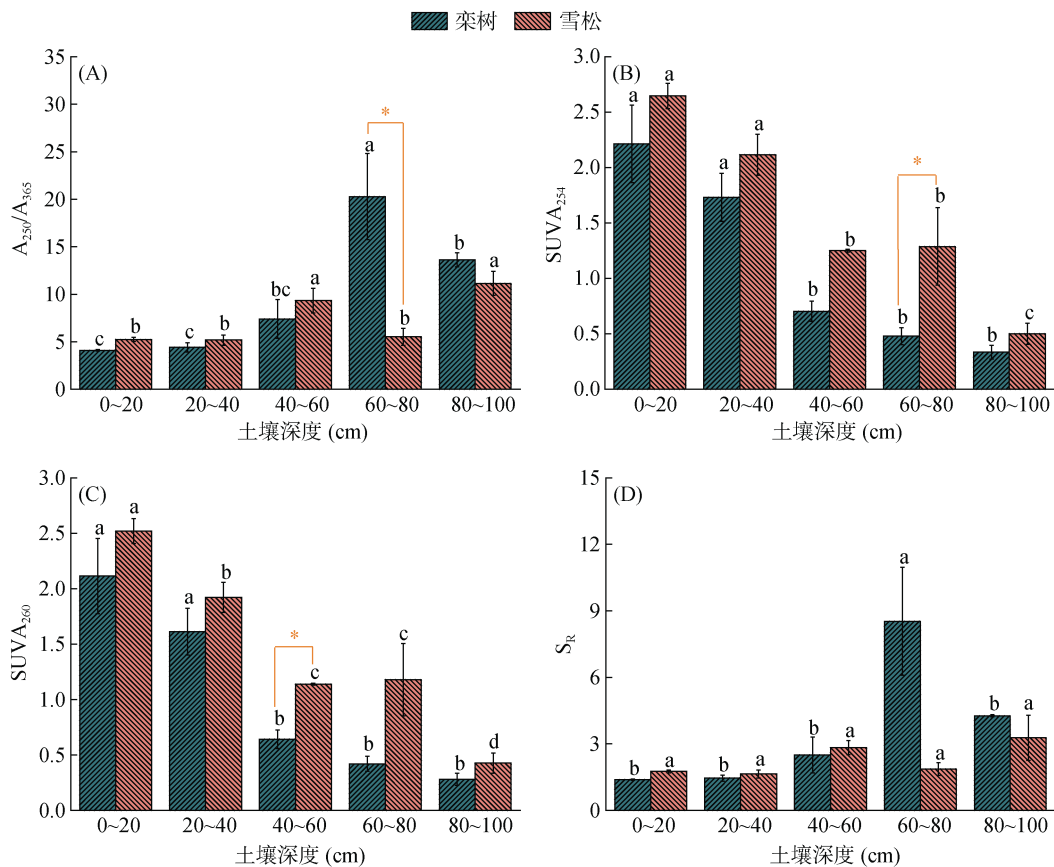


图 2 不同深度林地土壤 DOM 的 A_{250}/A_{365} (A)、 $SUVA_{254}$ (B)、 $SUVA_{260}$ (C)和 S_R (D)指数

Fig. 2 A_{250}/A_{365} (A), $SUVA_{254}$ (B), $SUVA_{260}$ (C) and S_R (D) of forest soil DOMs in different depths

