

方知库
Eco-Environmental
Knowledge Web

环境科学

ENVIRONMENTAL SCIENCE

ISSN 0250-3301 CODEN HCKHDV
HUANJING KEXUE

冠状病毒气溶胶传播及环境影响因素

李雪, 蒋靖坤, 王东滨, 邓建国, 贺克斌, 郝吉明



■ 主办 中国科学院生态环境研究中心

■ 出版 科学出版社



2021年7月

第42卷 第7期
Vol.42 No.7

目次

冠状病毒气溶胶传播及环境影响因素	李雪, 蒋靖坤, 王东滨, 邓建国, 贺克斌, 郝吉明 (3091)
新冠肺炎疫情期间气象条件和排放变化对 PM _{2.5} 的影响	逯世泽, 史旭荣, 薛文博, 雷宇, 严刚 (3099)
基于网格的长三角 PM _{2.5} 分布影响因素及交互效应	黄小刚, 赵景波, 辛未冬 (3107)
ARIMA 时间序列分析模型在臭氧浓度中长期预报中的应用	李颖若, 韩婷婷, 汪君霞, 权维俊, 何迪, 焦热光, 吴进, 郭恒, 马志强 (3118)
中国长三角背景点冬季大气棕碳污染特征及来源解析	赵宇, 吴灿, 王益倩, 陈玉宝, 吕少君, 汪芳琳, 杜伟, 刘仕杰, 李志健, 王格慧 (3127)
四川盆地 PM _{2.5} 浓度时空变化特征遥感监测与影响因子分析	李梦真, 张廷斌, 易桂花, 秦岩宾, 李景吉, 刘贤, 蒋杰 (3136)
河网连续动态模型构建及其在典型杀虫剂时空迁移模拟中的应用	邢成, 张芊芊, 蔡雅雅, 烟晓婷, 应光国 (3147)
九龙江流域河流氮输出对土地利用模式和水文状况的响应	黄亚玲, 黄金良 (3156)
滇池近岸水体微塑料污染与富营养化的相关性	袁海英, 侯磊, 梁启斌, 李佳琛, 任甲 (3166)
白洋淀夏季入淀区沉积物间隙水-上覆水水质特征及交换通量分析	张甜娜, 周石磊, 陈召莹, 张紫薇, 孙悦, 姚波, 崔建升, 李再兴, 罗晓 (3176)
镇江市古运河和金山湖河湖上覆水体和沉积物氮及有机质分布特征及污染评价	原璐彬, 邢书语, 刘鑫, 周晓红, Adelaide Angela Dadzie (3186)
洪湖国际重要湿地沉积物磷空间分布特征及释放风险	刘永九, 黄素珍, 张璐, 彭雪, 张心怡, 葛芳杰, 刘碧云, 吴振斌 (3198)
苏州古城区域河道底泥的重金属污染分布及生态风险评价	白冬锐, 张涛, 包峻松, 陈坦, 王洪涛, 金曦, 金军, 杨婷 (3206)
武汉集中式饮用水源地土壤重金属的时空分布特征及生态风险评价	朱静, 侯耀宗, 邹书成, 曹梦华, 涂书新 (3215)
升金湖河湖交汇区地表-地下水水化学特征及成因分析	崔玉环, 王杰, 刘友存, 郝洸, 高祥 (3223)
青岛市农区地下水硝态氮污染来源解析	寇馨月, 丁军军, 李玉中, 毛丽丽, 李巧珍, 徐春英, 郑欠, 庄姗 (3232)
三峡库区支流浮游植物群落稳定性及其驱动因子分析	何书晗, 欧阳添, 赵璐, 纪璐璐, 杨宋琪, 施军琼, 吴忠兴 (3242)
哈尔滨城市河网丰水期浮游植物群落分布特征及驱动因子	路枫, 李磊, 齐青松, 陆欣鑫, 刘妍, 范亚文 (3253)
湖泊沉积物中微生物群落对天然有机质输入的响应	居琪, 章奇, 曹驰程, 白雷雷, 张晖 (3263)
补给水质与社会活动对白洋淀湿地微生物的影响特征	赵志瑞, 吴会清, 毕玉方, 展庆周, 吴海森, 袁凯悦, 孟祥源, 李方红 (3272)
蓝藻衰亡过程中上覆水溶解性有机物变化特征	李翔, 李致春, 汪旋, 张思远, 王慧敏, 厉荣强, 王国祥, 李启蒙 (3281)
长江下游快速城市化地区水污染特征及源解析:以秦淮河流域为例	马小雪, 龚畅, 郭加汛, 王腊春, 徐蕴韵, 赵春发 (3291)
长江下游居民区降水地表径流的污染特征	郭文景, 张志勇, 闻学政, 张瀚文, 王岩 (3304)
潮河流域降雨径流事件污染物输出特征	包鑫, 江燕, 胡羽聪 (3316)
不透水地表粗糙度对城市面源颗粒物的累积和冲刷影响	单溪环, 谢文霞, 廖云杰, 房志达, 杨晓晶, 苏静君, 赵洪涛, 李叙勇 (3328)
基于概率方法的中国居民饮水途径暴露健康风险评估	秦宁, 刘运炜, 侯荣, 王彩云, 王贝贝, 段小丽 (3338)
蛋白类有机质在水厂各处理单元中的去除特性	李梦雅, 宋钰莹, 张晓岚, 黄海鸣 (3348)
污水处理厂不同单元工艺水中重金属及其纳米颗粒的分布	王杜珈, 何帅, 周小霞 (3358)
基于宏基因组技术分析 MBR 膜清洗后污泥中抗性基因	杜彩丽, 李中涵, 李晓光, 张列宇, 陈素华, 黎佳茜, 李曹乐 (3366)
石化废水处理厂中耐药菌和耐药基因的分布特征与去除效能解析	唐振平, 肖莎莎, 段毅, 刘迎九, 高媛媛, 吴月月, 陈怡雯, 周帅 (3375)
一段式亚硝化厌氧氨氧化 SMBBR 处理中低浓度氨氮废水	吕恺, 邵贤明, 王康舟, 姚雪薇, 彭党聪, 韩芸 (3385)
外加固体缓释碳源的两段反硝化工艺脱氮性能	唐义, 马懿文, 王金泉, 王艳, 叶刚 (3392)
臭氧投量对 SBR 系统污泥沉降性能及脱氮除磷的影响	吕永涛, 朱传首, 张旭阳, 徐超, 潘永宝, 刘爽, 崔双科, 王磊 (3400)
间歇梯度曝气下首段延时厌氧强化好氧颗粒污泥脱氮除磷	张玉君, 李冬, 王歆鑫, 张富国, 张杰 (3405)
提盐速率对序批式生物反应器性能和微生物群落结构的影响	古铂铭, 金春姬, 温淳, 侯金源, 赵阳国, 高孟春 (3413)
低温驯化对自养脱氮颗粒污泥功能活性与菌群结构的影响分析	钱飞跃, 刘雨馨, 王建芳, 刘文如 (3422)
矿渣基改性剂对城市污泥重金属稳定化	张发文, 董明坤, 陈辰慧, 赵长民 (3430)
2000~2018 年长三角土地利用变化对农田生态系统氮排放的影响	王文锦, 王卿, 朱安生, 黄凌, 顾莹, 王杨君, 王敏, 李莉 (3442)
麦秸水热炭及其改良产物对水稻产量和稻田氮挥发排放的影响	韩晨, 侯朋福, 薛利红, 冯彦房, 余姗, 杨林章 (3451)
水肥管理对热带地区双季稻田 CH ₄ 和 N ₂ O 排放的影响	李金秋, 邵晓辉, 缙广林, 邓艺欣, 谭诗敏, 徐文娟, 杨秋, 刘文杰, 伍延正, 孟磊, 汤水荣 (3458)
耐盐碱水稻土壤产甲烷菌群落特征及产甲烷途径	杨雨虹, 贺惠, 米铁柱, 刘玥腾, 刘佳音, 张国栋, 李明月, 甄毓 (3472)
铁碳微电解填料对人工湿地温室气体排放的影响	赵仲婧, 郝庆菊, 涂婷婷, 胡曼利, 张尧钰, 江长胜 (3482)
农地土壤重金属 Pb 和 Cd 有效性测定方法的筛选与评价	陈莹, 刘汉燚, 刘娜, 蒋珍茂, 魏世强 (3494)
亚热带高山森林土壤典型重金属的空间分布格局及其影响因素:以云南哀牢山为例	刘旭, 王训, 王定勇 (3507)
深圳市不同土类的重金属环境背景值与理化性质特征	林挺, 赵述华, 郝秀平, 杨坤, 吴静雅, 朱艳, 罗飞 (3518)
同步钝化土壤 Cd 和 As 材料的筛选	周嗣江, 刘针延, 熊双莲, 马烁, 黄倚豪, 雷寅, 曹梦华, 涂书新 (3527)
两种铁基材料对污染农田土壤砷、铅、镉的钝化修复	袁峰, 唐先进, 吴骥子, 赵科理, 叶正钱 (3535)
青藏高原东缘冻土中有机磷酸酯的污染特征	刘丽娅, 印红玲, 蹇林洁, 徐子文, 熊远明, 罗怡, 刘小雯, 徐维新 (3549)
成都平原氮磷化肥施用强度空间分布及影响因素分析	刘奇鑫, 王昌全, 李冰, 赵海岚, 方红艳, 邓茜, 李启权 (3555)
土壤中溶解性有机质对不同类型堆肥的响应差异	席北斗, 王燕, 檀文炳, 余红, 崔东宇, 程东会, 党秋玲 (3565)
《环境科学》征订启事 (3315)	
《环境科学》征稿简则 (3357)	
信息 (3391, 3441, 3564)	

土壤中溶解性有机质对不同类型堆肥的响应差异

席北斗^{1,2}, 王燕^{1,3}, 檀文炳^{1,2}, 余红^{1,2}, 崔东宇^{1,2}, 程东会³, 党秋玲^{1,2*}

(1. 中国环境科学研究院, 环境基准与风险评估国家重点实验室, 北京 100012; 2. 中国环境科学研究院, 国家环境保护地下水污染模拟与控制重点实验室, 北京 100012; 3. 长安大学水利与环境学院, 西安 710054)

摘要: 为探究不同类型堆肥施用对土壤溶解性有机质 (DOM) 的影响, 以空白土壤为对照, 采用紫外-荧光光谱并结合平行因子分析对分别添加不同比例的牛粪堆肥、餐厨垃圾堆肥和污泥堆肥土壤中 DOM 进行分析, 探究 DOM 结构变化特征及其驱动因素。结果表明, 3 种堆肥施用后土壤中 AN、NH₄⁺-N、DOC 和 SOM 含量均显著提高, SOM 和 DOC 含量随堆肥添加量的增加而增加; 施用牛粪和餐厨垃圾堆肥更有利于土壤中 AN、NO₃⁻-N 和 DOC 含量的提高, 而施用污泥堆肥土壤中 NH₄⁺-N 和 SOM 含量更高。堆肥施用后 DOM 结构特性的改变主要表现为共轭苯环结构、疏水性组分、醌基和显色组分含量显著提高, 不饱和有机分子 $\pi \rightarrow \pi^*$ 的跃迁更为活跃, DOM 分子量增大, 腐殖化程度增强。堆肥低剂量添加 (5%) 时, 餐厨垃圾堆肥更有利于 DOM 的芳构化和腐殖化; 堆肥较高剂量添加 (10% 和 20%) 时, 牛粪堆肥更能驱动 DOM 结构变化; 污泥堆肥对 DOM 结构影响最弱。堆肥施用后土壤 DOM 荧光组分相对含量发生改变, 小分子类腐殖质相对含量增加, 类蛋白相对含量降低。二维相关光谱表明, 施用牛粪和餐厨垃圾堆肥土壤中 DOM 荧光组分变化顺序为: 类蛋白 > 大分子类富里酸 > 小分子类腐殖质; 而施用污泥堆肥土壤中表现为: 大分子类富里酸 > 类蛋白 > 小分子类腐殖质。DOM 结构变化受多种因素共同影响, 影响程度表现为: 堆肥种类 > 添加比例 > 理化因子 > 培养时间。DOC 和 AN 含量的增加是引起 DOM 腐殖化程度增强和类蛋白相对含量降低的重要因素, 小分子类腐殖质相对含量与 NO₃⁻-N 含量显著正相关, DOM 中大分子类富里酸相对含量因外源 SOM 的输入而增加。

