

管理措施对黄土高原油松人工林土壤水溶性碳氮及其三维荧光特征的影响

宋亚辉^{1,2}, 张娇阳^{1,2}, 刘鸿飞³, 薛蕙^{1,3}, 李秧秧^{1,4*}

(1. 中国科学院水利部水土保持研究所, 黄土高原土壤侵蚀与旱地农业国家重点实验室, 杨凌 712100; 2. 中国科学院大学, 北京 100049; 3. 西北农林科技大学林学院, 杨凌 712100; 4. 西北农林科技大学水土保持研究所, 杨凌 712100)

摘要: 为研究不同管理措施(凋落物去除、油松幼林、灌木和草地)下土壤水溶性碳、氮含量的变化以及土壤溶解性有机质(SDOM)的组分,选取黄土高原油松人工林为研究对象,以未皆伐油松人工林作为对照,对土壤水溶性碳、氮以及SDOM荧光组分等相关重要特征量进行研究分析。结果表明,灌木和油松幼林的土壤水溶性有机碳含量显著高于其他管理措施,并且土壤水溶性有机碳含量随土层深度的增加而降低,土壤水溶性有机碳/土壤有机碳(WSOC/SOC)值随深度增加呈上升趋势;土壤水溶性氮含量的变化和水溶性碳的变化趋势一致,油松幼林土壤水溶性氮组分含量高于其他管理措施,总体上随深度的增加而降低。不同管理措施对SDOM组分影响显著,基于三维荧光光谱技术结合平行因子(EEM-PARAFAC)分析可知SDOM有4种组分,主要分为类腐殖质、类蛋白和可溶性微生物代谢产物三大类,其中SDOM的主要成分为富里酸类腐殖质,油松幼林土壤中富里酸含量最高。本研究表明,管理措施对土壤水溶性碳氮含量变化和SDOM组分具有一定的影响,特别是油松幼林和灌木影响较大。两种管理措施提高了土壤水溶性有机碳以及水溶性氮组分的含量,增强其在土壤中的迁移转化能力,同时改变土壤有机物的结构组成,加深腐殖化程度,进一步改善土壤质量。

关键词: 管理措施; 土壤水溶性碳氮; 三维荧光; 平行因子分析; 油松人工林

中图分类号: X144 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2020)02-0905-09 DOI: 10.13227/j.hjxx.201907085

Effects of Management Measures on Soil Water-soluble Carbon and Nitrogen and Their Three-Dimensional Fluorescence Characteristics of *Pinus tabulaeformis* Plantations on Loess Plateau

SONG Ya-hui^{1,2}, ZHANG Jiao-yang^{1,2}, LIU Hong-fei³, XUE Sha^{1,3}, LI Yang-yang^{1,4*}

(1. State Key Laboratory of Soil Erosion and Dryland Farming on the Loess Plateau, Institute of Soil and Water Conservation, Chinese Academy of Sciences and Ministry of Water Resources, Yangling 712100, China; 2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China; 3. College of Forestry, Northwest A&F University, Yangling 712100, China; 4. Institute of Soil and Water Conservation, Northwest A&F University, Yangling 712100, China)

Abstract: The *Pinus tabulaeformis* plantation on the Loess Plateau was selected as the research site to study the changes of soil water-soluble carbon and nitrogen content and components of soil dissolved organic matter (SDOM) under different management measures (litter removal, young *Pinus tabulaeformis* forest, shrubs, grassland). The uncleared *Pinus tabulaeformis* plantation was used as the control. Results show that the soil water-soluble organic carbon content of shrubs and young *Pinus tabulaeformis* forests was significantly higher than that in other management measures. The content of soil water-soluble organic carbon decreased with an increase in soil depth, whereas soil water-soluble organic carbon/soil organic carbon (WSOC/SOC) increased. The change of soil water-soluble nitrogen content corresponded to that of water-soluble carbon. The content of soil water-soluble nitrogen content in the young *Pinus tabulaeformis* forest was higher than that of other management measures, and generally decreased with an increase in depth. Different management measures have significant effects on SDOM components. Based on three-dimensional fluorescence spectroscopy combined with parallel factor (EEM-PARAFAC) analysis, four components of SDOM are identified, which are mainly divided into categories, humus, protein-like, and soluble microbial metabolites in three major categories, among which the main component of the SDOM is the rich acid humus, and the highest content in the soil of the young forest of *Pinus tabulaeformis* is rich acid. The results suggested that management measures had certain effects on soil water-soluble carbon and nitrogen content as well as SDOM components, especially in young *Pinus tabulaeformis* forests and shrubs. The young *Pinus tabulaeformis* forest and shrubs increased the content of soil water-soluble organic carbon and water-soluble nitrogen, enhanced their ability to migrate and transform in the soil, and changed the structural composition of soil organic matter, hence enhancing the degree of humification and further improving soil quality.

Key words: management measures; soil water-soluble carbon and nitrogen; three-dimensional fluorescence; parallel factor analysis; Chinese pine forest

收稿日期: 2019-07-09; 修订日期: 2019-09-09

基金项目: 国家重点研发计划项目(2016YFC0501707); 国家自然科学基金项目(41771557)

作者简介: 宋亚辉(1994-)女, 硕士研究生, 主要研究方向为土壤微生物生态, E-mail: songyahh@163.com

* 通信作者, E-mail: yyli@ms.iswc.ac.cn

森林生态系统是全球碳循环的重要组成部分,全球土壤有机碳库的 70%~73% 是森林土壤有机碳^[1]. 已有研究表明,皆伐后植被群落地能显著影响林地土壤结构特性、改变土壤温度、腐殖质形态、碳和氮的矿化速率等^[2,3]. 在森林生态系统中,凋落物分解影响土壤氮动态^[4],以及土壤有机质分解、氮素转化和微生物活性等过程^[5],从而导致皆伐后不同管理措施,对土壤水溶性碳氮含量的影响具有很大差异. 相关研究表明,皆伐后植被恢复有利于改善土壤结构,提高土壤肥力^[6,7],皆伐干扰能够显著提高土壤氮素的有效性^[8].

