

DOI: 10.11766/trxb202411190446

CSTR: 32215.14.trxb202411190446

徐焯红, 巴雯雯, 王炫清, 陆超, 罗佳, 马艳. 设施土壤溶解性有机质含量和质量对不同碳组分有机肥的响应[J]. 土壤学报, 2026, 63 (4): 1206–1218.

XU Yehong, BA Wenwen, WANG Xuanqing, LU Chao, LUO Jia, MA Yan. Response of Dissolved Organic Matter Content and Quality in Greenhouse Soils to the Application of Organic Fertilizers with Various Carbon Components[J]. Acta Pedologica Sinica, 2026, 63 (4): 1206–1218.

设施土壤溶解性有机质含量和质量对不同碳组分有机肥的响应*

徐焯红^{1, 2, 3}, 巴雯雯^{1, 3}, 王炫清^{1, 2}, 陆超^{1, 2}, 罗佳^{1, 2}, 马艳^{1, 2†}

(1. 江苏省农业科学院农业资源与环境研究所, 南京 210014; 2. 国家农业环境六合观测实验站, 南京 210014; 3. 江苏大学环境与安全工程学院, 江苏镇江 212013)

摘要: 溶解性有机质 (DOM) 是土壤碳库中最活跃的功能组分, 施用有机肥是设施土壤固碳培肥的有效措施。然而, 关于设施土壤 DOM 含量和质量对有机肥的响应尚不清楚, 阻碍了设施土壤活性碳库调控机理认知与有机肥精准施用技术的发展。利用田间试验, 设置不施肥 (CK)、单施化肥 (F) 以及 3 种不同碳组分特征有机肥替代 30% 化肥氮 (秸秆有机肥 FMs、鸡粪有机肥 FMc、菇渣有机肥 FMm) 处理, 探究设施菜地土壤表层和亚表层溶解性有机碳 (DOC)、溶解性有机氮 (DON) 含量的响应, 结合三维荧光光谱技术和平行因子分析方法, 分析土壤 DOM 的荧光光谱特征参数与组分构成。结果表明, 与 CK 相比, F 处理对表层和亚表层土壤 DOC 含量均没有显著影响; 仅显著增加了亚表层土壤 DON 的含量, 增幅达到 1.22 倍。与 F 处理相比, 活性碳组分含量最高的 FMc 处理显著提高表层土壤 DOC 和 DON 含量, 增幅分别为 44.2% 和 78.1%; 但是 FMs 和 FMm 处理表层土壤仅 DON 含量显著增加。与 CK 相比, 施用化肥和有机肥显著降低表层和亚表层土壤 DOC/DON 比值, 且表层土壤 DOM 腐殖化系数 (HIX) 显著提高 1.06 倍~2.07 倍, 并在 FMc 处理达到最高; 亚表层土壤 DOM 的荧光光谱特征参数对施肥均没有显著响应。DOC、DON 含量与分子量较小的富里酸类组分显著负相关, 而与分子量较大的胡敏酸、芳香类腐殖质组分显著正相关。综上所述, 施用活性碳组分含量高的鸡粪有机肥, 能够更有效地增加表层土壤 DOC 和 DON 的含量, 提高表层土壤 DOM 腐殖化程度, 增加亚表层土壤 DOM 抗分解组分比例, 对于实现设施菜地全耕层土壤活性碳库的含量和质量“双提升”更有裨益。

关键词: 碳组分; 溶解性有机质; 设施土壤; 有机肥; 三维荧光光谱

中图分类号: S153.6 文献标志码: A

Response of Dissolved Organic Matter Content and Quality in Greenhouse Soils to the Application of Organic Fertilizers with Various Carbon Components

XU Yehong^{1, 2, 3}, BA Wenwen^{1, 3}, WANG Xuanqing^{1, 2}, LU Chao^{1, 2}, LUO Jia^{1, 2}, MA Yan^{1, 2†}

* 国家重点研发计划项目 (2023YFD1702200)、国家自然科学基金项目 (41807047) 资助 Supported by the National Key Research and Development Program of China (No. 2023YFD1702200), and the National Natural Science Foundation of China (No. 41807047)

† 通讯作者 Corresponding author, E-mail: myjaas@sina.com

作者简介: 徐焯红 (1988—), 女, 江苏常熟人, 博士, 副研究员, 主要从事设施土壤元素循环与质量提升等研究。E-mail: yhxu0927@163.com

收稿日期: 2024-11-19; 收到修改稿日期: 2025-01-17; 网络首发日期 (www.cnki.net): 2025-04-02

(1. Institute of Agricultural Resources and Environment, Jiangsu Academy of Agricultural Sciences, Nanjing 210014, China; 2. National Agricultural Experimental Station for Agricultural Environment, Luhe, Nanjing 210014, China; 3. School of the Environment and Safety Engineering, Jiangsu University, Zhenjiang, Jiangsu 212013, China)

Abstract: 【 Objective 】 Dissolved organic matter (DOM) is the most active functional component in the soil carbon pool, and the application of organic fertilizer is an effective measure for carbon sequestration and soil fertility improvement in greenhouse soils. However, the response of DOM content and quality in greenhouse soils to organic fertilizer is still unclear, which hinders the elucidation of the regulation mechanisms of the active carbon pool in greenhouse soils and the development of precise application technologies for organic fertilizers. 【 Method 】 This study was conducted *in situ* and five treatments were included: no fertilization as control (CK), chemical fertilizer only (F), and three organic fertilizers with different carbon components replacing 30% of chemical N fertilizer (composted straw replacing 30% of chemical N, FMs; chicken manure replacing 30% of chemical N fertilizer, FMc; and spent mushroom replacing 30% of chemical N fertilizer, FMm). The content of dissolved organic carbon (DOC) and dissolved organic nitrogen (DON) were studied in the surface and subsurface layers of greenhouse soils under vegetable cultivation. Combined with three-dimensional fluorescence spectroscopy technology and parallel factor analysis method, the fluorescence spectral characteristic parameters and chemical composition of DOM in soil were analyzed. 【 Result 】 Compared with CK, the F treatment had no significant effect on the DOC content in both the surface and subsurface soil; it only significantly increased the DON content in the subsurface soil, with an increase of 1.22-folds. The results showed that compared with F, the FMc organic fertilizer with the highest content of labile carbon components significantly increased the DOC and DON content by 44.2% and 78.1%, respectively, in the surface soil. However, only the DON content in the surface soil significantly increased under the FMs and FMm treatments. Compared with CK, the application of chemical and organic fertilizers significantly reduced the DOC/DON ratio in the surface and subsurface soils, and the humification index (HIX) of DOM in the surface soil significantly increased by 1.06 to 2.07-folds, reaching the highest in the FMc treatment. Also, the fluorescence spectral characteristics of DOM in the subsurface soil did not significantly respond to fertilization. In addition, the content of DOC and DON were significantly negatively correlated with fulvic acid-like components with low molecular weight, while significantly positively correlated with humic acid and aromatic components with high molecular weight. 【 Conclusion 】 In summary, the application of chicken manure rich in labile carbon components can more effectively increase the content of DOC and DON and the humification degree of DOM in the surface soil, and increase the proportion of refractory components of DOM in the subsurface soil. Thus, it is more beneficial to apply chicken manure to achieve the "double improvement" of the content and quality of labile carbon pools in the entire tillage layer of greenhouse soils under vegetable cultivation.