关键词: 堆肥; 牛粪堆肥; 餐厨垃圾堆肥; 污泥堆肥; 溶解性有机质 (DOM)

中图分类号: X705 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2021)07-3565-12 DOI: 10.13227/j.hjxx.202010037

Different Responses of Soil Dissolved Organic Matter to Different Types of Compost

XI Bei-dou^{1,2}, WANG Yan^{1,3}, TAN Wen-bing^{1,2}, YU Hong^{1,2}, CUI Dong-yu^{1,2}, CHENG Dong-hui³, DANG Qiu-ling^{1,2*}

(1. State Key Laboratory of Environment Criteria and Risk Assessment, Chinese Research Academy of Environmental Sciences, Beijing 100012, China; 2. State Environment Protection Key Laboratory of Simulation and Control of Groundwater Pollution, Chinese Research Academy of Environmental Sciences, Beijing 100012, China; 3. School of Water and Environment, Chang'an University, Xi'an 710054, China)

Abstract: This study explored the responses of soil dissolved organic matter (DOM) to the application of different types of compost using a soil sample without compost as a control. Ultraviolet and fluorescence spectrum technology and EEM-PARAFAC was used to analyze DOM structure and driving factors in soil added with different proportion of cow dung compost (SCC), food and kitchen waste compost (SFC), and sludge compost (SCC). Compared with the control group, contents of AN, NH₄⁺-N, DOC, and SOM in soil added with compost were significantly increased, and contents of SOM and DOC increased with the increasing of compost amount. When added compost in the same proportion, contents of AN, NO₃⁻-N, and DOC in SCC and SFC were significantly higher than those in SSC, while contents of NH₄⁺-N and SOM were higher in SSC. The results of spectral analysis showed that the structure of conjugated benzene ring, hydrophobic component, quinone group, and chromogenic component in DOM of soil added with compost were significantly increased, the transition of unsaturated organic molecule ($\pi \rightarrow \pi^*$) was more active, the molecular weight of DOM increased, and the degree of humification was enhanced. When the amount of compost added is 5%, the influence of food and kitchen waste compost on DOM structure was greatest among three types of compost. At 10% and 20%, sludge compost had the greatest impact on DOM structure. The results of EEM-PARAFAC analysis showed that the relative content of fulvic acid-like substances with low molecular in DOM of soil added with compost was increased, while the relative content of proteoid-like substances decreased. 2D-COS analysis showed that compost affected the change order of fluorescence components in DOM. SCC and SFC were as follows: proteoid-like > fulvic acid-like > humus-like; in SSC, it was fulvic acid-like > proteoid-like > humus-like. The enhance of humification and the decrease of relative content of protein-like substances in DOM were related to increased DOC and AN, the relative content of humus-like in low molecular weight was positively correlated with the content of NO₃⁻-N, and the relative content of macromolecule fulvic acid-like was increased due to the input of SOM from compost.

Key words: compost; cow dung compost; food and kitchen waste compost; sludge compost; dissolved organic matter (DOM)

收稿日期: 2020-10-09; 修订日期: 2020-12-25

基金项目: 国家自然科学基金项目 (52000165, 51808519); 国家重点研发计划项目 (2019YFC1806204, 2018YFC1900102)

作者简介: 席北斗 (1969 ~), 男, 博士, 研究员, 博士生导师, 主要研究方向为固体废弃物处理处置, E-mail: xibeidou@263.net

* 通信作者, E-mail: dangling819@126.com

一直以来,农业土壤中大量的化肥施用为我国粮食产量的提高带来了显著的效益^[1,2],但也造成了土壤有机质含量下降、理化性质恶化、微生物多样性降低以及面源污染等一系列生态环境问题^[1,3]. 近年来,国家政策对有机肥行业发展的支持以及“化肥施用量零增长行动”的实施,对有机肥的品质提出了更高的要求. 与传统有机肥相比,堆肥是一种富含有机质和活性微生物的稳定化和清洁化有机肥料. 有研究表明,施用堆肥可显著提高土壤有机质含量,降低土壤容重,增强微生物活性,增加土壤孔隙度^[4,5],更有利于提高土壤肥力,维持作物生产的可持续性^[2]. 此外,在我国用于堆肥处理的城市固体废物约占固体废物总量的 20%^[6]. 堆肥产品的大规模土壤利用对于提高我国有机固体废物资源化能力和水平具有重要意义.

溶解性有机质(dissolved organic matter, DOM)占土壤有机质(SOM)的 5%^[7],是农业土壤中具有极强流动性和活性的有机组分. DOM 的含量和质量对调节土壤呼吸、植物生长、微生物代谢及养分循环具有重要作用^[8,9]. 土壤 DOM 中包含着易于被微生物吸收利用的小分子组分以及具有芳香性和稳定性的大分子组分,不同组分在土壤环境中的活性和反应性不同^[10]. 土壤 DOM 对外界环境的敏感响应能够有效反映土壤有机碳库的短期动态变化^[7]. 不同表面活性官能团(如:醌基、羟基、羧基和羰基等^[11])的存在使得 DOM 可以作为电子穿梭体,促进土壤中污染物降解、转化及其他氧化还原反应的进行^[12]. 有研究表明,土壤理化特性和微生物群落结构对 DOM 的动态变化具有强烈的影响. 例如:DOM 荧光强度随 pH 的升高而降低^[13];溶解性有机碳(DOC)含量与 DOM 腐殖化指数(HIX)呈显著正相关^[14];C 和 N 营养元素通过调节微生物代谢活动从而改变 DOM 的分子量和芳香性^[8]. 此外,施用堆肥是改善土壤理化特性和微生物群落结构的有效手段. 堆肥施用后可调节土壤 pH,使得有机质、有机碳及总氮含量显著提高^[15]. 土壤有机质含量的增加和外源微生物的引入,可能会造成微生物群落结构的重组^[16]. 因此,施用堆肥势必会对土壤 DOM 的动态

变化产生直接或者间接的影响. 然而以往的研究主要集中在土壤和堆肥等单一环境介质中,对施用不同物料堆肥土壤中 DOM 结构变化特性及其驱动因素还未见报道.

本研究以空白土壤样品为对照,对比分析了分别添加不同比例牛粪堆肥(soil with cow dung compost added, SCC)、餐厨垃圾堆肥(soil with food and kitchen waste compost added, SFC)和污泥堆肥(soil with sludge compost added, SSC)的土壤理化特性及 DOM 的紫外、荧光光谱特性,探讨了 DOM 结构变化特征及其潜在驱动因素,以期堆肥在土壤中的科学施用及改善土壤生态环境提供理论依据.

1 材料与方法

1.1 供试堆肥产品

本研究中使用的堆肥产品于 2018 年 5 月从不同堆肥厂采集的 3 种不同物料的腐熟堆肥:餐厨垃圾堆肥采集于河北省威德环境科技有限公司;牛粪堆肥和污泥堆肥采集于南京市某堆肥厂. 堆肥产品过 2 mm 筛去除杂质后于 -20℃ 冰箱保存备用. 3 种类型堆肥产品的基础理化指标见表 1.

1.2 实验设计

2018 年 5~9 月,在中国环境科学研究院(北京)玻璃温室中选取 10 块 0.75 m × 0.75 m、深度 0.5 m 的地块进行堆肥土壤利用实验,实验周期依据我国北方一般农作物生长周期定为 120 d. 其中 1~9 号地块为实验组,10 号地块为空白对照组. 实验组每种堆肥设置 3 种添加比例:堆肥与土壤体积比分别为 5%、10% 和 20%. 1~3 号地块添加牛粪堆肥,按照添加比例样品编号分别为 SCC5、SCC10 和 SCC20,4~6 号地块添加餐厨垃圾堆肥(SFC5、SFC10 和 SFC20),7~9 号地块添加污泥堆肥(SSC5、SSC10 和 SSC20),10 号地块未添加堆肥(CK). 每周添加适当去离子水,保持土壤具有适宜含水量约 60%^[17]. 分别在第 40、80 和 120 d,用土壤采样器从每个地块采集 3 个重复的土壤样品,并保存于 4℃ 的冰箱中用于理化性质分析和 DOM 提取. 供试土壤的基础理化指标见表 1.

表 1 供试土壤和堆肥样品理化性质

Table 1 Physiochemical properties of soil and compost

样品	AN/mg·kg ⁻¹	NH ₄ ⁺ -N/mg·kg ⁻¹	NO ₃ ⁻ -N/mg·kg ⁻¹	DOC/g·kg ⁻¹	SOM/g·kg ⁻¹
土壤	119.27	57.28	44.47	0.10	68.27
牛粪堆肥	143.12	47.96	81.71	3.69	278.20
餐厨垃圾堆肥	132.65	35.80	88.39	4.22	396.39
污泥堆肥	165.62	30.20	84.42	1.90	490.41

1.3 理化指标测定

土壤样品速效氮(AN)、 NH_4^+ -N和 NO_3^- -N含量采用连续流动分析仪(德国 AA3)进行测定,溶解性有机碳(DOC)含量采用岛津公司的 5000-TOC 分析仪进行测定. 采用燃烧法进行 SOM 含量测定, 2 g (精确至0.000 1 g)土壤样品,在电热板上炭化后,移入箱式电炉中 500℃灼烧 2 h,取出置于干燥器中冷却 30 min 后称重.

1.4 DOM 提取

土壤样品自然风干,过 2 mm 筛,称取 10 g 样品于 100 mL 离心管中,以水土比 5:1 的比例加入 50 mL 去离子水. 充分摇匀后于 30℃, 200 $\text{r}\cdot\text{min}^{-1}$ 避光振荡 24 h. 然后以 4 000 $\text{r}\cdot\text{min}^{-1}$ 离心 15 min. 离心后上清液过 0.45 μm 滤膜,即为土壤 DOM 溶液. DOM 溶液装入棕色螺口玻璃瓶中于 4℃冰箱保存,并及时进行紫外光谱和三维荧光光谱测定,光谱测定前将 DOM 溶液用纯净水调节 DOC 含量为 20 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$,避免内滤效应的干扰.

1.5 光谱分析

采用岛津公司的 UV-3600 紫外分光光度计测定 DOM 在 200~800 nm 范围内的吸光度,扫描间隔为 1 nm. DOM 三维荧光光谱的测定采用荧光光谱分析仪(日立 F-7000)进行. 参数设置为:激发波长 E_x :200~450 nm,发射波长 E_m :280~550 nm;扫描速度:2 400 $\text{nm}\cdot\text{min}^{-1}$;扫描间隔均为 5 nm. 以纯净水作为空白.

紫外和荧光光谱特征参数的计算方法参考文献[7,14]. 采用 Matlab 2019a 中的 DomFluor 工具包进行三维荧光平行因子分析:将添加不同堆肥的土壤样品分别按照培养时间划分为 3 组,每组包括堆肥添加比例为 0% (CK)、5%、10% 和 20% 的样品共 12 个. 将每组样品去除空白后的 DOM 矩阵合并到 fl 文件中进行平行因子处理. 分析过程中分别进行了扣除散射、去除异常点,根据误差曲线初步确定组分数,并通过对半分析检验组分数的有效性. 施用同一种堆肥的处理中,基于不同组分发射荷载(emission loading)在 2D-shige 中进行不同荧光组分的二维相关光谱分析.

1.6 统计学分析

采用 R 语言(4.0.1)及 SPSS 22.0 完成数据分析. 利用 SPSS 22.0 完成土壤中理化因子、DOM 的紫外及荧光光谱特征参数的单因素方差(ANOVA)和一般线性回归分析;利用 R 语言中的“randomFores”包进行 DOM 结构变化的驱动因素分析;利用 R 语言中的“ggcor”包完成不同驱动因素与 DOM 结构参数的相关性分析.

