

## 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<sup>①</sup>

王 涵<sup>1,2,3</sup>, 刘宗岳<sup>1,2,3</sup>, 窦圣龙<sup>1,2,3</sup>, 刘 畅<sup>1,2,3</sup>, 窦九九<sup>2,3,4</sup>, 刘钰钦<sup>2,3</sup>, 陈 森<sup>2,3\*</sup>

(1 海南大学环境科学与工程学院, 海口 570228; 2 中国热带农业科学院环境与植物保护研究所, 海口 571101; 3 海南儋州热带农业生态系统国家野外科学观测研究站, 海南儋州 571737; 4 华中农业大学资源与环境学院, 武汉 430070)

**摘要:** 以海南省儋州热带农业生态系统国家野外科学观测研究站长期定位试验为依托, 选择不施肥(CK)、单施无机肥(NPK)和有机无机配施(NPKOM)3 种施肥处理模式, 利用多光谱技术(紫外-可见光谱和三维荧光光谱技术)结合平行因子分析(PARAFAC)研究不同施肥模式对热区砖红壤剖面溶解性有机质(DOM)含量及光谱特征的影响。结果表明: 与 CK 处理相比, NPK 和 NPKOM 处理均降低了砖红壤 DOM 的含量。在剖面分布上, 表层(0~20 cm)土壤 DOM 的含量显著高于其他层(20~100 cm)土壤。PARAFAC 分析结果显示, 砖红壤 DOM 主要由陆源类腐殖质(Ex/Em=355 nm/428 nm, C1)、天然富里酸(Ex/Em=420 nm/471 nm, C2)和类蛋白质(Ex/Em=310 nm/346 nm)3 个荧光组分组成, NPK 和 NPKOM 处理均显著增加了 C1 组分和 C2 组分的相对丰度, 而降低了 C3 组分的相对丰度; C1 和 C2 组分的相对丰度均随着土层深度呈现降低趋势, 而 C3 组分则呈现增加趋势。综上, 由于施肥增加农作物残体累积及根系分泌物释放, 加上有机肥自身源 DOM 的释放, 与 CK 处理相比, NPK 和 NPKOM 处理土壤 DOM 腐殖化程度增加而自生源特征降低, NPK 和 NPKOM 处理耕层(0~40 cm)土壤 DOM 的芳香性及疏水性显著低于 CK 处理。

**关键词:** 施肥模式; 砖红壤; 溶解性有机质(DOM); 光谱特性; 剖面特征

中图分类号: S15 文献标志码: A

## Profile Distribution Characteristics of Latosol Dissolved Organic Matter Content and Spectral Properties Under Different Fertilization Treatments

WANG Han<sup>1,2,3</sup>, LIU Zongyue<sup>1,2,3</sup>, DOU Shenglong<sup>1,2,3</sup>, LIU Chang<sup>1,2,3</sup>, DOU Jiujiu<sup>2,3,4</sup>, LIU Yuqin<sup>2,3</sup>, CHEN Miao<sup>2,3\*</sup>

(1 School of Environmental Science and Engineering, Hainan University, Haikou 570228, China; 2 Environment and Plant Protection Institute, Chinese Academy of Tropical Agriculture Sciences, Haikou 571101, China; 3 Hainan Danzhou Tropical Agro-ecosystem Nation Observation and Research Station, Danzhou, Hainan 571737, China; 4 College of Resources and Environment, Huazhong Agricultural University, Wuhan 430070, China)

**Abstract:** This study was conducted at the long-term positioning experimental field of the Hainan Danzhou Tropical Agro-ecosystem Nation Observation and Research Station, China. Three treatments, including no fertilization (CK), inorganic fertilization (NPK), and combined inorganic-organic fertilization (NPKOM), were selected to investigate the impacts of different fertilization patterns on DOM concentration and spectral characteristics in the latosol profile using multiple spectral techniques (ultraviolet-visible spectroscopy, and three-dimensional fluorescence spectroscopy) and parallel factor analysis (PARAFAC). The results showed that compared with CK, DOM contents were reduced under NPK and NPKOM, and DOM contents in the surface layer (0–20 cm) were significantly higher than those in other layers (20–100 cm). PARAFAC analysis results suggested that DOM was mainly composed of three fluorescent components: terrestrial humic-like substances (Ex/Em=355 nm/428 nm, C1), natural fulvic acid (Ex/Em=420 nm/471 nm, C2), and protein-like substances (Ex/Em=310 nm/346 nm, C3). NPK and NPKOM significantly increased the relative abundances of C1 and C2 components but decreased that of C3 component. With the increase of soil depth, the relative abundances of C1 and C2 components decreased, whereas that of C3 component increased. In

<sup>①</sup>基金项目: 中国热带农业科学院国家热带农业科学中心科技创新团队项目(CATASCXTD202411)和中央级公益性科研院所基本科研业务费专项(1630042022001, 1630042023006)资助。

\* 通信作者(cataseppiael@163.com)

作者简介: 王涵(2000—), 女, 海南乐东人, 硕士研究生, 主要研究方向为土壤碳循环。E-mail: 1183310476@qq.com

conclusion, due to fertilization increasing the accumulation of crop residues and the release of root exudates, coupled with the release of DOM from organic fertilizer itself, the humification degree of DOM under NPK and NPKOM increased while the autochthonous source characteristics decreased in contrast with CK. Furthermore, the aromaticity and hydrophobicity of DOM in the cultivated soil layer (0~40 cm) under NPK and NPKOM were significantly lower than those under CK.

**Key words:** Fertilization pattern; Latosol; Dissolved organic matter (DOM); Spectral characteristics; Profile features

土壤是粮食的基础,具有维持土壤肥力、促进生态系统稳定、调节气候变化等多种功能<sup>[1]</sup>。众所周知,人为干扰和管理制度极大地影响了土壤性质和生化过程,特别是在集约化农业过程中。因此,有必要根据不同的农业管理制度对土壤特征进行批判性评估,以设计和实施更可持续的管理措施。热区农田土壤由于高温高湿气候条件以及高复种指数,土壤养分流失严重、肥力低下<sup>[2]</sup>。为提高土壤肥力、提升作物产量,施肥成为该地区的重要管理措施<sup>[3-4]</sup>。一般来说,无机肥(化肥)营养丰富,极易被植物吸收利用,但其可持续时间短<sup>[5]</sup>。为提高作物产量,农户加大化肥施用量,通常达到推荐施肥量的5倍~10倍<sup>[6]</sup>。相比之下,有机肥(如秸秆、生物质炭、禽畜粪便等)可以为植物生长提供持续的养分。然而,过量和长期施用无机或有机肥料均会导致土壤退化,如土壤肥力下降、土壤酸化及微生物失衡,最终导致作物产量下降<sup>[7-8]</sup>。研究表明,有机无机配施能够提高土壤有机碳含量和养分库容、改善土壤结构,实现作物产量与品质的提升,是实现化肥减量增效、提高土壤肥力的重要途径<sup>[9]</sup>。

土壤溶解性有机质(Dissolved organic matter, DOM)是土壤有机碳中最活跃的碳库,是全球碳循环的关键组成之一,在碳循环中发挥着重要作用,极易受农艺措施的影响<sup>[10]</sup>。其中,施肥作为最重要的农艺措施,是影响土壤 DOM 的关键因素<sup>[11]</sup>。已有大量研究表明,施肥会不同程度地影响土壤 DOM 含量<sup>[3]</sup>。然而,目前关于不同施肥模式对土壤 DOM 影响的研究主要集中在表层土壤,对土壤剖面上 DOM 组成、分布及结构特征的变化关注较少。而研究表明,全球一半的土壤有机质储存在深层土壤中,深层土壤中的 DOM 在固碳过程中起着至关重要的作用<sup>[12]</sup>。DOM 最初从降解的植物材料及所施肥料中溶出,或直接源自植物根系分泌,其在土壤中的迁移过程中,性质发生改变<sup>[13]</sup>。在植被到地下水这一关键带中,发生着有机质的产生、降解、再加工、储存和向下运输等过程。这些过程使得土壤 DOM 通过土壤剖面并最终进入地下水时性质发生显著变化,进而影响其生态功能及环境效应。因此,明确不同施肥模式下剖面土壤 DOM 含量、组成成分及结构特征,对理解不同施肥