Key words: Carbon component; Dissolved organic matter; Greenhouse soil; Organic fertilizer; Three-dimensional fluorescence spectroscopy

设施蔬菜高度集约化种植中化肥的过量和不合理施用现象普遍存在，不仅导致化肥利用率和经济效益低下，还导致土壤有机质含量下降、质量退化等问题，制约了我国蔬菜产业的可持续发展。据调查，设施菜地土壤有机质普遍处于中低水平，约有34%的土壤有机质含量低于 $20\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ ，仅12%的菜地达到肥沃标准（ $40\sim 50\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ ）^[1]。施用有机肥是提高土壤有机质含量、增加蔬菜产量的有效措施，但土壤有机质对施肥等养分管理措施响应较缓慢，仅测定其含量不能及时反映土壤质量的短期变化^[2]。事实上，土壤有机质的生产力功能受其含量和质量的

双重影响。溶解性有机质（DOM）作为土壤有机质中最活跃的功能组分，不仅是土壤有机质形成与周转过程中重要的中间产物，还关系到碳、氮、磷、硫等营养元素的生物有效性，可以作为表征土壤质量变化的敏感性指标^[3]。

DOM是高度复杂的混合体，包括易利用的小分子（碳水化合物等）、芳香性分子（多酚、缩合芳烃等）和稳定性分子（木质素单体等）^[4]。一般而言，芳香类、多聚化DOM能够抵抗生物分解，而碳水化合物、不饱和的脂肪类和蛋白类物质则被归为易分解组分^[5]。早期研究表明，小麦-玉米轮作体系下

施用有机肥可增加土壤 DOM 的含量,并通过增加结构复杂的芳香化合物的比例,增强土壤碳汇功能和有机质提升潜力^[6]。通常认为,施用有机肥能够增加根际微生物的活性,其效应主要发生在表层土壤,因此以往研究主要关注表层土壤 DOM 对有机肥施用的响应^[7]。但是,最近研究指出,DOM 通过淋溶作用向下迁移是亚表层碳库的主要来源,通过吸附作用形成有机无机复合体稳定化存在于亚表层土壤中;也有研究发现,亚表层土壤微生物群落对外源养分投入敏感,由此引发的本底土壤有机质分解的激发效应高于表层^[8]。目前关注全耕层土壤活性碳库调控机制的研究匮乏且集中于粮食作物种植体系,对于高强度利用且有机肥施用极为普遍的设施蔬菜,表层和亚表层土壤 DOM 含量和组分的响应与机制亟待深入研究。

外源添加有机肥对土壤 DOM 的作用途径主要体现在两个方面,直接作为土壤 DOM 的重要来源;或者通过刺激土壤微生物活动与作物根系生长,从而加剧本底 DOM 的分解,最终影响土壤 DOM 的含量与组成^[9]。溶解性有机碳(DOC)和溶解性有机氮(DON)是表征土壤 DOM 含量和生物有效性的重要指标。谢军等^[10]通过长期定位试验发现,施用猪粪有机肥处理下土壤 DON 的含量显著增加 27.5%,主要是因为 DON 的含量与土壤氮素矿化能力有关,外源有机物料通过增加微生物活性、促进有机物质分解,从而增加土壤中 DON 的含量。与 DOM 的含量相比,其组分的稳定性更能表征生物活性和潜在稳定性^[11]。以往的研究认为,DOM 中碳水化合物等易分解组分的减少是促进 DOM 稳定化的关键^[12];但也有观点认为,木质素等顽固性组分主导着 DOM 的稳定性^[13]。这是由于通常情况下,土壤中的无机氮能够促进碳水化合物的分解,但对木

质素等大分子的降解具有抑制效应^[14]。设施农业生产中化肥投入量大可能显著影响 DOM 的周转行为,并且施用的有机肥种类多。Xu 等^[15]利用固态 ¹³C 核磁共振技术,发现鸡粪有机肥含有的活性碳组分烷氧碳显著高于菇渣有机肥,而中药渣有机肥的惰性碳组分烷基碳含量显著高于鸡粪有机肥。施用不同碳组分构成的有机肥,如何影响设施菜地土壤 DOM 的组分构成进而改变活性有机质库容,亟需进一步研究阐明。

据此,本研究选取典型设施菜地作为研究对象,通过野外田间小区试验,结合三维荧光光谱技术耦合平行因子分子方法(Parallel factor analysis),探讨不同碳组分有机肥施用下设施菜地表层和亚表层土壤 DOM 含量与组分特征的响应,解析有机肥碳组分构成对土壤 DOM 组分特征的调控机制,为设施菜地全耕层土壤 DOM 含量和质量“双调控”的有机肥精准施用策略提供理论支撑和科学依据。

1 材料与方法

1.1 试验点概况

试验地点位于江苏省南京市六合区竹镇镇江苏省农业科学院六合基地(32°48'N, 118°62'E),属于北亚热带季风气候区,年平均气温 15.6~16.9 °C,年均降水量 992~1 100 mm。试验土壤属于黄棕壤,质地为粉黏壤。六合基地设施类型主要为塑料大棚(8 米宽装配式钢架大棚)。试验大棚在本试验开始前已为设施种植,作物为蔬菜。2020 年 9 月起开展不同碳组分有机肥施用对设施土壤活性碳库影响的试验,第一茬作物为萝卜(2020 年 9 月至 2020 年 12 月),第二茬作物为芹菜(2021 年 5 月至 2021 年 7 月)。试验开始前耕层土壤基本理化性质见表 1。为更好地获得不同

表 1 试验开展前耕层土壤基本理化性质

Table 1 Physicochemical characteristics of tested soil before experiment performing

土壤 Soil	pH	有机质	全氮 Total	全磷 Total	全钾 Total	NO ₃ ⁻ -N/ (mg·kg ⁻¹)	NH ₄ ⁺ -N/ (mg·kg ⁻¹)	有效磷 Available	速效钾
		Organic matter/ (g·kg ⁻¹)	nitrogen/ (g·kg ⁻¹)	phosphorus/ (g·kg ⁻¹)	potassium/ (g·kg ⁻¹)			phosphorus/ (mg·kg ⁻¹)	potassium/ (mg·kg ⁻¹)
黄棕壤 Yellow-brown soil	6.72	10.4	0.732	0.583	17.6	35.8	10.1	22.5	325

碳组分有机肥施用对土壤活性碳库的效应，仅针对第二茬作物和土壤进行数据分析与阐述。

1.2 试验设计

试验以田间原位小区的方式进行，共设置 20 个小区（每个小区 3.4 m × 3.4 m）随机区组排列。试验包括 5 个处理：不施肥（CK）、单施化肥（F）、秸秆有机肥替代 30% 化肥氮（FM_s）、鸡粪有机肥替代 30% 化肥氮（FM_c）和菇渣有机肥替代 30% 化肥氮（FM_m），每个处理 4 个重复。供试的三种有机肥为具有代表性、以常见有机废弃物堆制的商品有机肥，样品经风干、过筛后参照有机肥国标 NY525-2012 测定其基本理化性质（表 2）。有机肥碳组分含量使用 Bruker Avance 400 型核磁共振波谱仪进行固态 ¹³C 交叉极化/边带压制（¹³C CP TOSS）核磁共振测定。过 100 目筛的有机肥粉末样品装入 4 mm 样品旋转器，设置旋转速度为 14 kHz，接触时间为 1 ms，弛豫时间为 0.5 s，化学位移参考外标固态金刚烷的亚甲基信号进行校正^[15]。将获得的 ¹³C 核磁共振图谱划分为七个化学位移，即 0~45、45~60、60~93、93~110、110~142、142~160 和 160~

190 ppm，分别代表烷基碳、甲氧基碳、烷氧碳、双氧烷基碳、芳基碳、酚基碳和羰基碳^[16]。有机肥碳组分相对含量用对应区间积分面积占总积分面积的百分数表示（表 2）。

供试氮肥为尿素（N 含量 46%），施氮量为 150 kg·hm⁻²，基追比为 5：5。磷肥为磷酸二氢钾（P₂O₅ 含量 52%），施用量（P₂O₅）为 90 kg·hm⁻²，全部用于基肥。钾肥为磷酸二氢钾（K₂O 含量 34%）和硫酸钾（K₂O 含量 52%），施用量（K₂O）为 150 kg·hm⁻²，基追比为 4：6。施用有机肥的处理中，有机肥氮替代尿素氮 30%，基肥施用。有机肥处理磷、钾化肥用量与单施化肥处理相同。芹菜品种为文图拉，采用育苗移栽的方式种植。

