

# 巢湖湖滨带不同土地类型土壤 DOM 光谱研究<sup>1</sup>

申慧彦<sup>1, 2</sup> 王嘉富<sup>1, 2</sup> 曹承泽<sup>1, 2</sup> 王靖军<sup>1, 2</sup> 李卫华<sup>1, 2</sup> 张瑾<sup>1, 2</sup>

(1. 安徽建筑大学环境与能源工程学院, 安徽 合肥 230601;

2. 环境污染控制与废弃物资源化利用安徽省重点实验室, 安徽 合肥 230601)

**【摘要】**: 以巢湖北部湖滨带为研究区域, 采集潮间带、植物湿地、林地和田地 4 种类型土地 0 ~ 20cm 表层土壤, 利用紫外吸收光谱、三维荧光光谱结合平行因子法探讨不同土地类型土壤溶解性有机质 (DOM) 光谱特征。结果表明巢湖北部湖滨带 4 种土地类型土壤溶解性有机碳 (DOC) 与有色溶解性有机质 (CDOM)、荧光溶解性有机质 (FDOM) 具有显著正相关关系 ( $P < 0.05$ ), CDOM 和 FDOM 也呈显著正相关关系 ( $P < 0.05$ ); 相较于其他 3 种类型土壤, 植物湿地土壤 DOC、CDOM 和 FDOM 含量均为最高。紫外吸收光谱参数共同表明林地和田地土壤 DOM 分子量相对较大、疏水组分较高、芳香化程度较强。4 种类型土壤光谱斜率比值 (SR) 均小于 0.70, 荧光指数 (FI) 在 1.40 ~ 1.90 之间, 表明土壤腐殖化程度较好, DOM 具有内源与外源双重特征, 以外源为主。植物湿地土壤自生源指数 (BIX) 和  $F_n(280)$  高于其他 3 种类型土地, 且腐殖化指数 (HIX) 最低, 表明自生源和类蛋白的组分高于其他 3 种土地类型, 腐殖化程度最低。4 种类型土地土壤 DOM 由类富里酸 ( $Ex/Em = 245, 320 / 420 \text{ nm}$ )、类色氨酸 ( $Ex/Em = 280 / 340 \text{ nm}$ )、类腐殖酸 ( $Ex/Em = 275, 375 / 455 \text{ nm}$ ) 3 种荧光组分组成, 类富里酸组分对 DOM 贡献率最高 (46% ~ 62%), 植物湿地土壤 DOM 类色氨酸占比高于其他土壤类型。研究结果为揭示巢湖湖滨带不同土地类型土壤 DOM 的组成、结构和来源提供基础数据, 为巢湖水生环境的保护提供科学依据。

**【关键词】**: 湖滨带; 溶解性有机质; 紫外吸收光谱; 三维荧光光谱; 平行因子分析

中图分类号: X524 文献标识码: A 文章编号: 1004-8227(2023)04-0729-10

DOI: 10.11870/cjlyzyyhj202304005

溶解性有机质 (Dissolved Organic Matter, DOM) 泛指能透过  $0.45 \mu\text{m}$  孔径滤膜, 一系列大小和结构不同的分子组成的非均质化合物, 普遍存在于水体、土壤、底泥等环境中<sup>[1]</sup>, 通过络合、酸度缓冲、光衰减等作用影响其他污染物的形态、迁移转化、毒性及生物效应等<sup>[2, 3]</sup>。巢湖是我国五大淡水湖之一, 位于安徽省中部, 由合肥市和巢湖市环抱, 受人类活动干扰严重, 已出现大面积富营养化现象<sup>[4]</sup>。湖滨带是水陆生态系统的过渡缓冲带, 在丰水期淹水, 土壤中 DOM 释放进入水体, 进而影响水体其他污染物的环境行为; 而在落干期, 由于氧化还原条件改变、植被生长和人类活动干预, 改变土壤 DOM 组成和结构, 使其在淹水过程中对上覆水体 DOM 的贡献变得更为复杂。因此探究巢湖湖滨带土壤 DOM 地化特征, 对进一步认识其环境效应具有重要意义。

<sup>1</sup> **【收稿日期】**: 2022-04-24; **【修回日期】**: 2022-08-01

**【基金项目】**: 国家自然科学基金面上项目 (51978003); 环境污染控制与废弃物资源化利用安徽省重点实验室开放课题 (2022EPC06)

**【作者简介】**: 申慧彦 (1978 ~ ), 女, 副教授, 主要研究方向为水污染控制与生态修复. E-mail: huiyanshen@ahjzu.edu.cn

---

$\pi - \pi^*$ 共轭双键是组成 DOM 常见结构，在紫外光区具有强吸光性，这类具有吸光特性的物质称为有色溶解性有机质 (Chromophoric Dissolved Organic Matter, CDOM), 是 DOM 重要组成部分<sup>[5]</sup>。DOM 所含生色团结构和多少不同，造成紫外吸收光谱的差异，通过紫外吸收光谱参数的提取解析，可实现 DOM 定性和半定量识别。梁俭等<sup>[6]</sup>利用紫外吸收光谱分析了厌氧和正常淹水条件下三峡库区消落带土壤与上覆水之间 DOM 释放迁移规律，闫晓寒等<sup>[7]</sup>则通过紫外吸收光谱揭示了辽河保护区丰水期和枯水期 DOM 结构组成变化特征。

荧光溶解性有机质 (Fluorescent Dissolved Organic Matter, FDOM) 是 DOM 中能够吸收光能并发射荧光的组分，扫描不同激发波长获得的荧光发射矩阵构成三维荧光光谱，获得不同荧光基团对应的激发波长 (Ex)、发射波长 (Em) 范围和荧光强度 [8]。平行因子分析法 (Parallel Factor Analysis, PARAFAC) 可以将三维荧光光谱解析为单个荧光团，得到各组分的激发光谱、发射光谱和荧光强度，不仅能够去除彼此重叠干扰，还能去除未知物的干扰，获得样品中各组分特征荧光光谱<sup>[9,10]</sup>。国内一些学者采用三维荧光光谱结合 PARAFAC 研究了南淝河不同排污入口表层沉积物<sup>[11]</sup>、环滇池土壤<sup>[12]</sup>、茜坑水库<sup>[13]</sup> DOM 的组分、分布规律和来源贡献。由此可见，紫外与荧光光谱已成为辨识 DOM 结构、组分和来源的有效手段，能够更加便捷、全面地评估环境 DOM 信息。

基于此，本研究以巢湖北部区域湖滨带不同土地类型土壤为研究对象，借助紫外吸收光谱和三维荧光光谱技术，结合 PARAFAC 分析方法，获取土壤 DOM 结构、组分和来源等特征信息。为进一步认识湖滨带土壤 DOM 的地化特征提供基础数据和新思路，也为巢湖水生环境的保护提供科学依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 样品采集

考虑巢湖北部区域湖滨带土地类型的代表性，主要可分为潮间带、植物湿地、林地和田地四种类型，于 2021 年 12 月份采集 0~20 cm 的表层土壤，每种土地类型取 5 个地点 (图 1)。样品采集后装入自封袋，带回实验室，冷冻干燥、拣去根系等杂物，过 100 目筛。