模式下土壤 DOM 动态变化及其生态环境效益具有重要意义。

由此,本研究基于海南儋州热带农业生态系统国家野外科学观测研究站(简称“儋州站”)长期定位试验,选择不施肥(CK)、单施无机肥(NPK)和有机无机配施(NPKOM)3种施肥模式(耕作等管理措施保持一致),将紫外-可见光吸收光谱(Ultraviolet-visible spectrum, UV-vis)、三维荧光光谱(Three-dimensional fluorescence excitation-emission matrix, 3D-EEMs)等多光谱学技术与平行因子分析(parallel factor analysis, PARAFAC)等统计学分析方法相结合,考察不同施肥模式下热区砖红壤 DOM 含量、荧光组分、分子结构及来源的垂直剖面分布特征,并探讨控制不同施肥模式下 DOM 垂直分布的关键因子及其指示作用,以期为热区农田土壤地力提升提供重要的理论依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 试验地概况

本研究中的长期定位试验田位于海南省儋州市那大镇宝岛新村(19°31' N, 109°34' E)海南儋州热带农业生态系统国家野外科学观测研究站。试验田所在地区属于热带季风气候,年平均温度23.5°C,年均降水量1815.0 mm,年均日照时数1701.6 h,土壤为花岗岩母质风化所形成的砖红壤,由质量占比18.6%的黏土、8.8%的细粉土、6.4%的粗粉砂、14.7%的细砂和51.5%的粗砂组成。

### 1.2 试验设计及土壤样品采集

长期定位试验开始于2017年,本研究选择的3个施肥处理分别为:①对照(CK):不施加任何肥料;②单施无机肥(NPK):N、P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>和K<sub>2</sub>O年施用量分别为345、273和417 kg/hm<sup>2</sup>;③有机无机配施(NPKOM),施用的有机肥为蚯蚓粪,蚯蚓粪施用量2000 kg/hm<sup>2</sup>,N、P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>和K<sub>2</sub>O的施用量与单施无机肥处理一致。每个处理3个重复。试验小区面积为60 m<sup>2</sup>(7.5 m×8 m),所有试验田种植制度均为辣椒-玉米轮作。土壤样品采集于2023年9月,通过五点采样法采集各小区0~20、20~40、40~60、60~80和80~100 cm土层的土壤样品,采集后的土样运回

实验室风干过2 mm筛并保存备用。表1为不同处理土壤作物产量和生物量信息,表2为不同处理土壤基本理化性质。

表1 不同处理作物产量和生物量

Table 1 Crop yields and biomass under different fertilization patterns

| 指标                         | CK        | NPK        | NPKOM      |
|----------------------------|-----------|------------|------------|
| 玉米产量(kg/hm <sup>2</sup> )  | 71 852.57 | 139 334.97 | 308 891.98 |
| 辣椒产量(kg/hm <sup>2</sup> )  | 53 755.82 | 110 533.89 | 177 512.00 |
| 玉米生物量(kg/hm <sup>2</sup> ) | 2 025.3   | 3 207.3    | 3 282.9    |
| 辣椒生物量(kg/hm <sup>2</sup> ) | 1 291.6   | 2 714.7    | 3 185.4    |

表2 不同处理土壤基本理化性质

Table 2 Latosol basic physiochemical properties under different fertilization patterns

| 指标        | CK    | NPK   | NPKOM |
|-----------|-------|-------|-------|
| 全氮(g/kg)  | 0.60  | 0.56  | 0.58  |
| 全磷(mg/kg) | 220   | 440   | 680   |
| 全钾(g/kg)  | 33.46 | 27.46 | 29.71 |
| 有机碳(g/kg) | 5.38  | 5.61  | 7.11  |

### 1.3 土壤理化性质测定

土壤pH采用电位法(FiveEasy Plus, Mettler Toledo, 瑞士)进行测定。土壤DOM的含量采用溶解

性有机碳含量(dissolved organic carbon, DOC)表示,采用水土振荡法测定,即以土水质量比1:5混合后,在振荡器(HZ-9610KB, 华利达, 中国)中避光振荡24 h,振荡后的混合液置于冷冻离心机(Centrifuge 5810R, Eppendorf, 德国)中离心15 min, 将获取的上清液过0.45 μm滤膜后用总有机碳/氮分析仪(Multi N/C 3100/1, 耶拿, 德国)进行测定<sup>[14]</sup>。土壤全氮用半微量凯氏定氮法通过全自动凯氏定氮仪测定(K9860, 海能, 山东)<sup>[15]</sup>。土壤全磷运用碱溶-钼锑抗分光光度法进行测定<sup>[16]</sup>。土壤全钾采用碱熔法进行测定<sup>[17]</sup>。土壤有机碳含量采用重铬酸钾容量法-外加热法和硫酸亚铁滴定法测定<sup>[18]</sup>。

### 1.4 土壤DOM光谱分析

土壤DOM样品的UV-Vis吸光度通过紫外光分光光度计(UV2600, 岛津, 日本)进行测定。检测过程中, 以超纯水作为空白对照, 在200~700 nm波长下以1 nm的间隔扫描获得UV-Vis光谱<sup>[19]</sup>。为进一步表征DOM的光谱特征, 采用UV-Vis光谱参数对DOM的芳香度、分子量、疏水性组分含量等进行表征, 各光谱参数计算方法及含义见表3。

表3 紫外-可见光吸收光谱参数描述

Table 3 Description of ultraviolet-visible absorption spectrum parameters

| 光谱参数                | 计算方法   | 表征含义   |
|---------------------|--|--|
| SUVA <sub>254</sub> | 波长在254 nm处的紫外可见光吸光值与标准化的DOC浓度(mg/L)之比  | 表征DOM的芳香性组分含量 <sup>[20]</sup>  |
| SUVA <sub>260</sub> | 波长在260 nm处的紫外可见光吸光值与标准化的DOC浓度(mg/L)之比  | 表征DOM的疏水组分含量 <sup>[21]</sup>   |
| $E_2/E_3$           | 波长在250 nm与365 nm处紫外可见光吸光值之比  | 表征DOM分子量 <sup>[22]</sup>   |
| $S_R$               | 275~295 nm波段与350~400 nm波段的紫外可见光吸光值进行非线性拟合所得  | 该值与分子量成反比, 即 $S_R$ 值越高, DOM分子量越低。DOM分子量越低, 表明DOM为新产生或外源输入 <sup>[22]</sup>          |
| $E_3/E_4$           | 波长在300 nm与400 nm处紫外可见光吸光值之比  | 表征DOM的来源, $E_3/E_4 > 3.5$ , DOM以富里酸为主, $E_3/E_4 < 3.5$ , DOM以胡敏酸为主 <sup>[22]</sup> |
| $\alpha(355)$       | $\alpha(\lambda) = 2.303 \times D(\lambda) / r$ , 其中, $D(\lambda)$ 为紫外可见光吸光值, $r$ 为光程路径(m) | 表征有色溶解性有机质(chromophoric dissolved organic matter, CDOM)相对浓度 <sup>[23]</sup>        |

DOM样品的三维荧光光谱(3D-EEMs)通过荧光分光光度计(F97 pro, 棱光技术, 中国)测量: 激发波长(Ex)为200~500 nm, 发射波长(Em)为250~550 nm, 扫描间隔均为5 nm, 扫描速度为6 000 nm/min。为消除内滤效应, 所有DOM样品荧光光谱图均扣除以超纯水扫描获得的光谱图, 并进行瑞丽散射去除<sup>[24]</sup>。为进一步表征DOM的光谱特性, 荧光指数(fluorescence index, FI)、腐殖化指数(humification index, HIX)、

自生源指数(biological index, BIX)及新鲜度指数( $\beta/\alpha$ )等荧光光谱参数被用于表征DOM的腐殖化程度、自生源特性等特征, 各光谱参数计算方法及含义见表4。

### 1.5 平行因子分析

利用Matlab 2020a中的DOMFluor工具箱, 对3种施肥处理、3个重复、5个土层共45个土样的DOM的3D-EEMs数据进行PARAFAC建模, 以识别土壤DOM的荧光组分<sup>[29]</sup>。