1.3 样品采集与分析

于 2021 年 7 月 27 日采收芹菜，分小区全部采收称重计产，并根据小区面积折算产量（t·hm⁻²）。每个小区随机选择 16 株芹菜，测定株高后带回实验室，一部分鲜样用于测定芹菜品质，维生素 C 含量采用 2, 6-二氯酚酚滴定法测定，硝酸盐含量采用水杨酸-浓硫酸比色法测定；另一部分置于烘箱中

表 2 有机肥的元素组成、溶解性有机碳氮含量和有机碳官能团的占比

Table 2 Elemental composition, concentrations of dissolved organic carbon and nitrogen, and proportions of functional organic carbon groups of organic fertilizers

		基本理化性质 Basic physical and chemical properties						
有机肥 Organic fertilizer	总有机碳 Total organic carbon/ (g·kg ⁻¹)	全氮 Total nitrogen/ (g·kg ⁻¹)	全磷 Total phosphorus (P ₂ O ₅) / (g·kg ⁻¹)	全钾 Total potassium (K ₂ O) / (g·kg ⁻¹)	溶解性有机碳 Dissolved organic carbon/ (g·kg ⁻¹)	溶解性有机氮 Dissolved organic nitrogen/ (g·kg ⁻¹)		
Ms	280.3	19.0	14.3	21.8	5.8	0.6		
Mc	122.7	14.0	19.1	27.9	4.5	0.8		
Mm	272.3	27.5	34.4	21.7	3.3	0.3		
		有机碳官能团 Functional organic carbon groups						
有机肥 Organic fertilizer	烷基碳 Alkyl carbon/%	甲氧基碳 Methoxyl carbon/%	烷氧碳 O-alkyl carbon/%	双氧烷基碳 Di-O-alkyl carbon/%	芳基碳 Aromatic carbon/%	酚基碳 Phenolic carbon/%	羰基碳 Carbonyl carbon/%	
Ms	16.9	9.3	37.0	10.6	13.3	5.8	7.1	
Mc	16.7	7.2	47.0	12.0	6.9	3.4	6.8	
Mm	20.7	11.0	27.9	9.6	13.0	8.4	9.4	

注：Ms 秸秆有机肥，Mc 鸡粪有机肥，Mm 菇渣有机肥。Note: Ms, Composted straw; Mc, Chicken manure; Mm, Spent mushroom compost.

105 °C 杀青 30 min、75 °C 烘干至恒重, 计算含水率并保存用于植株全氮含量的测定。

将烘干至恒重的芹菜样品粉碎过 100 目筛, 用 $H_2SO_4-H_2O_2$ 联合消解法消煮。采用凯氏定氮法测定植株全氮含量。芹菜氮吸收量等于单位面积内芹菜对应的干质量×芹菜全氮含量。化肥氮利用率等于施肥与不施肥处理的芹菜氮吸收量之差/化肥氮施用量×100%, 肥料总氮利用率等于施肥与不施肥处理的芹菜氮吸收量之差/施氮总量×100%。

芹菜收获后, 每个小区按“S”型布点, 采集表层 (0~20 cm) 和亚表层 (20~40 cm) 的土壤。将各小区分层采集到的新鲜土壤混匀后带回实验室分析。称取 5.00 g 土壤以 1:10 的土水比添加去离子水, 250 $r \cdot min^{-1}$ 振荡 30 min 后, 将浸提液以 8 000 $r \cdot min^{-1}$ 离心 10 min, 取上清液过 0.45 μm 的滤膜 (聚醚砜) 获得 DOM 滤液, 在总有机碳 (vario TOC Cube, 德国元素) 分析仪上分别测定 DOC 和 DON 的浓度。称取 10.00 g 的鲜土, 以 1:10 的土水比加入 2 $mol \cdot L^{-1}$ 氯化钾溶液, 250 $r \cdot min^{-1}$ 振荡 1 h 后过滤, 用流动分析仪 (San⁺⁺ System, 荷兰斯卡拉) 测定浸提液中 NH_4^+-N 、 $NO_3^- - N$ 、和可浸提总氮 (ETN) 的浓度。采用 ETN 减去 NH_4^+-N 和 $NO_3^- - N$ 之差表征溶解性有机氮 (DON), $NO_3^- - N / NH_4^+ - N$ 比值表征土壤硝化能力^[17]。

采用三维荧光光谱仪 (Varian Cary Eclipse, 美国安捷伦) 对土壤 DOM 浸提液进行三维荧光光谱 (EEM) 扫描。激发波长 (Excitation wavelength, λ_{Ex}) 为 200~450 nm, 增量为 5 nm; 发射波长 (Emission wavelength, λ_{Em}) 为 250~550 nm, 增量为 2 nm。荧光指数 (Fluorescence index, FI) 等于 λ_{Ex} 为 370 nm 时, λ_{Em} 在 470 nm 和 520 nm 两处荧光强度比值, 指示 DOM 的形成来源。通常认为, FI>1.8 时, DOM 主要来源于微生物代谢产物; FI<1.2, DOM 主要来源于植物和土壤有机质等。腐殖化指数 (Humification index, HIX) 等于 λ_{Ex} 为 254 nm 时, λ_{Em} 在 435~480 nm 范围与 300~345 nm 范围的荧光强度积分的比值, 表征 DOM 的腐殖化程度。自生源指数 (Biological index, BIX) 即为 λ_{Ex} 为 310 nm 时, λ_{Em} 在 380 nm 与 430 nm 处荧光强度的比值, 通常认为 BIX>1 时 DOM 主要由微生物产生主导^[18]。新鲜度指数 (Freshness index, β/α) 等于 λ_{Ex} 为 310 nm 时, λ_{Em} 在 380 nm 的荧光强度与 420~435 nm 范围

内最大荧光强度的比值, 该比值较高时表明 DOM 主要由分子结构简单的组分构成, 以及微生物活动产生^[19]。

1.4 数据分析

采用 Matlab 软件调用 DOMFluor 工具箱对土壤 DOM 三维荧光光谱进行三维荧光光谱图绘制和平行因子分析。利用 Origin 2018 进行作图, 并分别对土壤 DOM 的 4 个荧光组分与荧光指数进行线性函数拟合。采用 SPSS 21.0 软件进行 Pearson 相关性分析、线性回归分析和单因素方差分析 (One-way ANOVA)。以 $P<0.05$ 为差异显著。

2 结果

2.1 不同碳组分有机肥对芹菜产量、营养品质和氮利用率的影响

从表 3 中可以看出, 与不施肥处理相比, 有机肥和化肥处理对芹菜产量和株高没有显著影响。与 F 处理相比, 有机肥处理芹菜硝酸盐含量显著降低 7.85%~9.33%; 芹菜维生素 C 在 FMm 处理中显著增加 9.01%, 在 FMc 处理中没有显著差异, 在 FMs 处理中显著降低 7.21%。

与 CK 处理相比, F、FMs、FMc 和 FMm 处理芹菜氮吸收量显著增加 42.9%~53.0%, 不同施肥处理之间没有显著差异 (表 4)。与 F 处理相比, FMs、FMc 和 FMm 处理化肥氮利用率显著增加, 增幅为 35.0%~42.9%; 上述有机肥处理之间肥料总氮利用率变化较小, 均处于 14.71%~15.56%。

