



海南北部滨海区不同土地利用模式下土壤DOM粒径分布与光谱特性

吴月颖, 吉恒宽, 吴蔚东, 吴治澎, 解钰, 符佩娇

引用本文:

吴月颖, 吉恒宽, 吴蔚东, 等. 海南北部滨海区不同土地利用模式下土壤DOM粒径分布与光谱特性[J]. *农业资源与环境学报*, 2020, 37(5): 654–665.

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.13254/j.jare.2020.0016>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

重庆农田土壤硫分布特征及其影响因素

罗曼琳, 窦添元, 向秋洁, 胡翔宇, 木志坚

*农业资源与环境学报*. 2019, 36(3): 287–297 <https://doi.org/10.13254/j.jare.2018.0306>

喀斯特山区土壤有机无机磷分级方法的比较研究

陈梦军, 舒英格, 肖盛杨

*农业资源与环境学报*. 2019, 36(4): 462–470 <https://doi.org/10.13254/j.jare.2018.0279>

玛纳斯河流域土壤盐渍化影响因素研究

郑琦, 王海江, 李万涛, 余露, 邵奇

*农业资源与环境学报*. 2016, 33(3): 214–220 <https://doi.org/10.13254/j.jare.2015.0263>

玛纳斯河流域耕地利用潜力评价

张丽, 盛建东, 蒋平安

*农业资源与环境学报*. 2015(4): 338–342 <https://doi.org/10.13254/j.jare.2015.0071>

宁夏青铜峡农耕土壤硒含量分布特征及其影响因素分析

李晓慧, 高宇, 赵万伏, 刘志坚

*农业资源与环境学报*. 2018, 35(5): 422–429 <https://doi.org/10.13254/j.jare.2018.0038>



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

吴月颖, 吉恒宽, 吴蔚东, 等. 海南北部滨海区不同土地利用模式下土壤 DOM 粒径分布与光谱特性[J]. 农业资源与环境学报, 2020, 37(5): 654–665.

WU Yue-ying, JI Heng-kuan, WU Wei-dong, et al. Size fractionation and optical properties of DOM under different land use types in the coastal area of northern Hainan Island[J]. *Journal of Agricultural Resources and Environment*, 2020, 37(5): 654–665.



开放科学 OSID

# 海南北部滨海区不同土地利用模式下土壤 DOM 粒径分布与光谱特性

吴月颖<sup>1</sup>, 吉恒宽<sup>1</sup>, 吴蔚东<sup>1</sup>, 吴治澎<sup>1\*</sup>, 解钰<sup>2</sup>, 符佩娇<sup>1</sup>

(1. 海南大学热带作物学院, 海口 570228; 2. 海南省农业科学院农业环境与土壤研究所, 海口 571100)

**摘要:**为研究海南热带滨海区不同土地利用模式对土壤溶解态有机质(DOM)含量组成及其分子粒径依赖性的影响,分别采集琼北滨海地区四种代表性土地利用模式下(水稻田、菜园、果园和橡胶园)土壤为研究材料,通过超滤技术对土壤水提液进行分级(所选滤膜孔径大小分别为0.7、0.45、0.2、0.1 μm和100、10、1 kDa),并对样品中DOM的碳、氮含量和光谱特性(紫外-可见吸收光谱、三维荧光光谱、傅立叶变换红外光谱)进行表征。结果表明,四种地类土壤溶解态有机碳(DOC)含量(<0.7 μm)为水稻土(171.9 mg·kg<sup>-1</sup>)最高,胶园土(116.7 mg·kg<sup>-1</sup>)最低;而C/N值则为胶园土(22.26)最高,菜园土(11.39)最低。在不同粒径中,4种地类土壤DOC含量为<1 kDa组分占比最高(45%以上),C/N值则在<1 kDa粒径中最高(31.43),10~100 kDa中最低(4.80)。紫外-可见吸收光谱和红外光谱表明了水稻土和菜园土DOM的分子芳香性(SUVA<sub>254</sub>)、分子量大小(S<sub>R</sub>)和疏水组分(SUVA<sub>260</sub>)比例显著高于胶园土和果园土,且含有较多的醇、酚、芳香类物质。三维荧光光谱特征表明四种土地利用模式土壤DOM的来源均为土壤微生物活动产生的“内源”。由此可见,不同的土地利用模式和粒径大小会影响土壤DOM的含量和组成结构,人类活动干扰是引起地类间DOM差异显著的重要因素。

**关键词:**溶解态有机质(DOM);土地利用模式;粒径分布;光谱特征

中图分类号:S153

文献标志码:A

文章编号:2095-6819(2020)05-0654-12

doi: 10.13254/j.jare.2020.0016

## Size fractionation and optical properties of DOM under different land use types in the coastal area of northern Hainan Island

WU Yue-ying<sup>1</sup>, JI Heng-kuan<sup>1</sup>, WU Wei-dong<sup>1</sup>, WU Zhi-peng<sup>1\*</sup>, XIE Yu<sup>2</sup>, FU Pei-jiao<sup>1</sup>

(1. College of Tropical Crops, Hainan University, Haikou 570228, China; 2. Institute of Agricultural Environment and Soil, Hainan Academy of Agricultural Sciences, Haikou 571100, China)

**Abstract:** To evaluate the size-dependent quantity and composition of DOM, soil samples of different land use types (paddy fields, vegetable gardens, orchards, and rubber plantation) were collected from a typical coastal area of northern Hainan. The samples were fractionated through ultrafiltration with membranes of different pore-sizes (0.7, 0.45, 0.2, 0.1 μm and 100, 10, 1 kDa) and the carbon and nitrogen content of DOM and their spectral characteristics (UV-Vis absorption spectrum, three-dimensional fluorescence spectrum, and Fourier transform infrared spectrum) were analyzed. The results showed that paddy soil had the highest DOC content (171.9 mg·kg<sup>-1</sup>), whereas rubber-plantation soil had the lowest content (116.7 mg·kg<sup>-1</sup>). The C/N ratio of DOC content was the highest in rubber-plantation

收稿日期:2020-01-08 录用日期:2020-04-13

作者简介:吴月颖(1995—),女,四川绵竹人,硕士研究生,从事土地利用生态环境效应研究。E-mail:1169172437@qq.com

\*通信作者:吴治澎 E-mail:peter@hainanu.edu.cn

基金项目:海南省自然科学基金项目(418QN208);国家自然科学基金项目(41807326)

Project supported: Hainan Provincial Natural Science Foundation of China(418QN208); The National Natural Science Foundation of China(41807326)

soil (22.26) and the lowest in vegetable-garden soil (11.39). Among different particle sizes of DOM, the proportions of soil DOC content and C/N ratio were the highest in the <1 kDa fraction for all land use types, but the C/N ratio was the lowest in the 10~100 kDa fraction. The characteristics of UV-Vis spectra and FTIR spectra indicated that the molecular aromaticity ( $SUVA_{254}$ ), molecular weight size ( $S_R$ ), and hydrophobic component ratio ( $SUVA_{260}$ ) of paddy soil and vegetable-garden soil were significantly higher than those of rubber-plantation soil and orchard soil, and contained more alcohol, phenol, and aromatic substances. 3D-EEM fluorescence spectra indicated that the source of soil DOM in the four land use types was endogenous DOM generated via soil microbial activities. Thus, different land use types and particle sizes affect the content and composition of soil DOM, and the interference from human activities is an important factor causing the significant difference of DOM between land use types.