表 4 荧光光谱参数描述  
Table 4 Description of fluorescence spectrum parameters

| 光谱参数                    | 计算方法   | 表征含义   |
|-------------------------|--|--|
| 荧光指数(FI)                | $Ex=370\text{ nm}$ 时, $Em=450\text{ nm}$ 和 $500\text{ nm}$ 处荧光强度的比值                        | 表征 DOM 来源, 当 $FI>1.9$ 时, DOM 主要为内源性来源; 当 $FI<1.4$ 时, DOM 主要为外源性来源 <sup>[25]</sup>    |
| 腐殖化指数(HIX)              | $Ex=254\text{ nm}$ 时, $Em$ 在 $435\sim480\text{ nm}$ 和 $300\sim345\text{ nm}$ 之间的荧光强度积分值的比值 | 表征 DOM 的腐殖化程度 <sup>[26]</sup>  |
| 自生源指数(BIX)              | $Ex=310\text{ nm}$ 时, $Em=380\text{ nm}$ 和 $430\text{ nm}$ 处荧光强度的比值                        | 表征 DOM 的自身来源贡献情况, 当 $BIX>0.8$ 时, 表示自生源显著; 当 $BIX<0.8$ 时, 表示自生源不明显 <sup>[27]</sup>    |
| 新鲜度指数( $\beta/\alpha$ ) | $Ex=310\text{ nm}$ 时, $Em=380\text{ nm}$ 处的荧光强度与 $Em=420\sim435\text{ nm}$ 区间下最大荧光强度的比值    | 表征新产生的 DOM 占总 DOM 的比例; 其中 $\beta$ 代表新近产生的 DOM, $\alpha$ 代表降解度较高的 DOM <sup>[28]</sup> |

## 1.6 数据处理与统计分析

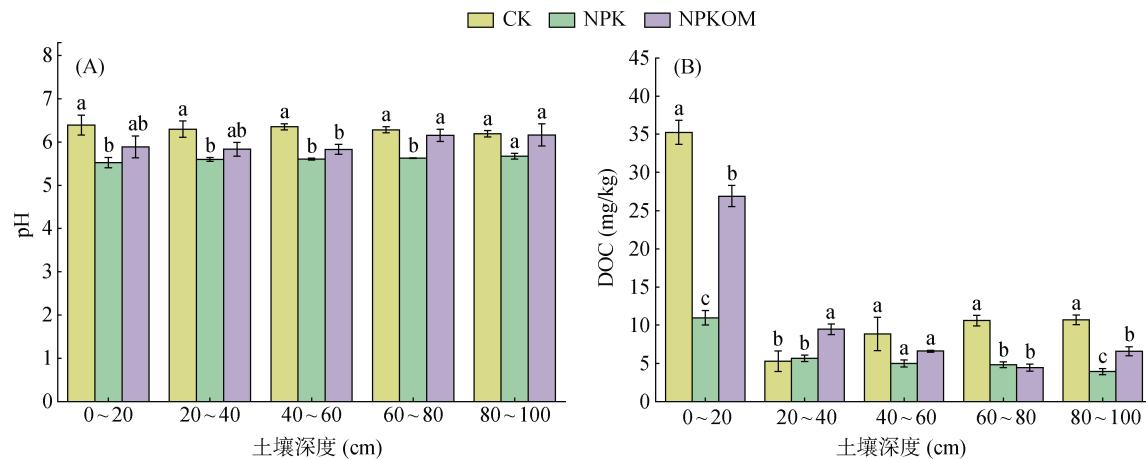
利用单因素方差分析方法分析不同施肥模式下土壤 DOM 光谱特征指标和相同施肥模式下不同土层 DOM 光谱特征指标的差异显著性( $P<0.05$ ); 运用 Pearson 相关系数法分析土壤 DOM 样品光谱特征指标与土壤理化性质间的相关性。所用统计分析均采用 SPSS 27 软件进行, 绘图均采用 Origin 2021 软件进行。

## 2 结果与分析

### 2.1 不同施肥模式下砖红壤 DOM 含量垂直分布特征

由图 1A 可知, 热区农田砖红壤呈微酸性( $pH 6.3$ ), 施肥降低砖红壤  $pH$ , 尤其是单施无机肥。不

同施肥模式下, 砖红壤  $pH$  随土壤深度变化趋势不一致, CK 处理土壤  $pH$  随土壤深度增加呈现微弱降低趋势, 而 NPK 和 NPKOM 处理土壤  $pH$  随土壤深度增加呈现增加的趋势。不同施肥模式下砖红壤 DOC 含量的垂直变化如图 1B 所示。与 CK 处理相比, NPK 及 NPKOM 处理均降低了土壤 DOC 含量, 其中 NPK 处理降低更为显著。所有处理中, 表层土壤( $0\sim20\text{ cm}$ )DOC 含量显著高于下层土壤( $20\sim100\text{ cm}$ )。值得注意的是, CK 处理土壤中 DOC 含量在  $20\sim100\text{ cm}$  内呈现逐渐增加的趋势, 而 NPK 和 NPKOM 处理呈现逐渐降低的趋势。此外, 不同施肥处理下砖红壤同一深度 DOC 含量存在不同的变化趋势。



(图中不同小写字母表示同一土层不同施肥处理之间差异显著( $P<0.05$ ); 下同)

图 1 不同施肥模式下砖红壤  $pH$  和 DOC 含量  
Fig. 1 Latosol pH and DOC contents under different fertilization patterns

### 2.2 不同施肥模式下砖红壤 DOM 紫外-可见光吸收光谱特性

通常,  $SUVA_{254}$  值用以表征 DOM 的芳香性组分含量<sup>[20]</sup>,  $SUVA_{260}$  值用以表征 DOM 中疏水组分含量, 其值越大表明 DOM 中疏水组分比例越高<sup>[21]</sup>。由图

2A 及 2B 可知, 不同施肥模式下砖红壤 DOM 的  $SUVA_{254}$  和  $SUVA_{260}$  值变化趋势一致。随着土壤深度的增加, CK 处理中  $SUVA_{254}$  和  $SUVA_{260}$  值呈下降趋势, 而在 NPK 和 NPKOM 处理中均呈波动上升趋势。在  $0\sim20\text{ cm}$  浅层土壤中, CK 处理土壤 DOM 的芳香

