

DOI:10.13869/j.cnki.rswc.2024.02.011.

魏志聪, 罗晓敏, 石福习, 等. 武夷山西坡退耕还林对土壤溶解性有机质含量和生物降解性的影响[J]. 水土保持研究, 2024, 31(2): 52-59.

Wei Zhicong, Luo Xiaomin, Shi Fuxi, et al. Effects of Returning Farmland to Forest on Concentration and Biodegradability of Soil Dissolved Organic Matter in the Western Slope of Wuyi Mountain[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2024, 31(2): 52-59.

武夷山西坡退耕还林对土壤溶解性 有机质含量和生物降解性的影响

魏志聪¹, 罗晓敏^{2,3}, 石福习^{1,2}, 曹俊林^{2,3}, 毛 琰^{1,2}

(1.江西农业大学 林学院 国家林业和草原局鄱阳湖流域森林生态系统保护与修复实验室, 南昌 330045;

2.江西马头山森林生态系统定位观测研究站, 江西 资溪 335300; 3.江西马头山国家级自然保护区管理局, 江西 资溪 335300)

摘 要: [目的]揭示典型人工林土壤溶解性有机质(DOM)含量和生物降解性及其影响因素,为评估武夷山西坡退耕还林工程的生态服务功能提供科学支撑。[方法]选取江西省武夷山西坡杉木林、枫香林、枫香-木荷混交林和弃耕地,调查了0—10 cm和10—30 cm土壤溶解性有机碳(DOC)、溶解性全氮(DTN)和溶解性全磷(DTP)浓度以及DOM芳香化程度,分析了土壤DOM生物降解性及其影响因素。[结果](1)退耕还林对土壤DOM含量的影响趋势取决于造林树种,但退耕还林地土壤DOC:DTP和DTN:DTP均高于弃耕地;(2)在0—10 cm中,枫香林土壤DOM的芳香族碳含量高于弃耕地,在10—30 cm中,杉木林土壤DOM的芳香族碳含量则低于弃耕地;(3)枫香林和混交林0—10 cm土壤DOM生物降解性均低于弃耕地,而杉木林10—30 cm土壤DOM生物降解性则高于弃耕地;(4)土壤DOM生物降解性与DOC:DTN:DTP化学计量比无显著相关,但与芳香族碳含量存在显著负相关关系,即碳质量调控土壤DOM生物降解性。[结论]树种决定着武夷山西坡退耕还林地土壤DOM数量和芳香化程度,而且碳质量是驱动退耕还林后土壤DOM生物降解性变化的主要因素。这些研究结果有助于理解和评估亚热带地区退耕还林工程的土壤碳汇功能。

关键词:生态化学计量学;生物降解性;土壤溶解性有机碳;亚热带森林;造林

中图分类号:S714

文献标识码:A

文章编号:1005-3409(2024)02-0052-08

Effects of Returning Farmland to Forest on Concentration and Biodegradability of Soil Dissolved Organic Matter in the Western Slope of Wuyi Mountain

Wei Zhicong¹, Luo Xiaomin^{2,3}, Shi Fuxi^{1,2}, Cao Junlin^{2,3}, Mao Rong^{1,2}

(1.Key Laboratory of Forest Ecosystem Protection and Restoration of Poyang Lake Watershed,

National Forestry and Grassland Administration, College of Forestry, Jiangxi Agricultural University,

Nanchang 330045, China; 2.Jiangxi Matoushan Observation and Research Station of Forest Ecosystem, Zixi,

Jiangxi 335300, China; 3.Jiangxi Matoushan National Nature Reserve Administration, Zixi, Jiangxi 335300, China)

Abstract: [Objective] The aims of this study are to explore soil dissolved organic matter (DOM) concentration and biodegradability and their influencing factors in typical plantations, and then to provide scientific support for assessing ecological service function of returning farmland to forest in the western slope of Wuyi Mountain. [Methods] *Cunninghamia lanceolata* forests, *Liquidambar formosana* forests, *Liquidambar formosana-Schima superba* mixed forests, and abandoned farmlands were selected in the western slope of Wuyi Mountain in Jiangxi Province, and soil dissolved organic carbon (DOC), dissolved total nitrogen (DTN),