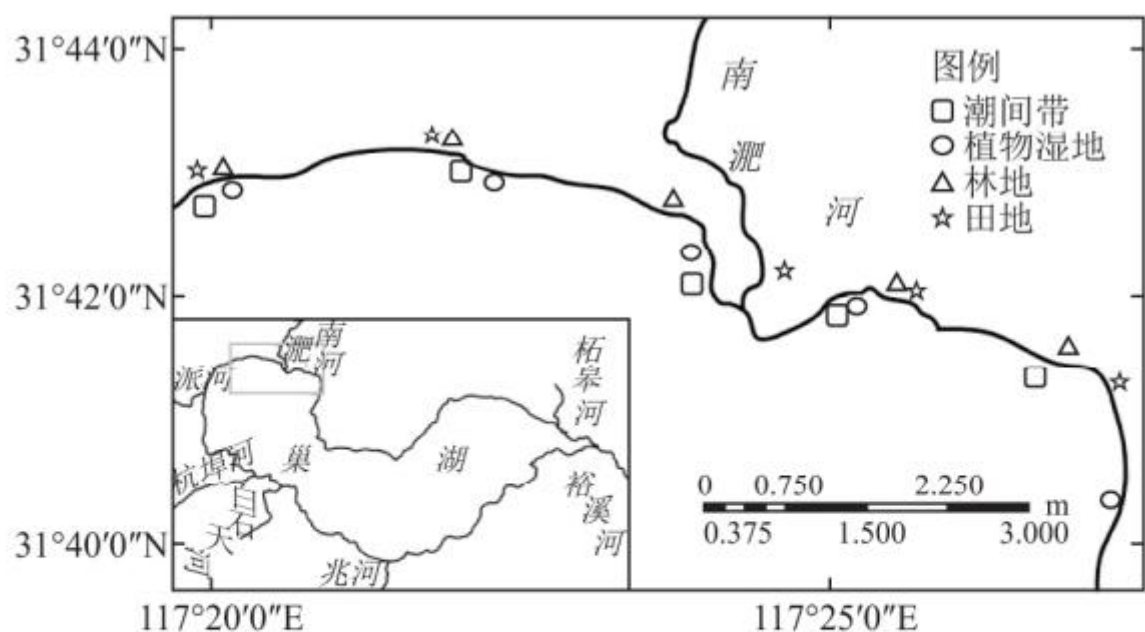


图 1 巢湖北部湖滨带土壤采样点

Fig. 1 Soil sampling sites in northern lakeside zone of Chaohu lake

### 1.2 土壤 DOM 提取

土样 DOM 提取参照李璐璐等[14]方法, 增加震荡提取时间。称取 5.00 g 土样, 加入超纯水(水土比 10:1), 在黑暗下以 200 r/min, 震荡 24 h。8 000 r/min 离心 10 min, 取上清液过 0.45 μm 滤膜, 得 DOM 滤液, 置于棕色瓶中, 4℃避光保存, 尽快进行样品分析。

### 1.3 样品测定与分析

采用 TU-1901 紫外分光光度计进行紫外光谱扫描, 用 10 mm 石英比色皿在 200~400 nm 范围内扫描, 扫描间隔 1 nm。三维荧光光谱测定采用日本 Hitachi 公司生产的 F-7000 荧光光谱仪, 用四通石英比色皿在 Ex/Em=230~450/250~620 nm 波长范围进行扫描, 波长间隔 5 nm, 速度 2 400 nm/min, PMT 电压 700V, 在出射光处加 290 nm 截止滤光片, 避免二级瑞利散射干扰, 相关紫外吸收光谱和荧光光谱参数见表 1。PARAFAC 法是基于交替最小二乘法实现三线性模型分解的算法<sup>[15]</sup>, 使用 DOMFluor 程序包, 在 MatlabR2018b 中进行 PARAFAC 分析, 通过残差分析和核心一致度检验, 将土壤样品 DOM 三维荧光光谱分解为独立组分。样品进行三维荧光分析时, 样品荧光强度扣除空白水样, 去除拉曼散射影响。

溶解性有机碳(Dissolved Organic Carbon, DOC)采用 Elementar 公司 Liqui TOCII 总有机碳分析仪进行测定。所有样品分析均以超纯水为空白, 使用 Origin2021 和 MatlabR2018b 进行数据处理、分析和绘图。

## 2 结果与讨论

## 2.1 不同土地利用类型土壤 DOM 含量

DOC 作为 DOM 主要组分, 常用来表示 DOM 的含量。由表 2 知, 不同类型土壤中 DOC 的量依次为植物湿地>潮间带>林地>田地。有研究表明, 林地土壤的 DOC 含量较高, 且林地中的 DOC 含量会随年限的增加而增加, 林地树木差异也会对土壤中 DOC 的含量有所影响<sup>[21,23]</sup>。在本研究中, 林地 DOC 含量次于植物湿地和潮间带, 这可能是由于采样区域林地多为由耕地改造的新生林, 年限较低。而植物湿地为常年自然生长湿地, 植物没有进行定期收割, 植物凋落物增加了对土壤 DOC 的贡献<sup>[24]</sup>; 且植物湿地和潮间带常年处于间歇淹水环境, 淹水条件有利于土壤中团聚体的分散和 DOM 的溶出, 进而提高土壤的 DOC 含量<sup>[25]</sup>。CDOM 和 FDOM 分别表示 DOM 中紫外吸收部分和荧光组分, 用紫外吸收光谱 355 nm 处的吸收系数  $a(355)$  和  $E_x/E_m=355/450$  nm 处的荧光强度  $F_n(355)$  表征它们的相对量<sup>[12,19]</sup>(表 1)。4 种用地类型中植物湿地 CDOM 和 FDOM 最高, 分别为  $10.06 \text{ m}^{-1}$  和  $993.75 \text{ A.U.}$ , 说明湿地土壤 DOC 含量高, DOM 中的共轭生色团以及能够吸收光能发射荧光的组分也多。对潮间带土壤分析发现, CDOM 含量低于其他土地类型, 但 FDOM 含量却高于林地和田地, 表明潮间带土壤 DOM 荧光效率高, 共轭结构( $\pi-\pi^*$ 双键) 组分少<sup>[25]</sup>。可见受用地类型、植物凋落物和淹水等条件影响, 不同土地类型的土壤 DOM 含量和组分存在差异性。

表 1 紫外吸收光谱和荧光光谱参数描述

光谱参数	表述公式	表征意义
光谱斜率比值 SR	$SR=S(275\sim 295)/S(350\sim 400)$ $a(\lambda)=a(\lambda_0)\exp[S(\lambda_0-\lambda)]$	光谱斜率比值 SR 是对光谱斜率 S 的改进, 一般用来表示 DOM 的结构特征, 与分子量成反比 <sup>[16]</sup>
吸收系数 $a(355)$	$a(\lambda)=2.303*D(\lambda)/r$ D( $\lambda$ )为吸光度, r 为光程路径(m)	表征 CDOM 相对浓度 <sup>[12]</sup>
SUVA254	$SUVA254=a(254)/DOC$	表征 DOM 的芳香性组分含量大小 <sup>[17]</sup>
SUVA260	$SUVA260=a(260)/DOC$	表征 DOM 中疏水组分含量大小 <sup>[6]</sup>
E2/E3  E3/E4	$D(250)/D(365)$  $D(300)/D(400)$	表征 DOM 分子量(反比) <sup>[18]</sup> 表征 DOM 来源, $E3/E4>3.5$ , DOM 以富里酸为主; $E3/E4<3.5$ , DOM 以胡敏酸为主 <sup>[18]</sup>
$F_n(355)$	$E_x=355 \text{ nm}$ $E_m=450 \text{ nm}$	表示荧光溶解性有机质(FDOM)浓度(类腐殖质相对浓度) <sup>[19]</sup>
$F_n(280)$	$E_x=280 \text{ nm}$ $E_m=340\sim 360 \text{ nm}$ 最大荧光强度	表征类蛋白质相对浓度 <sup>[19]</sup>
荧光指数(FI)	$E_x=370 \text{ nm}$ $E_m=450/520 \text{ nm}$	反映环境中 DOM 来源情况 <sup>[20~22]</sup>
自生源指数	$E_x=310 \text{ nm}$ $E_m=380/430 \text{ nm}$	反映环境中 DOM 的自身来源贡献情况 <sup>[20~22]</sup>