深处。不同树种对不同深度土壤 DOM 的芳香性有一定的影响。60~100 cm 深度, 雪松树下 DOM 芳香性更高, 其碳库更稳定。

不同深度林地土壤 DOM 的 $SUVA_{254}$ 值介于 0.3~2.6(图 2B), 浅层土壤(0~20 cm 和 20~40 cm)显著性高于其他深度土壤($P<0.05$), 表明林地浅层土壤芳香性组分含量较高, 腐殖化程度高^[12]。这与龙云川等^[13]林地土壤 DOM 的 $SUVA_{254}$ 值较低(<3.0)的研究结果相似。雪松树下各深度土壤 DOM 的 $SUVA_{254}$ 值均高于栎树树下土壤, 表明树种类型会导致 DOM 的组分发生变化, 尤其是在 60~80 cm 土层。不同树种环境下, 枯枝落叶的输入量及林下灌木、草本类型等均不同, 导致土壤容重、微生物群落结构等存在差异, 共同影响 DOM 的结构与性质。从芳香性来看, 不同树种仅在 60~80 cm 深度存在显著差异($P<0.05$)。浅层土壤含氧量较更深土层高, 微生物对有机物质的周转效率也较高, 易形成腐殖化产物。不同深度土壤 DOM 的 $SUVA_{260}$ 值介于 0.3~2.5(图 2C), 浅层土壤(0~20 cm 和 20~40 cm)显著高于其他深度土壤($P<0.05$), 表明林地浅层土壤疏水性组分含量较高, 如含丰富的苯环类物质^[14-15]。

S_R 可表征 DOM 的结构特征, 如分子量大小、胡敏酸/富里酸比例等。不同深度土壤 DOM 的 S_R 值介于 1.4~8.5(图 2D)。浅层土壤 DOM 的 S_R 值较低, 表明其分子量较大(与分子量成反比)^[16]。据此, 栎树树下 60~80 cm 土层 DOM 的分子量显著性低于其他土层($P<0.05$), 其他深度土层 DOM 的分子量之间没有显著差异。雪松树下不同深度土壤 DOM 的分子量差异不显著。DOM 分子量越小, 其向下物理迁移的可能性越大, 但同时因其微生物可利用性高, 使其可被快速转化, 一定程度上阻碍其向下迁移。

2.3 不同深度林地土壤溶解性有机质荧光光谱特征

不同深度林地土壤 DOM 的荧光光谱特征如图 3 所示。不同深度土层 DOM 的荧光特征差异较大(荧光强度与分布)。随土层深度增加, 不同树种林下土壤 DOM 荧光特征变化趋势一致, 即土壤 DOM 特征组分对应的发射波长(Em)与激发波长(Ex)逐渐降低, 表明从表层到深层, 土壤 DOM 分子量、芳香性、分子大小、疏水性等逐渐降低, 其组分类型也由占比小的氨基酸类物质转变为主导性占比^[17-18]。土壤孔隙可起到筛分 DOM 分子尺寸的作用。DOM 分子尺寸越小, 其生物可利用性越高, 易被进一步转化为蛋白质类物质, 如类色氨酸^[19]。对比两种树种的林下土壤,

栎树树下表层土壤含有更多的蛋白质类物质。

结合平行因子分析, 林地不同深度土壤 DOM 可匹配出 5 种荧光组分(图 4), 其中 C1 组分(Ex/Em: 245(364) nm/461 nm)为高分子量的陆源类胡敏酸物质, 广泛分布在草原、森林、农田土壤与海洋沉积物中; C2 组分(Ex/Em: 239(310) nm/410 nm)为原始和再生陆源类胡敏酸物质, 具有光稳定性, 不易光分解; C3 组分(Ex/Em: 270 nm/305 nm)为类酪氨酸物质, 易分解; C4 组分(Ex/Em: 276 nm/329 nm)为类色氨酸物质, 易与金属离子结合, 且易分解; C5 组分(Ex/Em: 270(430) nm/(366)522 nm)为类富里酸物质, 芳香性较低、分子量相对较低, 易转化形成活性氧类物质。

借助荧光强度, 可以半定量分析土壤 DOM 随土层深度的变化。如图 5 所示, 栎树树下与雪松树下土壤 DOM 的 C1、C2 和 C5 组分含量随土层深度增加, 呈现明显的下降趋势。雪松树下 0~20 cm 土层 DOM 的 C1、C2 和 C5 组分含量显著高于其他深度土层($P<0.05$); 80~100 cm 土层 DOM 的 C1、C2 和 C5 组分含量显著低于其他深度土层($P<0.05$)。这与 Ye 等^[20]对林地土壤(0~20、20~40 cm)DOM 的研究结果相似, 随土层深度增加, 类胡敏酸物质减少。C3 组分含量的变化趋势不同于其他组分, 深层土壤中其含量相对较高, 与 Han 等^[21]的研究结果相似。DOM 各组分相对占比可反映其稳定性等特征。在 0~20 cm 土层, 栎树树下与雪松树下土壤的 DOM 组分主要由 C1、C2 构成(均为类胡敏酸物质), 可达 67.5%。然而, 在 80~100 cm 土层, 栎树树下与雪松树下土壤的 DOM 组分主要由 C3、C4 构成(均为类氨基酸物质), 可达 76.5%。与 C3 和 C4 组分相比, C1、C2、C5 组分的分子量、芳香性与疏水性较大, 其生物可利用性较差。从组分含量与相对占比的角度看, 深层土壤较浅层土壤含有较多易分解的类氨基酸组分。