收稿日期:2022-07-14

修回日期:2023-03-23

资助项目:国家自然科学基金(32060295);江西省杰出青年基金(20212ACB215002);江西省“双千计划”项目(jxsq2018106044)

第一作者:魏志聪(1997—),男,江西赣州人,硕士研究生,研究方向为退耕还林的水土保持效益。E-mail:weizcong1997@163.com

通信作者:毛琰(1981—),男,湖南邵阳人,博士,研究员,主要从事森林生态与水土保持研究。E-mail:maorong@jxau.edu.cn

<http://stbcj.paperonce.org>

and dissolved total phosphorus (DTP) concentrations, and DOM aromatic degree in 0—10 cm and 10—30 cm depths were measured in these selected forests. Meanwhile, soil DOM biodegradability and its influencing factors were assessed. [Results] (1) The effect of returning farmland to the forest on soil DOM concentration was dependent on tree species, whereas soil DOC : DTP and DTN : DTP ratios were higher in the forests than in the abandoned farmland. (2) *L. formosana* forests had higher greater aromatic carbon content of soil DOM than abandoned farmland in the 0—10 cm depth, whereas *C. lanceolata* forests had lower aromatic carbon content of soil DOM than abandoned farmland in the 10—30 cm depth. (3) Soil DOM biodegradability was lower in the *L. formosana* forests and *L. formosana*-*S. superba* mixed forests than in the abandoned farmlands in the 0—10 cm depth, but was greater in the *C. lanceolata* forests than in the abandoned farmlands in the 10—30 cm depth. (4) Soil DOM biodegradability exhibited no significant relationship with DOC : DTN, DOC : DTP, and DTN : DTP ratios, but was significantly negatively correlated with aromatic carbon contents, indicating that carbon quality regulates soil DOM biodegradability. [Conclusion] Tree species regulate the effect of returning farmland to the forest on soil DOM quantity and aromaticity, and carbon quality is the key factor driving the changes in soil DOM biodegradability after returning farmland to the forest in the western slope of Wuyi Mountain. These findings will help understand and assess the consequences of returning farmland to the forest on soil carbon sink function in the subtropical regions.

Keywords: ecological stoichiometry; biodegradability; soil dissolved organic carbon; subtropical forest; afforestation

在森林生态系统中,土壤有机质在土壤结构改良、有机碳固定和养分循环等关键土壤过程中发挥着极为重要的作用,调控着森林生态系统的结构和功能^[1]。在森林土壤中,溶解性有机质(dissolved organic matter, DOM)尽管占土壤有机质的比例相对较小,但具有较高的生物活性,是土壤微生物主要的能量与养分来源,驱动着森林生态系统的碳和养分循环过程^[2-3]。同时,由于其较高的移动性和较强的吸附能力,土壤DOM不仅可以与土壤重金属络合,决定土壤重金属活性,而且容易通过地表径流、壤中流或地下水进入内陆水体,对区域水生态安全产生深远的影响^[2,4]。因此,明确土壤DOM数量和生物降解性,不仅有助于理解森林生态系统的碳和养分循环,也可为维持森林生态服务功能提供理论基础。

农田造林能有效提高生态系统固碳能力,被作为缓解大气温室气体浓度升高的一项重要措施在全球范围内得到广泛应用^[5-6]。已有的研究发现,农田造林能提高植物初级生产力,改变植物凋落物输入数量和质量以及土壤微生物活性,进而影响土壤有机质及其稳定性^[6-7]。在森林土壤中,土壤DOM主要来源于植物凋落物、根系分泌物、土壤有机质以及微生物代谢产物^[2-3]。因此,农田造林必然将对土壤DOM数量和生物降解性产生显著的影响。已有的研究发现,农田造林会显著改变土壤DOM的数量和化学结构组成,但变化趋势并不一致^[8-10]。由于土壤DOM