土壤水溶性有机碳是指土壤有效性较高、易被土壤微生物分解矿化和对植物养分供应有最直接作用的那部分有机碳^[9,10],并且是土壤活性有机碳库的重要组成部分,其含量和性质能够反映土壤中有机碳的稳定性,在陆地生态系统碳循环中发挥着重要作用^[11]. 虽然土壤水溶性有机碳占土壤有机碳的比值较小,但其运移速度快、易分解、易氧化、是直接参与土壤生物化学转化过程的重要组成部分,可敏感地反映土壤有机碳的微小变化^[12,13]. 土壤水溶性氮是指土壤中可以溶于水或稀盐溶液的那部分氮素^[14,15],是土壤氮素最为活跃的组成部分,可以直接或间接地被植物吸收和利用,迁移性较强,易随水分运移而发生径流或淋溶损失^[16,17],含量的高低直接决定着土壤氮素的可利用性,对研究土壤氮素迁移、转化具有重要意义^[18,19]. 现有的研究发现,新鲜凋落物中的水溶性氮、磷在淋洗作用下能够直接输入到土壤,从而提高土壤的有效养分含量,并且水溶性氮和磷动态是凋落物参与生态系统氮和磷循环的关键内容^[20].

土壤溶解性有机质(soil dissolved organic matter, SDOM)是一类含有富里酸、腐殖酸、芳烃聚合物质等可溶性的有机质,对生态系统有重要作用^[21],其来源主要为植物残体、根系分泌物及土壤有机质中的腐殖质等^[22]. SDOM 的结构组成和分布规律与其来源十分密切. SDOM 荧光物质主要分为类腐殖质和类蛋白两大类. 类腐殖质荧光物质由分子结构复杂的腐殖质类物质产生,而类蛋白质荧光物质则由具有芳香结构的氨基酸,如色氨酸、酪氨酸等产生^[23]. 三维荧光光谱因其具有灵敏度高、可重复性好以及不破坏样品结构等优点,被广泛用于测定各类水体 DOM 不同类型有机物组成之间的变化规律^[24]. 结合三维荧光光谱法对 SDOM 进行分析,通过观察三维荧光光谱不同组分的荧光峰值,可以定性定量地分析 SDOM 的不同组分类型以及各个组分所占的比例,进一

步研究其组分的来源以及 SDOM 腐殖化的特点. 然而,目前关于三维荧光光谱分析应用仍停留在其他相关领域,对土壤水溶性有机质测定的研究还很匮乏.

因此,本文以黄土高原油松人工林为研究对象,基于三维荧光光谱技术结合平行因子对土壤水溶性有机碳、水溶性总氮、土壤硝态氮、土壤铵态氮含量变化以及 SDOM 不同组分进行分析,进一步研究不同管理措施(凋落物去除、油松幼林、灌木和草地)对土壤水溶性碳氮及其三维荧光特性的影响,以期对该区林业管理提供一定的参考依据.

1 材料与方法

1.1 研究区概况

研究区位于陕西省北部宜川县黄龙山森林东缘(35°39'N, 110°06'E)的铁龙湾林场,属于典型的黄土丘陵区油松林,海拔 860~1 200 m,坡度 25°. 该地区属大陆性气候,年平均气温 9.7°C,平均无霜期为 180 天,年平均降水量为 584.4 mm,主要集中在 7~9 月之间,土壤类型为灰褐色森林土.

试验区油松人工林于 1966 年建立,面积为 600 hm². 地带性植被为温带落叶阔叶林,主要树种为油松,同时包含其他植被,如灌木(胡枝子、忍冬、黄刺玫、绣线菊等)和草本植物(大披针苔草)等.

1.2 试验设计和取样

本试验选取与气候、地理位置、地形条件及林分密度等基本条件一致的油松人工林为研究对象. 1999 年皆伐后,该油松人工林用铁丝围成面积相等的试验小区,以确保各个小区环境基本一致. 以未进行人为干扰的油松人工林作为对照,设置 4 种试验处理,分别为凋落物去除、油松幼林、草地和灌木. 每个处理 3 次重复,每个小区为 5×10 m².

2015 年 9 月采集土壤样品,在每个小区采用多点法分别从 0~20 cm 和 20~40 cm 土层中采集土样,并将各层土样进行充分混匀,装入自封袋中运回实验室保存. 将采集的土样剔除石头和根系等杂物后,过 2 mm 筛,一部分鲜土用于测定土壤水溶性有机碳和水溶性氮组分.

1.3 测定方法

土壤水溶性有机碳、氮的提取及测定采用 Ghani 等的方法^[25]. ①土壤浸提液的制备:称取 40 g 新鲜土壤样品,加 120 mL 蒸馏水(水土比为 3:1)浸提,25°C 下振荡 30 min 后,使用高速离心机(8 000 r·min⁻¹)离心 10 min,用 0.45 μm 滤膜进行抽滤,所得浸提液冷冻保存备用. ②土壤水溶性有机碳(WSOC)用 TOC 分析仪分析测定;土壤水溶性总

氮(WSN)采用碱性过硫酸钾消解-紫外分光光度法比色测定;土壤硝态氮($\text{NO}_3^- \text{-N}$)含量采用紫外比色法测定,土壤铵态氮($\text{NH}_4^+ \text{-N}$)含量用连续流动分析仪进行测定;土壤水溶性有机氮含量 $\text{WSN} = \text{WSN} - (\text{NO}_3^- \text{-N}) - (\text{NH}_4^+ \text{-N})$ 。

水样中水溶性有机物的三维荧光光谱(3DEEMs)利用 F4600 荧光光谱仪(日立,日本)进行测定,配以 10 mm 的石英试管,用超纯水作空白对照,PMT 电压 700 V,扫描速度 $2400 \text{ nm} \cdot \text{min}^{-1}$,激发光波长(E_x)范围 200 ~ 450 nm,发射光波长(E_m)范围 250 ~ 450 nm,激发光和发射光的狭缝宽度均为 5 nm。在测定前,利用荧光光度计自带的比率模型校正波长所依赖的光源强度和探测器的光敏度,修正仪器特定偏差的激发和发射强度。在数据分析之前,对荧光数据进行预处理,消除拉曼散射和瑞利散射的影响。用超纯水作为空白,通过处理从样本光谱图中减去超纯水空白的三维荧光光谱图,将拉曼散射效应从数据中剔除,同时排除瑞利散射效应,去除波长小于或等于激发波长 220 nm 的辐射测量^[26]。

利用三维荧光光谱技术结合平行因子分析法对 SDOM 组分进行分析。使用 Matlab 软件中的 drEEM (version 0.1.0) 和 DOMFour 工具包对 SDOM 三维荧光光谱进行平行因子(PARAFAC) 分析。主要分为 5 个步骤,第一 将荧光数据导入模型,组装数据集;

第二,预处理数据集,包括校正偏差、去除散点和标准化,光谱强度单位为 RU;第三,搜集数据集,去除异常值和开发初步模型;第四,验证模型,对模型适合度和灵敏度进行评估和分析;最后对结果进行解析^[27]。采用最大荧光强度法(F_{max})评价 PARAFAC 各组分的相对浓度^[28]。