2.2 不同碳组分有机肥对土壤溶解性碳氮含量的影响

不同碳组分有机肥对设施菜地土壤溶解性碳氮的影响见图 1。表层土壤 $NO_3^- - N$ 含量从 CK 处理中的 5.96 $mg \cdot kg^{-1}$ 显著提高至施肥处理中的 21.7~29.8 $mg \cdot kg^{-1}$, 亚表层土壤 $NO_3^- - N$ 含量较 CK 处理显著提高 50.3%~69.2%, 各施肥处理之间差异不显著。各处理表层和亚表层土壤 $NH_4^+ - N$ 含量变化范围为 3.05~3.81 $mg \cdot kg^{-1}$ 。表层土壤 DON 含量在 F 处理为 17.5 $mg \cdot kg^{-1}$, 在 FMs、FMc 和 FMm 处理显著增至 30.3~31.2 $mg \cdot kg^{-1}$; 各施肥处理亚表层土壤 DON 含量接近, 为 9.79~10.27 $mg \cdot kg^{-1}$, 均显著高于 CK 处理。与 CK 处理相比, 表层土壤 DOC 含量

表 3 不同处理下芹菜的产量、株高和营养品质

Table 3 Yield, height, and nutritional quality of celery under various treatments

处理 Treatment	产量 Fresh weight/ (t·hm ⁻²)	株高 Plant height/ cm	硝酸盐 Nitrate/ (mg·kg ⁻¹)	维生素 C Vitamin C/ (mg·kg ⁻¹)
CK	16.58±0.75a	60.45±0.83a	685±18c	43.71±1.04d
F	17.92±0.43a	61.00±0.53a	1 567±26a	51.62±1.52b
FMs	17.46±0.61a	60.64±1.11a	1 444±43b	47.90±0.77c
FMc	16.90±0.91a	61.53±2.29a	1 421±45b	49.29±0.47bc
FMm	17.37±0.30a	61.36±0.15a	1 434±31b	56.27±0.77a

注：CK、F、FMs、FMc、FMm 分别表示不施肥、单施化肥、秸秆有机肥替代 30%氮肥、鸡粪有机肥替代 30%氮肥和菇渣有机肥替代 30%氮肥。表中数据为平均值±标准误 ($n=4$)；同列小写字母不同表示处理之间差异达到显著水平 ($P<0.05$)。下同。Note: CK, F, FMs, FMc, and FMm mean no fertilization, chemical fertilizer only, and 30% substitution of chemical nitrogen fertilizer with composted straw, chicken manure, or spent mushroom compost, respectively. Data are presented with mean values ± standard error ($n=4$); Different letters within the same column indicate significant differences among treatments ($P<0.05$). The same below.

表 4 不同处理下芹菜氮吸收量、化肥氮利用率和肥料总氮利用率

Table 4 Nitrogen uptake of celery, chemical fertilizer nitrogen use efficiency and total fertilizer nitrogen use efficiency under various treatments

处理 Treatment	氮吸收量 N uptake amount/ (kg·hm ⁻²)	化肥氮利用率 Chemical fertilizer N use efficiency/%	肥料总氮利用率 Total fertilizer N use efficiency/%
CK	51.39±2.02b	—	—
F	78.62±1.03a	18.15±0.71b	18.15±0.71a
FMs	74.74±2.99a	25.94±1.11a	15.56±0.67a
FMc	73.45±4.12a	24.51±2.37a	14.71±1.42a
FMm	74.61±2.18a	25.80±0.83a	15.48±0.50a

仅在 FMc 处理中显著增加至 44.3 mg·kg⁻¹，其余处理均没有显著差异；亚表层土壤 DOC 含量在各施肥处理中均呈增加趋势，并在 FMs 和 FMm 中达到显著水平。施用化肥和有机肥显著降低表层和亚表层土壤 DOC/DON 比值，但施肥处理间没有显著差异。

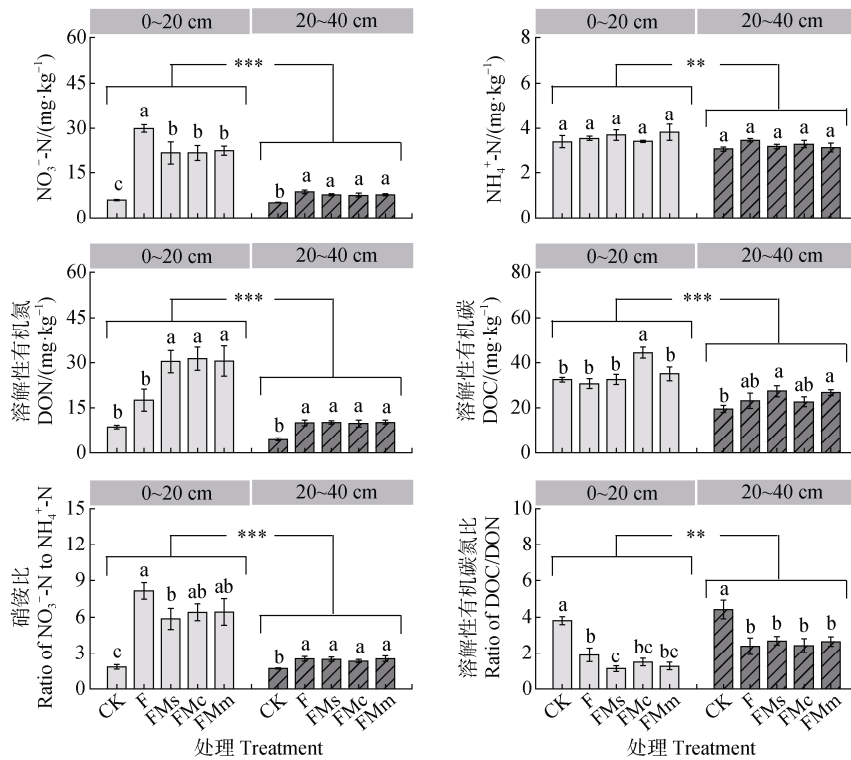
2.3 不同碳组分有机肥对土壤 DOM 的三维荧光光谱特征的影响

土壤 DOM 的 EEM 光谱参数 FI 值用于表征 DOM 的来源，在所有处理中 FI 值均小于 1.8，表明微生物的贡献较弱（图 2）。与 CK 相比，施用不同碳组分有机肥显著提高表层土壤 FI 值，但对亚表层土壤没有显著影响。表层土壤 DOM 表征新产生的、分子组成简单组分比例的 BIX 指数均小于 1，而亚

表层土壤 BIX 均大于 1，表明亚表层土壤 DOM 产生为生物源主导。与此相一致的是，亚表层土壤表征新旧碳比的 β/α 比值高于表层土壤。与 CK 处理相比，施肥处理表层土壤表征 DOM 腐殖化程度的 HIX 显著提高 1.06 倍~2.07 倍，其中 FMc 处理的 HIX 最高，达到 23.7；各处理亚表层土壤 HIX 没有显著差异。

2.4 不同碳组分有机肥对土壤 DOM 的三维荧光光谱组分的影响

对不同碳组分有机肥施用下土壤 DOM 数据进行平行因子分析，将土壤 DOM 分为 4 个荧光组分。线性回归分析结果表明（图 3），C1、C3 含量与荧光指数、腐殖化指数呈显著的负相关，而与自生源指数、新鲜度指数呈显著的正相关，表明 C1 和 C3



注：图中，误差线为标准误 ($n=4$)；柱上不同小写字母表示相同土层不同处理之间达到显著差异 ($P < 0.05$)。DON，溶解性有机氮；DOC，溶解性有机碳。*表示 $P < 0.05$ ，**表示 $P < 0.01$ ，***表示 $P < 0.001$ 。下同。Note: Data in the Fig. are presented with mean values \pm standard error ($n=4$). Different lowercase letters above the columns mean significant differences among treatments of the same soil depth at 0.05 level. DON, dissolved organic nitrogen; DOC, dissolved organic carbon. Significance level: * $P < 0.05$, ** $P < 0.01$, *** $P < 0.001$. The same below.