栎树与雪松树下各土层土壤 DOM 的荧光指数(FI, 表征生物与非生物来源特征)值分别介于 1.4~1.5 和 1.0~1.6(图 6)。FI 值相对偏小, 接近 1.4, 远小于 1.9, 表明其主体为植物残体源 DOM。其中, 0~20 cm 土层 DOM 的 FI 值相对较低, 其外源性更为明显。林地土壤表层常堆积枯枝落叶等, 降雨等环境行为可使植物残体中的 DOM 释放出来, 微生物转化形成的 DOM 相对较少。栎树与雪松树下各土层 DOM 的自生源指数(BIX, 表征其自生源占比特征)值分别介于 0.6~0.8 和 0.6~0.9。BIX 值相对偏小, 均小于 1, 表明其主体为外源 DOM, 自生源较少。深层土壤 DOM 的 BIX 值相对较高, 表明表层土壤(0~20 cm)DOM 外

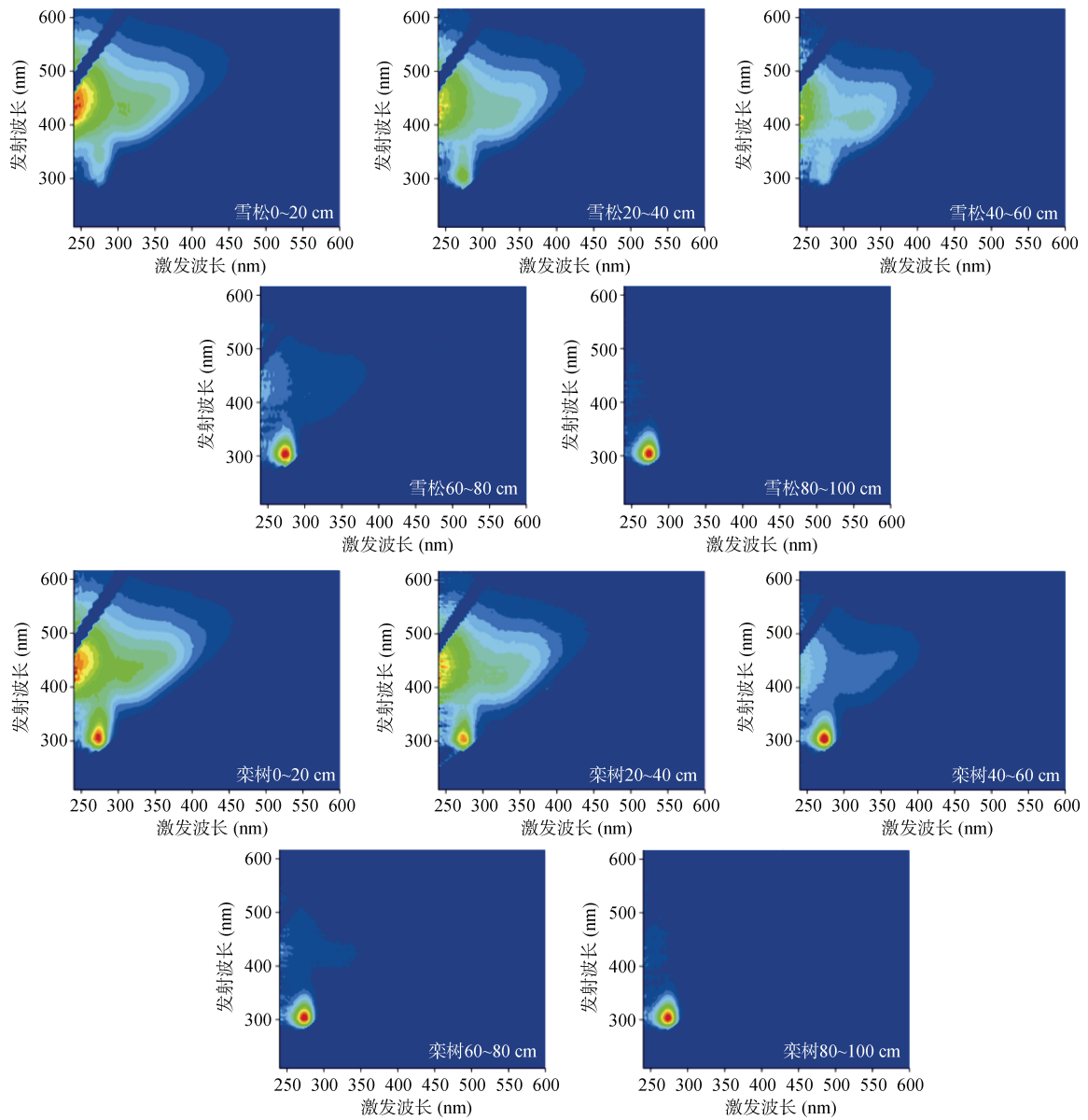


图 3 不同深度林地土壤 DOM 三维荧光光谱图

Fig. 3 Three-dimensional fluorescence spectra of forest soil DOMs in different depths

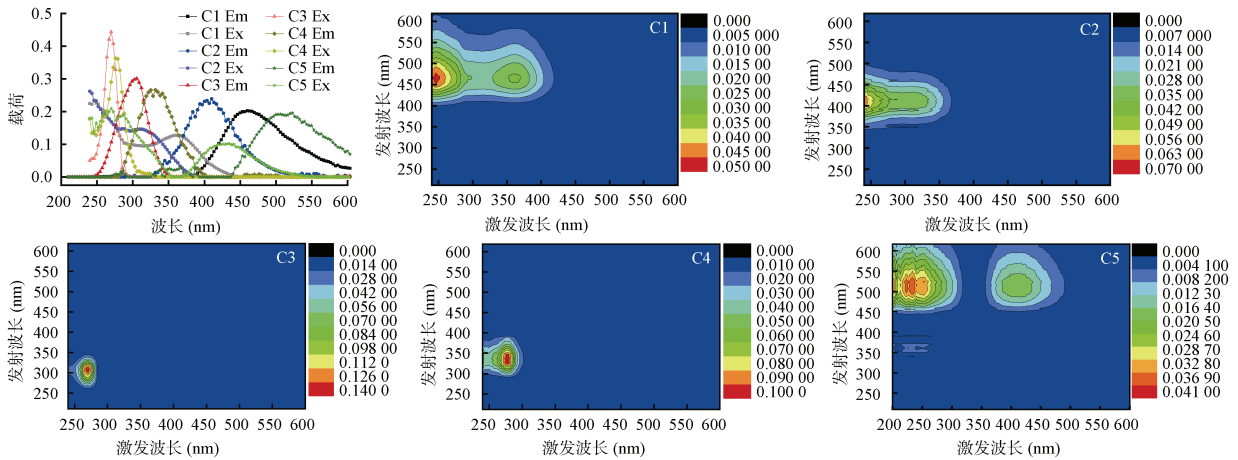
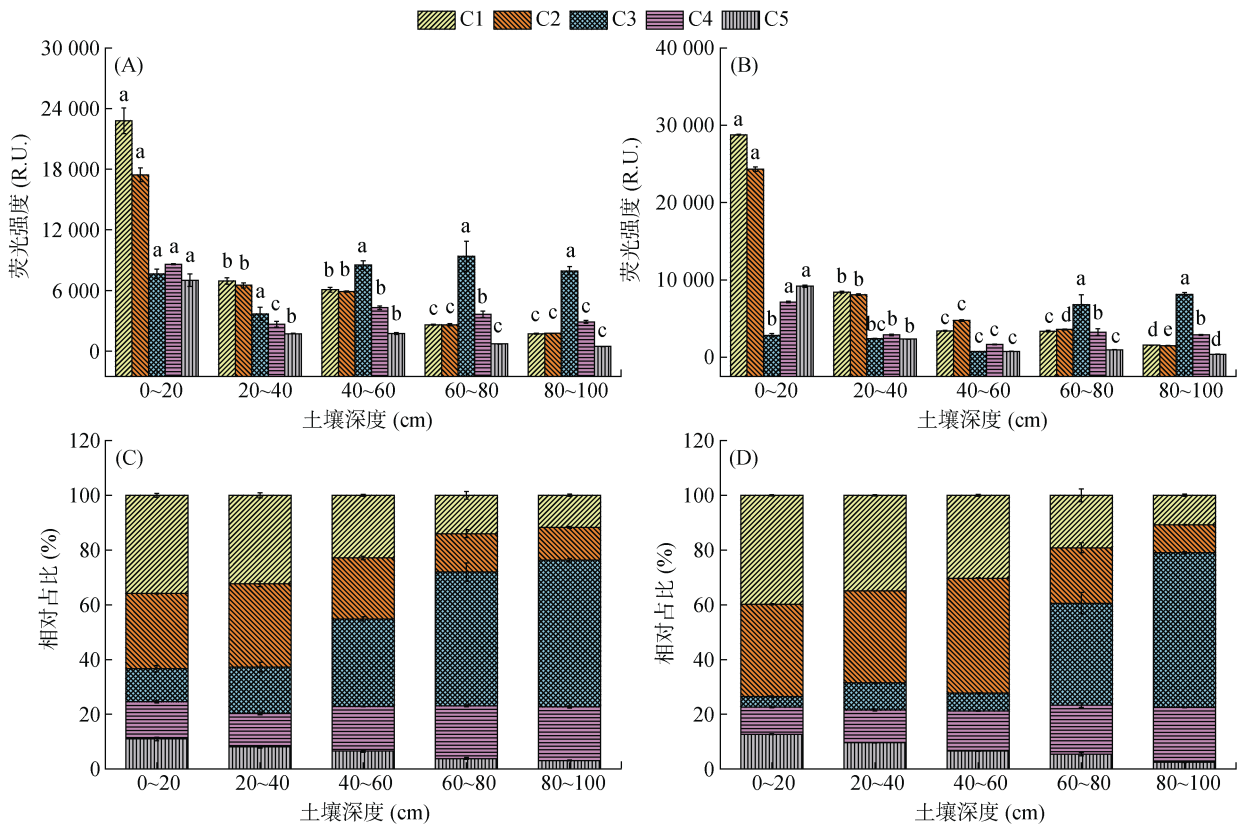