生物降解性主要受其初始质量的影响^[11],农田造林后土壤DOM生物降解性的变化规律也必然会存在较大的差异,而且其主要调控机制尚不清楚。由于树种间生长速率和凋落物化学组成的差异,树种可能是导致农田造林后土壤DOM数量和生物降解性变化趋势不一致的主要因素之一^[10],但目前缺乏相关的研究来揭示造林树种之间土壤DOM属性的变化规律。因此,开展不同造林树种对土壤DOM数量和生物降解性的影响的研究,对于评估和预测农田造林的生态服务效益具有极为重要的科学意义。

为控制水土流失和提高生态服务功能,我国亚热带地区从1999年开始启动了大规模的退耕还林工程。然而,退耕还林后土壤DOM含量和生物降解性的变化趋势是否随着树种而变化,目前仍不清楚。为此,本研究在江西省武夷山西坡选取杉木(*Cunninghamia lanceolata*)林、枫香(*Liquidambar formosana*)林和枫香-木荷(*Schima superba*)混交林作为研究对象,以弃耕地作为对照,通过野外取样和室内培养试验调查土壤DOM含量、光谱学特性和生物降解性,试图揭示造林树种对土壤DOM数量和生物降解性的影响,为准确评估亚热带地区退耕还林工程的土壤固碳功能和生态服务价值提供理论依据和数据支撑。

1 研究区概况与研究方法

1.1 研究区概况

研究区位于江西马头山国家级自然保护区(117°

09°11'E, 27°40'50"N) 的试验区和缓冲区。马头山国家级自然保护区位于江西省资溪县东北部, 地处武夷山脉中段西麓, 属亚热带湿润季风气候, 年平均气温 16~18℃, 年平均降水量为 1 929 mm, 但季节分配不均, 主要集中在春夏两季。土壤主要为花岗岩风化形成的山地红壤、山地黄红壤和山地黄壤。自 2000 年起, 马头山保护区内试验区和缓冲区开展了大规模的退耕还林工程, 主要造林模式为杉木和枫香人工纯林, 并伴有部分枫香和木荷的混交林。

1.2 试验设计和样品采集

2020 年 10 月份, 在研究区内选取地形、土地利用历史等基本一致的 8 块样地作为重复, 在每块样地内选取 20 a 生杉木纯林、枫香纯林和枫香-木荷混交林, 以毗邻的弃耕地作为对照。弃耕地植被均为草本植物, 优势物种包括千金子 (*Euphorbia lathyris*)、稗 (*Echinochloa crus-galli*)、莎草 (*Cyperus rotundus*)、节节草 (*Equisetum ramosissimum*) 等。在每个样地内, 每种植被类型设置 1 个 10 m×10 m 的样方, 对样方内所有树木进行每木检尺, 样方的基本信息见表 1。每个样方内随机选择 5 个采样点, 采用土钻 (直径 5 cm) 分别采集 0—10 cm 和 10—30 cm 土壤, 然后将同一样方内同一土层的土芯混合装入同一自封袋, 共计 64 个土样。样品带回实验室, 将石砾、植物根系和动植物残体等去除后过 2 mm 筛, 用于提取土壤 DOM。

表 1 样方基本信息概况

Table 1 Basic information about the forest plots

造林模式	林分密度/ (株·hm ⁻²)	树高/ m	胸径/ cm
杉木纯林	3218(155)	11.4(0.3)	11.0(0.4)
枫香纯林	2265(82)	14.0(0.3)	11.4(0.3)
枫香-木荷混交林	1162(71)	10.8(0.3)	11.7(0.5)