1.4 数据处理

采用 Excel 2007 软件对数据进行统计分析;不同管理措施各指标的方差分析和多重比较,采用 SPSS 24.0 软件中的 LSD 法和 Duncan 方法($P < 0.05$);部分图由 Origin 9.4 进行绘制;平行因子模型(PARAFAC) 的建立使用 Matlab 2014 a 软件,drEEM 和 DOMFour 工具包共同完成。

2 结果与分析

2.1 不同管理措施土壤水溶性有机碳分布特征

不同管理措施会显著影响 0 ~ 20 cm 土层 WSOC 含量,且 WSOC 含量随土层加深而有所下降[图 1(a)]; WSOC/SOC 变化趋势与 WSOC 含量的变化趋势相反,除对照外,4 种管理措施随土层加深均有所上升[图 1(b)]。对照 WSOC 含量和 WSOC/SOC 在 0 ~ 20 cm 和 20 ~ 40 cm 土层分别为最大值和最小值,其中在 0 ~ 20 cm 土层,4 种管理措施均显著高于对照;在 20 ~ 40 cm 土层,油松幼林显著高于对照。

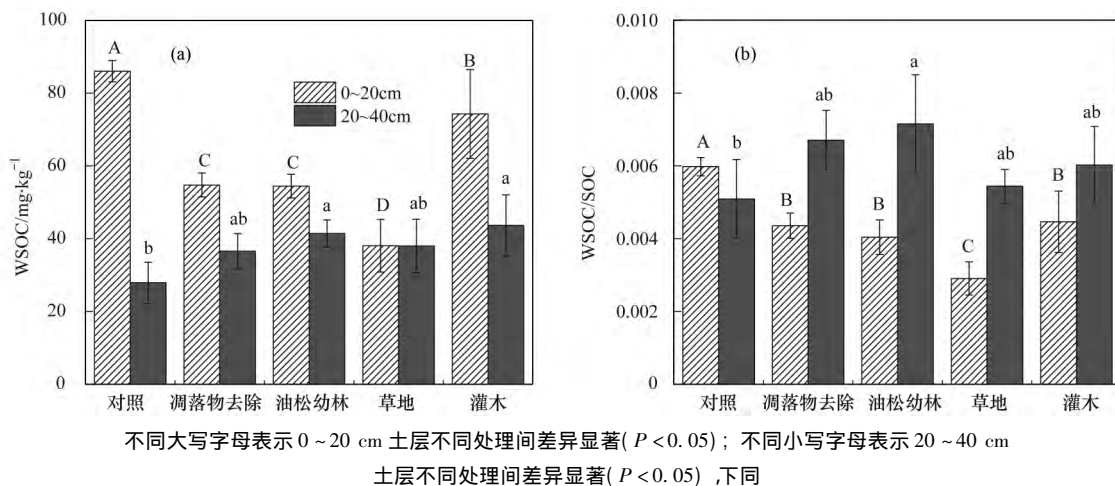


图 1 不同管理措施土壤水溶性有机碳分布特征

Fig. 1 Distribution characteristics of water-soluble organic carbon in soils with different management measures

2.2 不同管理措施土壤水溶性氮组分分布特征

WSN 含量的变化趋势与 WSOC 一致,不同管理措施会影响 WSN 和 $\text{NO}_3^- \text{-N}$ 含量[图 2(a) 和 2(b)],特别是在 0 ~ 20 cm 土层,会显著影响 WSN 含量。与对照相比,4 种管理措施 WSN 含量在 0 ~ 20 cm 土层均显著降低[图 2(a)];而在 20 ~ 40 cm 土层,4 种管理措施 WSN 含量与对照相比均有所提高,且凋

落物去除、油松幼林和灌木显著高于对照。 $\text{NO}_3^- \text{-N}$ 含量的变化趋势与 WSN 相似[图 2(b)],但除了对照和草地 $\text{NO}_3^- \text{-N}$ 含量随土层的加深明显下降,凋落物去除、油松幼林和灌木 $\text{NO}_3^- \text{-N}$ 含量随土层的加深变化不明显。不同管理措施下 $\text{NH}_4^+ \text{-N}$ 含量在 0 ~ 20 cm 和 20 ~ 40 cm 两个土层含量变化不明显,只有灌木 $\text{NH}_4^+ \text{-N}$ 含量在 0 ~ 20 cm 土层显著低于对照[图 2

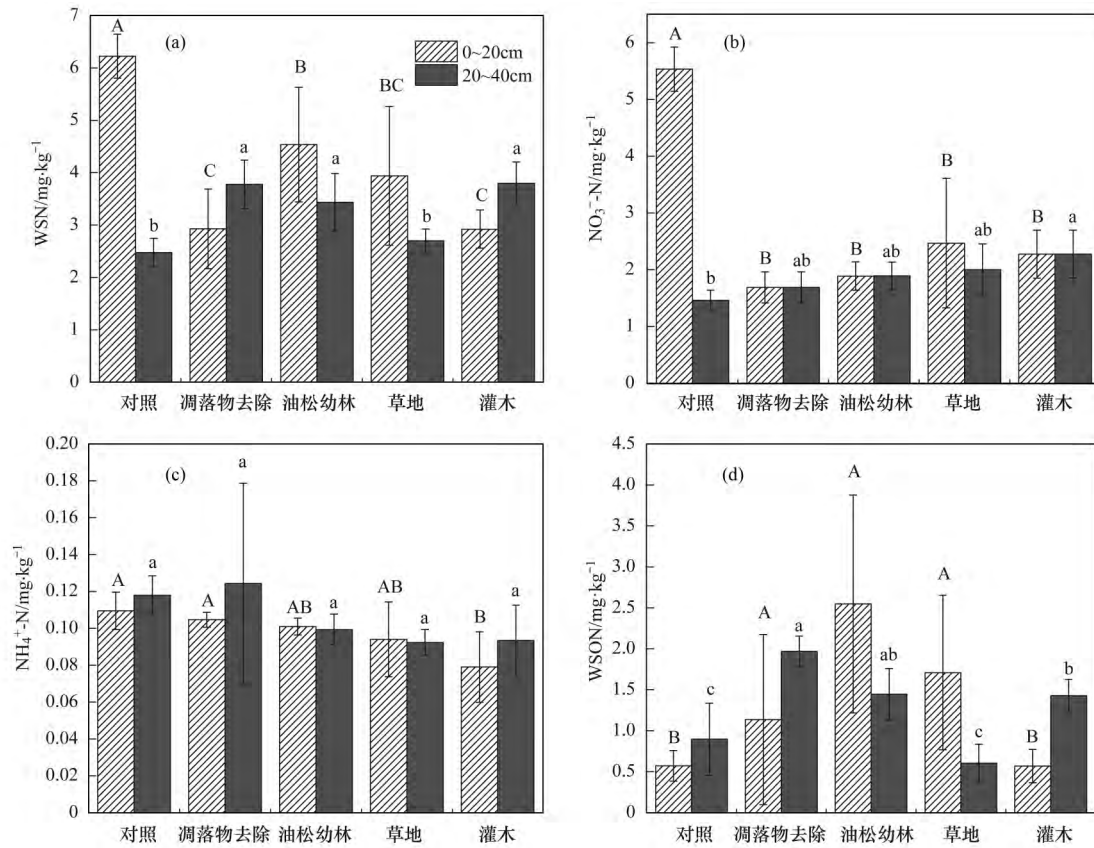


图 2 不同管理措施土壤水溶性氮组分分布特征

Fig. 2 Distribution characteristics of water soluble nitrogen components in soils with different management measures