2 结果与讨论

2.1 土壤理化特性

选取第 120 d 样品进行理化指标差异分析(表 2). 与 CK 相比,3 种堆肥施用后土壤中 AN、 NH_4^+ -N、DOC 和 SOM 含量均显著提高(T-test, $P < 0.05$);施用牛粪和餐厨垃圾堆肥土壤中各项理化指标值均显著提高($P < 0.05$). 这与 Xin 等^[2]的研究结果一致,施用堆肥可改善土壤理化特性,提高土壤中碳和氮营养元素的含量. 施用同种堆肥土壤中 DOC 和 SOM 含量随堆肥添加比例的增加而显著增加. DOC 可用于表征土壤中 DOM 的含量^[14],因此堆肥施用量的增加可显著提高土壤有机质含量,增强土壤肥力. 与 SSC10 相比,SSC20 中 NH_4^+ -N含量降低了 49%, NO_3^- -N 含量增加了 55%,而 AN 含量却无显著性差异,表明污泥堆肥添加比例的增加可能促进了土壤中氨氧化反应的进行.

堆肥添加比例相同的情况下,AN、 NO_3^- -N 和 DOC 含量表现为 $\text{SCC}(\text{SFC}) > \text{SSC}$; NH_4^+ -N 和 SOM 含量表现为 $\text{SSC} > \text{SCS}(\text{SFS})$,不同类型堆肥的理化特性不同,从而导致 SCC、SFC 和 SSC 中有机质、C 和 N 等营养元素的含量不同. 餐厨垃圾堆肥和牛粪堆肥的施用对土壤中 NO_3^- -N 和 DOC 含量增加效果显著($P < 0.05$),污泥堆肥的施用更有利于提高土壤中 NH_4^+ -N 含量($P < 0.05$). 差异性分析结果表明,堆肥种类对 AN 和 NO_3^- -N 的影响大于堆肥添加比例(ANOSIM, $R > 0$, $P < 0.05$),堆肥种类和添加比例交互作用使得土壤中 NH_4^+ -N 和 DOC 含量显著提高($P < 0.05$).

以堆肥添加比例 20% 为例,不同培养时间土壤的理化特性如图 1 所示. 与第 40 d 相比,第 120 d 的 SCC、SFC 和 SSC 中 SOM 含量分别增加了 39%、43% 和 11%. 随培养时间的延长,SCC 中 AN 含量无显著差异,而 NH_4^+ -N 含量显著降低($P < 0.05$), NO_3^- -N 含量显著增加($P < 0.05$),表明牛粪堆肥的施用影响了土壤中氮转化过程,可能导致氨氧化作用增强. 与第 40 d 相比,第 120 d 的 SFC 和 SSC 中 DOC 含量分别降低了 40% 和 25%,DOC 是土壤中最容易被微生物利用的碳源,随培养时间的延长 DOC 可能被微生物利用而转化为其他衍生化合物^[18].

综合比较,施用堆肥可改变土壤理化特性,主要表现在 AN、 NH_4^+ -N、DOC 和 SOM 含量的显著提高. 堆肥种类、添加比例及培养时间对土壤理化特性的影响不同. 施用牛粪和餐厨垃圾堆肥更有利于 AN、 NO_3^- -N 和 DOC 含量的提高,施用污泥堆肥更有利于

NH₄⁺-N、SOM 含量的提高. 随堆肥添加量的增加土壤中 DOC 和 SOM 不断累积而含量增加,随培养时间延长施用牛粪和餐厨垃圾堆肥土壤中 DOC 被不断消耗而含量降低.

表 2 土壤理化特性¹⁾

Table 2 Physiochemical properties of soil										
样品 ²⁾	AN/mg·kg ⁻¹		NH ₄ ⁺ -N/mg·kg ⁻¹		NO ₃ ⁻ -N/mg·kg ⁻¹		DOC/g·kg ⁻¹		SOM/mg·kg ⁻¹	
CK	67.64 ± 8.33a		17.41 ± 2.42a		52.47 ± 8.33a		0.10 ± 0.00a		76.54 ± 11.32a	
SCC5	120.32 ± 5.67b		21.80 ± 1.98b		88.0 ± 10.24b		0.16 ± 0.03b		89.06 ± 7.27b	
SCC10	120.06 ± 16.33b		30.65 ± 4.97 ^c		94.15 ± 8.83b		0.36 ± 0.11 ^c		102.26 ± 12.26b	
SCC20	122.01 ± 15.69b		32.15 ± 5.52 ^c		85.61 ± 9.77b		1.04 ± 0.25d		140.30 ± 9.84 ^c	
SFC5	118.87 ± 4.32b		40.21 ± 6.33b		88.11 ± 3.49b		0.19 ± 0.05b		98.00 ± 5.49b	
SFC10	121.00 ± 10.49b		27.68 ± 3.59 ^c		96.61 ± 6.49b		0.25 ± 0.05b		116.91 ± 10.38 ^c	
SFC20	123.53 ± 13.44b		38.49 ± 3.65b		94.26 ± 10.08b		0.60 ± 0.09 ^c		155.55 ± 8.76d	
SSC5	115.51 ± 6.47b		46.12 ± 5.98b		51.14 ± 5.98a		0.12 ± 0.01b		109.18 ± 11.38b	
SSC10	117.00 ± 8.37b		82.13 ± 7.34 ^c		36.27 ± 3.69b		0.19 ± 0.06ab		128.33 ± 14.66bc	
SSC20	115.94 ± 8.67b		41.97 ± 4.47b		56.30 ± 6.33a		0.37 ± 0.08 ^c		160.42 ± 15.47 ^c	
	<i>F</i>	<i>P</i>	<i>F</i>	<i>P</i>	<i>F</i>	<i>P</i>	<i>F</i>	<i>P</i>	<i>F</i>	<i>P</i>
堆肥添加比例	0.099	0.906	11.751	0.001	0.467	0.634	59.948	0.000	54.720	0.000
堆肥种类	0.603	0.558	75.838	0.000	96.859	0.000	17.848	0.000	9.096	0.002
堆肥种类 × 添加比例	0.043	0.996	26.596	0.000	3.552	0.026	8.114	0.001	0.155	0.958
	<i>R</i>	<i>P</i>	<i>R</i>	<i>P</i>	<i>R</i>	<i>P</i>	<i>R</i>	<i>P</i>	<i>R</i>	<i>P</i>
ANOSIM	0.564	0.031	0.161	0.129	0.556	0.015	-0.226	0.973	-0.259	0.906

1) 采用 Duncan's multiple range test 方法分析,对比施用同种堆肥不同添加比例土壤样品及对照组之间理化指标的差异,不同小写字母表示显著性差异($P < 0.05, n = 3$);采用一般线性回归分析,确定堆肥种类、添加比例及两者交互作用对不同理化指标的影响, F 为检验回归分析有效性的统计值;采用 ANOSIM 分析,对比堆肥种类和添加比例对不同理化指标影响程度($n = 3$), $R > 0, P < 0.05$ 表示堆肥种类对理化指标的影响大于添加比例;黑体字表示 $P < 0.05$,表内数值为平均值 ± 标准偏差;2) CK、SCC、SFC 和 SSC 分别表示空白土壤样品(对照组)、添加牛粪堆肥、餐厨垃圾堆肥和污泥堆肥的土壤样品;5、10 和 20 分别表示相应堆肥的添加比例为 5%、10%、20%,下同

2.2 土壤 DOM 紫外光谱特性

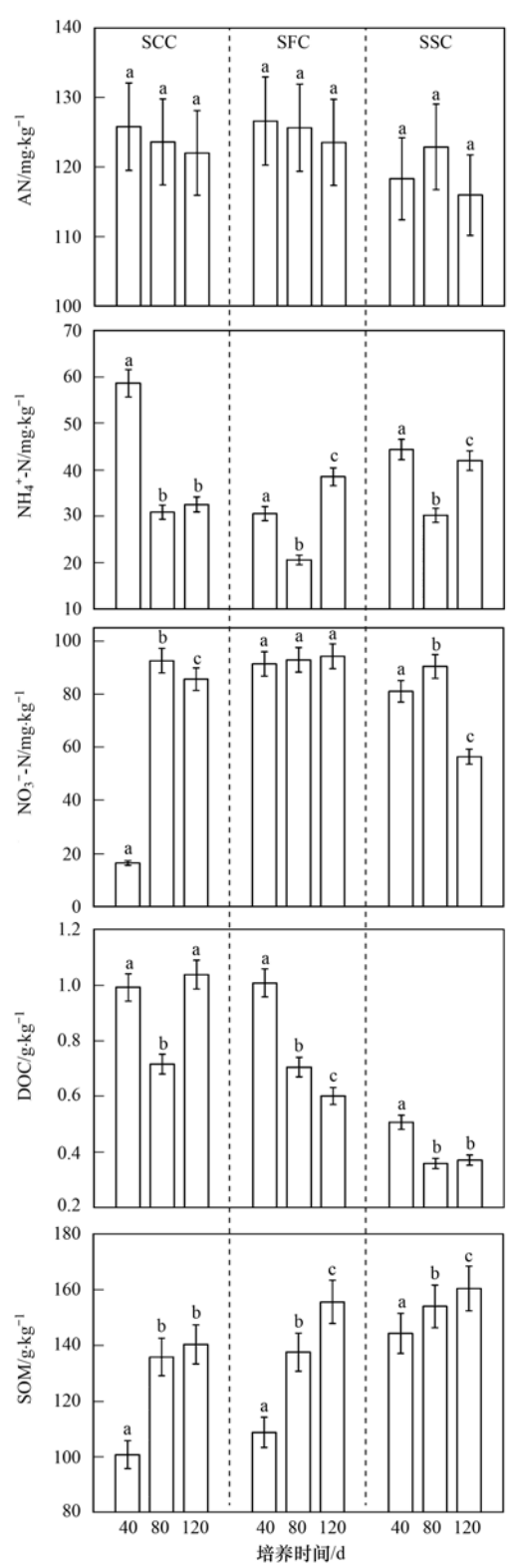
$S_{226-250}$ (226 ~ 250 nm 波段的面积积分)的吸收带常用于表征含 C=C、C≡C 或芳香环等不饱和有机分子中 $\pi \rightarrow \pi^*$ 的跃迁^[19]. $S_{260-400}$ (260 ~ 400 nm 波段的面积积分)常用于表征共轭苯环结构^[20]. 226 ~ 400 nm 的吸光带主要是由于不同取代程度和取代形式的芳香基团产生的^[19],因此 $S_{226-250}$ 和 $S_{260-400}$ 可用于表征 DOM 的芳构化程度. $SUVA_{254}$ [254 nm 处吸收系数 $a(254)$ 与 DOC 含量的比值]用于表征 DOM 的腐殖化程度, $SUVA_{260}$ [260 nm 处吸收系数 $a(260)$ 与 DOC 含量的比值]与疏水性组分含量呈正相关^[7]. $SUVA_{290}$ [290 nm 处吸收系数 $a(290)$ 与 DOC 含量的比值]与 DOM 中醌基含量呈正相关^[21]. $a(355)$ (355 nm 处的吸收系数)与 DOM 中显色组分含量呈正相关^[22]. S_R 可用于表征 DOM 分子的大小,与分子量呈负相关^[23]. 对第 120 d 样品进行 DOM 紫外光谱特征参数的差异性分析发现(表 3),3 种堆肥施用后土壤 DOM 的 S_R 值均显著低于 CK ($P < 0.05$),其他特征参数均显著高于 CK ($P < 0.05$). 表明堆肥施用使得土壤 DOM 中共轭苯环结构、疏水性组分、醌基和显色组分含量显著提高,不饱和有机分子 $\pi \rightarrow \pi^*$ 的跃迁更为活跃,DOM 分子量增大,腐殖化程度增强. 与土壤相比,堆肥有机质的腐殖化程度更高^[23],施用堆肥后外源有

机质和微生物的输入可能是诱导土壤 DOM 结构变化和腐殖化的重要原因^[24].