注: 数据为平均值, 括号内为标准误 ($n=8$)。

土壤 DOM 采用浸提法提取^[11]。每个土壤样品称取 10 g 鲜土于聚氯乙烯塑料瓶中, 按照土水比 1:25 加入超纯水, 充分摇匀后置于摇床, 在 20℃ 以 180 r/min 持续震荡 1 h 后离心, 将瓶中的上清液抽滤过 0.70 μm 孔径的玻璃微纤维滤膜 (What-man GF/F Glass Microfiber Filters) 后分为两部分, 其中第一部分滤液用于测定溶解性有机碳 (DOC)、溶解性总氮 (DTN)、溶解性总磷 (DTP) 以及 DOM 的光谱学特征, 第二部分滤液用于测定 DOM 的生物降解性。

土壤 DOC 和 DTN 浓度使用干烧法在总有机碳分析仪 (multi N/C2100S, Analytic Jena, Germany) 上进行测定, DTP 采用过硫酸钾消解-钼锑抗分光光

度法 (GB11893—89) 进行测定, DOM 光谱学特性采用紫外可见光光度计 (UV600SC, 上海菁华科技仪器) 测定。本研究选取 SUVA₂₅₄, SUVA₂₈₀, SUVA₃₅₀ 值指示 DOM 的芳香化程度, 分别通过 254, 280, 350 nm 处的吸光度除以 DOC 浓度得到^[12]。一般说来, SUVA₂₅₄, SUVA₂₈₀, SUVA₃₅₀ 值越大, DOM 中芳香族化合物的含量越高, 分子结构更为复杂^[12]。DOM 的生物降解性 (%) 采用 14 d 恒温 (20℃) 好氧培养法测定^[11], 通过初始和培养 14 d 的 DOC 浓度的差异除以初始 DOC 浓度得到。

1.3 数据处理

所有数据均使用 SPSS 19.0 for Windows 进行统计分析, 显著性水平设置为 $p<0.05$, 使用 Origin 2018 软件作图。所有数据分析前先进行正态分布和方差齐性检验, 不服从正态分布的数据在统计分析之前进行自然对数转换。首先, 采用双因素方差分析比较造林模式、土层深度及其交互作用对土壤 DOM 数量和特性的影响。然后, 在每一土层深度, 采用单因素方差分析和 Tukey HSD 多重比较分析不同造林模式之间土壤 DOM 数量和特性的差异。最后, 采用简单线性回归分析土壤 DOM 生物降解性与其初始属性之间的相关性。

2 结果与分析

2.1 造林模式对土壤 DOC, DTN 和 DTP 浓度及其化学计量比的影响

从图 1 可以看出, 土壤 DOC 和 DTN 浓度均受到造林模式和土层深度的显著影响, 而土壤 DTP 浓度则只受造林模式的影响 ($p<0.05$)。在 0—10 cm 土层深度, 杉木林 DOC 浓度均高于其他 3 种类型, 而枫香林土壤 DTN 数量则显著低于其他 3 种土地利用类型; 在 10—30 cm 土层深度, 混交林 DOC 浓度显著低于其他 3 种土地利用类型, 而 DTN 浓度则高于其他 3 种土地利用类型 ($p<0.05$)。在 0—10 cm 和 10—30 cm 土层深度, 弃耕地和杉木林 DTP 浓度均显著高于枫香林和混交林 ($p<0.05$)。

如图 2 所示, 土壤 DOC:DTN 和 DTN:DTP 显著受造林模式和土层深度的影响 ($p<0.01$)。在 0—10 cm 土层深度, 杉木林和枫香林 DOC:DTN 显著高于弃耕地和混交林, 而混交林 DOC:DTP 则显著高于弃耕地 ($p<0.05$)。在 10—30 cm 土层深度, 杉木林 DOC:DTN 显著高于弃耕地, 而混交林 DOC:DTN 则低于弃耕地 ($p<0.05$)。此外, 杉木林、枫香林和混交林 10—30 cm 深度土壤 DTN:DTP 均高于弃耕地 ($p<0.05$)。