**Keywords:** dissolved organic matter (DOM); land use type; particle size; spectral characteristics

土壤溶解性有机质 (Dissolved organic matter, DOM) 通常是指能够通过 0.7、0.45  $\mu\text{m}$  或 0.2  $\mu\text{m}$  等微米滤膜的一类碳基有机化合物<sup>[1]</sup>。DOM 作为环境中重要的天然配位体和吸着载体, 是一种非常活跃的化学物质, 能将土壤中的矿物质、有机质与生物成分联系在一起通过物理或化学作用改变金属与外源性化合物的环境行为, 从而对于修复重金属污染土壤有重要意义。此外, DOM 也是土壤微生物生长代谢过程重要的能源物质, 能调节土壤有机质分解和转化过程, 进而影响温室气体的排放。研究 DOM 调节土壤养分流失, 指示土壤质量等生态环境功能, 已经成为土壤、生态和环境科学交叉领域的研究热点<sup>[2]</sup>。

DOM 作为不同组分、不同分子大小形成的溶解态有机连续体, 其结构和组成已被国内外学者采用多种现代分析技术进行表征, 如傅立叶变换红外 (FTIR) 光谱、紫外-可见吸收光谱 (UV-Vis)、三维荧光光谱 (3D-EEM)、核磁共振波谱仪 (NMR) 和高效液相色谱质谱 (HPLC-MS) 法<sup>[3]</sup>等。其中傅立叶变换红外光谱、紫外-可见吸收光谱和三维荧光光谱结合平行因子分析等光谱方法具有成本低、灵敏度高、操作简便、样品消耗量少、可用于大批量实验且无需前处理等优点<sup>[4]</sup>, 已被广泛用于 DOM 的样品分析。实际上, 不同分子量级 DOM 的化学组成差异显著, 导致其在土壤与水环境中的行为归趋也不同。刘娜娜等<sup>[5]</sup>研究了浑太水系水体中不同粒径 DOM 光谱特征, 表明类腐殖质物质主要赋存于胶体形态 (相对分子质量 <100 kDa) 和真溶解态 (相对分子质量 <1 kDa), 且真溶解态腐殖质多来源于微生物分解的内源。Xu 等<sup>[6]</sup>研究了不同来源沉积物 DOM 分子量依赖光谱和金属结合特性, 表明高分子量 (1 kDa~0.45  $\mu\text{m}$ ) 的 DOM 相较于低分子量 (<1 kDa) DOM 有更高的金属结合潜能, 说明不同分子量 DOM 结构功能的差异显著影响 DOM 的生态环境行为。现有相关的研究主要集中在水体环

境<sup>[7-8]</sup>, 且土地利用变化对土壤 DOM 含量、组成的影响研究也主要集中于亚热带、温带地区<sup>[9-10]</sup>, 而对于土壤环境 DOM 结构组成的分子大小依赖性和热带地区土壤 DOM 含量组成的研究却鲜有报道。

滨海区作为海陆过渡带独特区位, 受到陆地和海洋的双重影响, 其农业用地更是作为地球环境变化的关键驱动力, 通过改变流域植被、土壤水文过程, 从源头上影响土壤-溪流系统中 DOM 来源、组成、迁移、降解/转化等行为模式。因此, 选择我国典型的热带岛屿——海南岛, 探讨其滨海区不同农业土地利用模式下 DOM 的含量与组成显得尤其必要。

本研究采用超滤 (UF) 技术分级方法, 综合运用傅立叶变换红外光谱、紫外-可见吸收光谱和三维荧光光谱结合平行因子分析的手段研究典型的热带地区——海南省北部滨海区, 探讨该区 4 种土地利用模式下不同分子量 DOM 的含量组成, 为研究热带滨海区土壤 DOM 的组成结构特征提供数据基础, 为合理利用土壤资源、改善土壤质量提供理论依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 研究区概况

采样地位于海南省热带滨海地区东寨港国家级自然保护区 (图 1)。保护区处于海口市和文昌市的交界处 (110°32'~110°37' E, 19°51'~20°10' N), 属湿地类型的自然保护区。保护区总面积 3 337.6  $\text{hm}^2$ , 其中红树林面积 1 578.2  $\text{hm}^2$ , 是以保护红树林湿地为主的北热带边缘河口港湾。研究区域属于典型的热带季风气候, 年平均气温为 23.8  $^{\circ}\text{C}$  (7 月份平均 28.4  $^{\circ}\text{C}$ , 1 月份平均 17.1  $^{\circ}\text{C}$ ); 年降雨量 1 700 mm, 5—10 月是多雨季, 11 月至次年 4 月为少雨季, 海水温度最高 32.6  $^{\circ}\text{C}$ , 最低 14.6  $^{\circ}\text{C}$ , 平均 24.5  $^{\circ}\text{C}$ 。在海南省海口市东寨港自然保护区外围选取 4 种土地利用模式: 水稻田 (SD)、橡胶林 (XJ)、菜园 (CY) 以及果园 (GS)。橡

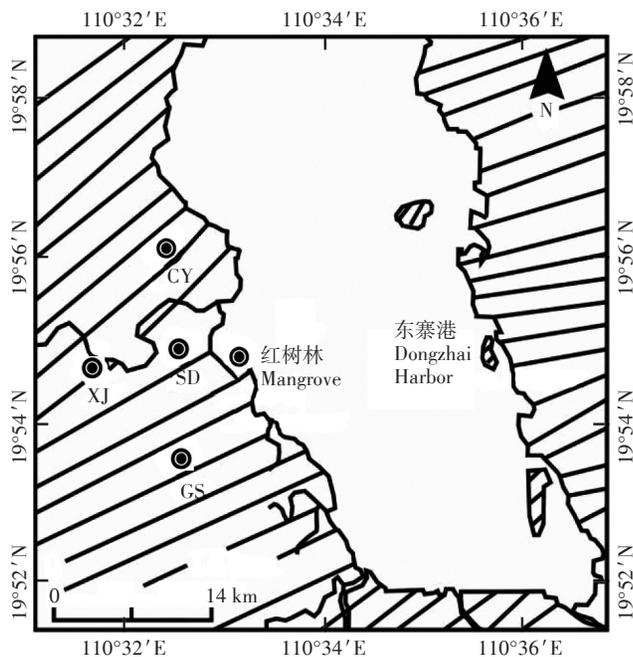


图1 东寨港自然保护区采样点分布

Figure 1 Distribution of sampling points in Dongzhai Harbor

胶林为单一橡胶树,树龄15年,每年每株施氮0.28 kg、磷0.6 kg、钾0.25 kg;菜园主要种植上海青,每年施氮330 kg·hm<sup>-2</sup>、磷220 kg·hm<sup>-2</sup>、钾98 kg·hm<sup>-2</sup>;果园种植荔枝树,每年施氮170 kg·hm<sup>-2</sup>、磷28 kg·hm<sup>-2</sup>、钾86 kg·hm<sup>-2</sup>;水稻田每年施氮420 kg·hm<sup>-2</sup>、磷57 kg·hm<sup>-2</sup>、钾92 kg·hm<sup>-2</sup>,四种地类土壤母质均为玄武岩。

## 1.2 样品采集与测定

### 1.2.1 土样采集及基本理化性质测定

在热带滨海地区以多点采样法分别采集水稻田、果园、橡胶林、菜园这四种土地利用模式(每种地类各设置1个15 m×15 m的样地)的表层(0~20 cm)土壤,新鲜土壤迅速带回室内,拣去可见石砾、动植物残体和碎屑等土壤异物后风干,过2 mm孔径尼龙筛备用。测定方法:土壤有机质采用重铬酸钾容量法;pH采用pH计法

(水土比2.5:1);全氮采用半微量凯氏法;全磷采用HClO<sub>4</sub>-H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>氧化法;全钾采用NaOH熔融-火焰光度法;土壤质地采用比重计法<sup>[11]</sup>。土壤基本理化性质见表1。

### 1.2.2 土壤DOM提取与分级

取过2 mm筛风干土壤30 g,按土水比1:5加入超纯水,置于转速为180 r·min<sup>-1</sup>的恒温振荡箱中,常温振荡0.5 h后放入转速4 000 r·min<sup>-1</sup>离心机中离心10 min后浸提。

取浸提好的上层溶液在避光条件下,用超滤装置过滤,滤膜孔径分别为0.7、0.45、0.2、0.1 μm和100、10、1 kDa。使孔径小于膜截留分子量的溶液或胶体颗粒透过超滤膜,收集滤液(即DOM溶液)并避光储存在4℃冰箱备用。

### 1.2.3 光谱测定

将7种不同粒径的DOM溶液分别进行红外光谱、紫外-可见吸收光谱、三维荧光光谱测定。

红外光谱:将DOM溶液冷冻干燥,压成薄片,采用傅立叶变换红外光谱仪(Spectrum 65,珀金埃尔默公司,美国)扫描,扫描波数范围4 000~450 cm<sup>-1</sup>。

紫外-可见吸收光谱:采用紫外-可见分光光度计(Lambda 25 UV spectrometer, PerkinElmer)测定,设定扫描范围:起始波长800 nm,终止波长220 nm,扫描间隔1 nm。

三维荧光光谱:采用F-320荧光光谱分析仪(天津港东科技),150 W 氙灯为激发光源,光电倍增电压为700 V,扫描波长范围:激发波长E<sub>x</sub>=200~450 nm,发射波长E<sub>m</sub>=230~650 nm,激发波长和发射波长增量均设为5 nm,狭缝宽度为10 nm,扫描间隔为1 nm,扫描速度为2 400 nm·min<sup>-1</sup>。