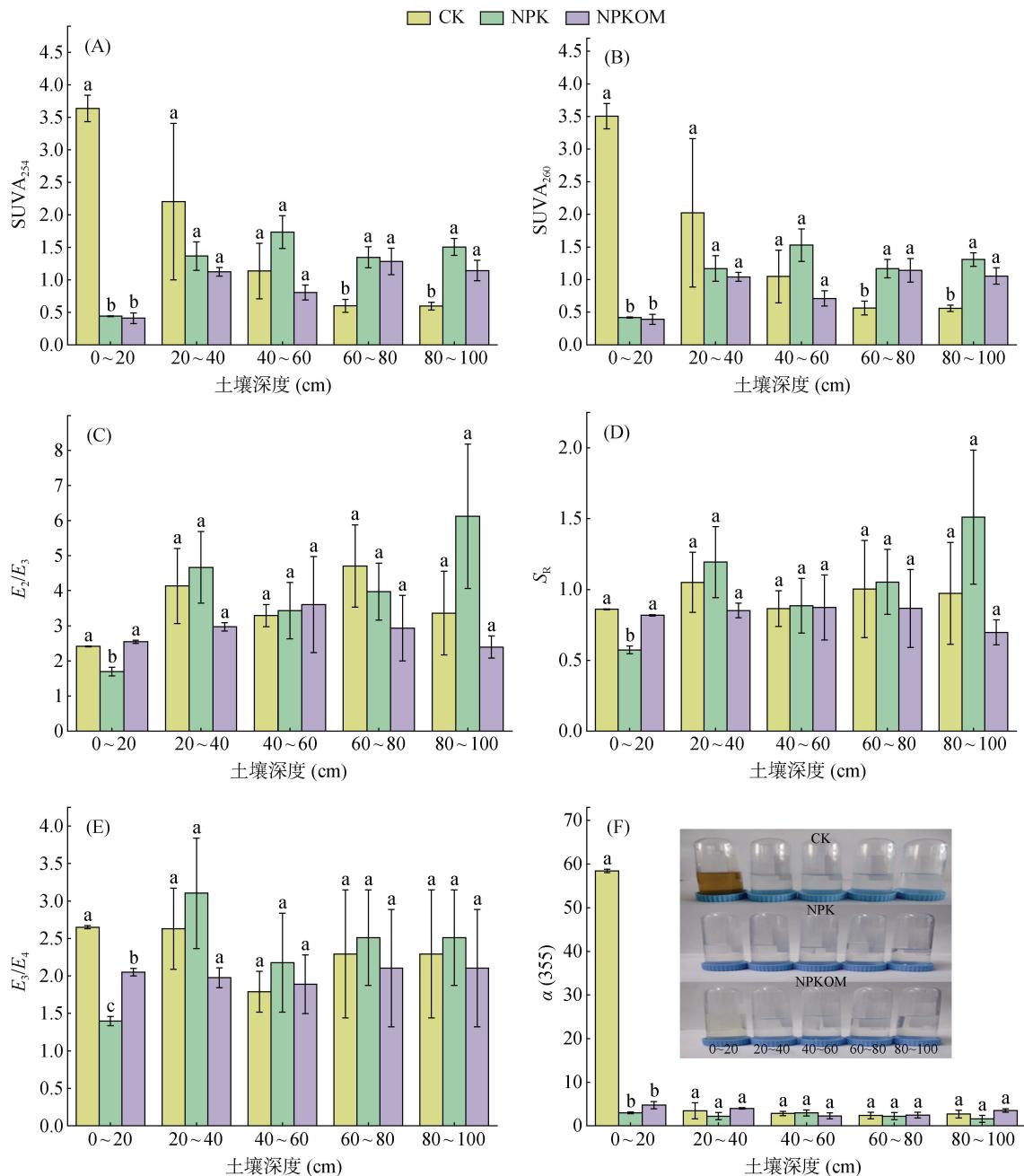


图 2 不同施肥模式下砖红壤 DOM 的紫外光谱参数  
Fig. 2 UV-vis spectral parameters of latosol DOM under different fertilization patterns

性组分及疏水组分含量显著高于 NPK 和 NPKOM 处理。然而, 相比于 0~20 cm 层, NPK 和 NPKOM 处理中 20~40 cm 土层土壤 DOM 的 SUVA<sub>254</sub> 和 SUVA<sub>260</sub> 值增加, 表明其芳香性和疏水组分含量增加; 随着深度继续增加至(60~100 cm), NPK 和 NPKOM 处理土壤中 DOM 的 SUVA<sub>254</sub> 和 SUVA<sub>260</sub> 值显著高于 CK 处理。

$E_2/E_3$  和  $S_R$  值均用以表征 DOM 分子量大小, 其中  $S_R$  值与 DOM 分子量成反比<sup>[22]</sup>。由图 2C 及 2D 可

知, CK 及 NPK 处理中土壤 DOM 的  $E_2/E_3$  和  $S_R$  值随着土壤深度增加呈波动上升趋势, 而 NPKOM 处理中土壤 DOM 的  $E_2/E_3$  和  $S_R$  值随土壤深度增加则呈先升后降的趋势(在中间层 40~60 cm 处呈现最大值)。该结果表明, CK 和 NPK 处理土壤 DOM 分子量随土壤深度增加呈现降低趋势, 而 NPKOM 处理土壤中 DOM 分子量在 40~60 cm 处最大。

$E_3/E_4$  可以表征 DOM 的来源, 该值 $>3.5$  表示 DOM 是以富里酸为主的来源, 该值 $<3.5$  表示 DOM

是以胡敏酸为主的来源<sup>[22]</sup>。由图 2E 可知, 不同施肥模式土壤 DOM 的  $E_3/E_4$  变化范围处于 1.4 ~ 3.1, 表明土壤 DOM 中荧光组分主要以胡敏酸为主。值得注意的是, 在表层 0 ~ 20 cm 土壤中, NPK 处理的  $E_3/E_4$  值显著低于 CK 和 NPKOM 处理, 而在其他层土壤中该值表现为高于 CK 和 NPKOM 处理的趋势。总体上, NPKOM 处理土壤中 DOM 的  $E_3/E_4$  值低于 CK 处理。

$\alpha(355)$ 通常用来表示有色溶解性有机质 CDOM 的相对浓度<sup>[23]</sup>。由图 2F 可知, CK 处理表层(0 ~ 20 cm)土壤 DOM 的  $\alpha(355)$ 值显著高于其他样品, 表明其 CDOM 相对浓度较高, 该结果与不同处理土壤样品 DOM 提取液显示结果一致(CK 处理表层土壤 DOM 提取液呈棕褐色, 而其他样品几乎呈无色透明)。总体上, CDOM 含量随土壤深度增加呈现降低趋势。

### 2.3 不同施肥模式下砖红壤 DOM 三维荧光光谱特征

FI 反映 DOM 的来源情况, FI>1.9 表示微生物降解的内源性来源; FI<1.4 表示陆地输入的外源性来源; 1.4<FI<1.9 表示内源和外源共同贡献<sup>[25]</sup>。由图 3A 可知, CK 处理表层(0 ~ 20 cm)土壤 DOM 的 FI

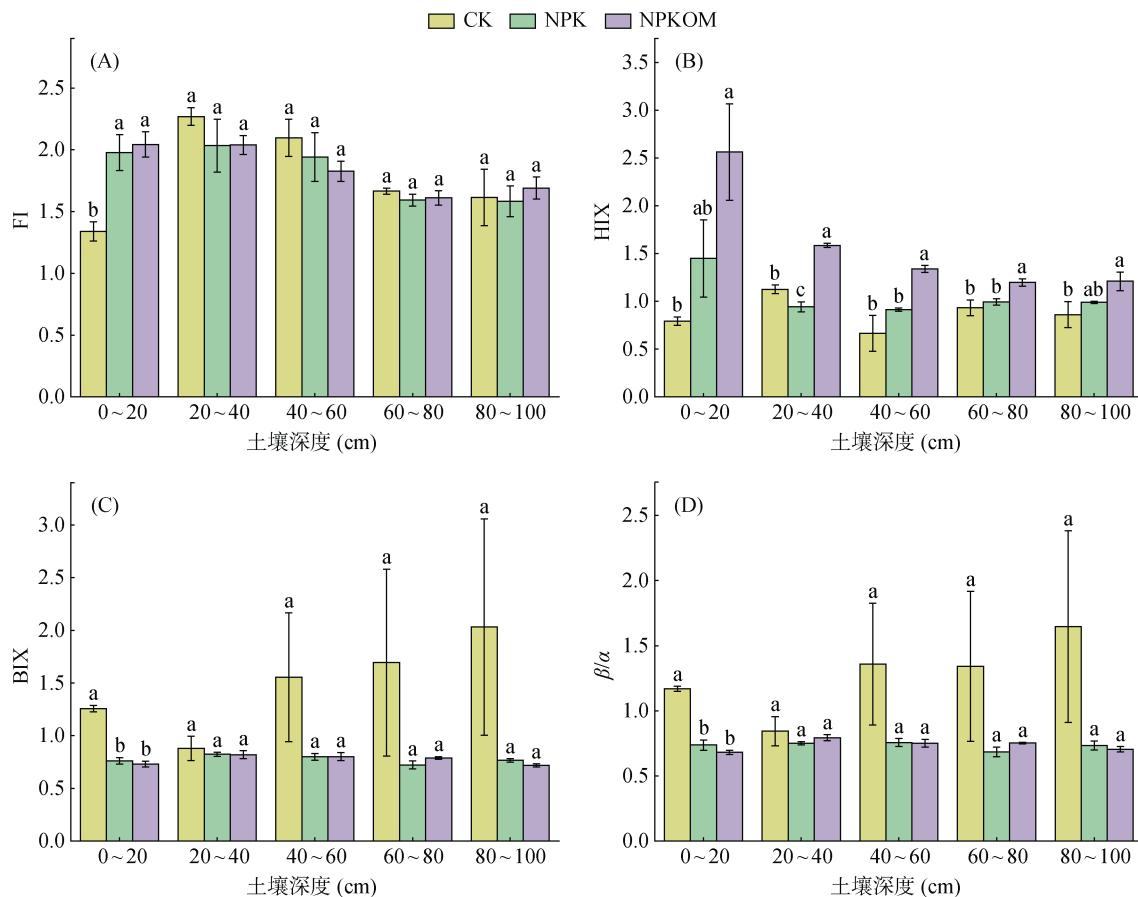


图 3 不同施肥模式下砖红壤 DOM 的荧光光谱参数  
Fig. 3 Fluorescence spectral parameters of latosol DOM under different fertilization patterns

值低于 1.4, 表明其以外源性来源为主, 在 20 ~ 100 cm 土层土壤 DOM 的内源性特征在 20 ~ 40 cm 处最为显著, 且随着土壤深度增加其逐渐转化为内外源共同作用为主; 而 NPK 和 NPKOM 处理土壤 DOM 由表层的内源性来源随着土壤深度增加逐渐转化为内外源共同作用, 但主要以内源为主。