图 4 EEM-PARAFAC 特征曲线和荧光特征组分

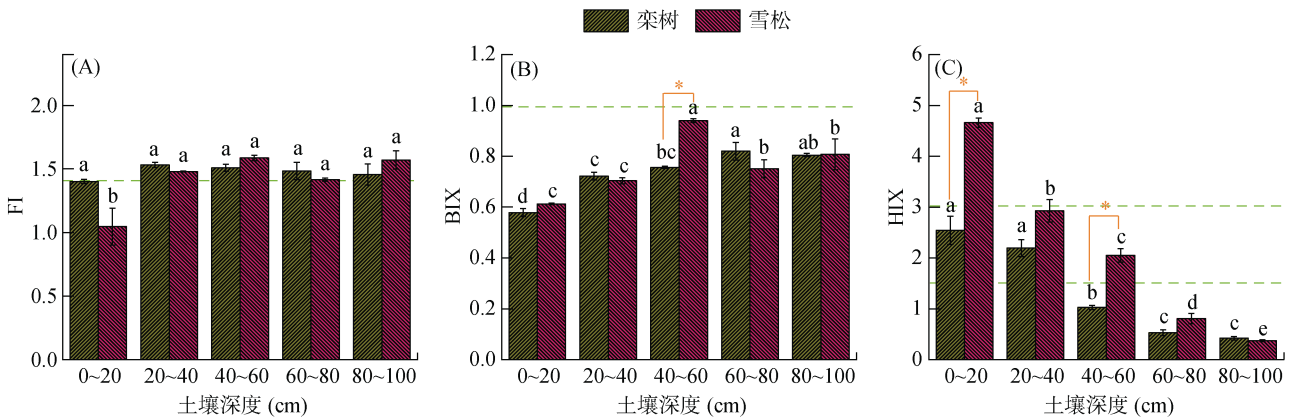
Fig. 4 Characteristic curves and fluorescence components obtained by EEM-PARAFAC analysis