(BIX)		
腐殖化指数 (HIX)	$E_x=254 \text{ nm}$ $E_m=S(435-480)/S(300-345) \text{ nm}$ $S(\lambda_0-\lambda)$ 为从 $\lambda_0$ 到 $\lambda$ 的区域积 分值	表示环境中 DOM 的腐殖化程度[20~22]

表 2 湖滨带土壤 DOM 描述统计

土地利用类型	CDOM(m <sup>-1</sup> ) a (355)	FDOM/A. U. Fn (355)	DOC (mg · kg <sup>-1</sup> )
潮间带	4.68	843.30	57.95
植物湿地	10.06	993.75	106.20
林地	8.25	791.67	28.70
田地	5.49	745.10	24.30

有研究表明水体<sup>[8]</sup>和土壤<sup>[6]</sup>中 DOC 和 CDOM 有显著相关性,但对西北内陆流域不同土地利用土壤<sup>[26]</sup>和城郊关键带土壤<sup>[27]</sup>DOM 研究发现它们之间的相关性并不明显,表明 DOM 组成受区域、土地利用类型等影响较大。对巢湖湖滨带 4 种类型土地表层土壤 DOM 进行相关性分析,结果如表 3 所示,DOC 与 CDOM、FDOM 具有显著相关性,其相关系数分别为 0.53 和 0.86 (P<0.05);CDOM 和 FDOM 也具有显著相关性,相关系数为 0.55 (P<0.05)。这表明 CDOM 和 FDOM 有着相近来源[28,29]或者在光和微生物等影响下 CDOM 可以转化为 FDOM<sup>[26]</sup>。

表 3 DOC、CDOM 和 FDOM 相关性分析

	DOC	CDOM	FDOM
DOC	1.00		
CDOM	0.53*	1.00	
FDOM	0.86*	0.55*	1.00

注: \*表示在 0.05 水平上的显著相关。

## 2.2 土壤 DOM 紫外吸收光谱和参数解析

4 种类型土地土壤 DOM 的紫外吸收光谱均呈随波长增加吸光度降低趋势(图 2)。其中 226~250 nm 处的吸收主要来源于无机阴离子[30], 植物湿地与林地 在 250~280 nm 处存在肩状吸收峰, 是由苯环的  $\pi-\pi^*$  跃迁所引起的<sup>[31]</sup>。

由表 4 可知, 巢湖湖滨带 4 种土壤类型 SR 均在 0.30~0.39 之间, 当  $SR < 0.70$  时, 通常认为有机物质分子缩合度较高且 DOM 以外源为主<sup>[16]</sup>。这表明本研究中巢湖湖滨带土壤 DOM 的有机物分子缩合程度均较高, 分子量较大, 外源特征明显。SUVA<sub>254</sub> 越大代表土壤 DOM 芳香度越高<sup>[17]</sup>, SUVA<sub>260</sub> 越大则表示土壤 DOM 所含的疏水性组分较多<sup>[6]</sup>。SUVA<sub>254</sub> 和 SUVA<sub>260</sub> 最高的是林地, 其次为田地、植物湿地与潮间带, 表明本研究中林地与田地土壤 DOM 中疏水组分和芳香性较高。E<sub>2</sub>/E<sub>3</sub> 越大, 表示 DOM 分子量越小, 表 4 中可得林地与田地土壤 DOM 的 E<sub>2</sub>/E<sub>3</sub> 较小, 表明分子量相对较高; 植物湿地 E<sub>2</sub>/E<sub>3</sub>=5.43 是 4 种土壤类型的最大值, 表明 DOM 中小分子量物质(单糖、氨基酸)相对较多<sup>[1]</sup>。当 E<sub>3</sub>/E<sub>4</sub>>3.50 时表示腐殖质中主要为富里酸, 小于 3.50 时表示腐殖质中主要是胡敏酸[18], 根据表 4 可知, 巢湖湖滨带 4 种土地利用类型土壤 DOM 的 E<sub>3</sub>/E<sub>4</sub> 变化范围在 4.99~5.46 之间, 表明研究区土壤 DOM 中腐殖质主要以类富里酸物质为主。

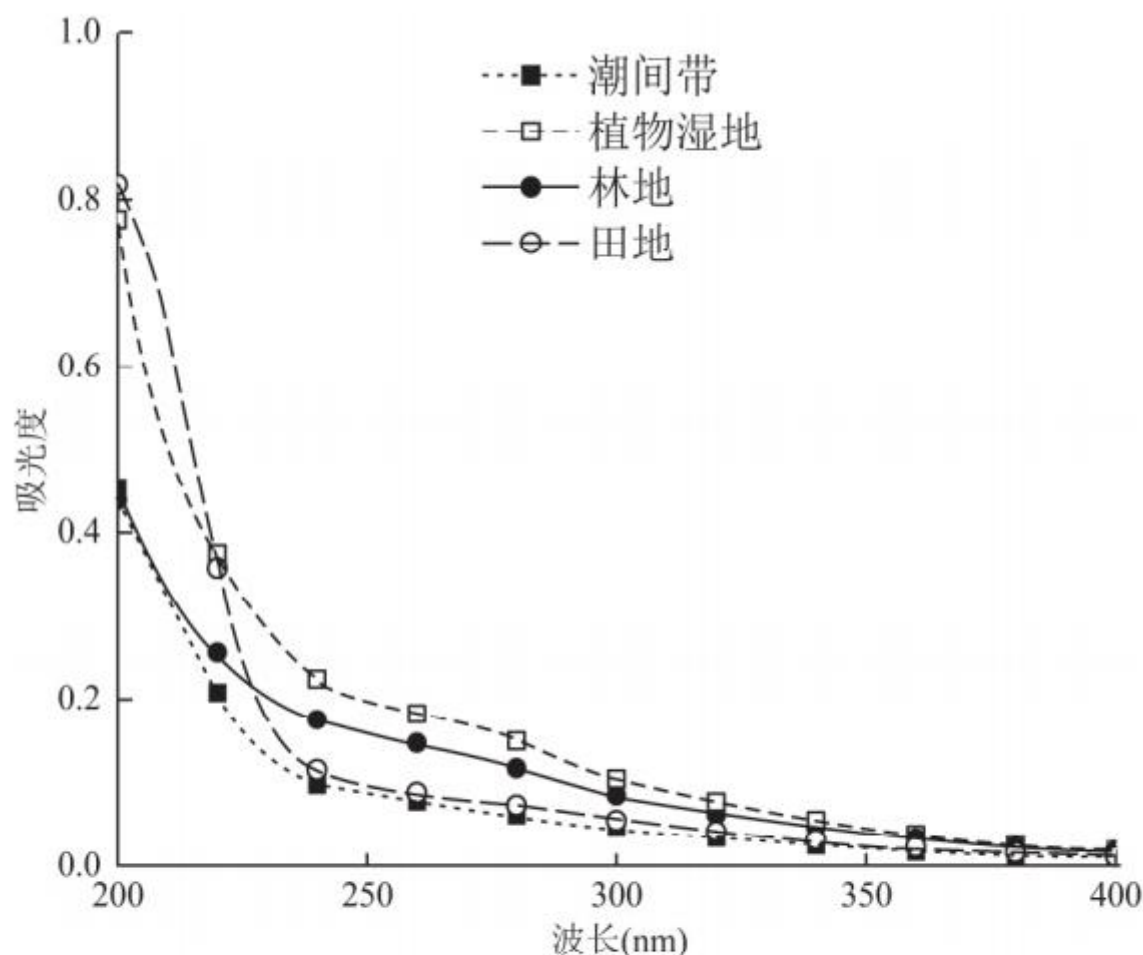


图 2 不同类型土壤 DOM 紫外吸收光谱

Fig. 2 DOM UV absorption spectra of different soil types

表 4 不同类型土壤的紫外吸收光谱指标

土地利用类型	SR	SUVA254 (L · (mg · m) <sup>-1</sup> )	SUVA260 (L · (mg · m) <sup>-1</sup> )	E2/E3	E3/E4
潮间带	0.38	1.73	1.65	5.31	5.20
植物湿地	0.39	2.04	1.97	5.43	5.46
林地	0.35	6.05	5.77	4.71	4.99
田地	0.30	4.30	3.60	5.15	5.09