HIX 用以表征 DOM 的腐殖化程度<sup>[26]</sup>。如图 3B 所示, 施肥促进了土壤 DOM 腐殖化, 尤其是 NPKOM 处理。随着土壤深度增加, NPK 和 NPKOM 处理土壤 DOM 的腐殖化程度呈现降低趋势, 而 CK 处理土壤 DOM 腐殖化程度呈现波动增加趋势。

BIX 用以表征 DOM 的自身来源贡献情况, 当 BIX>0.8 时, 表示自生源显著; 当 BIX<0.8 时, 表示自生源不显著<sup>[27]</sup>。不同施肥模式土壤 DOM 的 BIX 值变化趋势如图 3C 所示, CK 处理土壤 DOM 的 BIX 值随着土壤深度增加呈先降后升的趋势, 且值均高于 0.8, 表明其自生源显著。然而, NPK 和 NPKOM 处理土壤 DOM 的 BIX 值变化较小且值均小于 0.8, 表明 NPK 和 NPKOM 处理土壤 DOM 自生源特征不显著。 $\beta/\alpha$  为用以表征新生成的 DOM 占总 DOM 的比

例<sup>[28]</sup>。如图 3D 所示, 不同施肥处理模式下土壤  $\beta/\alpha$  值变化趋势与 BIX 值变化一致, 表明施肥降低了土壤中新生成 DOM 的相对丰度。

#### 2.4 不同施肥模式下砖红壤 DOM 荧光组分特征

将所有处理土壤 DOM 样品的 3D-EEMs 矩阵数据进行 PARAFAC 分析, 共鉴定出 3 个荧光组分, 分别为 2 个类腐殖质组分(C1 和 C2)和 1 个类蛋白组分(C3)(表 5 和图 4): C1 组分的激发波长和发射波长分别为 355 nm 和 428 nm, 为陆源类腐殖质<sup>[30]</sup>; C2 组分的激发波长和发射波长分别为 420 nm 和 471 nm, 为天然土壤富里酸<sup>[31]</sup>; C3 组分的激发波长和发射波长分别为 310 nm 和 346 nm, 为微生物源类蛋白质(类色氨酸)<sup>[32]</sup>。

不同施肥模式下土壤 DOM 中 EEM-PARAFAC

组分的荧光强度及相对丰度如图 5 所示。C1 组分的荧光强度最大, 其次为 C3 组分, C2 组分的荧光强度最低, CK 处理中所有组分的变化趋势均随土壤深度的增加呈现下降的趋势, 而 NPK 处理中随土壤深度的增加呈现先升后降的趋势, NPKOM 处理中 C1 和 C2 组分变化趋势一致, 均随土壤深度增加呈现先降后升的趋势, 而 C3 组分呈现波动上升的趋势。施肥显著增加了陆源类腐殖质 C1 组分(57.29% ~ 71.16%)及天然土壤富里酸 C2 组分(11.84% ~ 27.65%)的相对丰度, 显著降低了类蛋白组分 C3 的相对丰度(3.50% ~ 29.75%)。总体上, 不同施肥模式下土壤 DOM 的类腐殖质组分 C1 和 C2 组分的相对丰度随土壤深度呈现降低趋势, 而类蛋白组分 C3 相对丰度呈现逐渐增加趋势。

表 5 PARAFAC 分析得到的 3 种荧光组分位置及来源鉴别  
Table 5 Locations and source identifications of three fluorescent components obtained by PARAFAC

| 组分 | Ex/Em         | 物质组分           | 参考文献中对应组分 Ex/Em               |
|----|---------------|----------------|-------------------------------|
| C1 | 355 nm/428 nm | 陆源类腐殖质         | 350 nm/424 nm <sup>[30]</sup> |
| C2 | 420 nm/471 nm | 天然土壤富里酸        | 405 nm/490 nm <sup>[31]</sup> |
| C3 | 310 nm/346 nm | 微生物源类蛋白质(类色氨酸) | 300 nm/359 nm <sup>[32]</sup> |

#### 2.5 土壤 DOM 含量与其光谱特征参数指标的相关性

不同施肥模式下土壤 DOM 含量及其光谱参数特征的 Pearson 相关性分析结果如图 6 所示。土壤 pH 与类蛋白组分 C3( $R^2=0.69$ ,  $P \leq 0.01$ )和新鲜度指数  $\beta/\alpha$ ( $R^2=0.65$ ,  $P \leq 0.01$ )呈显著正相关; 土壤 DOC 含量与 CDOM 含量  $\alpha(355)$  值( $R^2=0.80$ ,  $P \leq 0.001$ )和 3 个荧光组分均呈显著正相关(C1:  $R^2=0.55$ ,  $P \leq 0.05$ ; C2:  $R^2=0.91$ ,  $P \leq 0.001$ ; C3:  $R^2=0.53$ ,  $P \leq 0.05$ )。芳香度指数 SUVA<sub>254</sub> 和 SUVA<sub>260</sub> 均与 CDOM 含量  $\alpha(355)$ ( $R^2=0.79$ ,  $P \leq 0.001$ ;  $R^2=0.77$ ,  $P \leq 0.001$ )、天然土壤富里酸组分 C2( $R^2=0.53$ ,  $P \leq 0.05$ ;  $R^2=0.55$ ,  $P \leq 0.05$ )和类蛋白组分 C3( $R^2=0.66$ ,  $P \leq 0.01$ ;  $R^2=0.65$ ,  $P \leq 0.01$ )呈显著正相关。 $S_R$  与  $E_2/E_3$  ( $R^2=0.97$ ,  $P \leq 0.001$ )和  $E_3/E_4$  ( $R^2=0.89$ ,  $P \leq 0.001$ )均呈显著正相关; 类腐殖质组分 C1 与天然土壤富里酸组分 C2 ( $R^2=0.78$ ,  $P \leq 0.001$ )和腐殖化指数 HIX( $R^2=0.70$ ,  $P \leq 0.01$ )均呈显著正相关, 而与自生源指数 BIX 呈显著负相关( $R^2=-0.53$ ,  $P \leq 0.05$ ); 类蛋白组分 C3 组分与新鲜度指数  $\beta/\alpha$  呈显著正相关( $R^2=0.59$ ,  $P \leq 0.05$ ), 而与腐殖化指数 HIX 呈显著负相关( $R^2=-0.52$ ,  $P \leq 0.05$ )。

### 3 讨论

#### 3.1 施肥模式对热区砖红壤 DOM 含量的影响

DOM 是土壤有机质中高活性组分, 在土壤养分生物地球化学循环、污染物迁移转化、土壤矿物质活化及肥力保持等过程中发挥着重要作用<sup>[11]</sup>。施肥作为重要的农艺措施, 是影响土壤 DOM 的关键因素, 可改变土壤 DOM 的含量和性质。张方方等<sup>[33]</sup>研究表明, 长期施氮肥可显著提高 0 ~ 40 cm 土层土壤 DOM 的含量。谢军等<sup>[34]</sup>研究发现, 长期施用无机肥对土壤 DOM 的含量影响较小, 有机无机配施则显著提高耕层(0 ~ 40 cm)土壤 DOM 的含量。然而, 本研究结果显示, 单施无机肥和有机无机配施处理均降低了热区砖红壤剖面中 DOM 的含量(图 1B)。其原因可能与土壤类型、气候条件以及肥料施用类型有关<sup>[34]</sup>。首先, 海南岛具有典型的热带季风气候, 频繁降雨导致土壤 DOM 向下淋失严重<sup>[35]</sup>。近年来, 海南极端气候事件频率和强度的普遍上升<sup>[36]</sup>, 使得该地区土壤 DOM 向下淋失更为严重。此外, 海南岛热区土壤富含铁矿物, 高温高湿气候使得该地区土壤氧化还原状况波动频繁, 促进了土壤 DOM 的矿化作用<sup>[37]</sup>。Chen 等<sup>[37]</sup>研究表明, 湿润土壤中铁矿物介导的有机碳分