(图中误差线为标准误(n=3), 不同小写字母表示同一土层不同组分间差异显著(P<0.05))

图 5 不同深度林地土壤 DOM 各组分荧光强度(A, 栎树; B, 雪松)和相对占比(C, 栎树; D, 雪松)

Fig. 5 Fluorescence intensities (A, *Koelreuteria paniculate*; B, *Cedrus deodara*) and relatively proportions (C, *Koelreuteria paniculate*; D, *Cedrus deodara*) of five components in forest soil SOMs in different depths



(图中不同小写字母表示同一树种下不同土层间差异显著(P<0.05), *表示同一土层不同树种间差异显著(P<0.05))

图 6 不同深度林地土壤 DOM 荧光指数(A)、自生源指数(B)和腐殖化指数(C)

Fig. 6 Fluorescence (A), biological (B), and the humification (C) indexes in forest soil DOMs in different depths

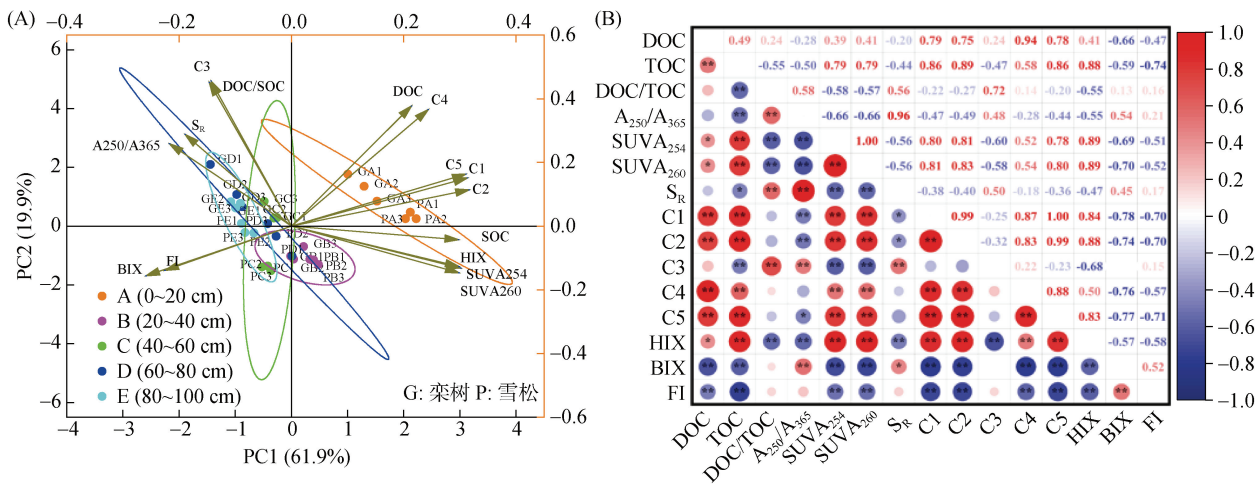
源性更强, 其微生物源 DOM 的来源占比相对较小。这与 Jiang 等^[22]关于生物质炭对农田土壤不同土层 DOM 的影响研究结果相似, 即深层土壤生物活性更强。农田土壤 DOM 的 BIX 值比本研究林地土壤高, 表明农业作业可强化土壤有机质的生物转化。DOM 向下迁移的同时, 微生物可将大分子类 DOM 转化为小分子类 DOM。栎树与雪松下各土层 DOM 的腐

殖化指数(HIX, 表征其腐殖化强度特征)值分别介于 0.4~2.5 和 0.4~4.7。相比于栎树下土壤, 雪松下土壤 DOM 腐殖化程度较高(表层土壤 DOM 的 HIX 值大于 3.0)。且 HIX 值在土层间差异性较大, 随土层深度增加, HIX 值呈下降趋势, 表明土层越深, 其 DOM 腐殖化程度越低。这与 Li 等^[23]对草地、农田与林地土壤的研究结果相似。由荧光特征指数可知, 林