图 1 不同处理设施菜地土壤溶解性碳氮含量与比值

Fig. 1 Concentrations and ratios of dissolved carbon and nitrogen in soils under various treatments

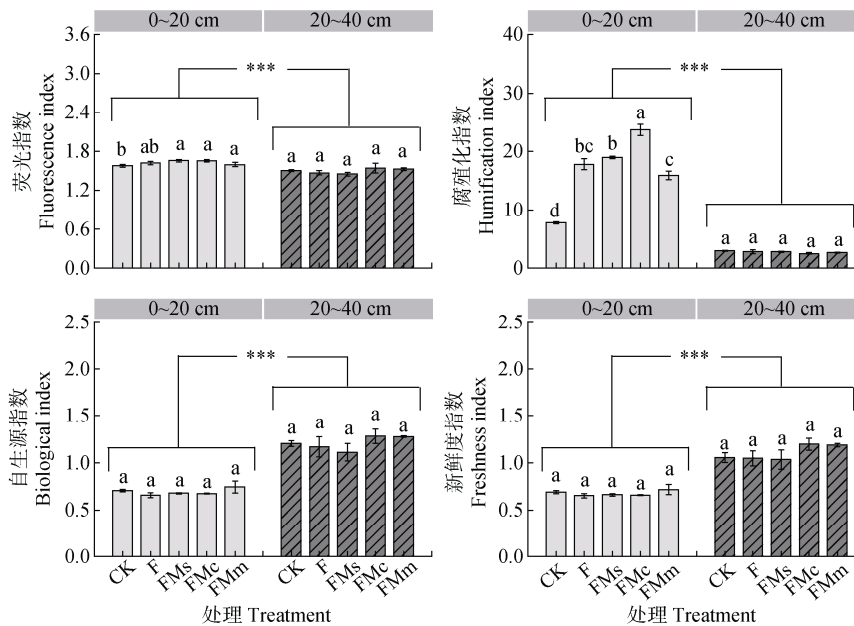


图 2 不同处理下设施菜地土壤溶解性有机质的荧光光谱参数特征

Fig. 2 Fluorescence spectral index of dissolved organic matter in soils under various treatments