### 1.2.4 溶解态有机碳、氮测定

采用岛津TOC-L型TOC分析仪测定总碳及无机碳含量,两者的差值为DOC;采用连续流动分析仪测

表1 四种地类土壤基本理化性质

Table 1 Basic physical and chemical properties of the four soil types

土地利用模式 Land use types	pH	有机质 Organic matter/(g·kg <sup>-1</sup> )	全氮 Total nitrogen/(g·kg <sup>-1</sup> )	全磷 Total phosphorus/(g·kg <sup>-1</sup> )	全钾 Total potassium/(g·kg <sup>-1</sup> )	质地 Texture
水稻土SD	6.14±0.04a	35.37±0.02a	1.83±0.09a	0.52±0.16c	5.11±0.22a	黏壤土
胶园土XJ	5.48±0.04c	33.97±0.42b	1.61±0.09b	0.47±0.03c	3.34±1.13b	壤土
菜园土CY	5.47±0.03c	29.20±0.46c	1.67±0.04b	1.41±0.07a	4.43±0.15ab	壤质黏土
果园土GS	5.60±0.01b	26.39±0.32d	1.44±0.08c	0.90±0.09b	5.03±0.18a	壤质黏土

注:同列不同小写字母代表土地利用模式间差异显著(P<0.05)。

Note: Different lowercase letters in a column represent significant differences among land use types (P<0.05).

定总氮及无机氮(硝态氮、铵态氮)含量,溶解态有机氮(DON)为总氮与无机氮的差值。C/N值为DOC与DON的比值。

### 1.3 指标计算及含义

**SUVA<sub>254</sub>**: 254 nm处UV的吸光系数与DOC浓度之比(即SUVA=UVA/DOC),示踪DOM的芳香性,值越大,表明芳香化程度越高,有机物越难被分解和利用<sup>[12]</sup>。

**SUVA<sub>260</sub>**: 260 nm处UV的吸光系数与DOC的浓度之比,表示DOM中疏水性组分的含量,值越大,DOM疏水组分所占比例越高<sup>[13]</sup>。

**S<sub>R</sub>(S<sub>275-295</sub>/S<sub>350-400</sub>)**: 光谱斜率比值,S为光谱斜率,S<sub>275-295</sub>和S<sub>350-400</sub>分别为波长范围275~295 nm和350~400 nm的S值,与DOM结构、分子量有关,数值较低说明分子量高、芳香性强及维管束植物类有机质的输入,数值越大表明DOM分子量越小<sup>[14]</sup>。

**腐殖化指数(Humification index, HIX)**: 254 nm激发波长下,荧光发射光谱中Σ(435~480 nm)区域与Σ(300~345 nm)区域的峰面积比值。值越高,表明腐殖化程度越高,DOM较稳定<sup>[15]</sup>。HIX<4,表明DOM腐殖化程度较低,HIX>10,则腐殖化特征强<sup>[16-17]</sup>。

**荧光指数(Fluorescence index, FI)**: 激发波长为370 nm时,荧光发射光谱强度在450 nm与500 nm处的比值,用来区分DOM的主要来源。FI>1.9:主要为微生物活动所产生的内源性DOM,自生源特征明显;FI<1.4:以陆源输入为主的外源性DOM,自身生产力和微生物活动等贡献相对较低<sup>[18]</sup>。

**自生源指数(Autochthonous index, BIX)**: 310 nm激发波长下,发射波长380 nm与430 nm处荧光强度的比值,反映DOM自生源相对贡献,BIX值越大,自生源特征越明显,类蛋白组分贡献越大,生物可利用性越高<sup>[19]</sup>。BIX在0.6~0.7之间,DOM自生组分较少,代表陆源输入或受人类影响较大;BIX>1时,类蛋白组分贡献大,代表生物或细菌引起的自生来源且有机质为新近产生,生物可利用性高<sup>[20]</sup>。

### 1.4 数据处理和统计分析

采用Excel 2013和SPSS 17.0软件对数据进行统计分析。图表中数据为平均值±标准差。

采用单因素方差分析(One-way ANOVA),对不同地类土壤DOM含量和同一类型不同粒径的DOM含量进行方差分析和多重比较(α=0.05)。

采用Matlab 2016软件对EEM光谱数据进行平行因子分析,将原始EEM光谱数据进行转化矫正并扣

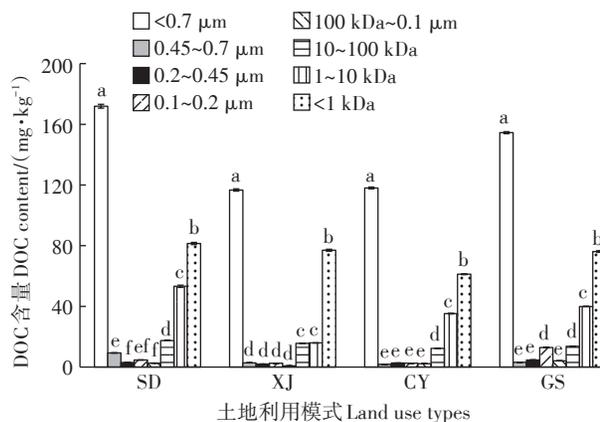
除空白,数据归一化处理提取模型得到2~7个组分,经裂半分析、核心一致性分析和随机初始化方法最终确定出3个组分。

## 2 结果与分析

### 2.1 不同土地利用模式下DOC含量的粒径分布特征

不同土地利用模式下DOC含量的粒径分布特征如图2所示。由图2可知,不同粒径下,四种地类的土壤DOC含量分布差异明显。从全量(<0.7 μm)上看,水稻土DOC含量(171.9 mg·kg<sup>-1</sup>)最高,胶园土DOC含量(116.7 mg·kg<sup>-1</sup>)最低。从粒径分布上看,随着粒径的减小,四种土地利用模式下的土壤DOC含量总体呈上升趋势,在粒径<1 kDa时达到最高。

不同土地利用模式下DOC含量百分比的粒径分



不同小写字母表示同一土地利用模式下粒径处理间差异显著(P<0.05)

The different lowercase letters under the same land use type indicate significant differences among treatments (P<0.05)

图2 不同土地利用模式下DOC含量的粒径分布特征

Figure 2 Particle size distribution characteristics of DOC content under different land use types

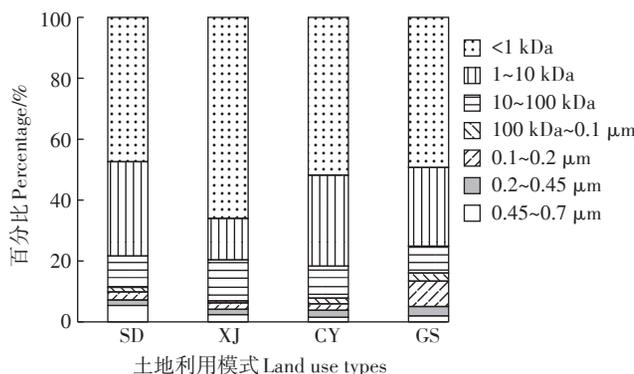


图3 不同土地利用模式下DOC含量百分比的粒径分布特征

Figure 3 Particle size distribution characteristics of DOC content percentage under different land use types

布特征如图3所示。由图3可知,四种土地利用模式下DOC所占百分比以<1、1~10、10~100 kDa这三种小粒径为主,而大粒径DOC所占百分比均较低。其中,粒径<1 kDa所占百分比最高,四种地类所占百分比由大到小顺序为胶园土(65.99%)>菜园土(51.83%)>果园土(49.27%)>水稻土(47.38%)。

## 2.2 不同土地利用模式下各粒径DOM的C/N值

四种土地利用模式土壤在不同粒径中的C/N值如表2所示。表2显示,四种地类土壤DOM(<0.7 μm)中,胶园土DOM的C/N值最高(22.26),而菜园土C/N值最低(11.39)。随着粒径减小,四种土地利用模式的C/N值整体呈波浪式上升,在10~100 kDa粒径中C/N最小,但仍以胶园土(10.74)最高,菜园土(4.80)最低;在<1 kDa粒径中,四种地类的C/N值均增加到最大,仍为胶园土最高。