堆肥添加比例为 5% 时,除 S_R 外其他指标均表现为 $SFC5 > SCC5 > SSC5$. 堆肥低剂量添加时,餐厨垃圾堆肥更能驱动 DOM 的芳构化和腐殖化. 而添加比例为 10% 和 20% 时,除 S_R 外其他指标均表现为 $SCC > SFC > SSC$. 表明堆肥较高剂量添加时,牛粪堆肥对 DOM 结构的影响更大. 相比之下,污泥堆肥对土壤中 DOM 结构影响最弱,这可能与污泥堆肥本身的结构特性有关. 施用同种堆肥土壤中,紫外光谱参数[除 S_R 和 $a(355)$]随堆肥添加比例的增加而增加,表明堆肥施用量的增加驱动了 DOM 的稳定化和腐殖化. 然而,ANOSIM 分析结果表明,堆肥种类对 $S_{260-400}$ 的影响大于堆肥添加比例 ($R > 0, P < 0.05$).

以堆肥添加比例 20% 为例,不同培养时间土壤 DOM 的 $SUVA_{254}$ 和 S_R 值如图 2 所示,SCC、SFC 和 SSC 的第 80 和 120 d 样品 DOM 的 $SUVA_{254}$ 值显著高于第 40 d 样品,而 S_R 值均显著低于第 40 d 样品,表明样品的培养过程实际上是堆肥-土壤体系有机质结构重塑的过程,从而导致土壤 DOM 中大分子物质增加,腐殖化程度增强.

以上结果表明,施用堆肥可显著提高土壤 DOM 中共轭苯环结构、疏水性组分、醌基和显色组分含



不同小写字母表示添加同种堆肥土壤不同培养时间样品之间差异的显著性 ($P < 0.05, n = 3$)

图1 不同培养时间土壤理化指标

Fig. 1 Physiochemical properties of soil at different culture time

量,使得不饱和有机分子 $\pi \rightarrow \pi^*$ 跃迁更为活跃, DOM 分子量增大,腐殖化程度增强.添加量较低(5%)时,餐厨垃圾堆肥更有利于土壤 DOM 的芳构化和腐殖化;而添加量较高(10%和20%)时,牛粪

堆肥更能驱动 DOM 结构变化.随培养时间的延长,施用堆肥土壤中 DOM 分子量增大,腐殖化程度提高.

2.3 土壤 DOM 荧光光谱特性

2.3.1 土壤 DOM 荧光光谱特征参数

BIX 为自生源指数,可用于表征 DOM 的生物可利用性^[25],且与腐殖化程度呈正相关. $\beta: \alpha$ 为 DOM 新鲜度指数,用于表征新生成的 DOM 占总 DOM 的比例.腐殖化指数(HIX)可以用来判定 DOM 的腐殖化程度^[26].总体来看,3种堆肥施用后土壤中 DOM 的 HIX 值均高于 CK(表4),堆肥添加比例相同时,其含量表现为 $SCC > SFC > SSC$.表明堆肥施用可提高土壤 DOM 的腐殖化程度,并且施用牛粪堆肥土壤中 DOM 具有更显著的腐殖化特征.堆肥添加比例较高(10%和20%)时,SFC 中 DOM 的 BIX 和 $\beta: \alpha$ 值显著高于 CK、SCC 和 SSC ($P < 0.05$),表明餐厨垃圾堆肥的施用可显著提高土壤 DOM 的生物可利用性,使得新生成 DOM 含量增加.已有研究表明,堆肥对土壤的生物强化作用可使土壤 DOM 中不易被微生物代谢的有机组分发生降解转化^[27].因此,堆肥施用后可能增强了微生物对 DOM 的代谢活动,促进了 DOM 不同组分的转化和生成.特别是施用餐厨垃圾堆肥的土壤中 DOM 反应活性更强.相比之下,污泥堆肥对 DOM 结构的影响最弱,这一结果与紫外光谱特征参数分析结果一致.此外,SFC 中 DOM 的 BIX 和 $\beta: \alpha$ 值表现为: $SFC5 < SFC10 < SFC20$,表明土壤 DOM 生物可利用性随餐厨垃圾堆肥添加比例的增加而增强.对比分析发现,堆肥种类对 DOM 荧光光谱特征参数的影响大于堆肥添加比例 (ANOSIM, $R > 0, P < 0.05$).土壤 DOM 荧光特征参数随培养时间的延长无明显变化特征.

2.3.2 土壤 DOM 荧光组分

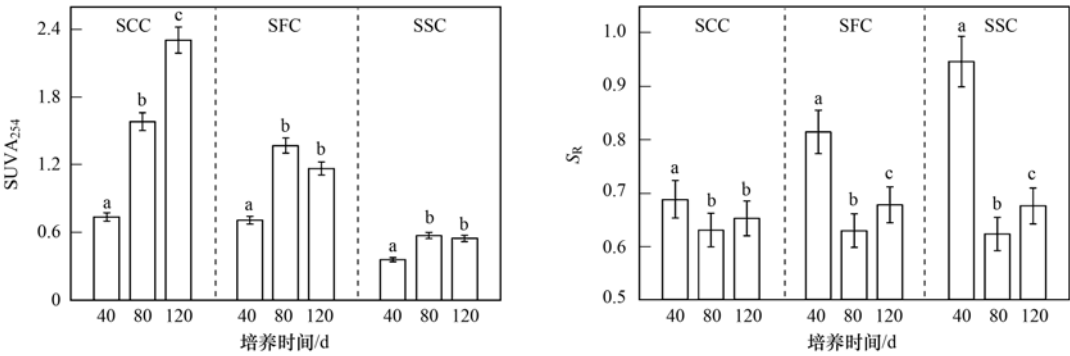
基于 DOM 三维荧光平行因子分析 (EEM-PARAFAC), SCC 和 SFC 中均获得 3 种荧光组分[图 3(b)和 3(c)],其中第一类组分[C1, E_x : 240 ~ 260 (295 ~ 380) nm/ E_m : 374 ~ 450 nm]为分子量相对较小的类腐殖质^[27];第二类组分[C2, E_x : 240 ~ 275 (339 ~ 420) nm/ E_m : 434 ~ 520 nm]为分子量相对较大的类富里酸^[28];第三类组分(C3, E_x : < 300 nm/ E_m : 300 ~ 350 nm)与微生物代谢活动相关,为聚合程度较低且易被微生物降解的类蛋白质^[29]. SSC 中共获得 4 种荧光组分[图 3(a)],其中前三类组分与 SCC 和 SFC 一致,第四类组分(C4, E_x : < 240 nm/ E_m : 434 ~ 520 nm)与第二类组分相同,为大分子类富里酸.因此,添加污泥堆肥土壤中 DOM 大分子类富里酸相对含量记为: C2 + C4.

表 3 土壤 DOM 紫外光谱特征参数¹⁾
Table 3 DOM UV characteristic parameters of soil

样品	$S_{226-250}$		$S_{260-400}$		$SUVA_{290}$		$SUVA_{260}$	
CK	5.82 ± 0.57a		5.82 ± 0.88a		0.09 ± 0.00a		0.12 ± 0.03a	
SCC5	17.76 ± 1.33b		46.03 ± 5.74b		0.23 ± 0.01b		0.32 ± 0.06b	
SCC10	35.57 ± 6.98c		79.53 ± 8.86c		0.57 ± 0.14c		0.77 ± 0.24c	
SCC20	77.35 ± 7.44d		167.55 ± 15.44d		1.57 ± 0.13d		2.17 ± 0.66d	
SFC5	20.80 ± 4.62b		57.61 ± 6.98b		0.30 ± 0.03b		0.40 ± 0.06b	
SFC10	28.65 ± 5.55b		59.58 ± 4.21b		0.35 ± 0.08b		0.46 ± 0.09b	
SFC20	49.91 ± 6.48c		106.22 ± 10.38c		0.84 ± 0.06c		1.11 ± 0.38c	
SSC5	6.98 ± 1.11a		32.45 ± 5.63b		0.12 ± 0.01b		0.17 ± 0.03ab	
SSC10	9.37 ± 2.41a		35.80 ± 7.41b		0.19 ± 0.06b		0.26 ± 0.08d	
SSC20	17.31 ± 2.24d		55.17 ± 7.47c		0.37 ± 0.04c		0.51 ± 0.07c	
	<i>F</i>	<i>P</i>	<i>F</i>	<i>P</i>	<i>F</i>	<i>P</i>	<i>F</i>	<i>P</i>
堆肥添加比例	110.583	0.000	140.501	0.000	214.131	0.000	31.710	0.000
堆肥种类	104.064	0.000	98.248	0.000	121.778	0.000	18.285	0.000
堆肥种类 × 添加比例	20.581	0.000	27.934	0.000	44.009	0.000	6.816	0.002
	<i>R</i>	<i>P</i>	<i>R</i>	<i>P</i>	<i>R</i>	<i>P</i>	<i>R</i>	<i>P</i>
ANOSIM	0.243	0.100	0.061	0.033	-0.028	0.563	-0.078	0.687

样品	$\alpha(355)$		S_R		$SUVA_{254}$	
CK	4.49 ± 0.98a		0.89 ± 0.05a		0.13 ± 0.03a	
SCC5	11.37 ± 2.55b		0.52 ± 0.06b		0.34 ± 0.09b	
SCC10	27.42 ± 5.58c		0.62 ± 0.11b		0.82 ± 0.12c	
SCC20	70.20 ± 8.37d		0.62 ± 0.13b		2.31 ± 0.37d	
SFC5	16.0 ± 3.21b		0.67 ± 0.13b		0.43 ± 0.10b	
SFC10	13.88 ± 2.37b		0.48 ± 0.14b		0.50 ± 0.21b	
SFC20	38.14 ± 6.69c		0.68 ± 0.09b		1.17 ± 0.22c	
SSC5	7.60 ± 0.99bc		0.58 ± 0.07b		0.18 ± 0.02a	
SSC10	7.23 ± 1.14b		0.60 ± 0.22ab		0.28 ± 0.09a	
SSC20	15.00 ± 4.31c		0.68 ± 0.14ab		0.55 ± 0.09d	
	<i>F</i>	<i>P</i>	<i>F</i>	<i>P</i>	<i>F</i>	<i>P</i>
堆肥添加比例	107.241	0.000	1.273	0.304	85.173	0.000
堆肥种类	73.983	0.000	0.158	0.855	49.102	0.000
堆肥种类 × 添加比例	26.558	0.000	1.057	0.406	18.431	0.000
	<i>R</i>	<i>P</i>	<i>R</i>	<i>P</i>	<i>R</i>	<i>P</i>
ANOSIM	-0.004	0.518	-0.119	0.906	-0.078	0.672

1) 采用 Duncan's multiple range test 方法,对比施用同种堆肥不同添加比例土壤样品及对照组样品中 DOM 紫外光谱特征参数的差异,不同小写字母表示显著性差异($P < 0.05, n = 3$); 采用一般线性回归,确定堆肥种类、添加比例及两者交互作用对不同紫外光谱特征参数的影响($n = 3$), F 为检验回归分析有效性的统计值; 采用 ANOSIM 分析,对比堆肥种类和添加比例对不同紫外光谱特征参数的影响程度($n = 3$); 黑体字表示 $P < 0.05$; 表内数值为平均值 ± 标准偏差



不同小写字母表示添加同种堆肥土壤不同培养时间样品之间差异的显著性($P < 0.05, n = 3$)

图 2 不同培养时间土壤中 DOM 的 $SUVA_{254}$ 和 S_R

Fig. 2 $SUVA_{254}$ and S_R of DOM in soil at different culture time

表 4 DOM 荧光光谱特征参数¹⁾
Table 4 DOM fluorescence parameters of soil (Mean ± SD)