地各土层 DOM 主要来源于外界环境中的动植物残体、根系分泌物等，且随雨水等向下迁移。结合紫外光谱指数可知，小分子量、低芳香性、亲水性化合物易迁移至土层深处。

图 7 显示，林地表层(0~20 cm)土壤 DOM 与其他土层土壤 DOM 距离均较远，DOM 特性差异较大。不同树种树下土壤 DOM 特性有一定差异。第 1 主成分(PC1)对 DOM 特性差异贡献率为 61.9%，第 2 主成分(PC2)对 DOM 特性差异贡献率为 19.9%，共为 81.8%。表层土壤 DOM 组分相对分子质量、疏水性等更高，与相关指标正相关。深层土壤 DOM 与小分子类组分及自源性指标等正相关。DOC 与 C4、C5、

C1、C2、SOC 极显著正相关，与 BIX 和 FI 指数极显著负相关，表明林地各土层土壤有机质主要来源于外部植物残体，且可释放的 DOM 占比相对稳定，其组分较 C3 更稳定。TOC 与 C3 组分极显著负相关以及 DOC/TOC 与 C3 组分极显著正相关，表明土壤有机质从表层到深层存在淋溶与分解过程，其内部的 C3 组分更易迁移至深处^[24-25]。C3 组分与其他组分无显著相关性，其他组分向 C3 转化相对较少，无对应的微生物过程^[23]。水溶性高、分子量较小的 DOM 组分更易渗透到深层土壤中，且深层土壤中微生物数量和活性均较低，导致随水下渗至土壤深层的 DOM 组分没有被快速分解。



(*、**分别表示在 P<0.05、P<0.01 水平显著相关)

图 7 不同深度林地土壤 DOM 含量、组分与性质主成分分析(A)和相关性分析(B)

Fig. 7 Principal component analysis (A) and Pearson correlation analysis (B) on characteristics of soil DOMs in different depths

3 结论

1)林地土壤有机质和 DOM 含量随土壤深度增加而显著下降，但深层土壤(60~80 cm 和 80~100 cm) DOC/TOC 值较高。

2)林地土壤 DOM 分子量、芳香性与疏水性整体表现为深层<表层(0~20 cm)。

3)林地土壤 DOM 荧光组分较多，且随土层深度增加，类胡敏酸物质含量与占比下降，类酪氨酸物质含量与占比上升；林地各深度土层土壤 DOM 的主要来源为植物残体，自生源较少，尤其是其表层土壤。

4)不同树种土壤 DOM 含量差异较大，但其组分相似，且 1m 深度内纵向变化趋势相似。

参考文献：

[1] Harris N L, Gibbs D A, Baccini A, et al. Global maps of twenty-first century forest carbon fluxes[J]. Nature Climate Change, 2021, 11(3): 234-240.

[2] Mitchard E T A. The tropical forest carbon cycle and climate change[J]. Nature, 2018, 559(7715): 527-534.

[3] Ding Y, Shi Z Q, Ye Q T, et al. Chemodiversity of soil dissolved organic matter[J]. Environmental Science & Technology, 2020, 54(10): 6174-6184.

[4] Chen G C, Gao M, Pang B P, et al. Top-meter soil organic carbon stocks and sources in restored mangrove forests of different ages[J]. Forest Ecology and Management, 2018, 422: 87-94.

[5] Cusack D F, Turner B L. Fine root and soil organic carbon depth distributions are inversely related across fertility and rainfall gradients in lowland tropical forests[J]. Ecosystems, 2021, 24(5): 1075-1092.

[6] Hicks Pries C E, Ryals R, Zhu B, et al. The deep soil organic carbon response to global change[J]. Annual Review of Ecology, Evolution, and Systematics, 2023, 54: 375-401.

[7] De Feudis M, Falsone G, Vianello G, et al. Soil organic carbon stock assessment in forest ecosystems through pedogenic horizons and fixed depth layers sampling: What's the best one?[J]. Land Degradation & Development, 2022, 33(9): 1446-1458.