## 2.3 不同土地利用模式下各粒径DOM紫外-可见吸收光谱特征

四种土地利用模式下各粒径DOM的紫外-可见吸收光谱特征值如表3所示。表3显示,四种土地利用模式中,从全量(<0.7 μm)上看,水稻土DOM的SUVA<sub>254</sub>值最大,胶园土最低,随着粒径减小,SUVA<sub>254</sub>值总体呈减小趋势;SUVA<sub>260</sub>值与SUVA<sub>254</sub>值呈现规律一致,并且,水稻土和菜园土的SUVA<sub>254</sub>值、SUVA<sub>260</sub>值在粒径<0.7、<0.45、<0.2 μm下均大于10。四种土地利用模式下土壤DOM的SUVA<sub>260</sub>值随着粒径减小并未呈现出明显的减小趋势,但SUVA<sub>260</sub>最小值都出现在小粒径中,四种土地利用模式下土壤DOM的S<sub>R</sub>值与SUVA<sub>254</sub>值呈现相反规律,即随着粒径减小,S<sub>R</sub>值增大。

## 2.4 不同土地利用模式下各粒径DOM三维荧光光谱特征

四种土地利用模式下各粒径DOM的荧光光谱特征值如表4所示。四种土地利用模式下DOM的BIX指数中,胶园土(1.14~1.29)最大,水稻土最小(0.81~0.88),菜园土(0.93~1.15)和果园土(0.88~1.29)相差不大。水稻土在不同粒径下DOM的BIX指数均小于

1,且最大值0.88在最小粒径(<1 kDa)出现,果园土也在最小粒径(<1 kDa)出现最大值(1.29),胶园土和菜园土DOM的BIX值随着粒径减小总体呈增大趋势。

四种土地利用模式下DOM的FI值为1.82~2.63,自生源特征明显。从粒径分布上来看,四种土地利用模式下DOM的FI值变化均不明显。

从粒径<0.7 μm上看,四种地类土壤DOM的HIX值为水稻土(2.51)最高,胶园土(1.09)最低;水稻土在不同粒径中DOM的HIX值差异不显著,胶园土随着粒径减小其DOM的HIX值也减小,果园土DOM的HIX值随着粒径的减小先增大后减小,四种地类土壤DOM最小值均出现在最小粒径(<1 kDa)。

结合Matlab平行因子分析,本研究区四种地类土壤的DOM均识别出类似的三种组分:C1、C2和C3。C1组分来源为疏水性高分子物质,与高等植物和芳香碳含量有关;C2组分主要来源于微生物转化,为降解的半醌类物质;C3组分主要来源为色氨酸、氨基酸类物质,由新鲜植物的凋落物产生。

四种土地利用模式下土壤DOM组分在不同的粒径范围分布情况如图4所示。水稻土中,C1组分占比最大,约为45%,随着粒径减小,C1组分基本不变,C2组分只在最小粒径(<1 kDa)中略有减小,而C3组分在最小粒径中略有增加,C2、C3在其他粒径中差异不显著。胶园土、菜园土和果园土DOM占比总体上呈现相同规律,即C1和C2组分占比随着粒径减小而减少,C3组分占比随着粒径减小而增加。除水稻土外,其他三种地类土壤DOM均在最小粒径(<1 kDa)出现C2组分最小值和C3组分最大值。

## 2.5 不同土地利用模式下不同粒径土壤DOM红外光谱特征

四种土地利用模式下粒径<0.7 μm和粒径<1 kDa土壤DOM的红外光谱如图5所示。两种粒径下四种地类土壤DOM的红外吸收曲线特征峰类似,3400 cm<sup>-1</sup>附近出现的信号峰表明氨基酸盐中的N—H键、醇、酚以及羧酸中羟基O—H存在,这些羟基主要来

表2 四种土地利用模式各粒径范围的C/N值

Table 2 C/N values of each particle size of the four land use types

土地利用模式 Land use types	<0.7 μm	0.45~0.7 μm	0.2~0.45 μm	0.1~0.2 μm	100 kDa~0.1 μm	10~100 kDa	1~10 kDa	<1 kDa
SD	15.80	20.78	11.11	12.24	7.29	5.63	19.46	22.79
XJ	22.26	24.00	20.69	19.23	15.00	10.74	16.97	31.43
CY	11.39	7.30	12.05	11.90	10.48	4.80	11.82	15.64
GS	18.76	17.83	22.38	24.09	16.85	7.06	16.11	28.59

表3 不同土地利用模式下各粒径DOM的紫外-可见吸收光谱特征值

Table 3 Characteristic values of UV-Vis absorption spectrum of DOM of different particle sizes under different land use types

土地利用模式 Land use types	粒径 Particle size	SUVA <sub>254</sub>	SUVA <sub>260</sub>	S <sub>R</sub>
SD	<0.7 μm	14.04±1.35Aa	13.57±1.31Aa	0.60±0.06Bb
	<0.45 μm	11.40±1.15Bb	10.97±1.10Ab	0.61±0.05Bb
	<0.2 μm	11.71±0.14Bb	11.25±0.15Bb	0.70±0.00Cb
	<0.1 μm	3.03±0.13Bc	2.86±0.13Bc	0.77±0.39Bb
	<100 kDa	2.36±0.02BCc	2.20±0.00BCc	0.86±0.16Bab
	<10 kDa	3.12±0.57Ac	2.94±0.56Ac	1.19±0.17Aa
	<1 kDa	2.82±0.01Ac	2.65±0.01Bc	1.14±0.17Ba
XJ	<0.7 μm	4.05±1.55Cb	3.87±1.50Cb	1.17±0.38Aab
	<0.45 μm	5.52±0.11Ca	5.29±0.11Ca	0.84±0.29ABbcd
	<0.2 μm	4.86±0.15Cab	4.66±0.19Cab	1.52±0.27Aa
	<0.1 μm	3.81±0.47Bb	3.75±0.39Bb	1.14±0.22Babc
	<100 kDa	2.69±0.14Bcd	2.55±0.13Bc	0.72±0.01Bd
	<10 kDa	3.80±0.16Abe	3.61±0.15Ab	0.68±0.03Bd
	<1 kDa	2.15±0.00Ad	2.02±0.00Bc	0.75±0.00Ccd
CY	<0.7 μm	11.81±0.13Bb	11.28±0.12Bb	0.74±0.07Bc
	<0.45 μm	13.79±0.53Aa	13.30±0.55Ba	1.04±0.22Aab
	<0.2 μm	14.79±0.80Aa	14.29±0.80Aa	1.03±0.14Bab
	<0.1 μm	10.26±2.48Ab	9.88±2.39Ab	1.21±0.03Ba
	<100 kDa	3.83±0.42Ac	3.59±0.40Acd	1.02±0.21Bab
	<10 kDa	2.87±0.63Ac	2.67±0.61Ad	0.87±0.17Bbc
	<1 kDa	2.75±0.71Ac	4.75±0.68Ac	0.94±0.06Cabc
GS	<0.7 μm	4.64±0.11Cb	4.42±0.11Cb	0.74±0.01Bc
	<0.45 μm	6.33±0.62Ca	6.04±0.58Ca	0.89±0.06ABbc
	<0.2 μm	3.78±0.28Db	3.58±0.26Db	1.23±0.00Bbc
	<0.1 μm	3.29±0.81Bbc	3.11±0.78Bbc	2.34±0.14Aa
	<100 kDa	2.08±0.00Cc	1.96±0.01Cc	2.93±1.04Aa
	<10 kDa	3.60±1.72Ab	3.42±1.68Ab	1.36±0.14Abc
	<1 kDa	2.13±0.63Ac	1.97±0.57Bc	1.55±0.10Ab

注:不同大写字母表示同一粒径下土地利用模式间差异显著( $P<0.05$ );不同小写字母代表同一土地利用模式下粒径间差异显著( $P<0.05$ )。下同。

Note: Different uppercase letters represent significant differences among land use types for the same particle size ( $P<0.05$ ); Different lowercase letters represent significant differences among particle sizes for the same land use type ( $P<0.05$ ). The same below.