样品	BIX		$\beta:\alpha$		HIX	
CK	0.73 ± 0.31a		0.70 ± 0.12a		0.67 ± 0.08a	
SCC5	0.80 ± 0.07a		0.77 ± 0.09a		0.86 ± 0.14a	
SCC10	0.76 ± 0.08a		0.75 ± 0.15a		0.85 ± 0.37a	
SCC20	0.77 ± 0.09a		0.77 ± 0.13a		0.85 ± 0.16a	
SFC5	0.90 ± 0.20b		0.83 ± 0.21a		0.82 ± 0.07a	
SFC10	0.91 ± 0.12b		0.86 ± 0.15a		0.81 ± 0.16a	
SFC20	0.97 ± 0.25b		0.91 ± 0.27a		0.83 ± 0.29a	
SSC5	0.74 ± 0.09a		0.72 ± 0.11a		0.80 ± 0.05a	
SSC10	0.73 ± 0.16a		0.70 ± 0.08a		0.74 ± 0.08a	
SSC20	0.76 ± 0.11a		0.71 ± 0.19a		0.79 ± 0.20a	
	<i>F</i>	<i>P</i>	<i>F</i>	<i>P</i>	<i>F</i>	<i>P</i>
堆肥添加比例	0.125	0.883	0.071	0.932	0.049	0.952
堆肥种类	4.242	0.031	2.127	0.148	0.346	0.712
堆肥种类 × 添加比例	0.093	0.983	0.069	0.991	0.021	0.999
	<i>R</i>	<i>P</i>	<i>R</i>	<i>P</i>	<i>R</i>	<i>P</i>
ANOSIM	0.745	0.004	0.885	0.007	0.671	0.004

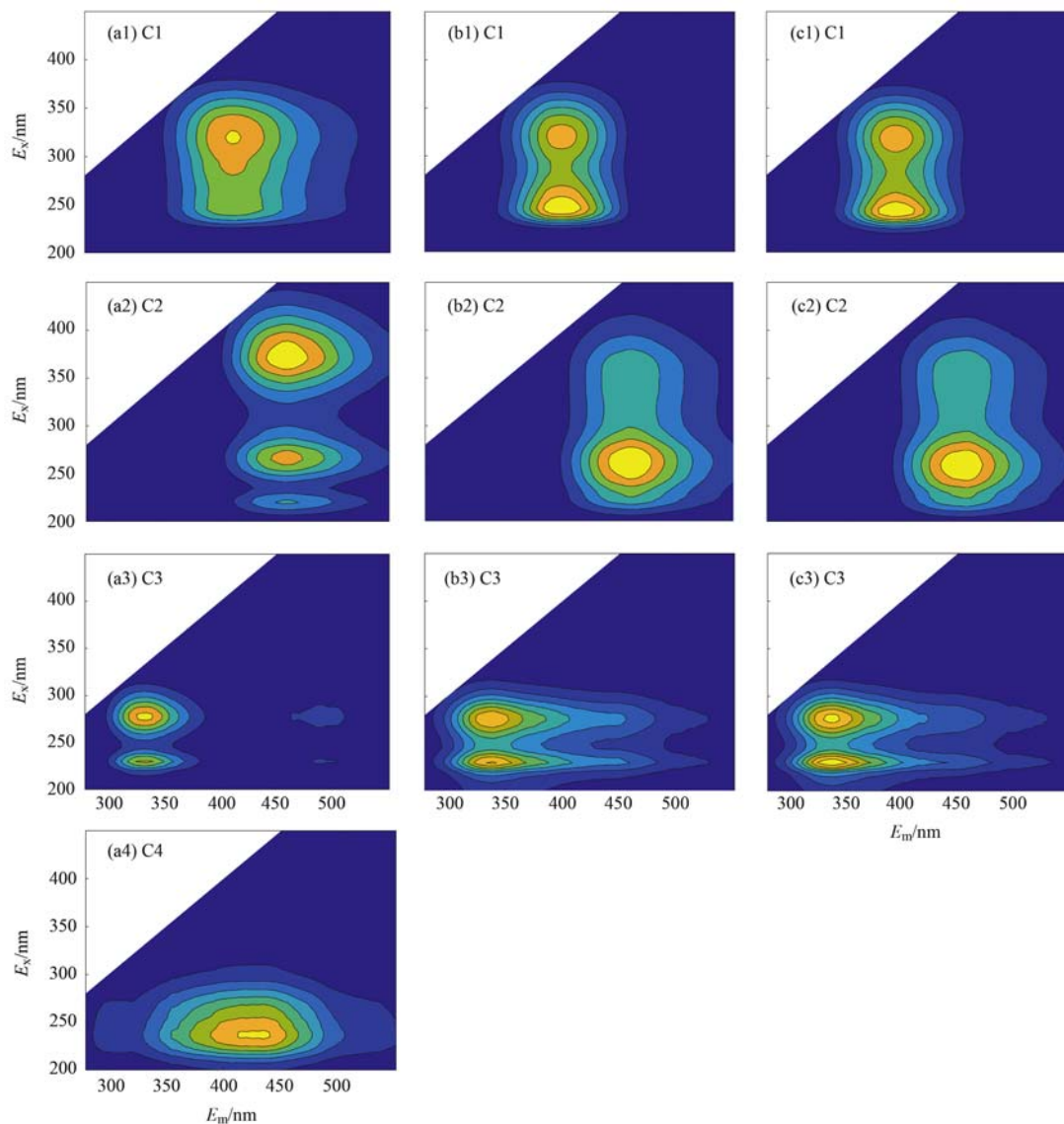
1) 采用 Duncan's multiple range test 方法, 对比施用同种堆肥不同添加比例土壤样品及对照组样品中 DOM 荧光光谱特征参数的差异, 不同小写字母表示显著性差异 ($n=3$), F 为检验回归分析有效性的统计值; 采用 ANOSIM 分析, 对比堆肥种类、添加比例以及两者交互作用对不同荧光光谱参数的影响 ($n=3$), 黑体字表示 $P<0.05$; 表内数值为平均值 ± 标准偏差

不同荧光组分的相对含量如图 4 所示, 与 CK 相比, 3 种堆肥施用后土壤 DOM 中 C1 相对含量增加, C3 相对含量降低. 有研究表明, 类色氨酸等蛋白质物质被微生物利用后可生成其他类腐殖质组分^[30]. 因此可以推测, 堆肥施用后土壤 DOM 中 C1 和 C3 相对含量的变化可能受以下两种因素的影响: 一方面, 堆肥中外源有机质的输入直接增加了土壤 DOM 中小分子类腐殖质的相对含量; 另一方面, 堆肥中外源微生物的输入增强了对类蛋白组分的吸收利用. 以第 120 d 为例, 堆肥添加比例相同的情况下, C1 相对含量表现为 SCC(SFC) > SSC, 与污泥堆肥相比, 施用牛粪和餐厨垃圾堆肥更有利于提高土壤 DOM 中小分子组分相对含量; 大分子类富里酸相对含量均表现为 SSC > SCC(SFC), 可能与污泥堆肥 DOM 中大分子类腐殖质含量有关. 有研究表明, 随污泥堆肥过程的进行, 大分子类腐殖质物质不断生成, 腐熟污泥堆肥中大分子类腐殖质相对含量可达 50% 以上^[31]. 尽管堆肥施用后土壤 DOM 中 C3 相对含量降低, 但 SCC 第 120 d 和 SFC 第 40 及 80 d 样品中 C3 相对含量仍随着堆肥添加比例的升高而增加, 这表明施用堆肥后土壤中类蛋白相对含量的降低可能主要是由于类腐殖质含量的增加造成的. 此外, 随培养时间的延长, SCC5 和 SFC20 中 C3 组分相对含量降低, 而 C1 和 C2 组分相对含量有增加的趋势, 进一步表明堆肥-土壤体系培养过程中 DOM 荧光组分之间可能发生了转化和重组.

2.3.3 土壤 DOM 荧光组分变化特征

二维相关光谱(2D-COS)是一种更细微观察物

质结构动态变化的有效手段^[32]. 基于平行因子分析中的 E_m Loading 进行二维相关光谱分析^[28], 比较了施用堆肥后土壤 DOM 不同荧光组分的动态变化顺序(图 5). SCC 和 SFC 中 DOM 荧光组分的同步[图 5(a)和 5(c)]和异步[图 5(b)和 5(d)]二维相关光谱中分别得到 3 个自动峰(335/335 nm、395/395 nm、465/465 nm)和 3 个交叉峰(395/335 nm、465/335 nm、465/395 nm). E_m 为 335、395 和 465 nm 时分别对应类蛋白、小分子类腐殖质和大分子类富里酸[图 3(b)和(c)]. 根据交叉峰在同步和异步映射中的相关性可知, 随堆肥添加比例的增加和样品培养时间的延长, SCC 和 SFC 中 DOM 荧光组分变化顺序为: 类蛋白($E_m=335$ nm) > 大分子类富里酸($E_m=465$ nm) > 小分子类腐殖质($E_m=395$ nm). 上述结果表明, 堆肥施用后聚合程度较低类蛋白组分可能被微生物吸收利用而优先变化. 荧光光谱参数($\beta:\alpha$)结果也表明, SFC 和 SCC 中新生成 DOM 含量增加. 因此大分子类富里酸的变化可能与类蛋白的变化有关, 类蛋白被微生物利用后可能导致了大分子类富里酸的生成. Li 等^[33]的研究也得出类似的结论, 小分子类蛋白在微生物的累积过程中被转化成分子量较高的腐殖酸类物质. 此外, SCC 和 SFC 同步二维相关光谱中 335/395 nm 均呈负相关, 表明 DOM 小分子类腐殖质和大分子类富里酸来源不同. 后续研究中有待于对堆肥施用后 DOM 不同组分的来源和结构变化进行更详细和深入地研究. 施用污泥堆肥土壤中 DOM 荧光组分的变化顺序为: 大分



(a)、(b) 和 (c) 分别表示施用污泥堆肥、牛粪堆肥和餐厨垃圾堆肥土壤中 DOM 荧光组分

图 3 土壤 DOM 荧光组分分析

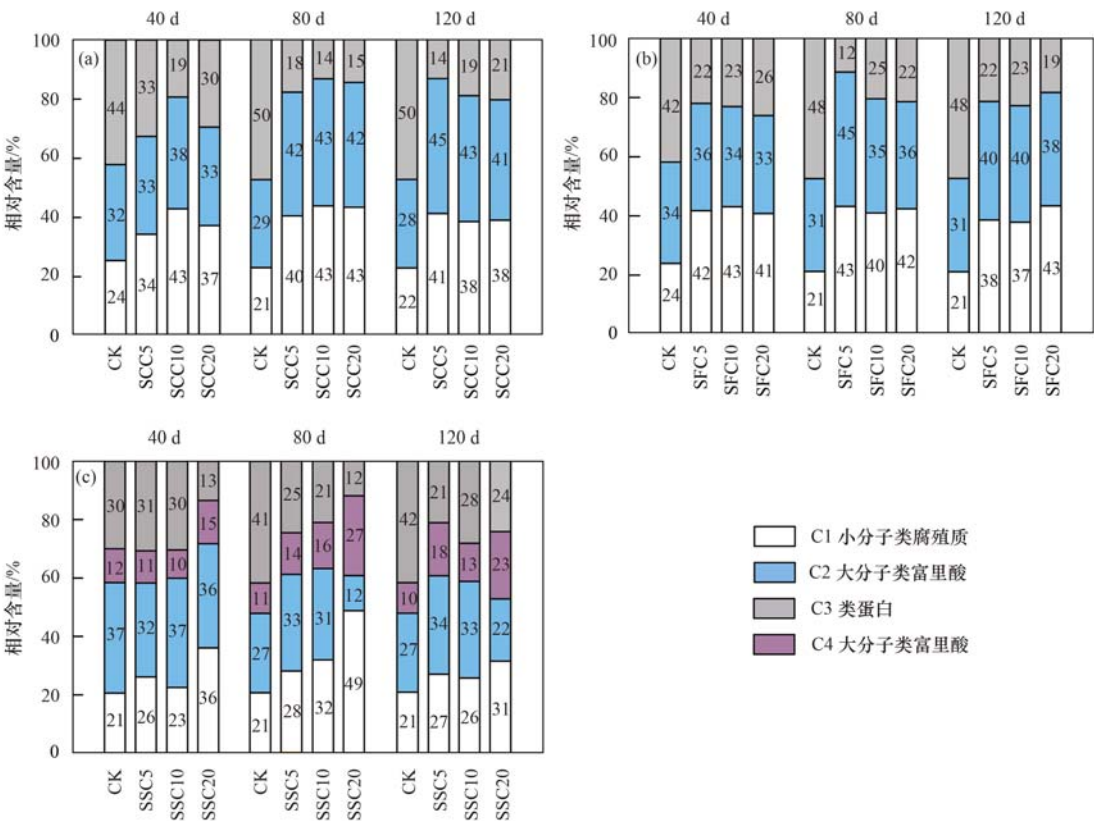
Fig. 3 DOM fluorescence analysis of soil

子类富里酸($E_m = 465/435 \text{ nm}$) > 类蛋白($E_m = 330 \text{ nm}$) > 小分子类腐殖质($E_m = 405 \text{ nm}$). 外源大分子类腐殖质的直接输入可能是施用污泥堆肥土壤中大分子类富里酸优先变化的原因.