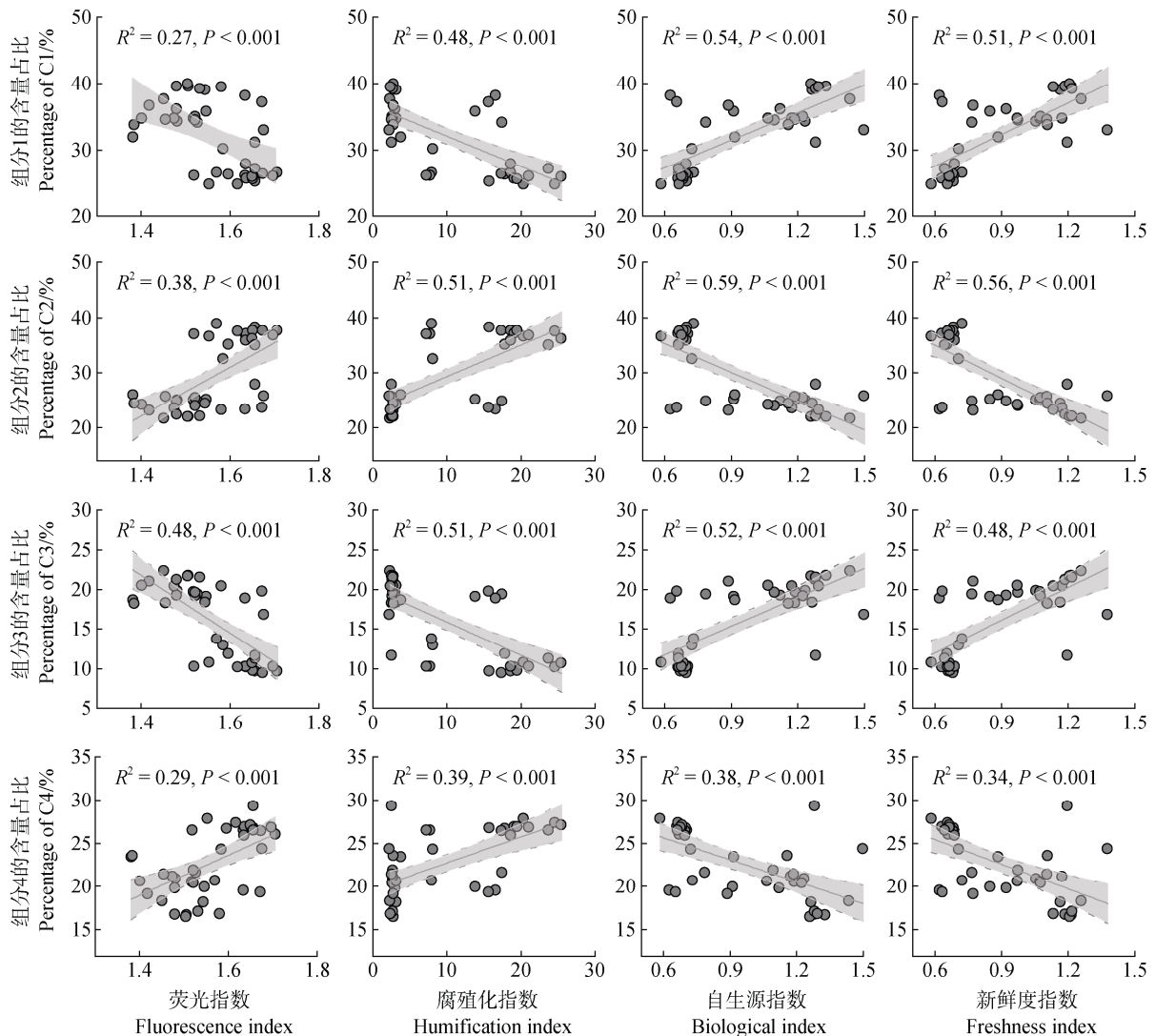


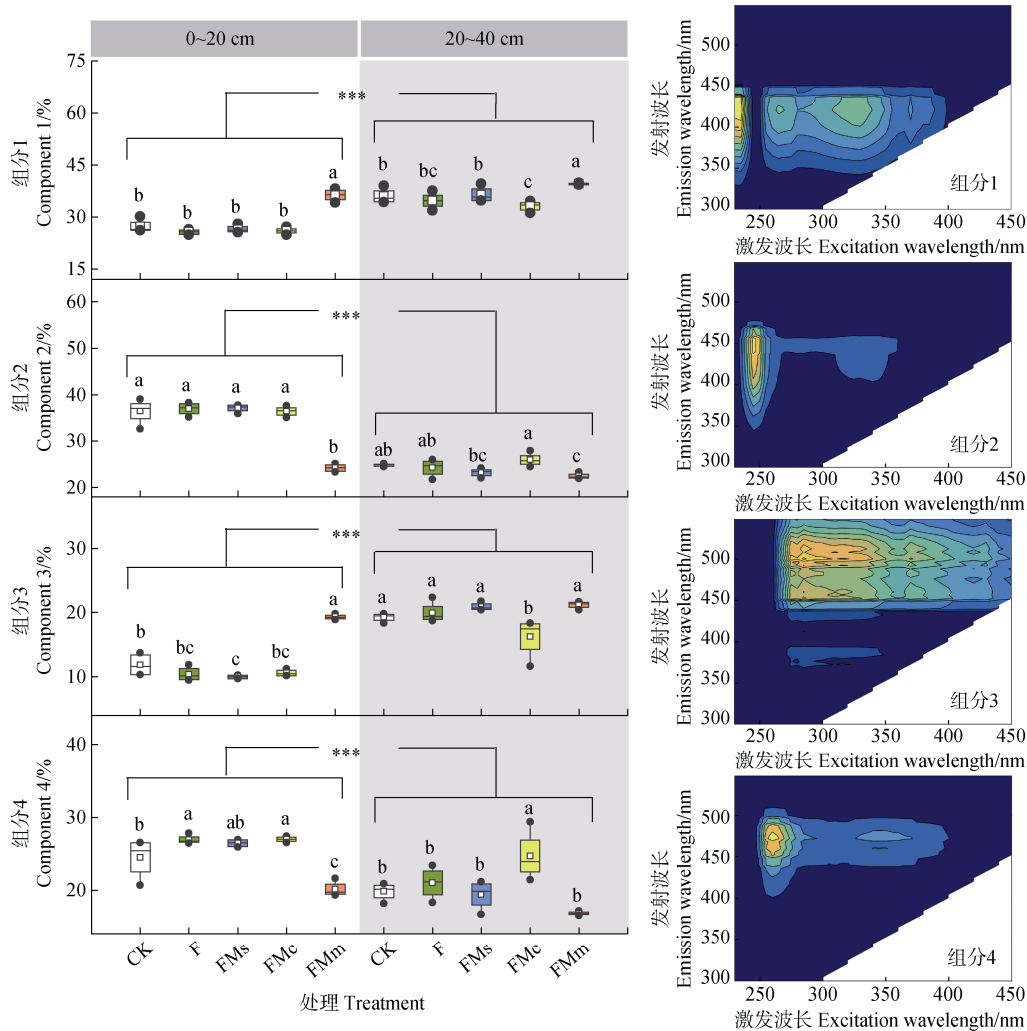
图3 设施菜地土壤溶解性有机质荧光组分与荧光光谱参数之间的关系

Fig. 3 Relationships between the percentages of fluorescence components and fluorescence spectral index of soil dissolved organic matter across various treatments

组分属于相对易分解的组分。这两个组分均表现为在亚表层土壤中的含量较高(图4)。与此相反的是, C2、C4含量与荧光指数、腐殖化指数呈显著的正相关,而与自生源指数、新鲜度指数呈显著的负相关,表明C2和C4属于相对难分解的组分,且这两个组分均表现为在表层土壤中的含量较高。

结合回归分析结果与4个荧光组分的特征峰位置,对其进行划分^[20-21](图4)。C1特征峰位置 Ex: 240(320) nm, Em: 410~440 nm,该峰荧光特征类似于富里酸类物质,分子量相对较小,主要来源于有机质的分解。FMm处理表层和亚表层土壤C1组分含量均显著高于FMs、FMc和F处理,其余处理之间没有显著差异。C2特征峰位置 Ex: 240 nm,

Em: 440~460 nm,该峰荧光特征类似于胡敏酸类物质,分子量较大,通常来源于陆生植物或土壤有机质。FMm处理表层和亚表层土壤C2组分含量均显著低于FMs、FMc和F处理(亚表层土壤FMs处理除外)。C3特征峰位置 Ex: 280(310) nm, Em: 500~520 nm,该峰荧光特征也类似于土壤富里酸类物质,表层土壤FMm处理该组分含量显著高于其他处理,亚表层土壤FMc处理该组分含量显著低于其他处理。C4特征峰位置 Ex: 260 nm, Em: 470 nm,该峰荧光特征类似于芳香类腐殖物质,分子量较大。表层土壤FMm处理该组分含量显著低于其他处理,亚表层土壤FMc处理该组分含量显著高于其他处理。



注: 箱式图上不同小写字母表示相同土层不同处理间差异显著 ($P < 0.05$)。Note: Different lowercase letters above the boxes indicate significant differences among treatments at the same soil depth ($P < 0.05$).

图 4 设施菜地不同处理下土壤溶解性有机质的 4 个荧光组分占比

Fig. 4 Percentages of four fluorescence components of dissolved organic matter in soils under various treatments

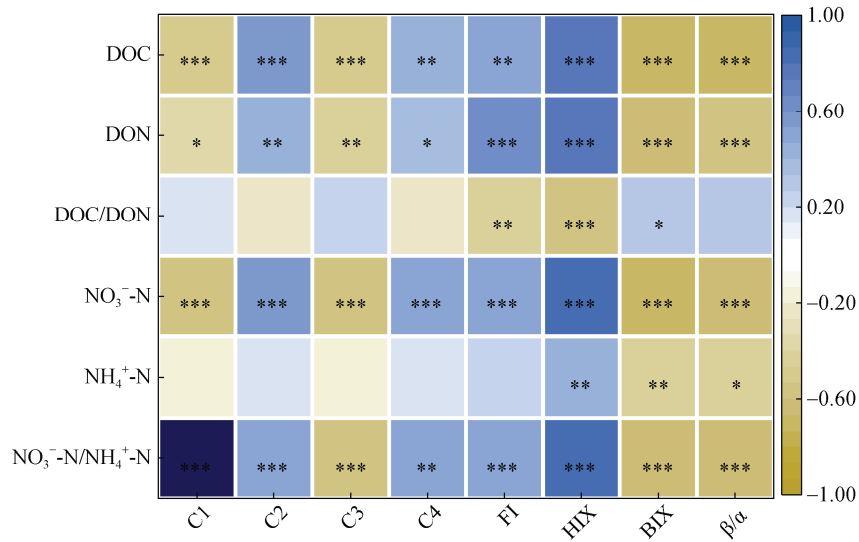
进一步进行相关分析(图 5), 结果表明土壤 DOC、DON 含量与 DOM 中分子量较小的富里酸类组分 C1、C3 呈显著负相关关系, 而与分子量较大的胡敏酸、芳香类腐殖质组分呈显著的正相关关系。同时, 土壤 NO_3^- -N 含量、 NO_3^- -N/ NH_4^+ -N 比值也均与 C1、C3 组分显著负相关, 而与 C2、C4 组分显著正相关。

3 讨论

3.1 不同碳组分有机肥施用下不同土层溶解性有机质的含量变化

溶解性有机质作为土壤有机质中生物化学活性

和迁移性最强的组分, 虽然在土壤总有机质中的占比通常不足 1%, 但在土壤溶液体系生化反应中发挥着枢纽作用^[22]。化肥主要通过影响土壤微生物活性与作物生长, 进而影响土壤 DOM 的含量^[10]。本研究表明, 化肥处理对表层和亚表层土壤 DOC 含量并无显著影响(图 1)。这可能因为供试土壤本身养分水平较高, 施用化肥后并未对作物生长产生显著的促进作用(表 3), 进而未能进一步激发土壤有机质分解、作物根系分泌物产生等形成 DOC 的过程。有机肥进入土壤中后, 其本身含有以及分解产生的 DOC 使得土壤 DOC 含量升高。除了对表层土壤产生直接的效应, 施用有机肥也会经由溶解性有



注：C1, DOM 荧光组分 1; C2, DOM 荧光组分 2; C3, DOM 荧光组分 3; C4, DOM 荧光组分 4; FI, DOM 的荧光指数; HIX, DOM 的腐殖化指数; BIX, DOM 的自生源指数; β/α , DOM 的新鲜度指数。Note: C1, fluorescence component 1 of DOM; C2, fluorescence component 2 of DOM; C3, fluorescence component 3 of DOM; C4, fluorescence component 4 of DOM. FI, fluorescence index of DOM; HIX, humification index of DOM; BIX, biological index of DOM; β/α , freshness index of DOM.