利用 Origin2021 对潮间带、植物湿地、林地和田地所有采集土壤样本进行 DOC 与紫外吸收光谱参数相关性分析(图 3)。其中 DOC 与 SUVA254、SUVA260 呈显著负相关( $P < 0.05$ ),这与环滇池土壤<sup>[12]</sup>,三峡库区消落带<sup>[14]</sup>等地区研究结果相一致。SUVA254 和 SUVA260 呈现显著正相关( $P < 0.05$ ),与马琦琦等[27]研究结果一致,表明 DOM 芳香性结构主要存在于疏水组分中<sup>[28,32]</sup>。E2/E3 和 E3/E4 呈现正相关( $P < 0.05$ ),说明土壤 DOM 腐殖质中类富里酸组分越多,分子量相对较小<sup>[21]</sup>。

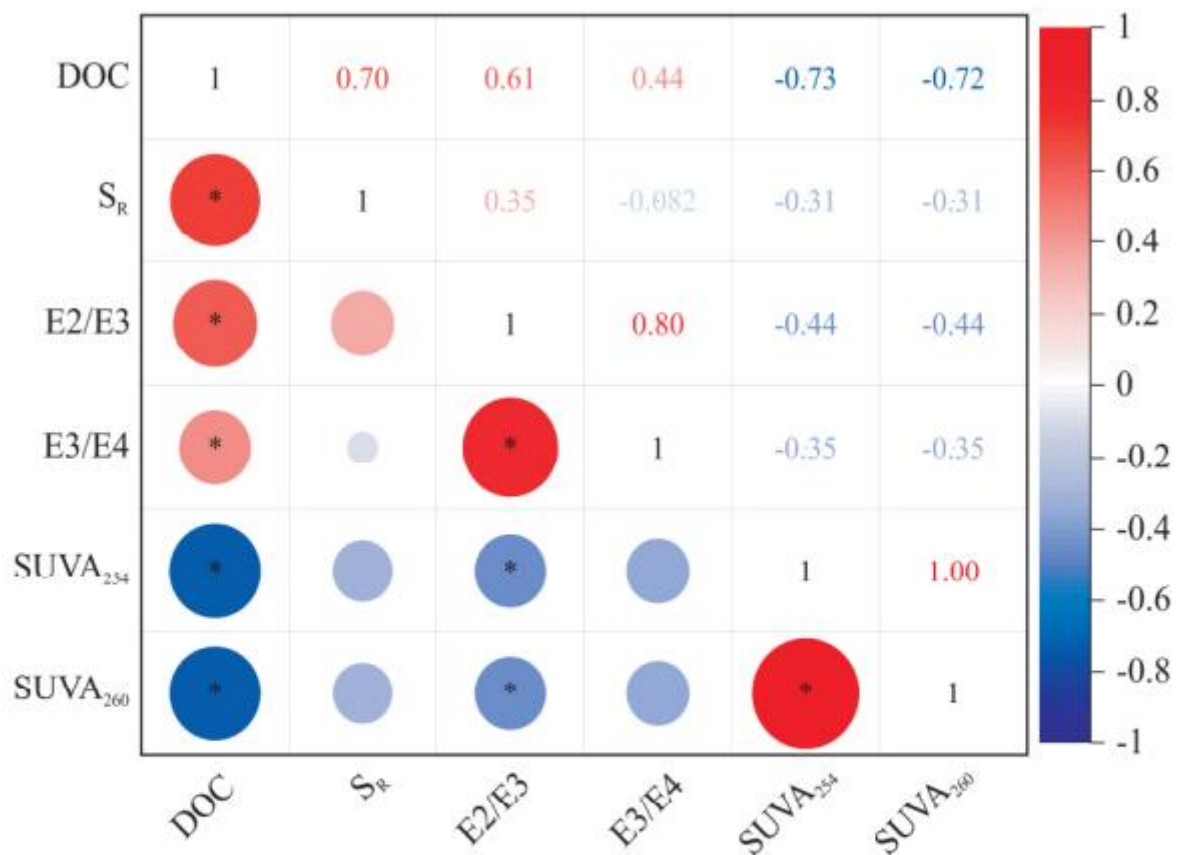


图 3 紫外吸收光谱参数与 DOC 相关性

Fig. 3 Correlation between UV absorption spectrum parameters and DOC

### 2.3 土壤 DOM 的荧光光谱参数解析

有研究指出荧光指数(FI) $>1.90$ 表示DOM主要为内源, FI $<1.40$ 表示DOM主要为陆源<sup>[20,21,22]</sup>。由表5可知, 巢湖湖滨带4种类型土壤DOM的FI值处于1.65~1.79之间, 说明土壤DOM为内源微生物与外源输入共同贡献<sup>[22]</sup>。与其他几种土地类型相比, 林地更接近1.40, 外源特征明显。

从表5可知, 植物湿地土壤Fn(280)远远大于其余3种, 说明DOM类蛋白组分高于其他3种土地类型。一般认为自身源指数(BIX) $<0.80$ 表示生物源的特征不显著,  $0.80 < BIX < 1.00$ 表示土壤自生源相对较强<sup>[20]</sup>。4种土地类型仅植物湿地土壤的BIX大于0.80, 说明植物湿地土壤DOM相对其它3种土地类型自生源较强。这是因为植物湿地中植物根系较茂盛, 根系分泌物较多, 生物可利用性高, 微生物活性强, 促使更多类蛋白质物质的产生<sup>[33]</sup>。而潮间带、田地、林地BIX均在小于0.80, 自生源特征不显著, 表明DOM主要来自于外源植物的输入, 与紫外参数光谱斜率SR分析结果一致。腐殖化指数(HIX)可用于表征DOM的腐殖化程度, 值越大表明DOM腐殖化程度大, 存在的时间长<sup>[22]</sup>。

表5 不同类型土壤的荧光光谱指标

土地利用类型	Fn(280) (A. U.)	FI	BIX	HIX
潮间带	682.62	1.79	0.75	7.47
植物湿地	2 175.83	1.76	0.81	1.81
林地	720.72	1.65	0.63	5.50
田地	632.63	1.70	0.72	5.15

由表 5 知, 潮间带中的 HIX 最高(7.47), 这可能是因为潮间带处于间歇淹水状态, 好氧厌氧交替进行有利于植物和土壤腐殖化进程<sup>[34,35]</sup>。林地与田地较为相似(5.15~5.50)、植物湿地最低(1.81), 这可能是由于湿地土壤新鲜植被凋落残体较多, 微生物代谢旺盛, DOM 中的类蛋白质组分较高<sup>[36]</sup>, 新的自生源相对较多。由上分析可知, FI、HIX、BIX 和 Fn(280)均表明巢湖湖滨带 DOM 由外源和内源共同贡献, 腐殖化程度较高。相较于其他 3 种土地类型, 植物湿地中类蛋白质相对较高, 新生自生源相对较多。