(c)]. 凋落物去除、油松幼林 WSON 含量在两个土层均显著高于对照,而草地和灌木分别在 0~20 cm 和 20~40 cm 显著高于对照 [图 2(d)].

除草地 WSON/WSN 值在 20~40 cm 土层低于对照外,其他管理措施 WSON/WSN 值在不同土层相较于对照 均有所增加,其中油松幼林和草地在 0~20 cm 土层以及凋落物去除在 20~40 cm 土层均显著高于对照 (图 3).

2.3 土壤溶解性有机质三维荧光光谱特性分析

利用 PARAFAC 模型对油松人工林 SDOM 进行三维荧光光谱分析 (如图 4),主要分析出 4 个荧光组分 (C1~C4). 其中,C1 荧光峰的位置为激发/发射 (E_x/E_m) 波长 220,250/440 nm,均属于类腐殖质荧光峰^[29],分别为类富里酸和类腐殖酸,与腐殖质结构中的羧基和羰基等有关,由分子结构复杂的腐殖质类产生,一般来源于植物残体的腐烂、降解产物等^[30];C2 荧光峰的位置为 E_x/E_m 波长 230,280/355 nm,分别为芳香性类蛋白类色氨酸荧光组分和可溶性微生物代谢产物^[31],其中前者与微生物降解产生的芳香性蛋白类结构有关^[32],后者主要来源于微生物的生命活动,主要为土壤中自身的微生物;C3 荧光峰的位置为 E_x/E_m 波长 225/450 nm,属于类腐殖质荧光峰,为富里酸类荧光物质;C4 荧光峰的位置为

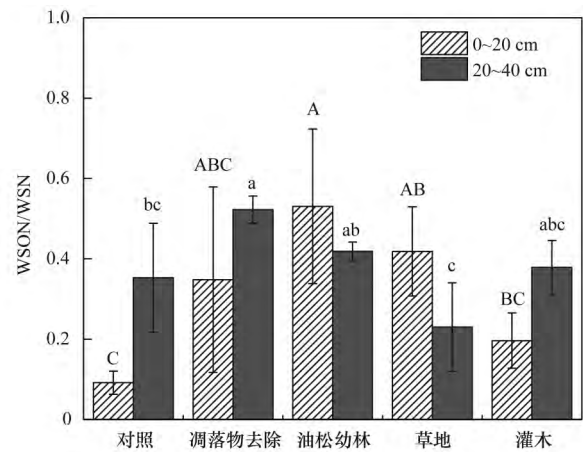


图 3 不同管理措施水溶性有机氮 (WSON) 占水溶性总氮 (WSN) 的比例特征

Fig. 3 Proportion of water-soluble organic nitrogen (WSON) to water-soluble total nitrogen (WSN) in different management measures

E_x/E_m 波长 220,275/300 nm,分别为芳香性类蛋白质类络氨酸荧光物质和可溶性微生物代谢产物.

通过研究不同管理措施下两个土层的总荧光强度发现 (图 5),C3 组分所占的比例相对较大,占绝对优势,并且与其他 4 个处理相比,对照的荧光强度值最大.与对照相比,不同管理措施的总荧光强度均有所降低,特别是在 0~20 cm 土层,降低趋势十分明显.结合 DOM 三维荧光光谱可以看出,油松人工