图 5 设施菜地土壤溶解性碳氮与溶解性有机质组分的相关性

Fig. 5 Relationships between the concentrations and ratios of dissolved carbon and nitrogen and the percentages of fluorescence components of dissolved organic matter in greenhouse soils

机质沿着土壤剖面向下迁移对亚表层土壤产生显著的影响^[23]。与 CK 处理相比, FMc 处理表层土壤、FMs 和 FMm 处理亚表层土壤 DOC 含量显著提高 18.1%~39.5% (图 1)。回归分析进一步表明, DOC 含量与土壤 DOM 溶液中相对易分解的 C1 和 C3 组分呈显著负相关关系, 而与相对抗分解的 C2 和 C4 组分呈显著正相关关系 (图 3, 图 5)。这可能是因为有机肥分解产生的碳水化合物、羧酸类等小分子物质, 在碳缺乏的设施菜地土壤中容易被微生物分解, 而芳香族化合物、腐殖酸类物质等相对抗分解组分更容易存留于土壤中。以往研究证实, 自然生态系统土壤 DOC 主要来自于凋落物、根系分泌物等, 而农田土壤中微生物驱动的碳循环过程在 DOC 的形成中起着更加重要的作用^[24]。本研究中, 有机肥的烷氧碳、双氧烷基碳等活性碳组分含量由高到低依次为鸡粪有机肥、秸秆有机肥、菇渣有机肥 (表 2), 表明与菇渣有机肥相比, 鸡粪有机肥和秸秆有机肥具有更高的生物可分解性, 能够分解产生更多的 DOC, 尤其是芳香类腐殖物质 C4 组分, 使得表层或亚表层土壤 DOC 含量显著提高。这与 FMc 处理中 DOC 淋溶量高于 FMs 和 FMm 处理相一致 (未发

表数据)。因此, 不同处理间土壤 DOC 含量的差异主要与有机肥自身的种类和性质有关。本研究发现, 施用不同碳组分有机肥的亚表层土壤 DOC 含量与化肥处理均没有显著差异 (图 1)。这可能是因为亚表层土壤碳底物缺乏, 施用有机肥后微生物之间对活性碳底物的竞争加剧, 促进由表层淋溶至亚表层的活性碳底物的分解利用^[8]。因此, 亚表层土壤微生物之间的竞争可能在一定程度上抵消了有机肥施用对亚表层 DOC 含量的正面影响。

DON 是土壤中重要的溶解性养分库, 其包括氨基酸、蛋白质等有机氮化合物。本研究表明, 与化肥处理相比, 施用不同碳组分有机肥均显著增加表层土壤 DON 含量, 但对亚表层土壤 DON 的影响不显著 (图 1)。土壤 DON 的含量与 $\text{NO}_3^- \text{-N}$ 、 $\text{NH}_4^+ \text{-N}$ 含量, 以及表征表观硝化效率的 $\text{NO}_3^- \text{-N}/\text{NH}_4^+ \text{-N}$ 比值呈显著的正相关关系 (图 5), 表明 DON 在土壤氮素循环中可能起着重要的中介作用, 反映了微生物在硝化过程中对 DON 的利用。同样地, Mariano 等^[25]的研究指出, 有机肥料的施用增加了土壤中的氨基酸、寡肽等小分子 DON 组分, 这些组分可迅速矿化或硝化, 从而对生物可利用的无机氮产生级联

效应。与 DOC 相比, DON 在土壤中的含量通常较低, 这可能是因为高碳氮比的疏水性组分 (DOC) 较低碳氮比的亲水性组分 (DON) 更容易被土壤矿物吸附。随着土壤深度的增加, 亚表层土壤 DON 含量显著低于表层土壤, 且亚表层 DOC/DON 比值显著升高, 这与 Jones 等^[26]的研究结果一致, 一方面是因为随着 DOC 沿着土壤剖面向下迁移, 其组分变得越来越难分解; 另一方面可能是因为微生物能够快速同化土壤溶液中的 DON。不同碳组分有机肥处理 DOC/DON 比值均低于不施肥处理, 可能是因为有机物料的分解过程或者有机肥对本底土壤有机质的激发作用增加了 DON 的产生, 另一方面促进了微生物对 DOC 的分解作用^[27]。

3.2 不同碳组分有机肥施用下不同土层溶解性有机质的质量变化

本研究中, 与不施肥处理相比, 4 种施肥处理均增加表层土壤 DOM 的腐殖化程度, 其中以 FMc 处理表层土壤 DOM 的腐殖化系数最高 (图 2)。同时, F、FM_s 和 FM_c 处理表层土壤 DOM 中表征芳香类腐殖酸的 C₄ 组分显著高于不施肥处理 (图 4)。以往的观点认为, 化肥氮能够促进 DOM 中木质素等顽固分子的杂聚, 从而增加 DOM 的腐殖化程度^[11]; 与此不同的是, 有机肥中大量溶解性的腐殖物质可直接进入表层土壤提高其腐殖化指数^[10]。高忠霞等^[6]研究不同培肥处理土壤 DOM 特性时也发现, 施用化肥、有机肥或秸秆能够增加土壤 DOM 中相对复杂芳香类物质的占比。但是, 本研究同时也发现, FM_m 处理表层 DOM 中相对难分解的 C₂ 和 C₄ 组分均显著低于不施肥和其他施肥处理。这可能是因为菇渣有机肥含有的烷氧碳、双氧烷基碳等活性碳组分低于鸡粪有机肥和秸秆有机肥, 对土壤微生物的激活作用较弱, 减弱了外源有机质的“激发效应”, 导致由土壤有机质矿化产生的难分解的芳香类腐殖物质较少^[28]。与此结果相佐证的是, 含活性碳组分较高的 FM_c 处理亚表层土壤 C₂ 和 C₄ 组分均高于 F、FM_s 和 FM_m 处理 (图 4)。因此, 土壤 DOM 的荧光特性同时受到外源碳分解及其对土壤有机质的激发效应的共同作用。

土壤 DOM 光谱指标沿不同土壤深度发生显著变化 (图 2), 说明 DOM 沿着土壤向下发生明显的质量偏移。本研究发现, 亚表层土壤 DOM 的 HIX 指数、难分解组分 C₂ 和 C₄ 含量均显著低于表层土

壤, 表明 DOM 中的高分子量化合物随着土壤深度增加而减少。Kaiser 和 Kalbitz^[29]指出, 表层土壤 DOC 主要由来源于木质素的酚类物质等组成, 表现出植源性特征; 而亚表层土壤 DOC 主要是碳水化合物、富氮化合物等构成, 具有微生物来源的特征。与低分子量的碳水化合物等相比, 高分子量的芳香性化合物易被土壤吸附, 使得亚表层土壤高分子组分数目减少。本研究发现, 亚表层土壤 DOM 的 BIX 指数均大于 1, 且高于表层土壤, 但不同碳组分有机肥处理之间没有显著差异。与此一致的是, 亚表层土壤易分解组分 C₁ 和 C₃ 含量均显著高于表层土壤, 说明与表层土壤相比, 亚表层土壤 DOM 中新产生的、分子组成简单组分的比例增加, 并以微生物产生为主导。以往研究发现, 新鲜输入的碳底物沿着土壤剖面向下迁移, 至少在短时间尺度上能够刺激亚表层分子构成复杂的土壤有机碳的分解^[26]。但 Salomé 等^[30]研究指出, 与表层土壤相比, 亚表层土壤的微生物群落更倾向于利用有机酸等小分子化合物而不是复杂的大分子物质; 由于团聚体对活性碳底物与微生物的物理隔离作用, 导致小分子化合物在亚表层土壤累积, 从而成为亚表层 DOM 中的主要组分。

4 结 论

相比于化肥处理, 施用活性碳组分含量高的鸡粪有机肥能够显著提高设施菜地表层土壤 DOC 和 DON 含量; 而施用含活性碳组分较低的秸秆和菇渣有机肥, 表层土壤仅 DON 含量显著提高。设施菜地土壤 DOC 和 DON 含量主要受分子量较大的胡敏酸类、芳香类腐殖质的影响。因此, 相比于 DOM 的含量, 其质量 (抗分解性) 也是实现设施土壤 DOM 提升的重要因素。综合而言, 施用活性碳组分含量高的鸡粪有机肥, 由于其具有更高的生物可分解性, 能够更有效地增加表层土壤 DOC 和 DON 的含量, 并且在提高表层土壤 DOM 腐殖化程度的同时, 增加亚表层土壤 DOM 抗分解组分的比例, 更有利于提升设施菜地全耕层土壤活性碳库的含量和质量。