如表 6 所示, 巢湖湖滨带土壤 DOM 参数 FI 和 BIX 与其他地区差别不大, HIX 较其他区域相对较高, 说明巢湖湖滨带土壤腐殖化程度总体较高, 这与紫外吸收光谱研究结果相吻合。

#### 2.4 土壤 DOM 荧光光谱解析

本研究中 4 种土地类型土壤 DOM 共出现三种荧光峰(图 4), 其中区域 A( $Ex/Em=240\sim 280/420\sim 460$  nm)和区域 C( $Ex/Em=310\sim 360/370\sim 450$  nm)都属于类腐殖质荧光峰, 区域 T( $Ex/Em=270\sim 290/320\sim 360$  nm)属于类蛋白荧光峰<sup>[38]</sup>。由图 4 可知, 潮间带、林地和田地 DOM 荧光特征较为接近, 均为 A 峰荧光强度最大, 是由小分子量, 高荧光效率的富里酸引起的, 主要来源于植物代谢和生物残体(外源性)<sup>[39]</sup>。此外, 4 种土地类型均含有荧光峰 C, 与腐殖酸荧光位置相似, 主要由分子量较大、高芳香性结构引起的, 说明这些土壤中含有腐殖化程度较高的组分<sup>[40]</sup>。植物湿地土壤 T 峰明显, T 峰与色氨酸荧光峰位置相近, 与 DOM 中的芳香氨基酸结构有关, 主要来源于植物和微生物代谢, 新生 DOM 组分较多(内源性)<sup>[41]</sup>。

表 6 不同区域土壤 DOM 的 FI、BIX 和 HIX 值对比

不同土地	FI	BIX	HIX	文献来源
三峡典型农业小流域土壤	1.33~1.64	0.51~0.77		[22]
三峡库区消落带土壤	1.43~1.64	0.59~0.83	1.48~4.21	[32]
淹水三峡库区消落带土壤	1.55~1.68	0.61~0.71		[6]
毛白杨不同深度土壤	1.68~2.04	0.58~0.86		[37]
西北地区土壤	1.42~1.55	0.45~0.61		[26]
茜坑水库沉积物	1.46~2.11	0.38~1.96	0.82~1.3	[13]
东洞庭湖沉积物	1.80~2.42	0.78~1.23	0.44~2.61	[35]
南淝河排口表层沉积物	2.23~2.47	0.66~0.94	3.72~8.71	[11]

巢湖湖滨带	1.65~1.79	0.63~0.81	1.81~7.47	本研究
-------	-----------	-----------	-----------	-----

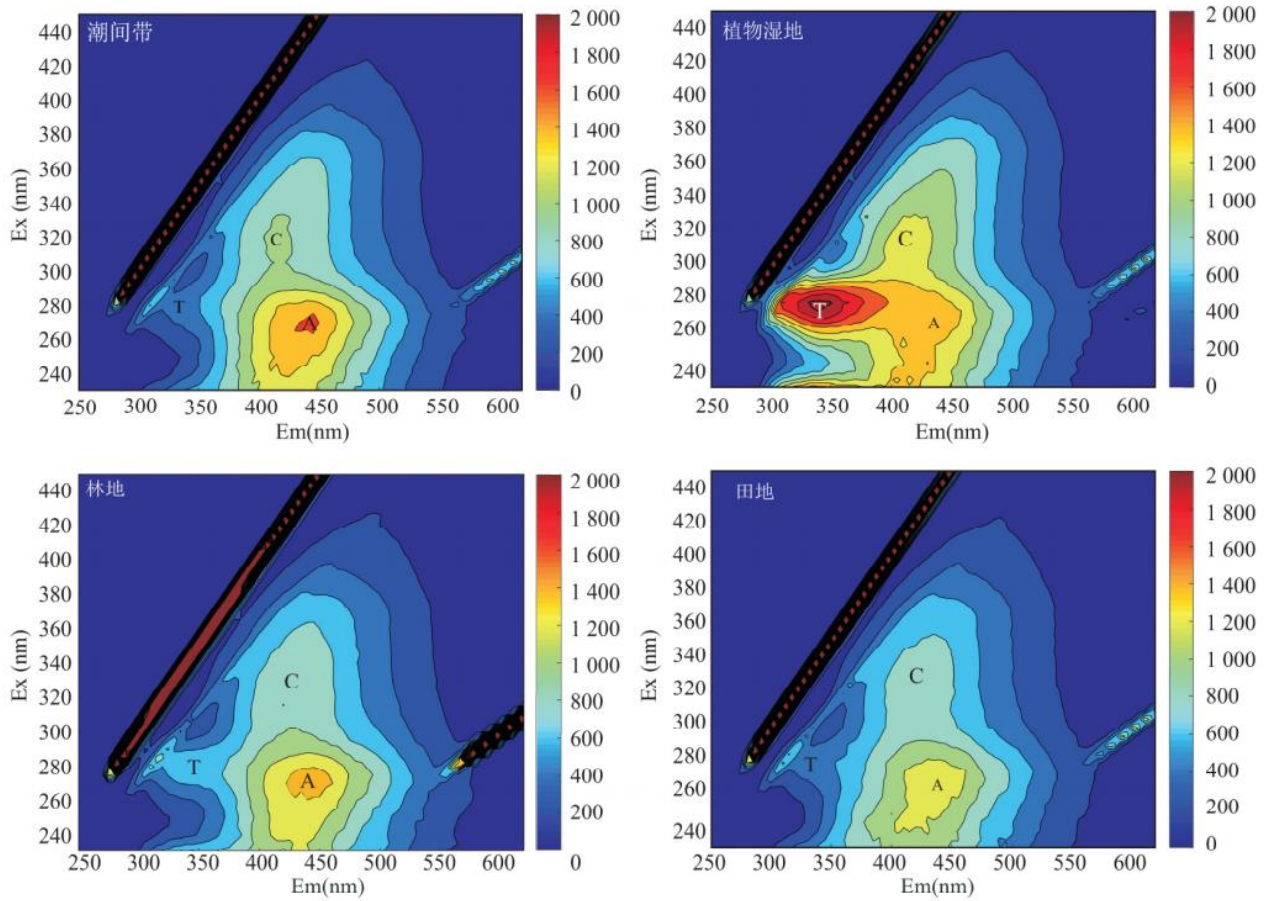


图4 不同类型土壤三维荧光光谱

Fig. 4 Three-dimensional fluorescence spectra of different soils

对4种类型土壤DOM的三维荧光光谱进行PARAFAC分析,获得3种DOM组分(分别标记为C1、C2、C3),图5为组分光谱图(左图)与载荷图(右图)。组分C1( $Ex/Em=245, 320/420$  nm)属于类腐殖质(类富里酸)组分;组分C2( $Ex/Em=280/340$  nm)属于类蛋白(类色氨酸)组分;组分C3( $Ex/Em=275, 375/455$  nm)属于类腐殖质(类腐殖酸)组分[42]。