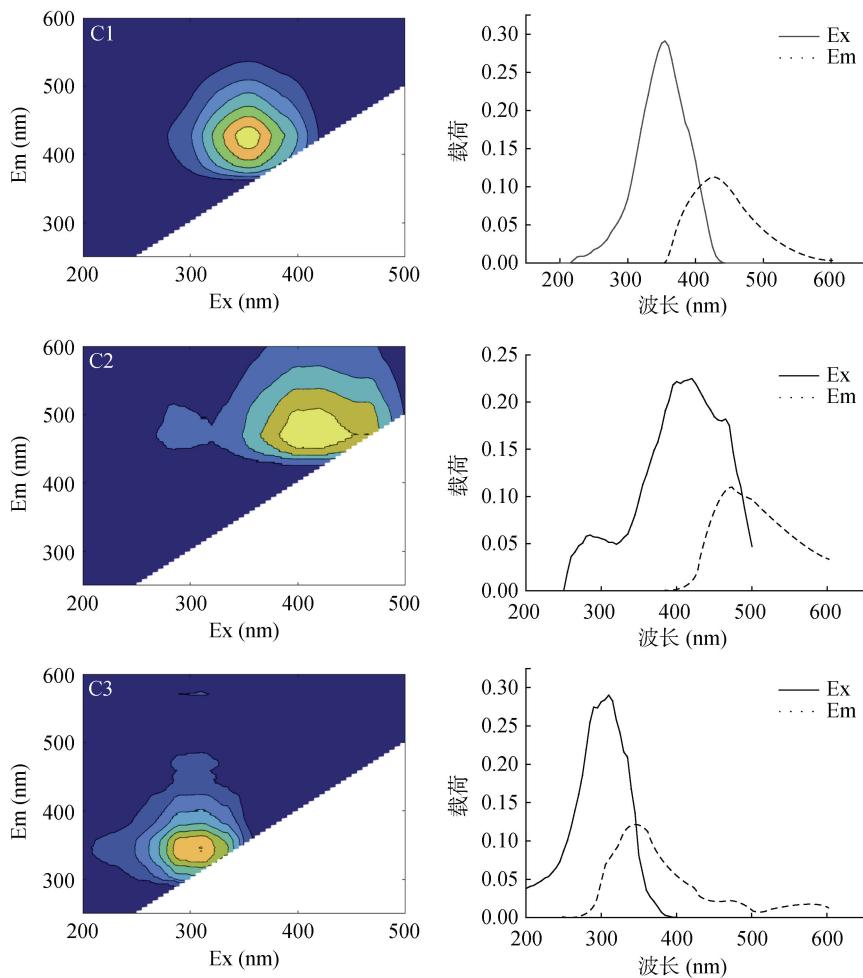


图 4 PARAFAC 分离出的 3 个荧光组分及其激发/发射载荷  
Fig. 4 Three fluorescent components isolated by PARAFAC and their excitation/emission loads

解可抵消其保护作用。由表 1 可知, 施肥处理土壤作物产量及生物量显著高于对照土壤, 表明施肥处理土壤作物根系生长、根系分泌物及微生物活性显著强于对照土壤。因此, 施肥可通过显著促进土壤微生物活性和作物生长(表 1)而加剧土壤中 DOM 的消耗和分解, 并促进 DOM 向非溶解性有机碳库的转化<sup>[38]</sup>, 施肥处理土壤中 SOC 含量较对照土壤增加也进一步证实了该现象(表 2)。同时, 施肥处理作物生长茂盛及根系发达可促进土壤孔隙结构发展, 进而增加孔隙水与土壤颗粒接触面积而强化 DOM 的淋失。进一步地, 发达的土壤孔隙结构可改变土壤颗粒微环境, 增加其持水量及含氧量, 进而强化 DOM 的矿化作用。与前人研究结果<sup>[39]</sup>一致的是, 与单施无机肥相比, 有机无机配施可以显著提升热区砖红壤 DOM 含量, 尤其是耕层(0~40 cm)土壤(图 1B)。这主要是由于: ①有机肥含有大量的可溶性有机物和具有易分解的特点, 进而增加土壤 DOM 含量; ②有机无机配施更能提高

微生物活性, 加快土壤有机化合物的分解和转化, 促进 DOM 的生成; ③有机无机配施可改善土壤理化性质, 增加微生物活性、作物凋落物和根系分泌物, 产生大量 DOM。然而, 由于有机肥施用及大量的作物残茬主要发生在耕层土壤, 使得有机无机配施处理中耕层土壤 DOM 含量较单施无机肥处理显著增加<sup>[40]</sup>。在剖面上, 砖红壤 DOM 含量由表层(0~20 cm)开始显著降低, 该结果与 Peng 等<sup>[41]</sup>研究结果一致。该现象受土壤剖面上作物根系和残茬的处置分布、淋溶过程、矿物黏土吸附和微生物降解程度的综合影响<sup>[42]</sup>。例如, 表层土壤中积累了丰富的有机质, 同时微生物分解了大量的植物凋落物、根系等腐烂物质, 释放出大量 DOM<sup>[43]</sup>。

### 3.2 施肥模式对热区砖红壤 DOM 结构特征的影响

由于海南岛高温高湿气候, 土壤风化严重, 热区砖红壤 DOM 主要由结构复杂的大分子类腐殖质(C1)及天然土壤富里酸(C2)化合物组成(36.20%~

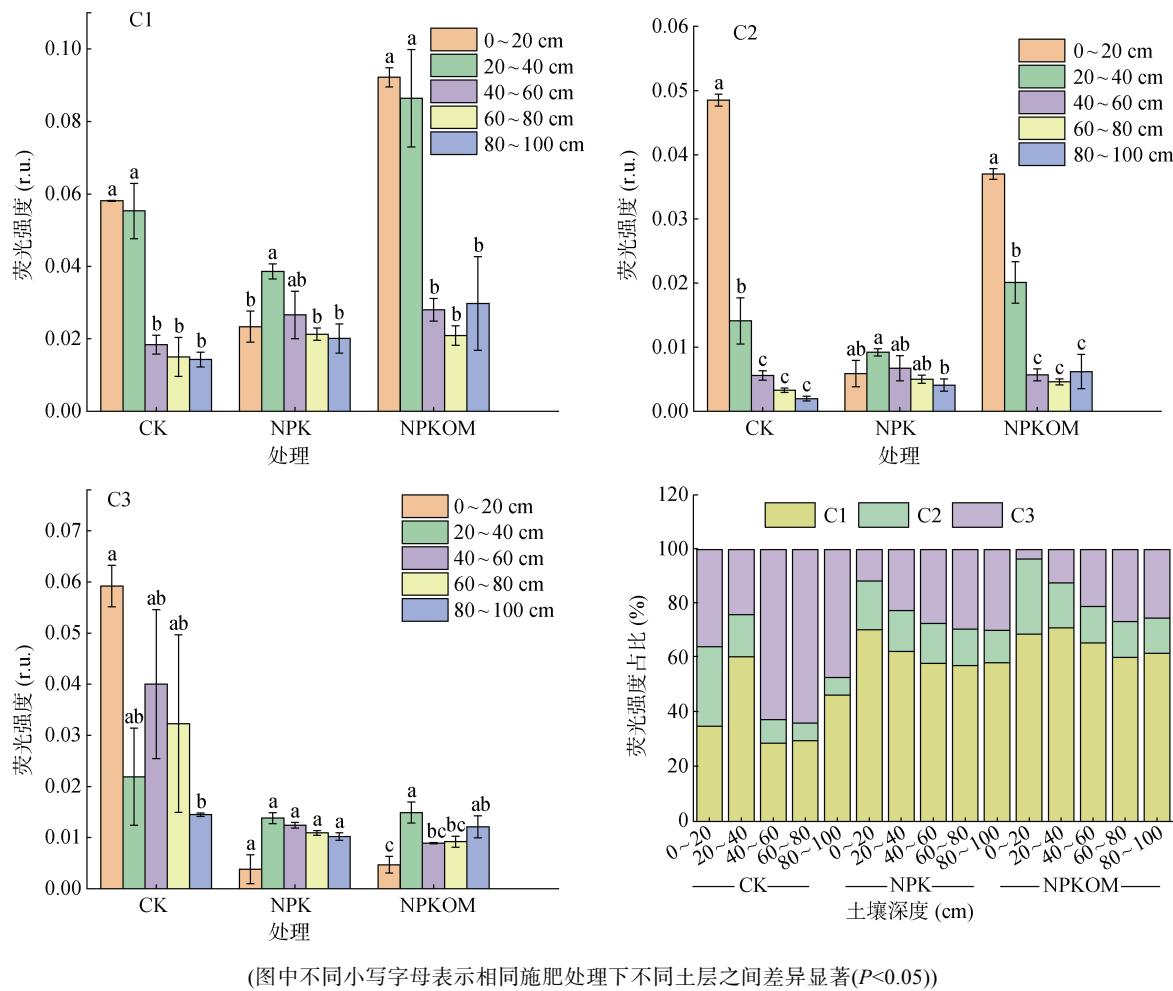
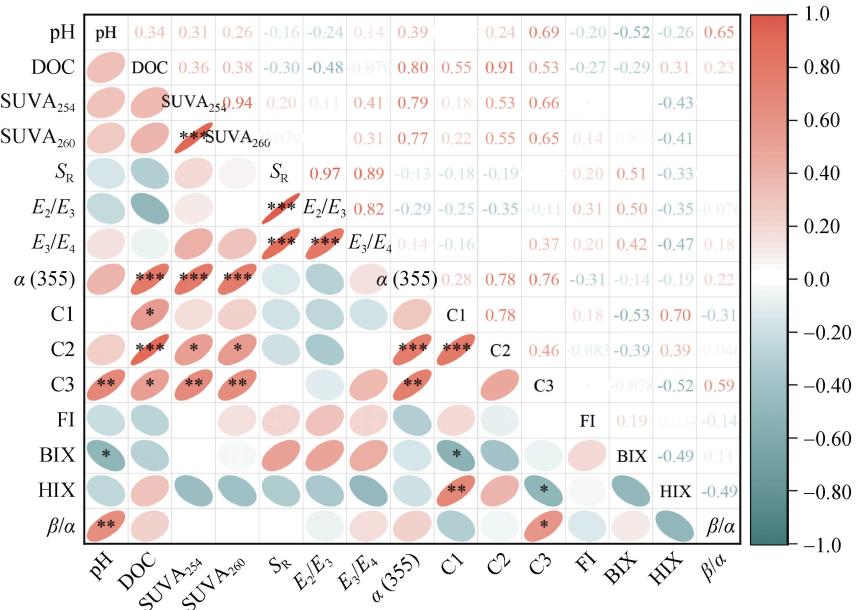