参考文献 (References)

- [1] Huang S W, Tang J W, Li C H, et al. Reducing potential of chemical fertilizers and scientific fertilization

- countermeasure in vegetable production in China[J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizer*, 2017, 23 (6): 1480—1493. [黄绍文, 唐继伟, 李春花, 等. 我国蔬菜化肥减施潜力与科学施用对策[J]. *植物营养与肥料学报*, 2017, 23 (6): 1480—1493.]
- [2] Wei X X, Xiong J F, Li T, et al. Effects of different organic amendments on soil organic carbon and its labile fractions in the paddy soil of a double rice cropping system[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2020, 31 (7): 2373—2380. [魏夏新, 熊俊芬, 李涛, 等. 有机物料还田对双季稻田土壤有机碳及其活性组分的影响[J]. *应用生态学报*, 2020, 31 (7): 2373—2380.]
- [3] Neff J C, Asner G P. Dissolved organic carbon in terrestrial ecosystems: Synthesis and a model[J]. *Ecosystems*, 2001, 4 (1): 29—48.
- [4] Kalbitz K, Solinger S, Park J H, et al. Controls on the dynamics of dissolved organic matter in soils: A review[J]. *Soil Science*, 2000, 165 (4): 277—304.
- [5] Lee M H, Osburn C L, Shin K H, et al. New insight into the applicability of spectroscopic indices for dissolved organic matter (DOM) source discrimination in aquatic systems affected by biogeochemical processes[J]. *Water Research*, 2018, 147: 164—176.
- [6] Gao Z X, Zhou J B, Wang X, et al. Effects of different fertilizer treatments on content and characteristics of dissolved organic carbon in soil[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2010, 47 (1): 115—121. [高忠霞, 周建斌, 王祥, 等. 不同培肥处理对土壤溶解性有机碳含量及特性的影响[J]. *土壤学报*, 2010, 47 (1): 115—121.]
- [7] Liang D, Zhou Q L, Zhang H, et al. Effects of biochar and organic fertilizers combined application on spectral characteristics of soil dissolved organic matter in paddy soil[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2024, 61(4): 1123—1133. [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.]
- [8] Liu X P, Wang H T, Wu Y J, et al. Manure application effects on subsoils: Abundant taxa initiate the diversity reduction of rare bacteria and community functional alterations[J]. *Soil Biology & Biochemistry*, 2022, 174: 108816.
- [9] Zhao H C, Liu J H, Zhao B P, et al. Effect of fertilization on soil dissolved organic matter under different yield levels of spring corn[J]. *Ecology and Environmental Sciences*, 2014, 23 (8): 1286—1291. [赵海超, 刘景辉, 赵宝平, 等. 施肥对不同肥力春玉米田土壤溶解性有机质的影响[J]. *生态环境学报*, 2014, 23 (8): 1286—1291.]
- [10] Xie J, Zhao Y N, Chen X J, et al. 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—2255. [谢军, 赵亚南, 陈轩敬, 等. 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—2255.]
- [11] Yuan X C, Zhang X Q, Zhou Q, et al. Short-term low nitrogen addition alters the molecular composition and stability of soil dissolved organic matter in a *Pinus taiwanensis* forest[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2025, 62 (2): 517—527. [元晓春, 张晓晴, 周茜, 等. 短期低氮添加改变黄山松土壤可溶性有机质的分子组成及稳定性[J]. *土壤学报*, 2025, 62 (2): 517—527.]
- [12] Niu G X, Yin G G, Mo X H, et al. Do long-term high nitrogen inputs change the composition of soil dissolved organic matter in a primary tropical forest?[J]. *Environmental Research Letters*, 2022, 17(9): 095015.
- [13] Ogawa H, Amagai Y, Koike I, et al. Production of refractory dissolved organic matter by bacteria[J]. *Science*, 2001, 292 (5518): 917—920.
- [14] Xu Y H, Fan J L, Ding W X, et al. Stage-specific response of litter decomposition to N and S amendments in a subtropical forest soil[J]. *Biology and Fertility of Soils*, 2016, 52 (5): 711—724.
- [15] Xu Y H, Chen Z M, Ding W X, et al. Responses of manure decomposition to nitrogen addition: Role of chemical composition[J]. *Science of the Total Environment*, 2017, 587: 11—21.
- [16] Xu Y H, Chen Z M, Fontaine S, et al. Dominant effects of organic carbon chemistry on decomposition dynamics of crop residues in a Mollisol[J]. *Soil Biology & Biochemistry*, 2017, 115: 221—232.
- [17] Chen Z M, Li Y, Xu Y H, et al. Spring thaw pulses decrease annual N₂O emissions reductions by nitrification inhibitors from a seasonally frozen cropland[J]. *Geoderma*, 2021, 403: 115310.
- [18] 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 & Biochemistry*, 2020, 148: 107880.
- [19] Liu M, Zhang Z J, He Q, et al. Exogenous phosphorus inputs alter complexity of soil-dissolved organic carbon in agricultural riparian wetlands[J]. *Chemosphere*, 2014, 95: 572—580.
- [20] Chai L W, Huang M K, Fan H, et al. Urbanization altered regional soil organic matter quantity and quality: Insight from excitation emission matrix (EEM) and parallel factor analysis (PARAFAC) [J]. *Chemosphere*, 2019, 220: 249—258.
- [21] Zhou L, Zhou Y Q, Hu Y, et al. Microbial production and consumption of dissolved organic matter in glacial ecosystems on the Tibetan Plateau[J]. *Water Research*, 2019, 160: 18—28.
- [22] Kleber M, Bourg I C, Coward E K, et al. Dynamic interactions at the mineral-organic matter interface[J]. *Nature Reviews Earth & Environment*, 2021, 2 (6): 402—421.

- [23] Liu X P, Bi Q F, Qiu L L, et al. Increased risk of phosphorus and metal leaching from paddy soils after excessive manure application: Insights from a mesocosm study[J]. *Science of the Total Environment*, 2019, 666: 778—785.
- [24] Kalbitz K, Meyer A, Yang R, et al. Response of dissolved organic matter in the forest floor to long-term manipulation of litter and throughfall inputs[J]. *Biogeochemistry*, 2007, 86 (3): 301—318.
- [25] Mariano E, Jones D L, Hill P W, et al. Mineralisation and sorption of dissolved organic nitrogen compounds in litter and soil from sugarcane fields[J]. *Soil Biology & Biochemistry*, 2016, 103: 522—532.
- [26] Jones D L, Magthab E A, Gleeson D B, et al. Microbial competition for nitrogen and carbon is as intense in the subsoil as in the topsoil[J]. *Soil Biology & Biochemistry*, 2018, 117: 72—82.
- [27] Xu Y H, Ma Y, Cayuela M L, et al. Compost biochemical quality mediates nitrogen leaching loss in a greenhouse soil under vegetable cultivation[J]. *Geoderma*, 2020, 358: 113984.
- [28] Tian X, He T R, Yin D L, et al. Responses of soil dissolved organic matter properties to the amendment of straw, cow manure, or their composting products[J]. *Journal of Agricultural Resources and Environment*, 2022, 39 (3): 556—566. [田翔, 何天容, 尹德良, 等. 土壤溶解性有机质结构和组成对秸秆、牛粪及其堆肥产品输入响应特征[J]. *农业资源与环境学报*, 2022, 39 (3): 556—566.]
- [29] Kaiser K, Kalbitz K. Cycling downwards—dissolved organic matter in soils[J]. *Soil Biology & Biochemistry*, 2012, 52: 29—32.
- [30] Salomé C, Nunan N, Pouteau V, et al. Carbon dynamics in topsoil and in subsoil may be controlled by different regulatory mechanisms[J]. *Global Change Biology*, 2010, 16 (1): 416—426.

(责任编辑: 卢 萍)