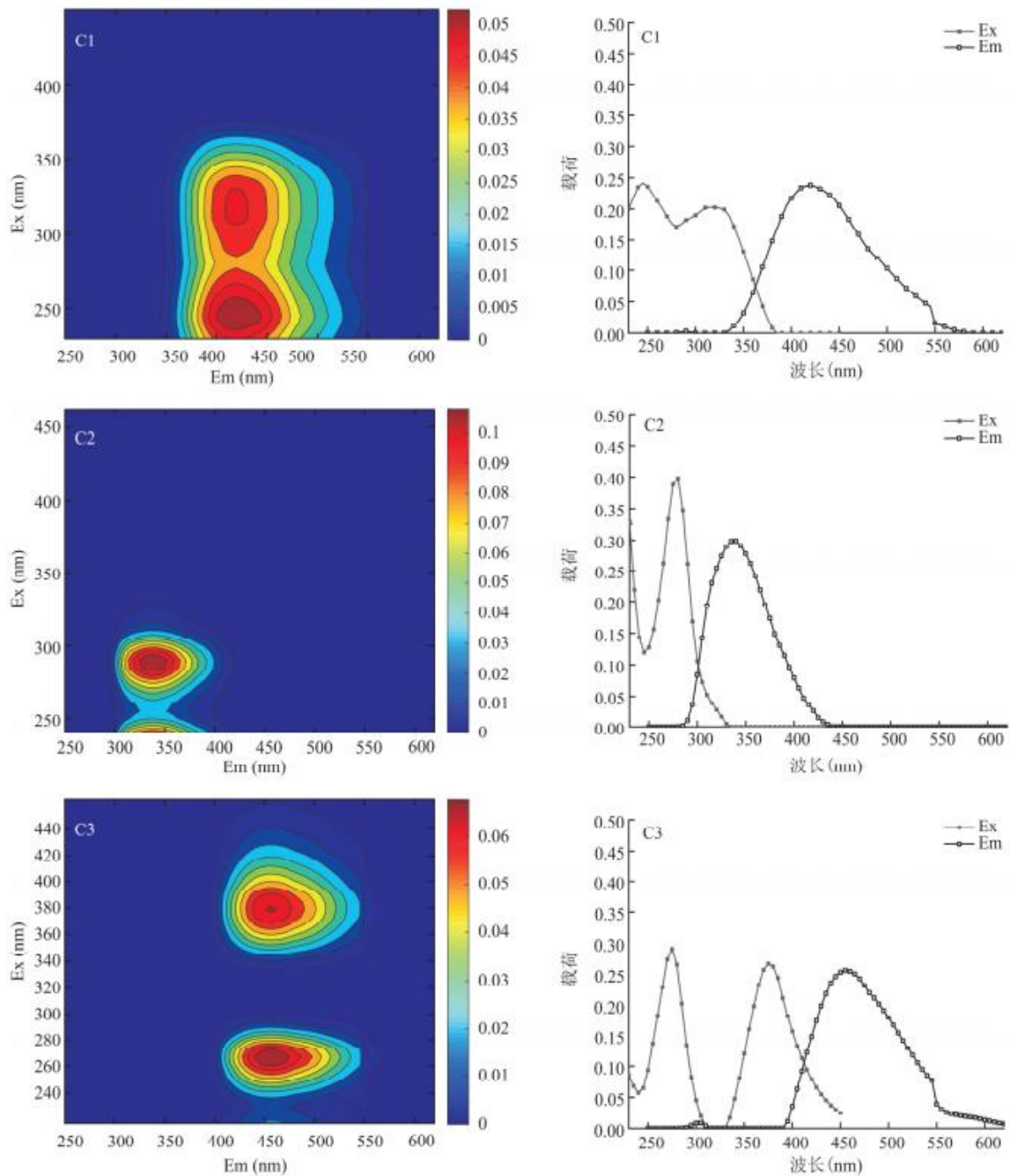


图5 PARAFAC 解析出的 DOM 中的荧光组分及其激发发射波长位置  
 Fig. 5 Fluorescent components in DOM and their excitation and emission wavelength positions resolved by PARAFAC

以 PARAFAC 输出各组分荧光得分来表示其强度相对大小(图 6 右),并计算土壤 DOM 各组分百分比(图 6 左)。类腐殖质(C1+C3)组分是 4 种用地类型土壤 DOM 的主要贡献者,占比为 64%~86%,其中 C1(类富里酸)对所有土壤 DOM 的贡献相对较大,占比为 46%~62%。相比于其他 3 种类型,土地植物湿地 DOM(C1+C2+C3)荧光强度得分为最高,说明较多的植被凋落物和微生物代谢产物为土壤 DOM 提供了重要来源; C2(类色氨酸)组分占比(36%)和荧光得分也相对最高,说明植物湿地土壤 DOM 中类蛋白组分高于其他土地类型,这与表 5 中植物湿地 Fn(280)的值最高(2175.83A.U.)和图 4 中植物湿地土壤 T 峰最为明显分析结果一致。

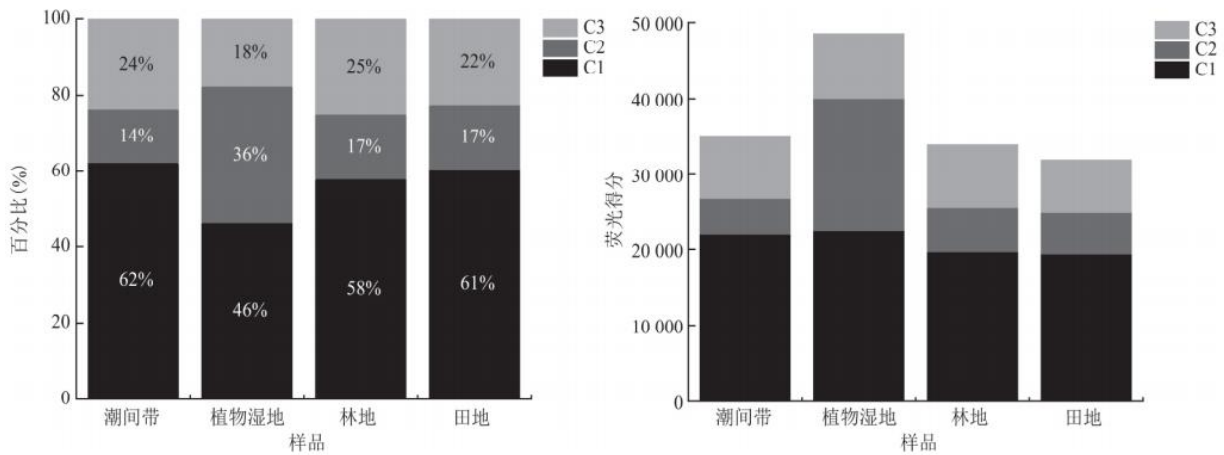


图 6 不同土壤类型 DOM 各组分百分比与荧光得分图

Fig. 6 Percentage and fluorescence scores of DOM components in different soil types

### 3 结论

(1) 三维荧光光谱结合 PARAFAC 分析表明巢湖北部湖滨带 4 种土地类型土壤 DOM 荧光物质主要由类富里酸、类色氨酸和类腐殖酸 3 种组分构成, 荧光得分表明类富里酸在 4 种类型土壤 DOM 中占比最大。相较于林地、田地和潮间带, 植物湿地土壤 DOC、CDOM 和 FDOM 含量都为最高, 荧光强度得分和 Fn(280) 共同表明植物湿地土壤 DOM 类蛋白质物质含量高于其他土地类型。

(2) 紫外吸收光谱参数 SR、SUVA260、SUVA254、E2/E3 和 E3/E4 表明林地和田地土壤 DOM 分子量相对较大、疏水组分较高、芳香化程度较强, 植物湿地 DOM 小分子量物质相对较多。荧光参数 FI、BIX 和 HIX 表明 4 种土壤整体腐殖化程度发育较好, DOM 由内源与外源共同产生, 以外源为主, 其中林地外源特征最为明显; 植物湿地土壤 DOM 自生源大于其他 3 种类型土地, 腐殖化程度最低。