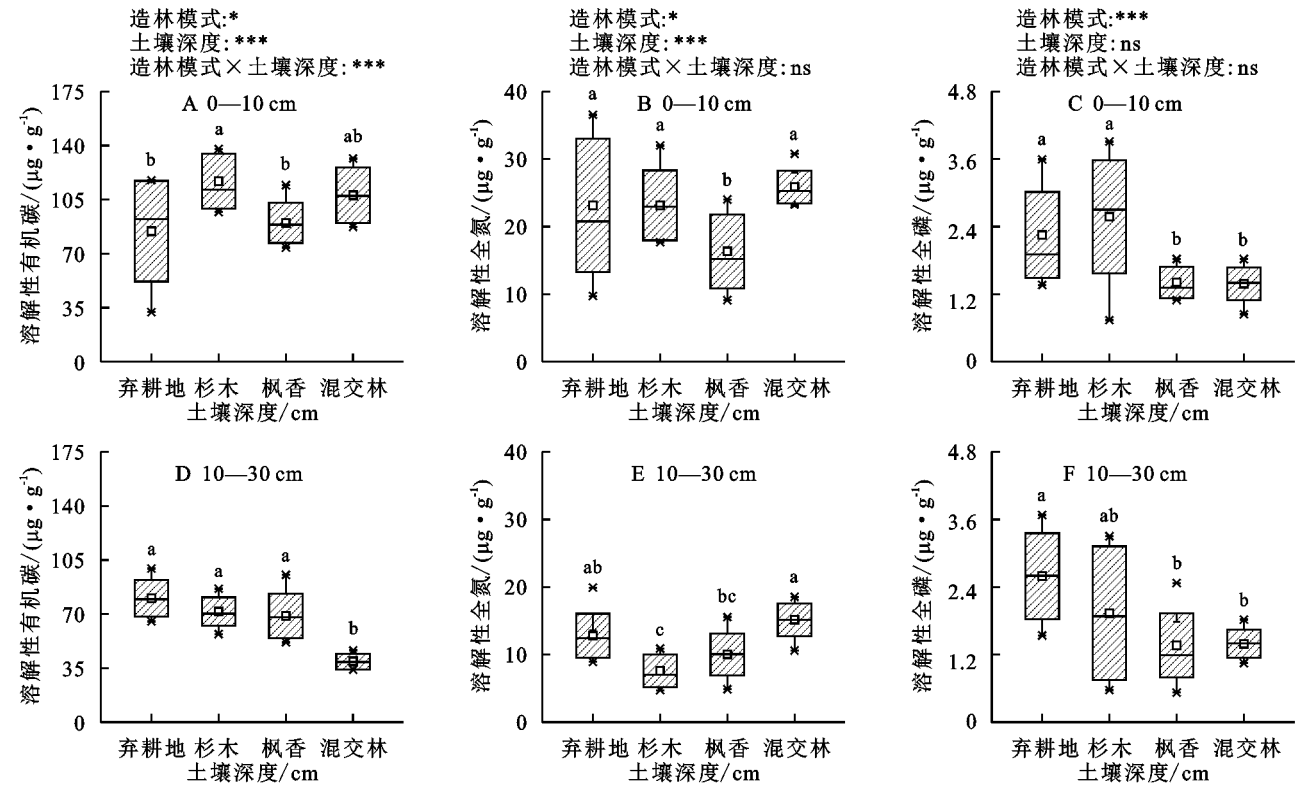


图 1 造林模式对土壤溶解性有机碳、溶解性全氮和溶解性全磷浓度的影响

Fig. 1 Effect of afforestation models on soil dissolved organic carbon, dissolved total nitrogen, and dissolved total phosphorus concentrations