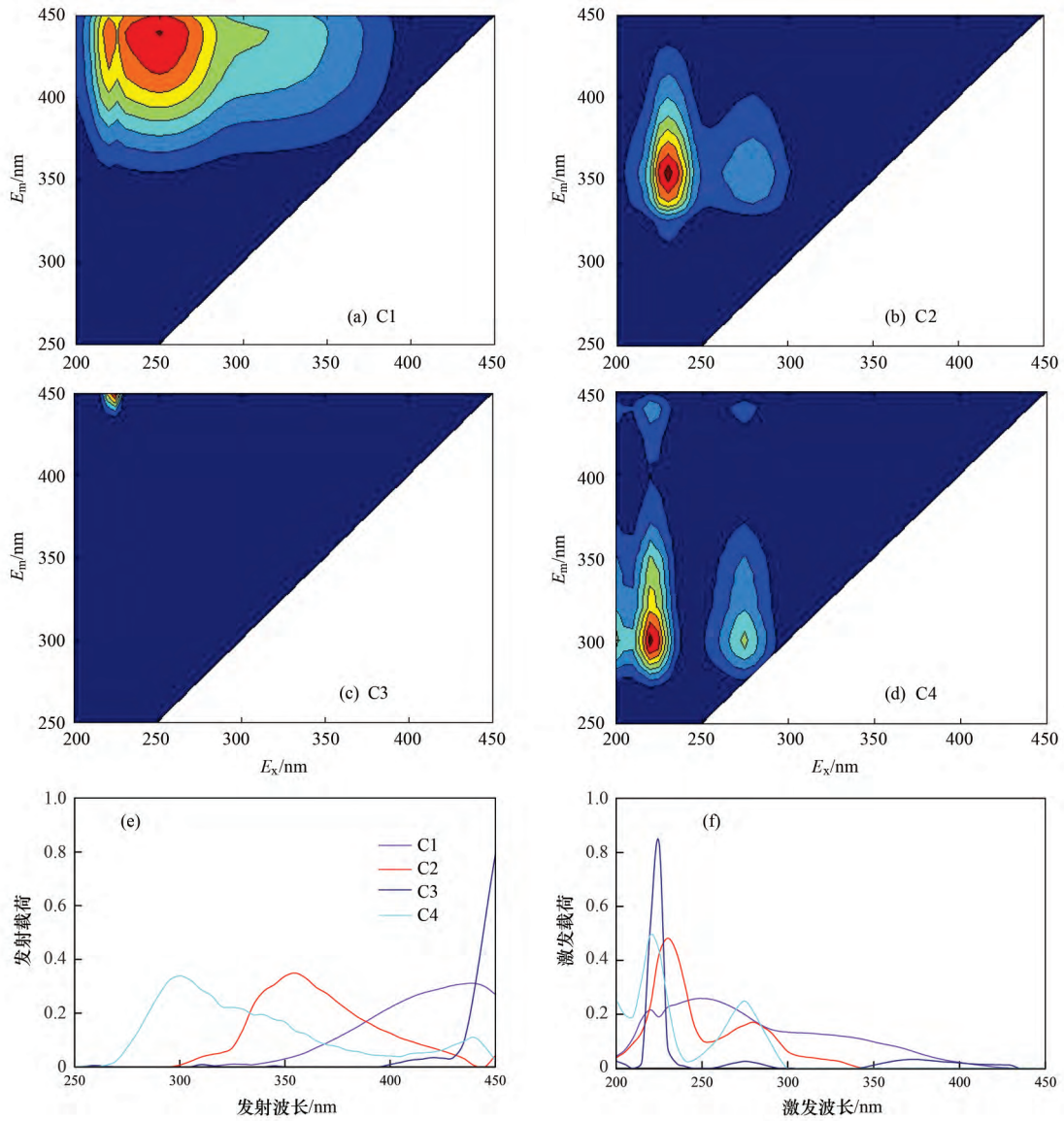


图 4 经 PARAFAC 分析的 SDOM 4 个组分的三维荧光光谱图及其荧光载荷

Fig. 4 Three-dimensional fluorescence spectroscopy and fluorescence load of four components of SDOM analyzed by PARAFAC

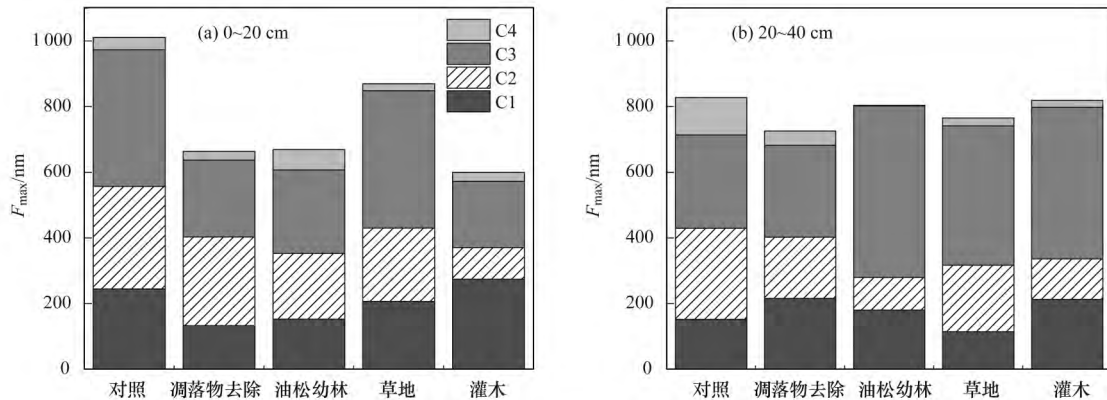


图 5 SDOM 中 4 种荧光组分相对比例

Fig. 5 Relative proportion of four fluorescent components of SDOM

林的 SDOM 主要以腐殖质物质为主, 占比为 33.65%~64.93%。随着土层加深, C3 组分所占的比例也在增加, 由 39.24% 提升至 49.92%, 即腐殖质物质含量增加。

3 讨论

3.1 不同管理措施对土壤水溶性有机碳含量的影响

表层的水溶性有机碳含量丰富, 随土壤层的加

深,水溶性有机碳有减少的趋势^[33].本研究结果与其相似,不同管理措施0~20 cm土层土壤水溶性有机碳含量38.03~86.05 mg·kg⁻¹,高于20~40 cm土层(37.98~45.55 mg·kg⁻¹)。随土层加深而减少,主要原因在于表层土壤有机质和养分的含量高,有良好的通气性,有利于微生物生长繁殖,加速了外界有机质向土壤中的输入和土壤中有机碳的分解速率,同时土壤水溶性有机碳属于活性有机碳组分,在土壤剖面中遇水易向下层淋溶.这与张义凡等^[12]对宁夏东北部不同荒漠草原植被土壤活性有机碳随土层加深而减少的研究结果一致.不同管理措施下20~40 cm土层WSOC/SOC值(0.51%~0.72%)相对较高,可能是由于土壤活性有机碳从表层向下层迁移的过程中,为下层土壤提供有机碳源,同时为下层土壤中微生物提供养分和能量,增加微生物活性,促进下层土壤有机质分解,从而增加下层活性有机碳占土壤有机碳的比重^[34].土壤水溶性有机碳作为活性有机碳的一部分,其占土壤有机碳的比重,也会随之增加,导致下层WSOC/SOC较大.0~20 cm土层WSOC/SOC值在0.29%~0.60%范围,差异较大,表现为对照(0.60%)>灌木(0.45%)、凋落物去除(0.44%)、油松幼林(0.40%)>草地(0.29%),其差异原因可能是由于不同管理措施下土壤表层植物残体或者凋落物数量差异较大造成.本研究中不同管理措施对土壤水溶性有机碳含量的影响也十分明显.由于灌木的凋落物和根系以及油松幼林的根系向土壤输送大量有机物质,致使土壤积累了较多的有机碳并支持了较大的微生物生物量,有利于土壤有机碳固持^[35],因而,灌木和油松幼林的土壤水溶性有机碳含量高于其他管理措施.

3.2 不同管理措施对土壤水溶性氮组分含量的影响

土壤水溶性氮的变化和水溶性碳的变化类似,这是因为土壤氮循环与碳循环存在偶联关系^[36].本研究结果中,不同管理措施水溶性氮素含量变化差异较大,随着土层加深,WSN、NO₃⁻-N和WSON含量总体上均有所降低.其中,不同管理措施对表层(0~20 cm)土壤水溶性氮素的影响明显高于20~40 cm,特别是对照(未扰动的油松林)WSN含量在0~20土层为6.22 mg·kg⁻¹,凋落物去除、油松幼林、草地和灌木的分别为2.93、4.53、3.94和2.92 mg·kg⁻¹,对照明显高于其他管理措施.有研究表明,土壤中的氮素主要以有机态的形式存在,凋落物分解是土壤氮循环的重要来源^[37],凋落物分解环境的变化可能改变凋落物分解速率,从而改变碳和氮的释放速率.也有研究发现,凋落物分解是控制表层

土壤可溶性氮动态的主要因素^[4],特别是凋落物中的碳质量和半纤维素质量,凋落物分解主要是半纤维素和木质素进行分解,其降解性相对较低,有利于水溶性有机碳和水溶性氮素的积累^[38].皆伐后,未扰动的油松林表层保留了丰富的凋落物,提供养分进入土壤,增强土壤持水能力,有效控制养分流失,增加土壤碳氮含量,WSN作为土壤氮组分的活跃部分,含量也会随之增加.