2.4 土壤 DOM 结构变化的驱动因素

基于随机森林回归模型识别了施用堆肥土壤中 DOM 结构变化的潜在驱动因素,并评估不同因素对 DOM 结构变化的贡献^[34]. 其中 DOM 结构特性通过紫外-荧光光谱特征参数和荧光组分来表示,并将 SSC 中 C4 合并到 C2. 随机森林模型中拟合优度(% Var Explained)即 R^2 可用来表征预测变量对响应变量的整体解释率,该值越大表示解释率越高. 随机森林模型均方误差增加的百分比(% Inc MSE)可以表征预测变量重要程度,该值越大表明预测变量越重要,越容易受响应变量的驱动^[35]. 当均方

误差增加的百分比为负值时以 0 来表示. 此外,理化因子在非度量多维尺度分析(NMDS)中第一坐标轴上的投影用于反映理化因子的整体状况. 总体来看[图 6(a)~6(c)],堆肥添加比例($R^2 = 0.572$)对土壤 DOM 结构变化影响大于理化因子($R^2 = 0.403$)和培养时间($R^2 = 0.227$),然而通过 ANOSIM 分析发现,堆肥种类对 DOM 结构的影响大于堆肥添加比例($R = 0.533$, $P = 0.001$). 因此可以确定,在施用堆肥(餐厨垃圾堆肥、牛粪堆肥和污泥堆肥)土壤中不同驱动因素对 DOM 结构变化的影响程度为:堆肥种类 > 堆肥添加比例 > 理化因子 > 培养时间. 进一步分析发现,多数较为重要的预测变量与响应变量呈显著相关, $S_{226-250}$ 、 $S_{260-400}$ 、 $SUVA_{290}$ 、 $SUVA_{254}$ 、 $SUVA_{260}$ 、 $a(355)$ 及 HIX 与堆肥添加比例呈显著正相关,进一步表明



(a)、(b)和(c)分别表示施用牛粪堆肥、餐厨垃圾堆肥和污泥堆肥土壤 DOM 中荧光组分的相对含量；柱状图中数字分别表示对应不同组分的相对含量

图 4 土壤 DOM 荧光组分相对含量

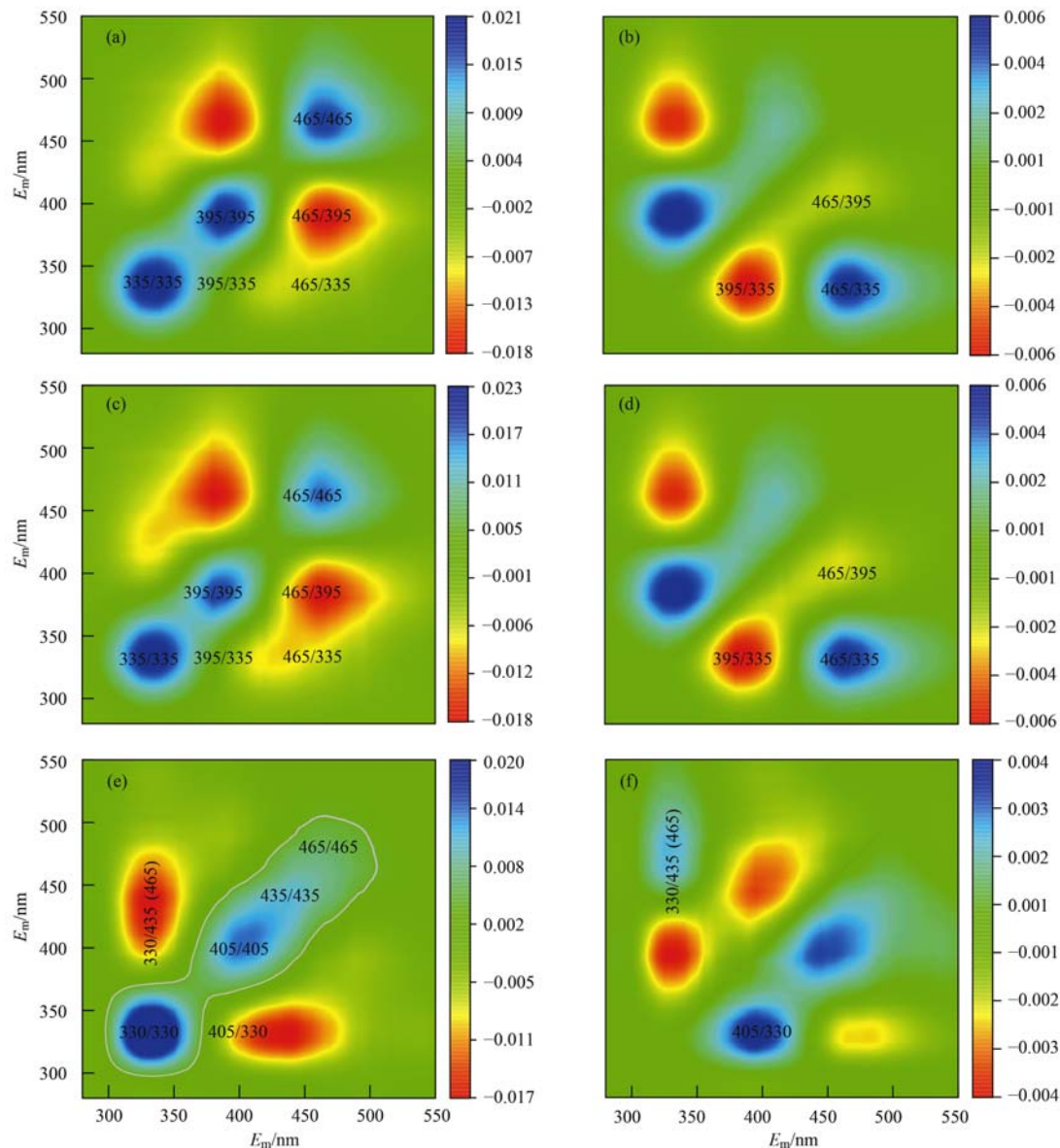
Fig. 4 Relative content of DOM fluorescence components of soil

随堆肥添加量的增加,DOM 中酮基、疏水性组分及显色组分含量增加,DOM 腐殖化程度增强. 样品培养时间与 S_R 呈显著负相关,进一步表明随培养时间的延长,施用堆肥土壤中大分子溶解性有机质含量不断增加.

土壤理化因子是推动 DOM 动态变化的重要驱动力^[33]. 堆肥施用后土壤理化因子与 DOM 紫外光谱参数(S_R 除外)呈显著正相关,且理化因子因堆肥添加比例、堆肥种类及培养时间的不同而表现出一定的差异(图 1 和表 2). 因此,施用堆肥可通过改变土壤理化因子而间接驱动 DOM 结构变化. 进一步分析不同理化指标对 DOM 结构的影响发现[图 6 (d)],DOC 是 DOM 结构变化的最主要的影响因素,解释率超过 70% ($R^2 = 0.739$). 已有研究表明,DOC 与 DOM 之间存在强烈的响应关系,DOC 含量的动态变化可影响 DOM 的腐殖化进程^[14,36],而 DOM 的分子组成会影响 DOC 的微生物代谢^[8]. 除 S_R 和 HIX 外,其他光谱参数均与 DOC 呈显著正相关,表明施用堆肥后 DOM 中不同组分(尤其是酮基)含量的增加与 DOC 含量的增加有关. AN ($R^2 = 0.432$)也是 DOM 结构变化的重要驱动因素,NO₃⁻-N 与

$S_{226-250}$ 、 $S_{260-400}$ 及荧光光谱特征参数呈显著正相关. Wang 等^[8]的研究也表明,N 营养元素具有明显促进 DOM 芳构化和腐殖化的作用. 此外,C 和 N 等营养元素对 DOM 结构变化的驱动作用主要是通过刺激微生物代谢活动实现的^[8]. SOM 与 S_R 呈显著负相关,与 $SUVA_{254}$ 呈显著正相关,表明施用堆肥后外源有机质的输入使得土壤 DOM 大分子有机组分增加,腐殖化程度增强.

堆肥施用后土壤理化因子与 C3 组分呈显著负相关[图 6(b)],说明不同理化因子的改变可能是驱动类蛋白组分相对含量降低的重要因素. 如图 6(d)所示,DOC 和 AN 均与 C3 组分相对含量呈显著负相关,DOC 和 AN 含量的增加可促进微生物代谢活动^[37],从而增强对类蛋白组分的吸收利用. 此外,NO₃⁻-N 含量与 C1 组分的显著正相关,表明NO₃⁻-N 刺激下微生物代谢活动的改变可能有助于小分子类腐殖质的生成,此外堆肥施用同时提高了土壤中NO₃⁻-N 以及 DOM 中小分子类腐殖质的含量也可能是导致两者成显著正相关的原因. SOM 与 C2 组分含量呈显著正相关,表明堆肥施用后 SOM 含量增加的同时提高了 DOM 中大分子类富里酸的相对含量.



(a) 和 (b) 分别为 SCC 中 DOM 荧光组分峰的同步和异步二维相关光谱, (c) 和 (d) 分别为 SFC 中 DOM 荧光组分峰的同步和异步二维相关光谱, (e) 和 (f) 分别为 SSC 中 DOM 荧光组分峰的同步和异步二维相关光谱

图 5 土壤中 DOM 荧光组分二维相关光谱分析

Fig. 5 2D-COS analysis of DOM fluorescence components of soil

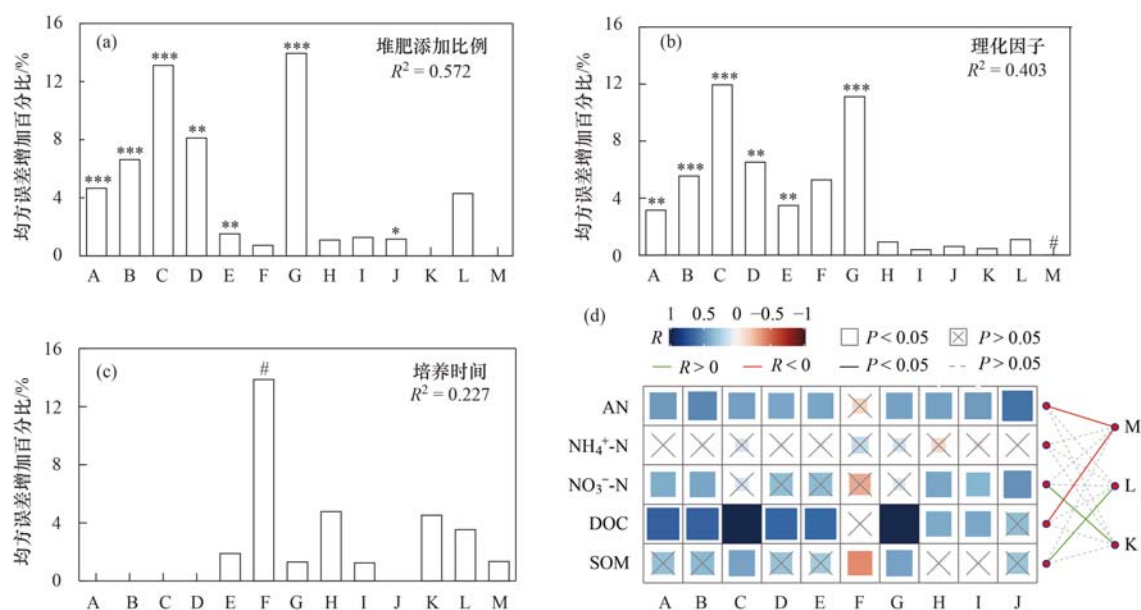
3 结论

(1) 施用堆肥可改变土壤理化特性, 使得 AN 、 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 、 SOM 和 DOC 含量显著提高. 堆肥种类、添加比例和培养时间对土壤理化特性影响不同. 施用牛粪和餐厨垃圾堆肥更有利于 AN 、 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 和 DOC 含量的提高, 而施用污泥堆肥土壤中 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 和 SOM 含量更高. 随堆肥添加量的增加土壤中 DOC 和 SOM 不断累积而含量增加, 随培养时间延长施用牛粪和餐厨垃圾堆肥土壤中 DOC 被不断消耗而含量降低.