源于样品中的纤维素、糖类、淀粉等碳水化合物等<sup>[21]</sup>, 1 635  $\text{cm}^{-1}$ 附近出现的信号峰表明芳香烃中C=C键的振动、烯烃中C=C键、羧酸盐中—COO<sup>-</sup>以及酰胺中C=O官能团的不对称伸缩以及氨基酸氨基N—H的弯曲引发<sup>[22]</sup>,归属于木质素,1 400  $\text{cm}^{-1}$ 附近出现的信号峰表明脂肪烃和含—CH<sub>3</sub>化合物C—H对称弯曲振动的存在<sup>[23]</sup>,1 100  $\text{cm}^{-1}$ 附近出现的信号峰表明醇、多糖中C—O伸缩振动的存在<sup>[24]</sup>,694  $\text{cm}^{-1}$ 附近出现的信号峰表明烯烃CH<sub>2</sub>—存在。

四种土地利用模式下土壤DOM中各官能团的相对含量如表5所示。从粒径<0.7 μm范围看,四种地类土壤DOM的官能团含量最高的均是氨基酸N—H

键和羟基O—H,其次是C—O键,表明四种地类土壤DOM均含有较多的多糖和碳水化合物,其中水稻土含量(366.79  $\text{cmol} \cdot \text{kg}^{-1}$ )最高,果园土含量(231.68  $\text{cmol} \cdot \text{kg}^{-1}$ )最低。四种地类土壤DOM中的C=C双键含量仍以水稻土含量(86.08  $\text{cmol} \cdot \text{kg}^{-1}$ )最高,胶园土含量(29.48  $\text{cmol} \cdot \text{kg}^{-1}$ )最低。四种地类土壤DOM中甲基—CH<sub>3</sub>和C—H键含量以及C—O键含量为菜园土和水稻土高于胶园土和果园土,表明水稻土和菜园土DOM中含有脂肪族类物质较多,多糖和碳水化合物类物质含量较高,而果园土和胶园土DOM中含量较少。

<1 kDa粒径范围内,四种地类土壤DOM中的

C=C双键和C—O键含量与粒径<0.7 μm相比,水稻土和菜园土含量减小,胶园土和果园土含量增加,表明粒径减小,水稻土和菜园土DOM中芳香类、多糖和碳水化合物类物质含量减少,胶园土和果园土壤DOM中的芳香类、多糖和碳水化合物类物质含量增加。四种地类土壤DOM中甲基—CH<sub>3</sub>和C—H键含量相较于粒径<0.7 μm含量增加,表明土壤DOM中脂肪类物质增加。

### 3 讨论

#### 3.1 不同土地利用模式下各粒径土壤DOC含量差异

本研究发现,四种土地利用模式下的土壤DOC含量均以小粒径为主体,且随粒径减小呈上升趋势,其中<1 kDa组分占比最高(45%以上)。陈雪霜等<sup>[25]</sup>在研究水体不同粒径DOM时也发现胶体组分(1

kDa~0.22 μm)占比最高,这与本研究结果类似,即DOC主要分布在小粒径中。从全量(<0.7 μm)上看,四种土地利用模式下DOC含量大小顺序为水稻土>菜园土>果园土>胶园土,表明了人类干扰强度大的农业耕地DOC含量高于人类活动较小的果园和林地。陈高起等<sup>[26]</sup>研究岩溶区5种土地利用方式对表层土壤DOC含量时发现,其DOC含量大小顺序为菜地>林地>草地>橘园地>弃耕地,卫东等<sup>[27]</sup>研究安徽省芜湖市区附近不同地类时发现,农田土壤DOC含量高于林地土壤。不同区域研究结果的差异与当地的植被覆盖、土壤类型、微生物量、pH以及人类活动干扰等有关。吴金水等<sup>[28]</sup>研究表明,稻田土壤在淹水条件下厌氧微生物活动会产生小分子有机酸使稻田土DOC含量增加,并且微生物群落会参与土壤C元素氧化还原的电子传递。本研究中四种地类土壤皆为酸

表4 不同土地利用模式下各粒径DOM的荧光光谱特征值

Table 4 Characteristic values of fluorescence spectra of DOM of different particle sizes under different land use types

土地利用模式 Land use types	粒径 Particle size	自生源指数 BIX	荧光指数 FI	腐殖化指数 HIX
SD	<0.7 μm	0.84±0.11Ba	1.89±0.25Aa	2.51±0.36Aa
	<0.45 μm	0.86±0.10Ca	1.82±0.12Aa	2.37±0.38Aa
	<0.2 μm	0.85±0.13Ba	1.90±0.15Ba	2.28±0.29Aa
	<0.1 μm	0.81±0.13Ba	2.06±0.08Aa	2.50±0.60Aa
	<100 kDa	0.84±0.15Ba	1.86±0.09Aa	2.40±0.44Aa
	<10 kDa	0.85±0.08Ba	1.88±0.14Aa	2.27±0.51Aa
	<1 kDa	0.88±0.13Ba	1.99±0.13Aa	1.84±0.42Aa
XJ	<0.7 μm	1.17±0.13Aa	1.98±0.16Aa	1.09±0.10Ca
	<0.45 μm	1.29±0.11Aa	2.11±0.22Aa	0.92±0.04Cb
	<0.2 μm	1.19±0.17Aa	2.17±0.19ABa	0.96±0.02Cab
	<0.1 μm	1.25±0.28Aa	2.15±0.19Aa	0.89±0.08Cb
	<100 kDa	1.20±0.21Aa	1.99±0.25Aa	0.89±0.01Cb
	<10 kDa	1.14±0.14Aa	2.17±0.37Aa	0.96±0.12Bab
	<1 kDa	1.26±0.27Aa	2.05±0.39Aa	0.70±0.09Bc
CY	<0.7 μm	0.93±0.12ABa	2.11±0.04Aa	2.03±0.31ABa
	<0.45 μm	1.15±0.14ABa	2.22±0.38Aa	1.43±0.39BCab
	<0.2 μm	1.01±0.13ABa	2.44±0.27Aa	1.28±0.46BCab
	<0.1 μm	0.97±0.14ABa	2.15±0.17Aa	1.47±0.32BCab
	<100 kDa	1.10±0.15ABa	2.08±0.18Aa	1.68±0.51Bab
	<10 kDa	1.05±0.14ABa	2.12±0.29Aa	1.67±0.5ABab
	<1 kDa	1.14±0.04ABa	2.16±0.08Aa	1.23±0.18Bb
GS	<0.7 μm	0.94±0.20ABa	2.01±0.04Ab	1.56±0.18BCa
	<0.45 μm	0.97±0.18BCa	2.01±0.18Ab	1.58±0.27Ba
	<0.2 μm	0.88±0.14Ba	2.02±0.05Bb	1.61±0.10Ba
	<0.1 μm	0.91±0.05ABa	2.14±0.04Aab	1.68±0.12Ba
	<100 kDa	0.87±0.18ABa	1.98±0.17Ab	1.91±0.20ABa
	<10 kDa	1.00±0.09ABa	1.90±0.22Ab	1.96±0.28Aa
	<1 kDa	1.29±0.20Ab	2.63±0.77Aa	1.05±0.40Bb