NO₃⁻-N和NH₄⁺-N可以直接被农作物吸收利用.不同管理措施对NO₃⁻-N和NH₄⁺-N含量的影响不明显.其中,油松幼林、草地和灌木的NO₃⁻-N含量高于凋落物去除,与刘俊第等对植被恢复对红壤侵蚀区土壤氮组分的影响对土壤NH₄⁺-N含量研究结果一致^[39],这是因为土壤主要来源于微生物对铵的硝化作用,皆伐后,自然恢复过程中,随着土壤环境进一步得到改善,增加了微生物活性和数量,有利于土壤进行硝化作用,导致土壤NO₃⁻-N含量有所增加.

本研究中,不同管理措施下WSON含量在0~20 cm土层为0.57~2.5 mg·kg⁻¹,总体高于20~40 cm土层(0.60~1.97 mg·kg⁻¹).不同管理措施对0~20 cm土层WSON占WSN的比例影响较大,油松幼林(56.15%)>草地(43.40%)>凋落物去除(38.80%)>灌木(19.44%)>对照(9.19%).对照WSON占WSN的比例较小,主要原因为皆伐后,未扰动的油松林表层富含凋落物,而凋落物中较难分解的木质素和多酚等会影响WSON的释放.油松幼林和草地两种管理措施下WSON占WSN的比例较大,一方面可以改善土壤养分状况,但另一方面,过多的WSON会造成有机氮流失,从而污染环境^[40].

3.3 不同管理措施对SDOM的影响

一般地,总荧光强度可以用来表征DOM浓度的高低^[41].本研究中,0~20 cm土层的SDOM荧光强度值高于20~40 cm土层,由39.24%提升至49.92%.产生这种现象的主要原因是SDOM具有迁移性,在迁移过程中DOM会出现“分馏”现象,即疏水性组分吸附在土壤表层,亲水性组分会随着一些有机物向深层迁移;在SDOM向地下迁移时容易与金属离子等形成络合物,络合物中的氢键可能导致荧光物质产生淬灭现象,严重影响它的荧光强度^[30].已有的相关研究结果与本研究一致,随着土层深度增加,荧光强度值会逐渐减小,这主要与SDOM的淋溶、生物降解或吸附有关,矿物质中疏水性组分被优先吸附在土壤表层,植物根系主要存在于土壤表层,与为土壤提供有机质等有关^[42].荧光参数对SDOM的来源具有一定的指示作用^[43].本研究中,对照、油松幼林、灌木以及草地这4种处理

方式中, C3 组分的类腐殖质富里酸类荧光物质所占比例相对较大, 占比为 33.65%~64.93%, 主要是因为对照、油松幼林、灌木以及草地凋落物相对较多, 在土壤微生物的作用下, 再加上良好的生长环境, 将其分解转化为腐殖质类物质, 最终导致腐殖质物质成为 SDOM 主要成分。腐殖质类物质(类富里酸和类腐殖酸)一般来自植物残体的腐烂及其降解产物, 凋落物分解刺激了微生物活性, 微生物的分解作用对腐殖质类荧光物质的增加具有一定贡献, 随微生物死亡消耗蛋白质降低、腐殖酸类物质积累^[44]。

4 结论

不同管理措施对土壤水溶性碳氮含量变化有所影响, 且具有显著差异。油松幼林与灌木对表层土壤水溶性有机碳含量影响较大, 油松幼林对土壤水溶性氮含量影响较大。基于 EEM-PARAFAC 分析, 不同管理措施 SDOM 含有 4 种组分, 主要分为类腐殖质、类蛋白和可溶性微生物代谢产物三大类, 腐殖质为 SDOM 的主要成分。其中, 油松幼林的 SDOM 腐殖质含量较高, 主要来源于凋落物分解。不同管理措施下, 油松幼林和灌木通过影响土壤水溶性碳氮含量变化, 提高土壤水溶性有机碳以及水溶性氮组分的数量, 改变土壤有机物的结构组成, 加深腐殖化程度, 同时有利于其在土壤中的迁移转化, 进一步改善土壤质量。

参考文献:

- [1] Birdsey R A, Plantinga A J, Heath L S. Past and prospective carbon storage in United States forests [J]. *Forest Ecology and Management*, 1993, **58**(1-2): 33-40.
- [2] Grayston S J, Prescott C E. Microbial communities in forest floors under four tree species in coastal British Columbia [J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2005, **37**(6): 1157-1167.
- [3] 景航, 刘国彬, 王国梁, 等. 恢复措施对皆伐油松林团聚体活性有机碳含量的影响——以黄土丘陵区松峪流域为例 [J]. *中国水土保持科学*, 2017, **15**(1): 113-120.
Jing H, Liu G B, Wang G L, *et al.* Effects of restoration measure on labile organic carbon in aggregates after clear-cutting Chinese pine forest: a case study of Songyugou Watershed of the Loess Plateau [J]. *Science of Soil and Water Conservation*, 2017, **15**(1): 113-120.
- [4] Zhou W J, Sha L Q, Schaefer D A, *et al.* Direct effects of litter decomposition on soil dissolved organic carbon and nitrogen in a tropical rainforest [J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2015, **81**: 255-258.
- [5] Jiang J, Li Y K, Wang M Z, *et al.* Litter species traits, but not richness, contribute to carbon and nitrogen dynamics in an alpine meadow on the Tibetan Plateau [J]. *Plant and Soil*, 2013, **373**(1-2): 931-941.
- [6] 黄和平, 杨劫, 毕军, 等. 皇甫川流域植被恢复对改善土壤肥力的作用研究 [J]. *水土保持通报*, 2005, **25**(3): 37-40.
Huang H P, Yang J, Bi J, *et al.* Effects of vegetative restoration on improving soil fertility in Huangfuchuan basin [J]. *Bulletin of Soil and Water Conservation*, 2005, **25**(3): 37-40.
- [7] 张俊华, 常庆瑞, 贾科利, 等. 黄土高原植被恢复对土壤肥力质量的影响研究 [J]. *水土保持学报*, 2003, **17**(4): 38-41.
Zhang J H, Chang Q R, Jia K L, *et al.* Effect of plant restoration to soil fertility quality on Loess Plateau [J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2003, **17**(4): 38-41.
- [8] 杨秀云, 韩有志, 宁鹏, 等. 砍伐干扰对华北落叶松林下土壤有效氮含量空间异质性的影响 [J]. *环境科学学报*, 2011, **31**(2): 430-439.
Yang X Y, Han Y Z, Ning P, *et al.* The effect of cutting disturbance on spatial heterogeneity of soil NO₃⁻-N and NH₄⁺-N in a larch (*Larix principis-rupprechtii*) forest [J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2011, **31**(2): 430-439.
- [9] 裴隆翠, 陈月明, 张鑫, 等. 红松人工林植被恢复对土壤活性有机碳组分影响的时效性 [J]. *东北林业大学学报*, 2019, **47**(6): 21-25.
Pei L C, Chen Y M, Zhang X, *et al.* Effects of Vegetation restoration of *Pinus koraiensis* plantation on timeliness of soil active organic carbon structure [J]. *Journal of Northeast Forestry University*, 2019, **47**(6): 21-25.
- [10] 沈宏, 曹志洪, 胡正义. 土壤活性有机碳的表征及其生态效应 [J]. *生态学杂志*, 1999, **18**(3): 32-38.
Shen H, Cao Z H, Hu Z Y. Characteristics and ecological effects of the active organic carbon in soil [J]. *Chinese Journal of Ecology*, 1999, **18**(3): 32-38.
- [11] 李亚男, 武俊男, 高强, 等. 不同种植年限苏打盐碱型水稻土水溶性有机碳三维荧光光谱特征分析 [J]. *华南农业大学学报*, 2017, **38**(1): 44-49.
Li Y N, Wu J N, Gao Q, *et al.* Three-dimensional fluorescence spectral characteristics of water extractable organic matter in soda saline-alkaline paddy soil with different planting years of rice [J]. *Journal of South China Agricultural University*, 2017, **38**(1): 44-49.
- [12] 张义凡, 陈林, 李学斌, 等. 不同荒漠草原植被根际与非根际土壤养分及碳库管理指数特征 [J]. *草业学报*, 2017, **26**(8): 24-34.
Zhang Y F, Chen L, Li X B, *et al.* Soil nutrients and carbon management indexes in the rhizosphere versus non-rhizosphere area of different plant species in desert grassland [J]. *Acta Prataculturae Sinica*, 2017, **26**(8): 24-34.
- [13] Bastida F, Barberá G G, García C, *et al.* Influence of orientation, vegetation and season on soil microbial and biochemical characteristics under semiarid conditions [J]. *Applied Soil Ecology*, 2008, **38**(1): 62-70.
- [14] 牛颖权, 李军, 杨曦, 等. 天津盐渍化土壤水溶性氮素组成及分布特征 [J]. *地球与环境*, 2016, **44**(2): 169-176.
Niu Y Q, Li J, Yang X, *et al.* Composition and distribution of water-soluble nitrogen in salinized soils in Tianjin City, China [J]. *Earth and Environment*, 2016, **44**(2): 169-176.
- [15] Murphy D V, Macdonald A J, Stockdale E A, *et al.* Soluble organic nitrogen in agricultural soils [J]. *Biology and Fertility of Soils*, 2000, **30**(5-6): 374-387.
- [16] Qualls R G, Richardson C J. Factors controlling concentration, export, and decomposition of dissolved organic nutrients in the Everglades of Florida [J]. *Biogeochemistry*, 2003, **62**(2): 197-229.
- [17] Nie S A, Zhao L X, Lei X M, *et al.* Dissolved organic nitrogen distribution in differently fertilized paddy soil profiles: implications for its potential loss [J]. *Agriculture, Ecosystems &*