- [8] Meng Y X, Li P, Xiao L, et al. Differences in dissolved organic matter and analysis of influencing factors between plantations pure and mixed forest soils in the Loess Plateau[J]. *Frontiers in Forests and Global Change*, 2024, 7: 1344784.
- [9] Gu J, Bol R, Wang Y, et al. Controls on soil dissolved organic carbon along the 4000 km North-South forest transect in Eastern China[J]. *Catena*, 2023, 220: 106691.
- [10] Huang R, Li Z, Xiao Y, et al. Composition of DOM along the depth gradients in the paddy field treated with crop straw for 10 years[J]. *Journal of Environmental Management*, 2024, 353: 120084.
- [11] 李帅东, 张明礼, 杨浩, 等. 昆明松华坝库区表层土壤溶解性有机质(DOM)的光谱特性[J]. *光谱学与光谱分析*, 2017, 37(4): 1183–1188.
- [12] 梁栋, 周巧林, 张辉, 等. 生物质炭和有机肥配施对水稻土溶解性有机质光谱学特征的影响[J]. *土壤学报*, 2024, 61(4): 1123–1133.
- [13] 龙云川, 蒋娟, 胡菁, 等. 高原湿地草海不同覆被土壤中溶解性有机质光谱特征[J]. *环境科学研究*, 2025, 38(4): 896–906.
- [14] 尹英杰, 商建英. 农作物秸秆腐解规律及其可溶性有机质特征[J]. *土壤学报*, 2025, 62(3): 692–704.
- [15] Zhang F F, Zhang W W, Wu S Z, et al. Analysis of UV-Vis spectral characteristics and content estimation of soil DOM under mulching practices[J]. *Ecological Indicators*, 2022, 138: 108869.
- [16] 黄媛, 王海珍, 杨智杰, 等. 种植米槠、杉木土壤 DOM 浓度和光谱特征差异及其对短期增温的响应[J]. *土壤*, 2025, 57(1): 47–57.
- [17] 王涵, 刘宗岳, 窦圣龙, 等. 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/OL]. *土壤*, 2025, 57(5): 1013–1024.
- [18] Zhou X R, Ma A Z, Chen X K, et al. Climate warming-driven changes in the molecular composition of soil dissolved organic matter across depth: A case study on the Tibetan Plateau[J]. *Environmental Science & Technology*, 2023, 57(44): 16884–16894.
- [19] Zhang R Q, Huang Q Q, Yan T Y, et al. Effects of intercropping mulch on the content and composition of soil dissolved organic matter in apple orchard on the Loess Plateau[J]. *Journal of Environmental Management*, 2019, 250: 109531.
- [20] Ye Q H, Wang Y H, Zhang Z T, et al. Dissolved organic matter characteristics in soils of tropical legume and non-legume tree plantations[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2020, 148: 107880.
- [21] Han C X, Li W, Li M, et al. Investigating the vertical distribution of dissolved organic matter in 5-m soil profiles in farmland and typical woodland on the southern Loess Plateau[J]. *Environmental Research*, 2023, 219: 115017.
- [22] Jiang S J, Dai G L, Liu Z Y, et al. Field-scale fluorescence fingerprints of biochar-derived dissolved organic matter (DOM) provide an effective way to trace biochar migration and the downward co-migration of Pb, Cu and as in soil[J]. *Chemosphere*, 2022, 301: 134738.
- [23] Li W, Jia X X, Li M, et al. Insight into the vertical characteristics of dissolved organic matter in 5-m soil profiles under different land-use types on the Loess Plateau[J]. *Science of the Total Environment*, 2019, 692: 613–621.
- [24] 师立鹏, 谷会岩, 王秀伟. 典型黑土区不同树种退耕还林地土壤活性有机碳差异及其影响因素[J]. *生态学报*, 2025, 45(1): 103–111.
- [25] Peng Y M, Xu H S, Wang Z, et al. Responses of the content and spectral characteristics of dissolved organic matter in intercropping soil to drought in Northeast China[J]. *Plant and Soil*, 2025, 506(1): 471–485.

(责任编辑: 于 飞)