图 5 不同施肥模式下砖红壤 DOM 荧光组分强度及相对丰度

Fig. 5 Intensities and relative abundance of fluorescent components of latosol DOM under different fertilization patterns



(\*、\*\*、\*\*\*分别表示在  $P<0.05$ 、 $P<0.01$ 、 $P<0.001$  水平显著相关；每个椭圆的偏向及颜色表示对应行与列的相关性，椭圆偏向为右表示正相关，偏向为左表示负相关，且椭圆越扁颜色越红表示正相关性越强，椭圆越扁颜色越绿表示负相关性越强)

图 6 砖红壤 DOM 含量与其光谱参数的 Pearson 相关性分析

Fig. 6 Pearson correlation analysis between DOM contents and spectral parameters

96.50%)(图 6)。与不施肥处理相比,单施无机肥和有机无机配施处理均增加了热区砖红壤中陆源类腐殖酸组分 C1 的相对丰度,而降低了微生物源类蛋白组分 C3 的相对丰度(图 5)。如前所述,施肥可促进作物生长(表 1),产生更多的凋落物及根系分泌物,这些化合物在微生物作用下转化为腐殖酸类化合物,而外源增施的有机肥还能够直接提高 DOM 的陆源性。同时,这些外源腐殖质也使得施肥处理砖红壤 DOM 的腐殖化程度增加,而自生源特性降低(图 3C),尤其是有机无机配施处理。类腐殖酸组分 C1 与 HIX 指数呈显著正相关关系( $R^2=0.70, P\leq 0.01$ )(图 6),表明砖红壤 DOM 的腐殖化程度主要由 C1 组分贡献。类蛋白组分 C3 与新鲜度指数  $\beta/\alpha$  呈显著正相关( $R^2=0.59, P\leq 0.05$ )(图 6),进一步表明了其微生物来源特性。随着土壤深度增加,C1 和 C2 组分相对丰度呈降低趋势,而类蛋白组分 C3 相对丰度呈增加趋势(图 5),该结果与 Han 等<sup>[29]</sup>研究结果一致。以往研究表明,微生物多样性随着土壤深度的增加而降低,且上层土壤群落稳定性较高,而深层土壤群落稳定性则相反,导致微生物对深层土壤中类蛋白小分子吸收及高分子量腐殖质的释放减少<sup>[44]</sup>。通常情况下,施用有机肥能使 DOM 的芳香度和腐殖化程度均增加<sup>[34]</sup>,然而,本研究中增施有机肥降低了表层(0~40 cm)土壤 DOM 的芳香度(SUVA<sub>254</sub>、SUVA<sub>260</sub>)(图 2A、2B)。Angst 等<sup>[45]</sup>研究发现,施肥处理可显著促进作物产量和生物量增加,提升土壤中凋落物含量,改变微生物群落结构,促进芳烃类化合物向不可溶性有机质转变,施肥处理促进土壤固碳也进一步证明了该现象(表 2)。此外,陈丽铭等<sup>[46]</sup>研究发现,有机肥处理土壤中 DOM 的烯烃或多糖类碳先于芳香性或羧酸碳发生分解反应,导致芳香类化合物更容易向下迁移至底层土壤。此外,底层土壤中富含铁铝矿物,这些矿物更易吸附芳香类化合物<sup>[47]</sup>,进一步促进了底层土壤中芳香类化合物相对丰度的增加。施肥处理深层土壤中 DOM 的 SUVA<sub>254</sub>、SUVA<sub>260</sub>值显著高于不施肥处理进一步证明了该现象(图 2A、2B)。然而,施用无机肥降低 DOM 的芳香性和疏水性,主要是因为无机肥中的磷肥可以降低 DOM 的结构复杂性,提高 DOM 的生物可降解性,该现象在较高的无机肥施用水平下更为显著<sup>[48]</sup>。此外,不施肥处理表层 0~20 cm 土壤中 CDOM 含量( $\alpha(355)$ 值)显著高于施肥处理(图 2F),这可能与表层植物覆盖度有关<sup>[49]</sup>。施肥处理可促进土壤中农作物生长(表 1),降低表层土壤光照强度,进而减少 CDOM 含量的生成<sup>[50]</sup>。相关性结果显示,

$\alpha(355)$ 值与 C2 和 C3 组分呈显著正相关(图 6),表明其主要由天然类富里酸和微生物源类蛋白物质贡献。

## 4 结论

1) 与不施肥处理相比,单施无机肥和有机无机配施均降低了砖红壤 DOM 含量,其中单施无机肥处理土壤中降低更为显著。表层(0~20 cm)砖红壤 DOM 的含量最高,且土壤 DOM 的含量随土壤深度增加呈现显著降低趋势。

2) 不同施肥模式下砖红壤 DOM 共解析出 3 个荧光组分,分别为陆源类腐殖酸(C1)、天然土壤富里酸(C2)和类蛋白(C3),C1 组分占主体地位,C3 组分次之,C2 组分占比最小。相比于不施肥处理,单施无机肥和有机无机配施处理均提升了砖红壤 DOM 中 C1 和 C2 组分的相对丰度,降低了 C3 组分的相对丰度。随着土壤剖面深度的增加,C1 和 C2 组分相对丰度逐渐降低,而 C3 组分相对丰度逐渐增加。

3) 光谱特征参数分析结果表明,相比于不施肥处理,单施无机肥和有机无机配施处理均强化了砖红壤 DOM 的腐殖化程度,降低了其自生源特征。总体上,砖红壤 DOM 的腐殖化程度随土壤深度增加呈现逐渐降低趋势,不施肥处理表层(0~20 cm)土壤 DOM 的芳香性及疏水性显著高于其他处理,而其他土层(60~100 cm)DOM 的芳香性与疏水性与之相反。

## 参考文献:

- [1] Jing X, Sanders N J, Shi Y, et al. The links between ecosystem multifunctionality and above- and belowground biodiversity are mediated by climate[J]. *Nature Communications*, 2015, 6: 8159.
- [2] 黄锐. 化肥不同减量配施有机肥对热带地区菜地土壤生态系统多功能性的影响[D]. 贵阳: 贵州大学, 2022.
- [3] Han P F, Zhang W, Wang G C, et al. Changes in soil organic carbon in croplands subjected to fertilizer management: A global meta-analysis[J]. *Scientific Reports*, 2016, 6: 27199.
- [4] McDonald R I, Weber K F, Padowski J, et al. Estimating watershed degradation over the last century and its impact on water-treatment costs for the world's large cities[J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2016, 113(32): 9117–9122.
- [5] Hernández T, Chocano C, Moreno J L, et al. Towards a more sustainable fertilization: Combined use of compost and inorganic fertilization for tomato cultivation[J]. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 2014, 196: 178–184.
- [6] 张白鸽. 华南露地苦瓜生产体系的氮素调控[D]. 北京: 中国农业大学, 2016.