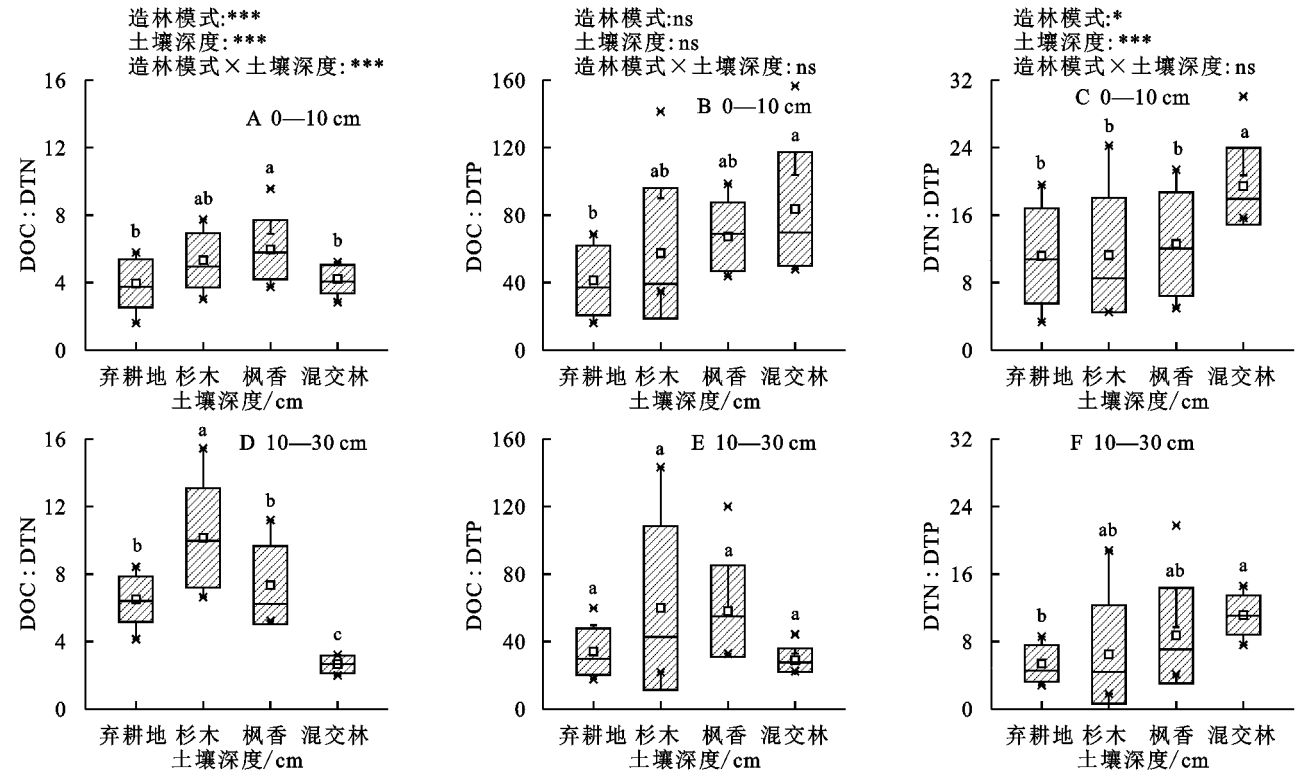


图 2 造林模式对土壤 DOC : DTN : DTP 化学计量比的影响

Fig. 2 Effect of afforestation models on soil DOC : DTN : DTP stoichiometry

2.2 造林模式对土壤 DOM 光谱学特性的影响 SUVA₂₈₀ 和 SUVA₃₅₀ 值产生显著影响($p<0.001$)。在由图 3 可知,造林模式与土层深度均对 SUVA₂₅₄, 0—10 cm 土层深度,枫香林 SUVA₂₅₄, SUVA₂₈₀ 和

SUVA₃₅₀ 值均显著高于其他 3 种土地利用类型 ($p < 0.05$)。在 10—30 cm 土层深度, 杉木林土壤 SUVA₂₅₄, SUVA₂₈₀ 和 SUVA₃₅₀ 值均显著低于其他 3 种土地利用类型 ($p < 0.05$)。