### 参考文献

- [1] 何伟, 白泽琳, 李一龙, 等. 溶解性有机质特性分析与来源解析的研究进展 [J]. 环境科学学报, 2016, 36(2): 359-372. HE W, BAI Z L, LI Y L, et al. Advances in the characteristics analysis and source identification of the dissolved organic matter [J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2016, 36(2): 359-372.
- [2] FENG L, ZHANG J, FAN J, et al. Tracing dissolved organic matter in inflowing rivers of Nansi Lake as a storage reservoir: Implications for water-quality control [J]. Chemosphere, 2022, 286: 131624.
- [3] 蔡文良, 罗固源, 许晓毅, 等. 长江重庆段主城水体沉积物溶解性有机质 (DOM) 的光谱特性 [J]. 长江流域资源与环境, 2012, 21(5): 641-645. CAI W L, LUO G Y, XU X Y, et al. Assessing the spectra characteristics of dissolved organic matter from the sediments in the Yangtze River of Chongqing section [J]. Resources and Environment in the Yangtze Basin, 2012, 21(5): 641-645.
- [4] 张民, 孔繁翔. 巢湖富营养化的历程、空间分布与治理策略(1984-2013 年) [J]. 湖泊科学, 2015, 27(5): 791-798. ZHANG M, KONG F X. The process, spatial and temporal distributions and mitigation strategies of the eutrophication of Lake Chaohu (1984-2013) [J]. Journal of Lake Sciences, 2015, 27(5): 791-798.

- 
- [5] LI P, HUR J. Utilization of UV-Vis spectroscopy and related data analyses for dissolved organic matter (DOM) studies: A review [J]. *Critical Reviews in Environmental Science and Technology*, 2017, 47(3):131-154.
- [6] 梁俭, 江韬, 卢松, 等. 淹水条件下三峡库区典型消落带土壤释放 DOM 的光谱特征: 紫外-可见吸收光谱 [J]. *环境科学*, 2016, 37(7):2496-2505. LIANG J, JIANG T, LU S, et al. Spectral characteristics of dissolved organic matter (DOM) releases from soils of typical water-level fluctuation zones of Three Gorges Reservoir areas: UV-vis spectrum [J]. *Environmental Science*, 2016, 37(7):2496-2505.
- [7] 闫晓寒, 韩璐, 刘勇丽, 等. 基于 UV-Vis 辽河保护区地表水 DOM 的时空分布特征 [J]. *环境科学研究*, 2022, 35(1):51-59. YAN X H, HAN L, LIU Y L, et al. Spatiotemporal distribution of DOM in surface water of Liaohe reservation zone based on UV-vis absorption spectra [J]. *Research of Environmental Sciences*, 2022, 35(1):51-59.
- [8] 周永强, 张运林, 牛城, 等. 基于 EEMs 及 PARAFAC 的洪湖、东湖与梁子湖 CDOM 组成特征分析 [J]. *光谱学与光谱分析*, 2013, 33(12):3286-3292. ZHOU Y Q, ZHANG Y L, NIU C, et al. Characterizing chromophoric dissolved organic matter (CDOM) in Lake Honghu, Lake Donghu and Lake Liangzihu using excitation-emission matrices (EEMs) fluorescence and parallel factor analysis (PARAFAC) [J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2013, 33(12):3286-3292.
- [9] NAM S, LEE J, KIM E, et al. Application of fluorescence excitation-emission matrix spectroscopy coupled with parallel factor analysis (FEEM/PARAFAC) to monitor organic matter removal in drinking water treatment [J]. *Journal of Korean Society of Water Science and Technology*, 2020, 28(3):3-11.
- [10] CHOUDHARY P, GARG K. Tensor data imputation by PARAFAC with updated chaotic biases by Adam optimizer [J]. *International Journal of Recent Technology and Engineering (IJRTE)*, 2021, 9(6):30-38.
- [11] 沈烁, 王育来, 杨长明, 等. 南淝河不同排口表层沉积物 DOM 光谱特征 [J]. *中国环境科学*, 2014, 34(9):2351-2361. SHEN S, WANG Y L, YANG C M, et al. Spectral characteristic of dissolved organic matter (DOM) in the surface sediments from different discharging points along the Nanfei River in Hefei City, Anhui Province [J]. *China Environmental Science*, 2014, 34(9):2351-2361.
- [12] 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):1448-1454. LI S D, JIANG Q L, LI Y, et al. Spectroscopic characteristics and sources of dissolved organic matter from soils around Dianchi Lake, Kunming [J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2017, 37(5):1448-1454.
- [13] 王斌, 黄廷林, 李楠, 等. 水源水库沉积物及其上覆水 DOM 光谱特征 [J]. *中国环境科学*, 2022, 42(3):1309-1317. WANG B, HUANG T L, LI N, et al. Spectral characteristics of dissolved organic matter in sediment and overlying water of water source reservoir [J]. *China Environmental Science*, 2022, 42(3):1309-1317.
- [14] 李璐璐, 江韬, 闫金龙, 等. 三峡库区典型消落带土壤及沉积物中溶解性有机质 (DOM) 的紫外-可见光谱特征 [J]. *环境科学*, 2014, 35(3):933-941. LI L L, JIANG T, YAN J L, et al. Ultraviolet-visible (UV-vis) spectral characteristics of dissolved organic matter (DOM) in soils and sediments of typical water-level fluctuation zones of Three Gorges Reservoir areas [J]. *Environmental Science*, 2014, 35(3):933-941.
- [15] OLIVIERI A C. Computing sensitivity and selectivity in parallel factor analysis and related multiway

---

techniques: The need for further developments in net analyte signal theory [J]. *Analytical Chemistry*, 2005, 77(15):4936-4946.

[16] SINGH S, DASH P, SILWAL S, et al. Influence of land use and land cover on the spatial variability of dissolved organic matter in multiple aquatic environments [J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2017, 24(16):14124-14141.

[17] 王东香, 张一鸣, 王锐诚, 等. 神农架大九湖泥炭地孔隙水溶解有机碳特征及其影响因素 [J]. *长江流域资源与环境*, 2018, 27(11):2568-2577. WANG D X, ZHANG Y M, WANG R C, et al. Characteristics of dissolved organic matter in pore water from the Dajiuhe peatland, central China [J]. *Resources and Environment in the Yangtze Basin*, 2018, 27(11):2568-2577.

[18] 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. LUO H L, CHEN J, ZHANG Y H, et al. Responses of Cd accumulation in rice and spectral characteristics of soil dissolved organic matter regulated by soil amendments [J]. *Environmental Science*, 2022, 43(6):3315-3327.

[19] 晏彩霞, 杨雪, 文鑫梅, 等. 南昌市灰尘中可淋溶态 DOM 的光谱特性 [J]. *环境科学学报*, 2019, 39(5):1452-1463. YAN C X, YANG X, WEN X M, et al. Spectral characterization of leaching dissolved organic matter (LDOM) from the dust in Nanchang City [J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2019, 39(5):1452-1463.

[20] 安世林, 罗春燕, 陈煜, 等. 亚高山湖泊天才湖周边土壤腐殖酸的光降解研究 [J]. *湖泊科学*, 2022, 34(2):553-568. AN S L, LUO C Y, CHEN Y, et al. Photodegradation of humic acid from the surrounding soils of a sub-alpine Lake Tiancai [J]. *Journal of Lake Sciences*, 2022, 34(2):553-568.