(2) 施用堆肥改变了土壤 DOM 结构特性, 使得 DOM 中共轭苯环结构、疏水性组分、醌基和显色组分含量增加, 不饱和有机分子 $\pi \rightarrow \pi^*$ 的跃迁更为活

跃, DOM 分子量增大, 腐殖化程度增强. DOM 结构特性因堆肥种类、添加比例和培养时间的差异而不同. 添加量较低 (5%) 时, 餐厨垃圾堆肥更有利于 DOM 的芳构化和腐殖化; 而添加量较高 (10% 和 20%) 时, 牛粪堆肥更能驱动 DOM 结构变化. 随培养时间的延长, 土壤 DOM 分子量增大, 腐殖化程度提高.

(3) 施用堆肥改变了土壤 DOM 荧光组分的变化顺序. 随培养时间延长, 施用牛粪和餐厨垃圾堆肥土壤中 DOM 组分的变化顺序为: 类蛋白 > 大分子类富里酸 > 小分子类腐殖质; 施用污泥堆肥土壤中表现为: 大分子类富里酸 > 类蛋白 > 小分子类腐殖质.



(a)堆肥添加含量,(b)理化因子,(c)培养时间,(d)不同理化指标对 DOM 结构的影响分析; A 表示 $S_{226-250}$, B 表示 $S_{260-400}$, C 表示 SUVA_{290} , D 表示 SUVA_{260} , E 表示 $\alpha(355)$, F 表示 S_R , G 表示 SUVA_{254} , H 表示 BIX, I 表示 β/α , J 表示 HIX, K 表示 C1 组分(小分子类腐殖质), L 表示 C2 组分(大分子类富里酸), M 表示 C3 组分(类蛋白); 驱动因素与结构参数之间的相关性用 * (显著正相关)和# (显著负相关)来表示, * 和#表示 $P < 0.05$, ** 表示 $P < 0.01$, *** 表示 $P < 0.001$

图 6 土壤中 DOM 结构的影响因素分析

Fig. 6 Influence of different driving factors on DOM soil structure

(4)不同因素对 DOM 结构变化的影响程度表现为:堆肥种类 > 添加比例 > 理化因子 > 培养时间。DOC 和 AN 的增加促进了 DOM 腐殖化程度的增强和类蛋白相对含量的降低; DOM 中小分子类腐殖质相对含量的增加与 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 含量的增加有关,外源 SOM 的输入促进了 DOM 中大分子类富里酸相对含量的增加。

参考文献:

- [1] 陶磊, 褚贵新, 刘涛, 等. 有机肥替代部分化肥对长期连作棉田产量、土壤微生物数量及酶活性的影响[J]. 生态学报, 2014, **34**(21): 6137-6146.
- [2] Xin X L, Zhang J B, Zhu A N, *et al.* Effects of long-term (23 years) mineral fertilizer and compost application on physical properties of fluvo-aquic soil in the North China Plain[J]. Soil and Tillage Research, 2016, **156**: 166-172.
- [3] Cai Z C, Qin S W. Dynamics of crop yields and soil organic carbon in a long-term fertilization experiment in the Huang-Huai-Hai Plain of China[J]. Geoderma, 2006, **136** (3-4): 708-715.
- [4] Sodhi G P S, Beri V, Benbi D K. Soil aggregation and distribution of carbon and nitrogen in different fractions under long-term application of compost in rice-wheat system[J]. Soil and Tillage Research, 2009, **103**(2): 412-418.
- [5] Tripathi R, Nayak A K, Bhattacharyya P, *et al.* Soil aggregation and distribution of carbon and nitrogen in different fractions after 41 years long-term fertilizer experiment in tropical rice-rice

system[J]. Geoderma, 2014, **213**: 280-286.

- [6] Wei Y S, Fan Y B, Wang M J, *et al.* Composting and compost application in China [J]. Resources, Conservation and Recycling, 2000, **30**(4): 277-300.
- [7] 秦纪洪, 王姝, 刘琛, 等. 海拔梯度上川西高山土壤溶解性有机质(DOM)光谱特征[J]. 中国环境科学, 2019, **39**(10): 4321-4328.
- [8] Qin J H, Wang S, Liu C, *et al.* Spectroscopic characteristics of soil dissolved organic matter (DOM) along the altitudinal gradient of alpine in western Sichuan[J]. China Environmental Science, 2019, **39**(10): 4321-4328.
- [9] Wang J J, Liu Y N, Bowden R D, *et al.* Long-term nitrogen addition alters the composition of soil-derived dissolved organic matter[J]. ACS Earth and Space Chemistry, 2020, **4**(2): 189-201.
- [10] Jones D L, Healey J R, Willett V B, *et al.* Dissolved organic nitrogen uptake by plants—an important N uptake pathway? [J]. Soil Biology and Biochemistry, 2005, **37**(3): 413-423.
- [11] 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.
- [12] Liu H F, Yang X M, Liu G B, *et al.* Response of soil dissolved organic matter to microplastic addition in Chinese loess soil[J]. Chemosphere, 2017, **185**: 907-917.
- [13] He X S, Yang C, You S H, *et al.* Redox properties of compost-derived organic matter and their association with polarity and molecular weight[J]. Science of the Total Environment, 2019, **665**: 920-928.
- [14] 王涛, 邵田田, 梁晓文, 等. 夏季高原河流 CDOM 光学特性、组成及来源研究[J]. 环境科学学报, 2019, **39**(3): 668-678.
- [15] Wang T, Shao T T, Liang X W, *et al.* Optical characteristics, composition and sources of colored dissolved organic matter in

- plateau rivers in summer[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2019, **39**(3): 668-678.
- [14] 张文浩, 赵铎霖, 王晓毓, 等. 太白山自然保护区水体 CDOM 吸收与三维荧光特征[J]. *环境科学*, 2020, **41**(11): 4958-4969.
- Zhang W H, Zhao D L, Wang X Y, *et al.* Absorption and three dimensional fluorescence spectra of CDOM in the water of Taibaishan nature reserve[J]. *Environmental Science*, 2020, **41**(11): 4958-4969.
- [15] 聂文翰, 戚志萍, 冯海玮, 等. 复合菌剂秸秆堆肥对土壤碳氮含量和酶活性的影响[J]. *环境科学*, 2017, **38**(2): 783-791.
- Nie W H, Qi Z P, Feng H W, *et al.* Straw composts with composite inoculants and their effects on soil carbon and nitrogen contents and enzyme activity[J]. *Environmental Science*, 2017, **38**(2): 783-791.
- [16] 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**, doi: 10.1016/j.soilbio.2020.107880.
- [17] 张旭, 席北斗, 赵越, 等. 有机废弃物堆肥培肥土壤的氮矿化特性研究[J]. *环境科学*, 2013, **34**(6): 2448-2455.
- Zhang X, Xi B D, Zhao Y, *et al.* Characteristics of organic nitrogen mineralization in organic waste compost-amended soil[J]. *Environmental Science*, 2013, **34**(6): 2448-2455.
- [18] Roth V N, Lange M, Simon C, *et al.* Persistence of dissolved organic matter explained by molecular changes during its passage through soil[J]. *Nature Geoscience*, 2019, **12**(9): 755-761.
- [19] Zhang W J, Tang M Y, Yang P, *et al.* Micro-interfacial mechanisms on sludge dewaterability enhancement using cerium chloride for preparation of carbon-based functional material[J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2020, **386**, doi: 10.1016/j.jhazmat.2019.121930.
- [20] Wang K, Li W G, Gong X J, *et al.* Spectral study of dissolved organic matter in biosolid during the composting process using inorganic bulking agent; UV-vis, GPC, FTIR and EEM[J]. *International Biodeterioration & Biodegradation*, 2013, **85**: 617-623.
- [21] Ratasuk N, Nanny M A. Characterization and quantification of reversible redox sites in humic substances[J]. *Environmental Science & Technology*, 2007, **41**(22): 7844-7850.
- [22] 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.
- [23] 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.
- 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.
- [24] Kästner M, Miltner A. Application of compost for effective bioremediation of organic contaminants and pollutants in soil[J]. *Applied Microbiology and Biotechnology*, 2016, **100**(8): 3433-3449.
- [25] 马琦琦, 李刚, 魏永. 城郊关键带土壤中溶解性有机质的光谱特性及其时空变异[J]. *环境化学*, 2020, **39**(2): 455-466.
- Ma Q Q, Li G, Wei Y. Spectral characteristics and spatiotemporal variation of DOM in Peri-urban Critical Zone[J]. *Environmental Chemistry*, 2020, **39**(2): 455-466.
- [26] 刘堰杨, 秦纪洪, 刘琛, 等. 基于三维荧光及平行因子分析的川西高原河流水体 CDOM 特征[J]. *环境科学*, 2018, **39**(2): 720-728.
- Liu Y Y, Qin J H, Liu C, *et al.* Characteristics of chromophoric dissolved organic matter (CDOM) in rivers of western Sichuan plateau based on EEM-PARAFAC analysis[J]. *Environmental Science*, 2018, **39**(2): 720-728.
- [27] Ishii S K L, Boyer T H. Behavior of reoccurring PARAFAC components in fluorescent dissolved organic matter in natural and engineered systems; a critical review[J]. *Environmental Science & Technology*, 2012, **46**(4): 2006-2017.
- [28] Zhu L J, Zhao Y, Bai S C, *et al.* New insights into the variation of dissolved organic matter components in different latitudinal lakes of northeast China[J]. *Limnology and Oceanography*, 2020, **65**(3): 471-481.
- [29] 彭莉, 虞敏达, 何小松, 等. 垃圾填埋场地下水溶解性有机物光谱特征[J]. *环境科学*, 2018, **39**(10): 4556-4564.
- Peng L, Yu M D, He X S, *et al.* Spectral characteristics of dissolved organic matter in landfill groundwater[J]. *Environmental Science*, 2018, **39**(10): 4556-4564.
- [30] Chen M L, Price R M, Yamashita Y, *et al.* Comparative study of dissolved organic matter from groundwater and surface water in the Florida coastal Everglades using multi-dimensional spectrofluorometry combined with multivariate statistics[J]. *Applied Geochemistry*, 2010, **25**(6): 872-880.
- [31] 刘晓明, 余震, 周普雄, 等. 污泥超高温堆肥过程中 DOM 结构的光谱分析[J]. *环境科学*, 2018, **39**(8): 3807-3815.
- Liu X M, Yu Z, Zhou P X, *et al.* Spectroscopic characterization of DOM during hyperthermophilic composting of sewage sludge[J]. *Environmental Science*, 2018, **39**(8): 3807-3815.
- [32] Gao X T, Tan W B, Zhao Y, *et al.* Diversity in the mechanisms of humin formation during composting with different materials[J]. *Environmental Science & Technology*, 2019, **53**(7): 3653-3662.
- [33] 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.
- [34] Trivedi P, Delgado-Baquerizo M, Trivedi C, *et al.* Microbial regulation of the soil carbon cycle; evidence from gene-enzyme relationships[J]. *The ISME Journal*, 2016, **10**(11): 2593-2604.
- [35] Jiao S, Chen W M, Wang J L, *et al.* Soil microbiomes with distinct assemblies through vertical soil profiles drive the cycling of multiple nutrients in reforested ecosystems[J]. *Microbiome*, 2018, **6**(1), doi: 10.1186/s40168-018-0526-0.
- [36] 常单娜, 曹卫东, 包兴国, 等. 西北灌漠土长期不同施肥改变土壤可溶性有机质的化学及光谱学特性[J]. *光谱学与光谱分析*, 2016, **36**(1): 220-225.
- Chang D N, Cao W D, Bao X G, *et al.* Long-term different fertilizations changed the chemical and spectrum characteristics of DOM of the irrigation-desert soil in North-Western China[J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2016, **36**(1): 220-225.
- [37] Dang Q L, Tan W B, Zhao X Y, *et al.* Linking the response of soil microbial community structure in soils to long-term wastewater irrigation and soil depth[J]. *Science of the Total Environment*, 2019, **688**: 26-36.