- [7] Dai Z M, Su W Q, Chen H H, et al. Long-term nitrogen fertilization decreases bacterial diversity and favors the growth of Actinobacteria and Proteobacteria in agro-ecosystems across the globe[J]. *Global Change Biology*, 2018, 24(8): 3452–3461.
- [8] 刘新宇, 巨晓棠, 张丽娟, 等. 不同施氮水平对冬小麦季化肥氮去向及土壤氮素平衡的影响[J]. *植物营养与肥料学报*, 2010, 16(2): 296–303.
- [9] 苗运彩, 何铁虎, 袁俊吉, 等. 有机肥部分替代化肥对河套灌区土壤有机碳和向日葵产量的影响[J]. *北方农业学报*, 2024, 52(1): 46–54.
- [10] D'Andrilli J, Silverman V, Buckley S, et al. Inferring ecosystem function from dissolved organic matter optical properties: A critical review[J]. *Environmental Science & Technology*, 2022, 56(16): 11146–11161.
- [11] 周悦, 褚克坚, 苏良湖, 等. 农艺措施对土壤可溶性有机质的影响研究进展[J]. *土壤*, 2022, 54(3): 437–445.
- [12] Henneron L, Balesdent J, Alvarez G, et al. Bioenergetic control of soil carbon dynamics across depth[J]. *Nature Communications*, 2022, 13(1): 7676.
- [13] 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.
- [14] 申慧彦, 徐华健, 王嘉富, 等. 湖滨带土壤长期淹水释放 DOM 与抗生素的猝灭作用[J]. *环境科学学报*, 2024, 44(1): 366–376.
- [15] 杨冰, 孟祥海, 王佰成, 等. 不同耕作及秸秆还田方式对土壤养分及微生物生物量碳氮的影响[J]. *黑龙江农业科学*, 2024(7): 24–29.
- [16] 张兰, 刘济明, 陈敬忠, 等. 不同产地米槁果实营养成分及其与土壤养分和酶活性的相关性研究[J]. *土壤通报*, 2022, 53(4): 939–947.
- [17] 尚天翠, 刘影, 赵玉. 新疆野生樱桃李林自然保护区不同海拔梯度土壤养分特征及相关性分析[J]. *中国农业科技报*, 2018, 20(8): 119–127.
- [18] 李阳, 徐小惠, 孙伟, 等. 不同形态和水平的氮添加对内蒙古草甸草原土壤净氮矿化潜力的影响[J]. *植物生态学报*, 2019, 43(2): 174–184.
- [19] Green S A, Blough N V. Optical absorption and fluorescence properties of chromophoric dissolved organic matter in natural waters[J]. *Limnology and Oceanography*, 1994, 39(8): 1903–1916.
- [20] Weishaar J L, Aiken G R, Bergamaschi B A, et al. Evaluation of specific ultraviolet absorbance as an indicator of the chemical composition and reactivity of dissolved organic carbon[J]. *Environmental Science & Technology*, 2003, 37(20): 4702–4708.
- [21] 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.
- [22] 罗会龙, 陈娟, 张云慧, 等. 改良剂调控下水稻镉累积和土壤溶解性有机质光谱特征的响应[J]. *环境科学*, 2022, 43(6): 3315–3327.
- [23] 李帅东, 姜泉良, 黎烨, 等. 环滇池土壤溶解性有机质(DOM)的光谱特征及来源分析[J]. *光谱学与光谱分析*, 2017, 37(5): 1448.
- [24] Murphy K R, Butler K D, Spencer R G M, et al. Measurement of dissolved organic matter fluorescence in aquatic environments: An interlaboratory comparison[J]. *Environmental Science & Technology*, 2010, 44(24): 9405–9412.
- [25] 李霞, 田光明, 朱军, 等. 不同磷肥用量对水稻土有机碳矿化和细菌群落多样性的影响[J]. *土壤学报*, 2014, 51(2): 360–372.
- [26] 缪闯和, 呂貽忠. 黑土、潮土和红壤可溶性有机质的光谱特征及结构差异[J]. *土壤*, 2021, 53(1): 168–172.
- [27] 贾汉忠, 刘子雯, 石亚芳, 等. 不同植被恢复类型的沙地土壤中溶解性有机质演变特征[J]. *科学通报*, 2021, 66(34): 4425–4436.
- [28] 陈彦洁, 崔育倩, 李青松, 等. 厦漳地区原水 DOM 的 3-DEEM-FRI 表征与分析研究[J]. *光谱学与光谱分析*, 2021, 41(2): 499.
- [29] 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.
- [30] Lambert T, Bouillon S, Darchambeau F, et al. Shift in the chemical composition of dissolved organic matter in the Congo River network[J]. *Biogeosciences*, 2016, 13(18): 5405–5420.
- [31] Hong H L, Wu S J, Wang Q, et al. Trace metal pollution risk assessment in urban mangrove patches: Potential linkage with the spectral characteristics of chromophoric dissolved organic matter[J]. *Environmental Pollution*, 2021, 272: 115996.
- [32] Amaral V, Romera-Castillo C, Forja J. Dissolved organic matter in the gulf of Cádiz: Distribution and drivers of chromophoric and fluorescent properties[J]. *Frontiers in Marine Science*, 2020, 7: 126.
- [33] 张方方, 高娜, 吴锁智, 等. 长期施氮和覆膜对土壤溶解性有机质含量及其结构特征的影响[J]. *环境科学学报*, 2023, 43(11): 300–313.
- [34] 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.
- [35] 卢小慧, 李奇龙, 乔骁. 农业系统溶解性有机态氮淋滤损失及影响因素研究进展[J]. *湖北农业科学*, 2016, 55(13): 3265–3268, 3275.
- [36] 佟金鹤, 钱昆, 田光辉, 等. 1977—2017年海南极端气候事件变化时空差异分析[J]. *中国农学通报*, 2019, 35(12): 89–94.
- [37] Chen C M, Hall S J, Coward E, et al. Iron-mediated organic matter decomposition in humid soils can counteract protection[J]. *Nature Communications*, 2020, 11(1): 2255.
- [38] 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.

- [39] 蓝贤瑾, 刘益仁, 侯红乾, 等. 长期有机无机肥配施对红壤性水稻土微生物生物量和有机质结构的影响[J]. 农业资源与环境学报, 2021, 38(5): 810–819.
- [40] 王伟光, 郭永霞, 谢修鸿. 不同施肥处理对草甸型水稻土溶解性有机物荧光特性的影响[J]. 农业与技术, 2022, 42(13): 55–59.
- [41] Peng Y M, Niu L G, Hu Y L, et al. Long-term effects of nitrogen and phosphorus fertilization on profile distribution and characteristics of dissolved organic matter in fluvo-aquic soil[J]. Journal of Environmental Management, 2024, 366: 121834.
- [42] Jobbágy E G, Jackson R B. The vertical distribution of soil organic carbon and its relation to climate and vegetation[J]. Ecological Applications, 2000, 10(2): 423–436.
- [43] 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.
- [44] Du X F, Deng Y, Li S Z, et al. Steeper spatial scaling patterns of subsoil microbiota are shaped by deterministic assembly process[J]. Molecular Ecology, 2021, 30(4): 1072–1085.
- [45] Angst G, Pokorný J, Mueller C W, et al. Soil texture affects the coupling of litter decomposition and soil organic matter formation[J]. Soil Biology and Biochemistry, 2021, 159: 108302.
- [46] 陈丽铭, 吴月颖, 李财生, 等. 土壤溶解性有机质分子特征对不同来源有机肥分解的响应[J]. 土壤学报, 2023, 60(4): 1101–1112.
- [47] Kaiser K, Kalbitz K. Cycling downwards–dissolved organic matter in soils[J]. Soil Biology and Biochemistry, 2012, 52: 29–32.
- [48] Zhang Z J, Wang X Z, Liang L Y, et al. Phosphorus fertilization alters complexity of paddy soil dissolved organic matter[J]. Journal of Integrative Agriculture, 2020, 19(9): 2301–2312.
- [49] Zhao Z L, Shi K, Peng Y Y, et al. Widespread decrease in chromophoric dissolved organic matter in Chinese lakes derived from satellite observations[J]. Remote Sensing of Environment, 2023, 298: 113848.
- [50] 高洁, 江韬, 李璐璐, 等. 三峡库区消落带土壤中溶解性有机质(DOM)吸收及荧光光谱特征[J]. 环境科学, 2015, 36(1): 151–162.