- Environment, 2018, **262**: 58-64.
- [18] Xing S H, Chen C R, Zhang H, *et al.* Genotype and slope position control on the availability of soil soluble organic nitrogen in tea plantations [J]. *Biogeochemistry*, 2011, **103**(1-3): 245-261.
- [19] Xing S H, Chen C R, Zhou B Q, *et al.* Soil soluble organic nitrogen and active microbial characteristics under adjacent coniferous and broadleaf plantation forests [J]. *Journal of Soils and Sediments*, 2010, **10**(4): 748-757.
- [20] 袁吉, 黄美玉, 麦淑媛, 等. 华西南屏区麻栎人工混交林凋落物水溶性碳、氮、磷含量及化学计量比随物候节律的变化特征 [J]. *生态学杂志*, 2019, **38**(2): 376-383.
Yuan J, Huang M Y, Mai S Y, *et al.* Changes in water-soluble carbon, nitrogen and phosphorus in fresh litter of *Quercus acutissima* mixed plantation with phenological rhythms in Rainy Zone of West China [J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2019, **38**(2): 376-383.
- [21] 冯伟莹, 朱元荣, 吴丰昌, 等. 太湖水体溶解性有机质荧光特征及其来源解析 [J]. *环境科学学报*, 2016, **36**(2): 475-482.
Feng W Y, Zhu Y R, Wu F C, *et al.* The fluorescent characteristics and sources of dissolved organic matter in water of Tai Lake, China [J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2016, **36**(2): 475-482.
- [22] 周艳翔, 吕茂奎, 谢锦升, 等. 深层土壤有机碳的来源、特征与稳定性 [J]. *亚热带资源与环境学报*, 2013, **8**(1): 48-55.
Zhou Y X, Lyu M K, Xie J S, *et al.* Sources, characteristics and stability of organic carbon in deep soil [J]. *Journal of Subtropical Resources and Environment*, 2013, **8**(1): 48-55.
- [23] 郭卫东, 程远月, 吴芳. 海洋荧光溶解有机物研究进展 [J]. *海洋通报*, 2007, **26**(1): 98-106.
Guo W D, Cheng Y Y, Wu F. An overview of marine fluorescent dissolved organic matter [J]. *Journal of Marine Science Bulletin*, 2007, **26**(1): 98-106.
- [24] Osburn C L, Handsel L T, Mikan M P, *et al.* Fluorescence tracking of dissolved and particulate organic matter quality in a river-dominated estuary [J]. *Environmental Science & Technology*, 2012, **46**(16): 8628-8636.
- [25] Ghani A, Dexter M, Perrott K W. Hot-water extractable carbon in soils: a sensitive measurement for determining impacts of fertilisation, grazing and cultivation [J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2003, **35**(9): 1231-1243.
- [26] 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.
- [27] Murphy K R, Stedmon C A, Graeber D, *et al.* Fluorescence spectroscopy and multi-way techniques. PARAFAC [J]. *Analytical Methods*, 2013, **5**(23): 6557-6566.
- [28] Yu H R, Qu F S, Chang H Q, *et al.* Understanding ultrafiltration membrane fouling by soluble microbial product and effluent organic matter using fluorescence excitation-emission matrix coupled with parallel factor analysis [J]. *International Biodeterioration & Biodegradation*, 2015, **102**: 56-63.
- [29] Kothawala D N, Von Wachenfeldt E, Koehler B, *et al.* Selective loss and preservation of lake water dissolved organic matter fluorescence during long-term dark incubations [J]. *Science of the Total Environment*, 2012, **433**: 238-246.
- [30] 瞿园园, 孔范龙, 郝敏, 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, **27**(12): 3871-3881.
Zi Y Y, Kong F L, Xi M, *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, **27**(12): 3871-3881.
- [31] 柴立伟, 刘梦娇, 蒋大林, 等. 北京市不同地区土壤中的球囊霉素荧光特征及其与土壤理化性质的关系 [J]. *环境科学*, 2016, **37**(12): 4806-4814.
Chai L W, Liu M J, Jiang D L, *et al.* Fluorescence properties of Glomalin and its relationship with soil Physicochemical characteristics in different regions of Beijing City [J]. *Environmental Science*, 2016, **37**(12): 4806-4814.
- [32] 颜秉斐, 彭剑峰, 邓齐玉, 等. 白塔堡河水体 DOM 分布特征及来源 [J]. *环境工程技术学报*, 2019, **9**(3): 225-232.
Yan B F, Peng J F, Deng Q Y, *et al.* DOM distribution characteristics and source analysis of Baitabu River [J]. *Journal of Environmental Engineering Technology*, 2019, **9**(3): 225-232.
- [33] 周丽甜, 耿玉清, 王玲, 等. 人工油松林土壤线虫密度垂直分布及其影响因素 [J]. *西北林学院学报*, 2017, **32**(1): 43-47.
Zhou L T, Geng Y Q, Wang L, *et al.* Vertical distribution of soil nematodes density and the its driving factors in *Pinus tabulaeformis* plantations [J]. *Journal of Northwest Forestry University*, 2017, **32**(1): 43-47.
- [34] 习丹, 旷远文. 广州城郊森林公园常绿阔叶林土壤有机碳及组分特征 [J]. *生态科学*, 2019, **38**(1): 226-232.
Xi D, Kuang Y W. Characteristics of soil organic carbon and its components in evergreen broadleaved forests of suburban forest parks in Guangzhou [J]. *Ecological Science*, 2019, **38**(1): 226-232.
- [35] 李英, 韩红艳, 王文娟, 等. 黄淮海平原不同土地利用方式对土壤有机碳及微生物呼吸的影响 [J]. *生态环境学报*, 2017, **26**(1): 62-66.
Li Y, Han H Y, Wang W J, *et al.* Effects of different land use types on soil organic carbon and microbial respiration in Huang-Huai-Hai Plain [J]. *Ecology and Environmental Sciences*, 2017, **26**(1): 62-66.
- [36] Gärdenäs A I, Agren G I, Bird J A, *et al.* Knowledge gaps in soil carbon and nitrogen interactions-from molecular to global scale [J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2011, **43**(4): 702-717.
- [37] 孔青, 王传宽, 王兴昌. 植物残体去除对帽儿山温带落叶林土壤碳、氮、磷化学计量特征及其相关因子的影响 [J]. *应用生态学报*, 2018, **29**(7): 2173-2182.
Kong Q, Wang C K, Wang X C. Effects of detritus removal on soil carbon, nitrogen and phosphorus stoichiometry and related factors in a temperate deciduous forest in the Maershan Mountain, China [J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2018, **29**(7): 2173-2182.
- [38] 白潇, 张世熔, 钟钦梅, 等. 中国东部区域土壤活性有机碳分布特征及其影响因素 [J]. *生态环境学报*, 2017, **27**(9): 1625-1631.
Bai X, Zhang S R, Zhong Q M, *et al.* Distribution and influencing factors of soil labile organic carbon among the east area of China [J]. *Ecology and Environmental Sciences*, 2018, **27**(9): 1625-1631.
- [39] 刘俊第, 刘骏, 胡亚林, 等. 植被恢复对红壤侵蚀区土壤氮组分的影响 [J]. *土壤通报*, 2019, **50**(1): 115-123.
Liu J D, Liu J, Hu Y L, *et al.* Effect of vegetation restoration on soil nitrogen fractions in eroded red soil area [J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 2019, **50**(1): 115-123.

- [40] 谢秉楼, 吴家森, 徐秋芳, 等. 覆盖与施肥处理对雷竹林土壤水溶性有机氮的影响[J]. 土壤学报, 2009, 46(6): 1168-1171.
Xie B L, Wu J S, Xu Q F, et al. Effect of different fertilization and mulching on water soluble organic N of the soil under *Phyllostachy praecox* stands [J]. Acta Pedologica Sinica, 2009, 46(6): 1168-1171.
- [41] 王晓江, 黄廷林, 李楠, 等. 峡谷分层型水源水库表层沉积物溶解性有机物光谱特征[J]. 湖泊科学, 2018, 30(6): 1625-1635.
Wang X J, Huang T L, Li N, et al. Spectral characteristics of dissolved organic matter in the surface sediments from a canyon-shaped, stratified, water-source reservoir [J]. Journal of Lake Sciences, 2018, 30(6): 1625-1635.
- [42] Wang Y L, Yang C M, Zou L M, et al. Spatial distribution and fluorescence properties of soil dissolved organic carbon across a riparian buffer wetland in Chongming Island, China [J]. Pedosphere, 2015, 25(2): 220-229.
- [43] 李昀, 魏鸿杰, 王侃, 等. 溶解性有机物(DOM)与区域土地利用的关系: 基于三维荧光平行因子分析(EEM-PARAFAC) [J]. 环境科学, 2019, 40(4): 1751-1759.
Li Y, Wei H J, Wang K, et al. Analysis of the relationship between dissolved organic matter (DOM) and watershed land-use based on three-dimensional fluorescence-parallel factor (EEM-PARAFAC) analysis [J]. Environmental Science, 2019, 40(4): 1751-1759.
- [44] 孙小琳, 孔范龙, 李悦, 等. 胶州湾滨海湿地枯落物分解对土壤活性有机碳含量及其三维荧光特性的影响[J]. 应用生态学报, 2019, 30(2): 563-572.
Sun X L, Kong F L, Li Y, et al. Effects of litter decomposition on contents and three-dimensional fluorescence spectroscopy characteristics of soil labile organic carbon in coastal wetlands of Jiaozhou Bay, China [J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2019, 30(2): 563-572.