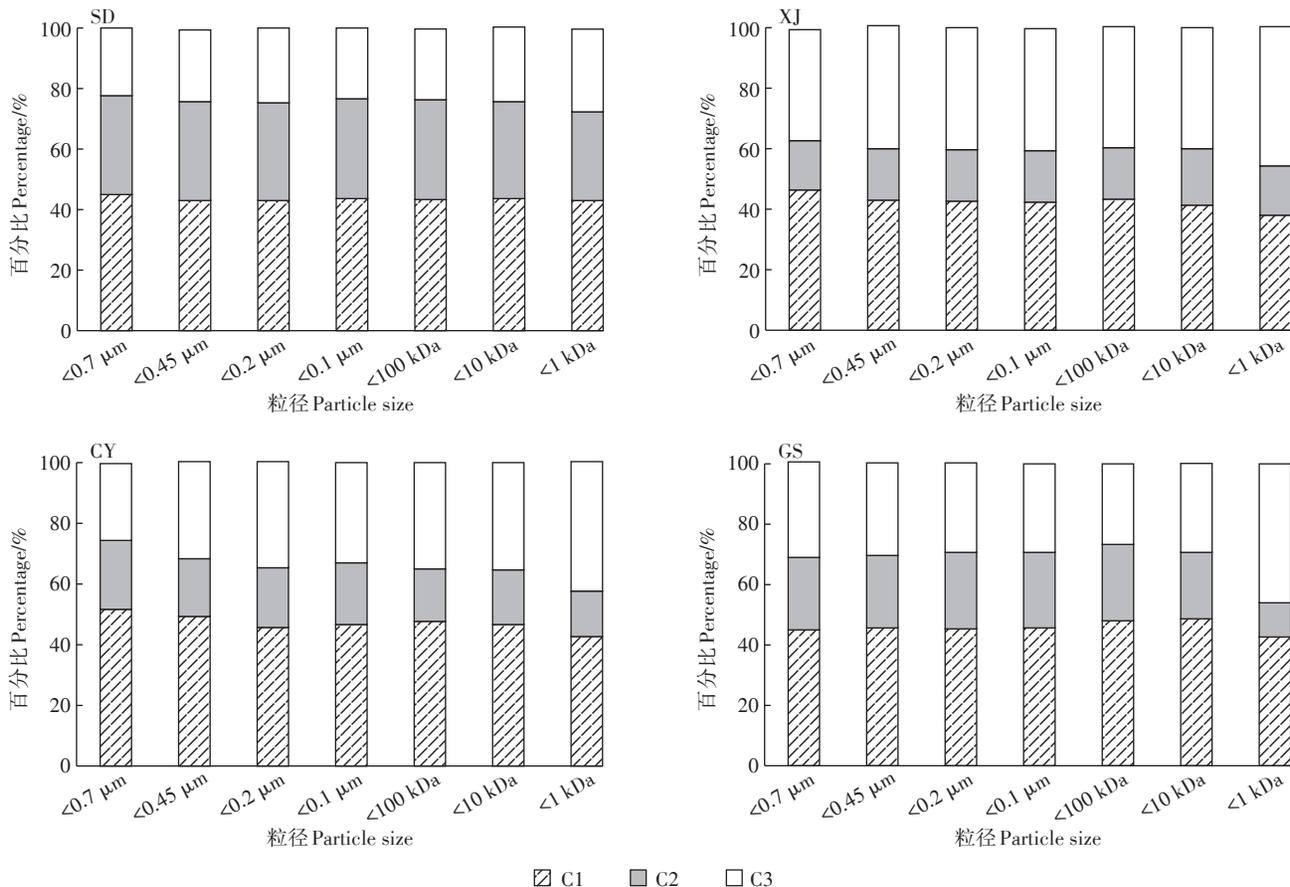


图4 不同粒径下四种地类土壤DOM的组分分布

Figure 4 DOM component distribution of four soil types with different particle sizes

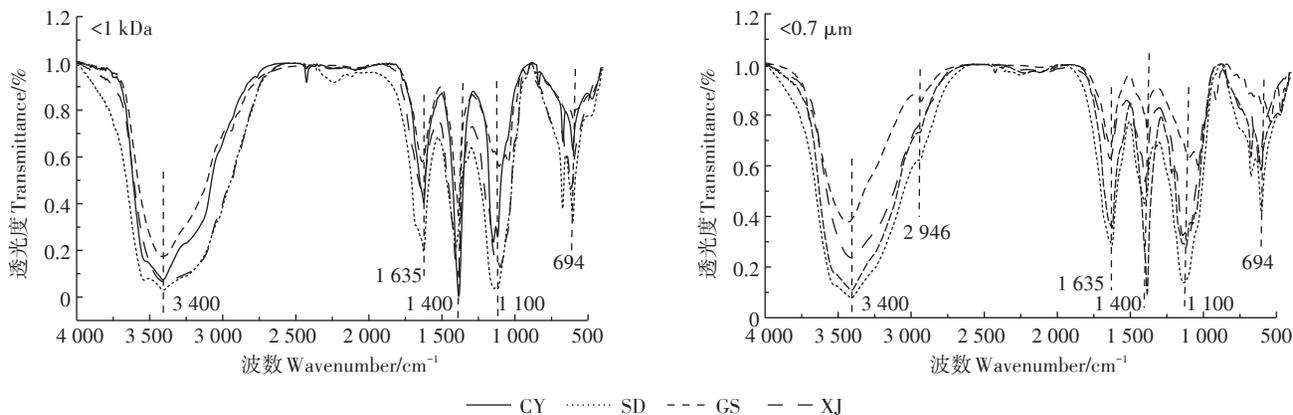


图5 不同土地利用模式下两种粒径土壤DOM的红外光谱

Figure 5 FTIR spectrum of soil DOM of two particle sizes under different land use types

性土壤(pH 5.47~6.14),而水稻土常年淹水,酸性土壤经淹水后,铁锰氧化物在缺氧条件下被还原形成 $Fe(OH)_2$ 和 $Mn(OH)_2$ ,使水稻土pH值升高,促进DOC从土壤矿物上解吸,进而增加DOC的含量,因此水稻土DOC含量最高,同样水稻土的有机质含量也最高。研究还发现人类活动,如灌溉、施肥等,会导致农业土

壤中DOC的含量显著提高<sup>[29]</sup>。水稻土和菜园土DOC含量高于果园土和胶园土,由样地的施肥情况可知,这两种地类施入的氮、磷、钾肥总体上高于果园和橡胶林,加上受人类活动干扰强度大,如翻地深耕等会加强土壤微生物活动,促进有机质分解和DOC释放;果园土、胶园土受人类干扰强度小,且胶园土属半自

表5 不同土地利用模式下两种粒径土壤DOM中各官能团的相对含量( $\text{cmol}\cdot\text{kg}^{-1}$ )

Table 5 The relative contents of functional groups in soil DOM of two particle sizes under different land use types( $\text{cmol}\cdot\text{kg}^{-1}$ )

土地利用模式 Land use types	官能团 Functional group	粒径 Particle size	
		<0.7 $\mu\text{m}$	<1 kDa
SD	氨基酸盐中的N—H或羟基 O—H(醇、酚以及羧酸)	366.79	691.40
	C=C双键(芳香烃)	86.08	72.88
	甲基—CH <sub>3</sub> 、C—H键(脂肪族)	24.38	40.07
	C—O键(醇、多糖、碳水化合物)	137.54	131.92
	烯烃CH <sub>2</sub> —	11.08	15.71
XJ	氨基酸盐中的N—H或羟基 O—H(醇、酚以及羧酸)	275.88	627.33
	C=C双键(芳香烃)	29.48	49.46
	甲基—CH <sub>3</sub> 、C—H键(脂肪族)	24.74	57.65
	C—O键(醇、多糖、碳水化合物)	105.50	129.79
	烯烃CH <sub>2</sub> —	8.03	10.69
CY	氨基酸盐中的N—H或羟基 O—H(醇、酚以及羧酸)	355.24	520.47
	C=C双键(芳香烃)	72.07	52.24
	甲基—CH <sub>3</sub> 、C—H键(脂肪族)	53.79	64.50
	C—O键(醇、多糖、碳水化合物)	114.20	87.42
	烯烃CH <sub>2</sub> —	8.59	7.71
GS	氨基酸盐中的N—H或羟基 O—H(醇、酚以及羧酸)	231.68	442.52
	C=C双键(芳香烃)	35.55	43.43
	甲基—CH <sub>3</sub> 、C—H键(脂肪族)	11.78	36.40
	C—O键(醇、多糖、碳水化合物)	54.24	63.62
	烯烃CH <sub>2</sub> —	4.67	2.33

然林地土壤,管理和种植模式基本为免耕,因此DOC含量最低,这与陈高起等<sup>[26]</sup>、卫东等<sup>[27]</sup>研究结果一致。而在粒径<1 kDa中,四种地类土壤DOC含量百分比以胶园土占比最高(65.99%),水稻土(47.38%)最低,在粒径1~10 kDa中则刚好相反,表明不同土地利用模式会影响DOC的粒径分布。Antonio等<sup>[30]</sup>将DOM分子分为氨基酸、醛酮等小分子量分子(<1 kDa)与腐植酸、腐黑物等大分子量分子(>1 kDa)。由此,胶园土的DOC以<1 kDa的醛、酮等小分子为主,而水稻土DOC则是腐植酸(1~10 kDa)等物质占比最高。

### 3.2 不同土地利用模式下各粒径土壤DOM的C/N值差异

表2表明了四种地类土壤DOM的C/N值在<1 kDa粒径中最高,10~100 kDa中最低。He等<sup>[31]</sup>基于SEC-OCD色谱图的方法,将DOM分成>10 kDa的非腐殖质高分子量亲水性生物大分子(多糖和一些蛋白质)和<1 kDa的腐殖质和低分子量有机质(如酸、醛、