[21] 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. JIA H Z, LIU Z W, SHI Y F, et al. Spectral characteristics of soil dissolved organic matter under different vegetation types in sandy soil [J]. *Chinese Science Bulletin*, 2021, 66(34):4425-4436.

[22] 王齐磊, 江韬, 赵铮, 等. 三峡库区典型农业小流域土壤溶解性有机质的紫外-可见及荧光特征 [J]. *环境科学*, 2015, 36(3):879-887. WANG Q L, JIANG T, ZHAO Z, et al. Ultraviolet-visible(UV-vis) and fluorescence spectral characteristics of soil dissolved organic matter(DOM) in typical agricultural watershed of Three Gorges Reservoir region [J]. *Environmental Science*, 2015, 36(3):879-887.

[23] LI W, JIA X, LI M, et al. Insight into the vertical characteristics of dissolved organic matter in 5-m soil profiles under different land-use types on the Loess Plateau [J]. *Science of the Total Environment*, 2019, 692:613-621.

[24] LEROY F, GOGO S, GUIMBAUD C, et al. Vegetation composition controls temperature sensitivity of CO<sub>2</sub> and CH<sub>4</sub> emissions and DOC concentration in peatlands [J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2017, 107:164-167.

[25] 许金鑫, 王初, 姚东京, 等. 崇明东滩湿地土壤溶解性有机质的光谱特征分析 [J]. *环境工程*, 2020, 38(11):218-225. XU J X, WANG C, YAO D J, et al. Spectral characteristics of soil dissolved organic matters in Chongming Dongtan wetland [J]. *Environmental Engineering*, 2020, 38(11):218-225.

[26] 祁延明, 程艳, 李琳, 等. 西北内陆流域不同土地利用土壤 DOM 荧光特征 [J]. *环境科学与技术*, 2021, 44(9):160-166. QI

---

Y M, CHENG Y, LI L, et al. DOM fluorescence characteristics of different land use soils in inland watershed of northwest China [J]. *Environmental Science & Technology*, 2021, 44(9):160-166.

[27] 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.

[28] 周石磊, 孙悦, 张艺冉, 等. 周村水库四季变化过程中水体溶解性有机物的分布与光谱特征 [J]. *环境科学学报*, 2019, 39(10):3492-3502. ZHOU S L, SUN Y, ZHANG Y R, et al. Impact of seasonal variations on distribution and spectral characteristics of dissolved organic matter in Zhoucun Reservoir [J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2019, 39(10):3492-3502.

[29] 周倩倩, 苏荣国, 白莹, 等. 舟山渔场有色溶解有机物(CDOM)的三维荧光-平行因子分析 [J]. *环境科学*, 2015, 36(1):163-171. ZHOU Q Q, SU R G, BAI Y, et al. Characterization of chromophoric dissolved organic matter(CDOM) in Zhoushan fishery using excitation-emission matrix spectroscopy(EEMs) and parallel factor analysis(PARAFAC) [J]. *Environmental Science*, 2015, 36(1):163-171.

[30] KHAN S, WU Y G, ZHANG X Y, et al. Estimation of concentration of dissolved organic matter from sediment by using UV-visible spectrophotometer [J]. *International Journal of Environmental Pollution and Remediation*, 2014, 2(1):18-23.

[31] PEURAVUORI J, PIHLAJA K. Isolation and characterization of natural organic matter from lake water: Comparison of isolation with solid adsorption and tangential membrane filtration [J]. *Environment International*, 1997, 23(4):441-451.

[32] 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. GAO J, JIANG T, LI L L, et al. Ultraviolet-visible(UV-vis) and fluorescence spectral characteristics of dissolved organic matter(DOM) in soils of water-level fluctuation zones of the Three Gorges Reservoir region [J]. *Environmental Science*, 2015, 36(1):151-162.

[33] 高参, 杜晓丽, 韩强, 等. 湿地植物芦苇根系分泌物的三维荧光光谱表征分析 [J]. *安全与环境学报*, 2017, 17(2):641-644. GAO C, DU X L, HAN Q, et al. Characterization analysis for *Phragmites australis* root exudates of wetland plant via three-dimensional excitation emission matrix fluorescence spectroscopy [J]. *Journal of Safety and Environment*, 2017, 17(2):641-644.

[34] 杨翔宇, 林学巍, 窦森. 不同氧气条件对玉米秸秆在土壤中腐殖化的影响 [J]. *东北林业大学学报*, 2013, 41(1):106-108, 132. YANG X Y, LIN X W, DOU S. Effect of O<sub>2</sub> concentration on humification of corn stalk in soil [J]. *Journal of Northeast Forestry University*, 2013, 41(1):106-108, 132.

[35] 陈佳, 李忠武, 金昌盛, 等. 不同淹水环境下湖泊沉积物 DOM 的特征与来源 [J]. *环境科学*, 2022, 43(9):4566-4575. CHEN J, LI Z W, JIN C S, et al. Characteristics and sources of DOM in lake sediments under different inundation environments [J]. *Environmental Science*, 2022, 43(9):4566-4575.

---

[36] LEE H S, HUR J, LEE M H, et al. Photochemical release of dissolved organic matter from particulate organic matter: Spectroscopic characteristics and disinfection by-product formation potential [J]. *Chemosphere*, 2019, 235:586-595.

[37] 赵丽, 孙超, 黄兴宇, 等. 毛白杨落叶与不同深度土中 DOM 的紫外与荧光特性对比研究 [J]. *河南理工大学学报(自然科学版)*, 2022, 41(1):75-80. ZHAO L, SUN C, HUANG X Y, et al. Comparative study of ultraviolet and fluorescence characteristics of populus tomentosa leaf litter and DOM from soil at different depths [J]. *Journal of Henan Polytechnic University (Natural Science)*, 2022, 41(1):75-80.

[38] CHEN W, WESTERHOFF P, LEENHEER J A, et al. Fluorescence excitation-emission matrix regional integration to quantify spectra for dissolved organic matter [J]. *Environmental Science & Technology*, 2003, 37(24):5701-5710.

[39] 李卫华, 刘怡心, 王伟, 等. 污水处理厂及受纳水体样品的三维荧光光谱解析 [J]. *光谱学与光谱分析*, 2015, 35(4):940-945. LI W H, LIU Y X, WANG W, et al. Analysis of samples from wastewater treatment plant and receiving waters using EEM fluorescence spectroscopy [J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2015, 35(4):940-945.

[40] 韩琦, 薛爽, 刘影, 等. 河流底泥中溶解性有机物的释放途径及影响因素研究 [J]. *中国环境科学*, 2016, 36(12):3737-3749. HAN Q, XUE S, LIU Y, et al. Release pathway and influencing factors of dissolved organic matter in river sediments [J]. *China Environmental Science*, 2016, 36(12):3737-3749.

[41] ZHANG Y, VAN DIJK M A, LIU M, et al. The contribution of phytoplankton degradation to chromophoric dissolved organic matter (CDOM) in eutrophic shallow lakes: Field and experimental evidence [J]. *Water Research*, 2009, 43(18):4685-4697.

[42] 方芳, 翟端端, 郭劲松, 等. 三峡水库小江回水区溶解有机物的三维荧光光谱特征 [J]. *长江流域资源与环境*, 2010, 19(3):323-328. FANG F, ZHAI D D, GUO J S, et al. Three-dimensional fluorescence spectroscopy characterization of dissolved organic matter in Xiaojiang River backwater area, Three Gorges Reservoir [J]. *Resources and Environment in the Yangtze Basin*, 2010, 19(3):323-328.