CONTENTS

Transmission of Coronavirus via Aerosols and Influence of Environmental Conditions on Its Transmission	LI Xue, JIANG Jing-kun, WANG Dong-bin, <i>et al.</i> (3091)
Impacts of Meteorology and Emission Variations on PM _{2.5} Concentration Throughout the Country During the 2020 Epidemic Period	LU Shi-ze, SHI Xu-rong, XUE Wen-bo, <i>et al.</i> (3099)
Factors and Their Interaction Effects on the Distribution of PM _{2.5} in the Yangtze River Delta Based on Grids	HUANG Xiao-gang, ZHAO Jing-bo, XIN Wei-dong (3107)
Application of ARIMA Model for Mid- and Long-term Forecasting of Ozone Concentration	LI Ying-ruo, HAN Ting-ting, WANG Jun-xia, <i>et al.</i> (3118)
Pollution Characteristics and Sources of Wintertime Atmospheric Brown Carbon at a Background Site of the Yangtze River Delta Region in China	ZHAO Yu, WU Can, WANG Yi-qian, <i>et al.</i> (3127)
Spatio-temporal Variation Characteristics Monitored by Remotely Sensed Technique of PM _{2.5} Concentration and Its Influencing Factor Analysis in Sichuan Basin, China	LI Meng-zhen, ZHANG Ting-bin, YI Gui-hua, <i>et al.</i> (3136)
Construction of Continuous Dynamic Model for River Networks and Its Application in Simulation of Spatiotemporal Migration of Typical Biocides	XING Cheng, ZHANG Qian-qian, CAI Ya-ya, <i>et al.</i> (3147)
Response of Riverine Nitrogen Exports to Land Use Pattern and Hydrological Regime in the Jiulong River Watershed	HUANG Ya-ling, HUANG Jin-liang (3156)
Correlation Between Microplastics Pollution and Eutrophication in the Near Shore Waters of Dianchi Lake	YUAN Hai-ying, HOU Lei, LIANG Qi-bin, <i>et al.</i> (3166)
Analysis of Water Quality and Exchange Flux of Interstitial Water-Overlying Water in Sediments of Baiyangdian Entrance Area in Summer	ZHANG Tian-na, ZHOU Shi-lei, CHEN Zhao-ying, <i>et al.</i> (3176)
Distribution Characteristics and Pollution Evaluation of Nitrogen and Organic Matter in Overlying Water and Sediment of Guyun River and Jinshan Lake in Zhenjiang City	YUAN Lu-bin, XING Shu-yu, LIU Xin, <i>et al.</i> (3186)
Spatial Distribution Characteristics of Phosphorus Fractions and Release Risk in Sediments of Honghu International Importance Wetland	LIU Yong-jiu, HUANG Su-zhen, ZHANG Lu, <i>et al.</i> (3198)
Pollution Distribution and Ecological Risk Assessment of Heavy Metals in River Sediments from the Ancient Town of Suzhou	BAI Dong-rui, ZHANG Tao, BAO Jun-song, <i>et al.</i> (3206)
Spatio-temporal Distribution Characteristic and Risk Assessment of Heavy Metals in Soils Around Centralized Drinking Water Sources in Wuhan	ZHU Jing, HOU Yao-zong, ZOU Shu-cheng, <i>et al.</i> (3215)
Hydro-chemical Characteristics and Ion Origin Analysis of Surface Groundwater at the Shengjin Lake and Yangtze River Interface	CUI Yu-huan, WANG Jie, LIU You-cun, <i>et al.</i> (3223)
Identifying the Sources of Groudwater NO ₃ ⁻ -N in Agricultural Region of Qingdao	KOU Xin-yue, DING Jun-jun, LI Yu-zhong, <i>et al.</i> (3232)
Analysis of Phytoplankton Community Stability and Influencing Factors in a Tributary of the Three Gorges Reservoir	HE Shu-han, OUYANG Tian, ZHAO Lu, <i>et al.</i> (3242)
Distribution Characteristics and Influencing Factors of Phytoplankton Community in Harbin Urban River Network During Wet Season	LU Feng, LI Lei, QI Qing-song, <i>et al.</i> (3253)
Response of Microbial Community to Natural Organic Matter Input in Lake Sediments	JU Qi, ZHANG Qi, CAO Chi-cheng, <i>et al.</i> (3263)
Effects of Water Supply Quality and Social Activity on the Microbial Community in Baiyangdian Wetland	ZHAO Zhi-rui, WU Hui-qing, BI Yu-fang, <i>et al.</i> (3272)
Characteristics of Dissolved Organic Matter in Overlying Water During Algal Bloom Decay	LI Xiang, LI Zhi-chun, WANG Xuan, <i>et al.</i> (3281)
Water Pollution Characteristics and Source Apportionment in Rapid Urbanization Region of the Lower Yangtze River: Considering the Qinhuai River Catchment	MA Xiao-xue, GONG Chang, GUO Jia-xun, <i>et al.</i> (3291)
Contamination Characteristics of Surface Runoff in Densely Populated Areas in Downstream Yangtze River, China	GUO Wen-jing, ZHANG Zhi-yong, WEN Xue-zheng, <i>et al.</i> (3304)
Characteristics of Pollutant Dynamics Under Rainfall-Runoff Events in the Chaohe River Watershed	BAO Xin, JIANG Yan, HU Yu-cong (3316)
Influence of Impervious Surface Roughness on Accumulation and Erosion of Urban Non-Point Source Particles	SHAN Xi-huan, XIE Wen-xia, LIAO Yun-jie, <i>et al.</i> (3328)
Probabilistic Risk Assessment of Arsenic Exposure Through Drinking Water Intake in Chinese Residents	QIN Ning, LIU Yun-wei, HOU Rong, <i>et al.</i> (3338)
Removal Behavior of Protein-like Dissolved Organic Matter During Different Water Treatment Processes in Full-Scale Drinking Water Treatment Plants	LI Meng-ya, SONG Yu-ying, ZHANG Xiao-lan, <i>et al.</i> (3348)
Distribution of Heavy Metals and Their Corresponding Nanoparticles in Different Treatment Unit Processes in the Sewage Treatment Plant	WANG Du-jia, HE Shuai, ZHOU Xiao-xia (3358)
Metagenomic Analysis of Resistance Genes in Membrane Cleaning Sludge	DU Cai-li, LI Zhong-hong, LI Xiao-guang, <i>et al.</i> (3366)
Distribution and Removal of Antibiotic-Resistant Bacteria and Antibiotic Resistance Genes in Petrochemical Wastewater Treatment Plants	TANG Zhen-ping, XIAO Sha-sha, DUAN Yi, <i>et al.</i> (3375)
Treatment of Medium Ammonium Wastewater by Single-stage Partial Nitrification-ANAMMOX SMBBR	LÜ Kai, SHAO Xian-ming, WANG Kang-zhou, <i>et al.</i> (3385)
Two-Stage Denitrification Process Performance with Solid Slow-Release Carbon Source	TANG Yi, MA Yong-wen, WAN Jin-quan, <i>et al.</i> (3392)
Effect of Ozone Dosage on Sludge Settleability and Biological Nutrient Removal in SBR System	LÜ Yong-tao, ZHU Chuan-shou, ZHANG Xu-yang, <i>et al.</i> (3400)
First Extended Anaerobic Phase Enhanced Nitrogen and Phosphorus Removal by Aerobic Granular Sludge Under Intermittent Gradient Aeration	ZHANG Yu-jun, LI Dong, WANG Xin-xin, <i>et al.</i> (3405)
Effect of Rate of Salinity Increase on the Performance and Microbial Community Structure of Sequencing Batch Reactors	GU Bai-ming, JIN Chun-ji, WEN Chun, <i>et al.</i> (3413)
Effects of Cold Acclimation on the Activity of Autotrophic Nitrogen Removal in Granular Sludge and Its Bacterial Population Structure	QIAN Fei-yue, LIU Yu-xin, WANG Jian-fang, <i>et al.</i> (3422)
Stabilization of Heavy Metals in Municipal Sludge Using a Slag-Based Modifying Agent	ZHANG Fa-wen, DONG Ming-kun, CHEN Chen-hui, <i>et al.</i> (3430)
Role of Land Use Changes on Ammonia Emissions from Agricultural Ecosystems in the Yangtze River Delta Region from 2000 to 2018	WANG Wen-jin, WANG Qing, ZHU An-sheng, <i>et al.</i> (3442)
Effects of Wheat Straw Hydrochar and Its Modified Product on Rice Yield and Ammonia Volatilization from Paddy Fields	HAN Chen, HOU Peng-fu, XUE Li-hong, <i>et al.</i> (3451)
Effects of Water and Fertilization Management on CH ₄ and N ₂ O Emissions in Double-rice Paddy Fields in Tropical Regions	LI Jin-qiu, SHAO Xiao-hui, GOU Guang-lin, <i>et al.</i> (3458)
Community Characteristics of Methanogens and Methanogenic Pathways in Salt-tolerant Rice Soil	YANG Yu-hong, HE Hui, MI Tie-zhu, <i>et al.</i> (3472)
Effect of Ferric-carbon Micro-electrolysis on Greenhouse Gas Emissions from Constructed Wetlands	ZHAO Zhong-jing, HAO Qing-ju, TU Ting-ting, <i>et al.</i> (3482)
Screening and Evaluation of Methods for Determining Available Lead (Pb) and Cadmium (Cd) in Farmland Soil	CHEN Ying, LIU Han-yi, LIU Na, <i>et al.</i> (3494)
Spatial Distribution Trends and Influencing Factors of Typical Heavy Metals in Subtropical Alpine Forest Soils: A Case Study from Ailao Mountain in Yunnan Province	LIU Xu, WANG Xun, WANG Ding-yong (3507)
Environmental Background Values of Heavy Metals and Physicochemical Properties in Different Soils in Shenzhen	LIN Ting, ZHAO Shu-hua, XI Xiu-ping, <i>et al.</i> (3518)
Screening of Amendments for Simultaneous Cd and As Immobilization in Soil	ZHOU Si-jiang, LIU Zhen-yan, XIONG Shuang-lian, <i>et al.</i> (3527)
Simultaneous Immobilization of Arsenic, Lead, and Cadmium in Paddy Soils Using Two Iron-based Materials	YUAN Feng, TANG Xian-jin, WU Ji-zi, <i>et al.</i> (3535)
Pollution Characteristics of Organophosphate Esters in Frozen Soil on the Eastern Edge of Qinghai-Tibet Plateau	LIU Li-ya, YIN Hong-ling, JIAN Lin-jie, <i>et al.</i> (3549)
Analysis of Spatial Distribution and Influencing Factors of Nitrogen and Phosphorus Fertilizer Application Intensity in Chengdu Plain	LIU Qi-xin, WANG Chang-quan, LI Bing, <i>et al.</i> (3555)
Different Responses of Soil Dissolved Organic Matter to Different Types of Compost	XI Bei-dou, WANG Yan, TAN Wen-bing, <i>et al.</i> (3565)