酮等),这表明四种地类土壤DOM中腐殖质和低分子量有机质C/N值高,而非腐殖质高分子(多糖和蛋白质组分)C/N值低。研究表明,DOM的C/N值高低可以反映其腐殖化程度,值越高,腐殖化程度越低。本研究中四种地类土壤在粒径<0.7  $\mu\text{m}$ 和<1 kDa下均以胶园土DOM的C/N值最高,菜园土最低,其他粒径中C/N值随地类不同而波动变化。C/N值与DOC和DON的释放有关,人为活动会影响DOM中DOC和DON的释放,DOC的释放主要取决于土壤有机质的含量,而DON的释放不受土壤有机质的约束,主要受土壤无机氮含量的影响,胶园土属半自然林地土壤,在四种地类中受人类活动干扰强度最低,DON释放速率低而C/N值则偏高;菜园土壤受人类活动(耕种、施入氮肥等)影响DON的释放速度快于DOC释放,因此C/N值低于胶园土。Heinz等<sup>[32]</sup>在研究农业和森林影响水源DOM时也发现,由于农田土壤微生物的活动,农业水源中的DOM主要是复杂的土壤源性芳香物质,腐殖化程度较高,C/N值较森林土壤低,与本研究结果类似。

### 3.3 不同土地利用模式下各粒径土壤DOM的光谱特征

本研究中,不同土地利用模式下土壤DOM的紫外光谱特征值差异显著,四种地类土壤DOM的SUVA<sub>254</sub>和SUVA<sub>260</sub>随粒径减小而减小,在小粒径组分<100 kDa和<1 Ka出现最小值,从全量(<0.7  $\mu\text{m}$ )上看,均为水稻土>菜园土>果园土>胶园土,表明水稻土DOM的芳香化程度高、分子量较大且疏水组分占比最高。这说明水稻土DOM中富含芳香环结构的腐殖质,如酚、醇类物质。李璐璐等<sup>[14]</sup>研究土壤及沉积物中DOM的紫外光谱特征值发现疏水性与芳香结构关系密切,芳香性结构主要存在于疏水组分中。研究表明,造成水稻土DOM的芳香化程度高的原因是水环境中存在较多水生植物残体,经厌氧微生物降解后产生大量芳香性化合物,造成沉积物芳香性较高<sup>[33]</sup>。这与本研究结果一致,且与前文提到的土壤DOM的DOC含量和C/N值表现为相同的结果。

四种土地利用模式下土壤DOM来源均为土壤微生物活动所产生的内源性DOM(FI $\geq$ 1.9, BIX $\geq$ 1,且均含有C2组分),胶园土HIX最小、BIX最大,且C3组分占比在四种地类中也最高,水稻土则相反。这表明胶园土DOM的自生源特征明显,有机质为新近凋落的树叶等,类蛋白组分贡献大,生物可利用性高,同时也说明胶园土DOM的腐殖化程度低,这与前文对四种地类土壤DOM的C/N值和紫外吸收光谱特征值的结

果一致。瞿园园等<sup>[34]</sup>在研究胶州湾滨海湿地土壤DOM的荧光特性时也发现,该地土壤DOM主要由生物活动内源产生,但芳香程度和腐殖化程度不高,与本研究结果类似。从粒径分布上看,随粒径减小,BIX和FI略有增大,而HIX值随着粒径减小而减小,并在最小粒径(<1 kDa)中出现最小值。表明小粒径的土壤DOM腐殖化程度低,分子量和芳香性也小,与土壤DOM的紫外吸收光谱中SUVA<sub>254</sub>和SUVA<sub>260</sub>值变化趋势一致。陈雪霜等<sup>[25]</sup>在研究水体DOM不同分子量组分三维荧光特征中发现,所有样本随分子量降低,FI和BIX增加,HIX降低,“内源”输入特征增强,腐殖化程度降低,这与本文研究结果一致。水稻土和菜园土DOM中降解的半醌类物质和疏水性的高分子物质(C1和C2)高于胶园土和果园土,是由于这两种地类土壤受人类活动影响大,加强了土壤微生物活动,增强了腐殖质物质的形成,这与前文观察到的紫外特征值和C/N值及HIX显示出相同的结果。果园土和橡胶林地表面留存大量的植物凋落物,使得DOM的色氨酸等蛋白类物质(C3)高于水稻土和菜园土。随着粒径减小,类腐殖质物质(C1和C2)的百分含量减小,而类蛋白质(C3)的百分含量增加,这种趋势与前文对HIX和BIX的研究结果一致。

不同土地利用模式和粒径分布对土壤DOM的结构和官能团的数量有明显影响。四种地类土壤DOM的N—H键和羟基O—H含量都最高,表明四种地类土壤中存在大量的多糖和碳水化合物。而在人类干扰强度大的土壤(水稻土和菜园土)DOM中的醇、酚、氨基酸、芳香类物质含量高于半自然的橡胶林,结合前文荧光光谱特征值分析,其BIX值和C3组分也低于橡胶林地,即蛋白类物质更少。在<1 kDa粒径中,水稻土和菜园土C=C双键和C—O键含量减小,而胶园土和果园土含量增加,表明粒径减小,水稻土和菜园土DOM中芳香类、多糖和碳水化合物类物质含量减少,这与前文观察到的SUVA<sub>254</sub>和HIX值在最小粒径出现最小值的规律一致。综上所述,农田土壤在人类合理的干扰下微生物活动及腐殖质的形成增强,使得DOM的芳香性和腐殖化程度更高。盛浩等<sup>[35]</sup>在研究土地利用变化对花岗岩红壤底土DOM影响时发现,天然林改为杉木人工林、板栗园后DOM常含有更多的木质素、酚类等物质,这与本文研究结果类似。

## 4 结论

(1)土地利用模式显著影响土壤DOC含量和C/N

值。从全量上看,四种地类土壤DOC含量为116.7~171.9 mg·kg<sup>-1</sup>,其大小顺序表现为水稻土>菜园土>果园土>胶园土;受人类干扰力度大的农业耕地DOM的C/N值低于林地而腐殖化程度更高。

(2)土地利用模式影响土壤DOC含量和C/N值的粒径分布。四种地类土壤DOC含量分布以小粒径为主体,且<1 kDa组分占比最高(45%以上);C/N值在<1 kDa粒径中最高(31.43),在10~100 kDa粒径中最低(4.80),表明腐殖质低分子量有机质含量高,而非腐殖质高分子量有机质(多糖和蛋白质组分)含量低。

(3)三种光谱特征综合表明四种地类土壤DOM来源均为土壤微生物活动产生的“内源”,且随粒径减小,DOM的芳香性和分子量相应降低,但内源输入特征增强;紫外和荧光光谱特征表明水稻土DOM腐殖化程度和芳香性最高,疏水组分占比和分子量最大,胶园土DOM的腐殖化程度最低,但蛋白类组分占比高,人类活动干扰是引起地类间差异显著的重要因素;红外光谱进一步表明腐殖化程度高的水稻土含有更多的醇、酚、芳香类物质。

## 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 Wei, BAI Ze-lin, LI Yi-long, 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] 李睿,屈明.土壤溶解性有机质的生态环境效应[J].生态环境,2004(2):125-129.  
LI Rui, QU Ming. Effects of dissolved organic matter on environment [J]. *Ecology and Environmental Sciences*, 2004(2):125-129.
- [3] Dong H P, Wang D Z, Xie Z X, et al. Metaproteomic characterization of high molecular weight dissolved organic matter in surface seawaters in the South China Sea[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 2013, 109: 51-61.
- [4] 任兆勇,颜秉斐,于会彬,等.白塔堡河不同粒级有机物的三维荧光特征解析[J].环境保护科学,2017,43(2):1-6.  
REN Zhao-yong, YAN Bing-fei, YU Hui-bin, et al. Characteristic analysis of size-grading organic matters in Baitapu River by three-dimensional fluorescence[J]. *Environmental Protection Science*, 2017, 43(2):1-6.
- [5] 刘娜,李斌,刘瑞霞,等.浑太水系水体中不同粒径有机胶体荧光光谱特性[J].环境科学,2014,35(11):4103-4110.  
LIU Na-na, LI Bin, LIU Rui-xia, et al. Fluorescence characteristics of fractionated colloidal organic matter in freshwater from Hunhe and Taizihe watersheds[J]. *Environmental Science*, 2014, 35(11):4103-4110.
- [6] Xu H C, Zou L, Guan D X, et al. Molecular weight-dependent spectral

- and metal binding properties of sediment dissolved organic matter from different origins[J]. *Science of the Total Environment*, 2019, 665: 828–835.
- [7] Ilina S M, Drozdova O Y, Lapitskiy S A, et al. Size fractionation and optical properties of dissolved organic matter in the continuum soil solution-bog-river and terminal lake of a boreal watershed[J]. *Organic Geochemistry*, 2014, 66: 14–24.
- [8] Cory R M, Kaplan L A. Biological lability of stream-water fluorescent dissolved organic matter[J]. *Limnology and Oceanography*, 2012, 57(5): 1347–1360.
- [9] 吕学军, 刘庆, 陈印平, 等. 黄河三角洲土地利用方式对土壤可溶性有机碳、氮的影响[J]. 农业现代化研究, 2011, 32(4): 505–508.  
LÜ Xue-jun, LIU Qing, CHEN Yin-ping, et al. Effects of land use patterns on soil soluble organic carbon and nitrogen in the Yellow River Delta[J]. *Research of Agricultural Modernization*, 2011, 32(4): 505–508.
- [10] 高颖, 鲍勇, 胡伟芳, 等. 亚热带地区3种典型林分土壤DOM数量及光谱特征[J]. 亚热带资源与环境学报, 2018, 13(1): 26–35.  
GAO Ying, BAO Yong, HU Wei-fang, et al. Soil DOM quantity and spectral characteristics of three typical forest soils in subtropical China[J]. *Journal of Subtropical Resources and Environment*, 2018, 13(1): 26–35.
- [11] 鲍士旦. 土壤农化分析[M]. 3版. 北京: 中国农业出版社, 2002: 22–162.  
BAO Shi-dan. Soil agro-chemistry analysis[M]. 3th Edition. Beijing: China Agriculture Press, 2002: 22–162.
- [12] 雷秋霜, 杨秀虹, 方志文, 等. 森林新近凋落叶溶出DOM的性质及其对非增溶作用的影响[J]. 生态环境学报, 2014, 23(1): 170–177.  
LEI Qiu-shuang, YANG Xiu-hong, FANG Zhi-wen, et al. Characteristics of fresh leaf litter-derived dissolved organic matter and its capacity to enhance the apparent water solubility of phenanthrene[J]. *Ecology and Environmental Sciences*, 2014, 23(1): 170–177.
- [13] 韦梦雪, 王彬, 谌书, 等. 川西平原还田秸秆腐解释放DOM的光谱特征[J]. 光谱学与光谱分析, 2017, 37(9): 2861–2868.  
WEI Meng-xue, WANG Bin, SHEN Shu, et al. Study on spectral characteristics of dissolved organic matter collected from the decomposing process of crop straw in west Sichuan Plain[J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2017, 37(9): 2861–2868.
- [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 Lu-lu, JIANG Tao, YAN Jin-long, 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] Tsutomu O. Fluorescence inner-filtering correction for determining the humification index of dissolved organic matter[J]. *Environmental Science and Technology*, 2002, 36(4): 742–746.
- [16] Salve P R, Lohkare H, Gobre T, et al. Characterization of chromophoric dissolved organic matter (CDOM) in rainwater using fluorescence spectrophotometry[J]. *Bulletin of Environmental Contamination and Toxicology*, 2012, 88(2): 215–218.
- [17] Birdwell J E, Valsaraj K T. Characterization of dissolved organic matter in fogwater by excitation-emission matrix fluorescence spectroscopy[J]. *Atmospheric Environment*, 2010, 44(27): 3246–3253.
- [18] McKnight D M, Boyer E W, Westerhoff P K, et al. Spectrofluorometric characterization of dissolved organic matter for indication of precursor organic material and aromaticity[J]. *Limnology and Oceanography*, 2001, 46(1): 38–48.
- [19] Wilson H F, Xenopoulos M A. Effects of agricultural land use on the composition of fluvial dissolved organic matter[J]. *Nature Geoscience*, 2009, 2(1): 37–41.
- [20] Huguet A, Vacher L, Relexans S, et al. Properties of fluorescent dissolved organic matter in the Gironde estuary[J]. *Organic Geochemistry*, 2009, 40(6): 706–719.
- [21] 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.
- [22] Plaza C, Brunetti G, Senesi N, et al. Molecular and quantitative analysis of metal ion binding to humic acids from sewage sludge and sludge-amended soils by fluorescence spectroscopy[J]. *Environmental Science & Technology*, 2006, 40(3): 917–923.
- [23] 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: 荧光光谱[J]. 环境科学, 2016, 37(7): 2496–2505.  
LIANG Jian, JIANG Tao, LU Song, et al. Spectral characteristics of dissolved organic matter (DOM) releases from soils of typical water-level fluctuation zones of Three Gorges Reservoir areas: Fluorescence spectra[J]. *Environmental Science*, 2016, 37(7): 2496–2505.
- [24] 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 Jie, JIANG Tao, LI Lu-lu, 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.
- [25] 陈雪霜, 江韬, 卢松, 等. 三峡库区消落带水体DOM不同分子量组分三维荧光特征[J]. 环境科学, 2016, 37(3): 884–892.  
CHEN Xue-shuang, JIANG Tao, LU Song, et al. Three-dimensional fluorescence spectral characteristics of different molecular weight fractionations of dissolved organic matter in the water-level fluctuation zones of Three Gorges Reservoir areas[J]. *Environmental Science*, 2016, 37(3): 884–892.
- [26] 陈高起, 傅瓦利, 沈艳, 等. 岩溶区不同土地利用方式对土壤有机碳及其组分的影响[J]. 水土保持学报, 2015, 29(3): 123–129.  
CHEN Gao-qi, FU Wa-li, SHEN Yan, et al. Effects of land use types on soil organic carbon and its fractions in Karst area[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2015, 29(3): 123–129.
- [27] 卫东, 戴万宏, 汤佳. 不同利用方式下土壤溶解性有机碳含量研究[J]. 中国农学通报, 2011, 27(18): 121–124.  
WEI Dong, DAI Wan-hong, TANG Jia. Study of soils dissolved organ-

- ic carbon in different land use[J]. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2011, 27(18):121-124.
- [28] 吴金水, 葛体达, 胡亚军. 稻田土壤关键元素的生物地球化学耦合过程及其微生物调控机制[J]. *生态学报*, 2015, 35(20):6626-6634. WU Jin-shui, GE Ti-da, HU Ya-jun. A review on the coupling of bio-geo chemical process for key elements and microbial regulation mechanisms in paddy rice ecosystems[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2015, 35(20):6626-6634.
- [29] Agegnehu G, Nelson P N, Bird M I. Crop yield, plant nutrient uptake and soil physicochemical properties under organic soil amendments and nitrogen fertilization on nitisols[J]. *Soil & Tillage Research*, 2016, 160: 1-13.
- [30] Antonio N, Alessandro P. Molecular characterization of dissolved organic matter (DOM): A critical review[J]. *Analytical and Bioanalytical Chemistry*, 2013, 405(1): 109-124.
- [31] He W, Choi I, Lee J J, et al. Coupling effects of abiotic and biotic factors on molecular composition of dissolved organic matter in a freshwater wetland[J]. *Science of the Total Environment*, 2016, 544: 525-534.
- [32] Heinz M, Graeber D, Zak D, et al. Comparison of organic matter composition in agricultural versus forest affected headwaters with special emphasis on organic nitrogen[J]. *Environmental Science & Technology*, 2015, 49(4):2081-2090.
- [33] 林樱, 吴丰昌, 白英臣, 等. 我国土壤和沉积物中富里酸标准样品的提取和表征[J]. *环境科学研究*, 2011, 24(10):1142-1148. LIN Ying, WU Feng-chang, BAI Ying-chen, et al. Isolation and characterization of standard fulvic acids from soil and sediments in China[J]. *Research of Environmental Sciences*, 2011, 24(10): 1142-1148.
- [34] 訾园园, 孔范龙, 郗敏, 等. 胶州湾滨海湿地土壤溶解性有机质的三维荧光特性[J]. *应用生态学报*, 2016(12):3871-3881. ZI Yuan-yuan, KONG Fan-long, XI Min, et al. Three dimensional fluorescent characteristics of soil dissolved organic matter (DOM) in Jiaozhou Bay coastal wetlands, China[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2016(12):3871-3881.
- [35] 盛浩, 宋迪思, 周萍, 等. 土地利用变化对花岗岩红壤底土溶解性有机质数量和光谱特征的影响[J]. *生态学报*, 2017, 37(14):4676-4685. SHENG Hao, SONG Di-si, ZHOU Ping, et al. Effects of land-use change on dissolved organic matter in subsoil derived from granite: Quantity and spectrum characteristics[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2017, 37(14):4676-4685.