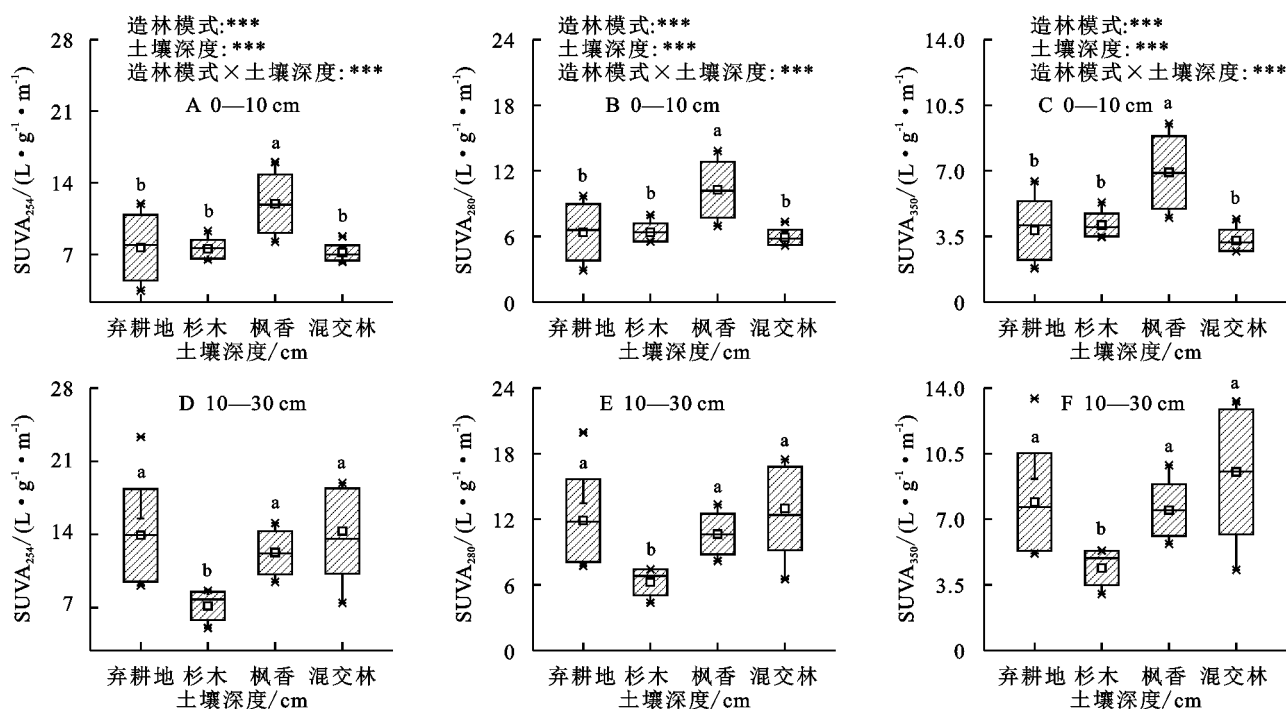


图 3 造林模式对土壤 DOM 光谱学特性的影响

Fig. 3 Effect of afforestation models on soil DOM spectral properties

2.3 造林模式对土壤 DOM 生物降解性的影响

如图 4 所示, 造林模式显著影响土壤 DOM 生物降解性 ($p < 0.001$)。在 0—10 cm 土层深度, 杉木林 DOM 生物降解性在 4 种土地利用类型中最高, 弃耕地和混交林居中, 而枫香林最低 ($p < 0.05$)。在 10—

30 cm 土层深度, 杉木林 DOM 生物降解性均显著高于其他 3 种土地利用类型 ($p < 0.05$)。此外, 土壤 DOM 生物降解性与 SUVA₂₅₄, SUVA₂₈₀ 和 SUVA₃₅₀ 值显著负相关, 但与 DOC : DTN, DOC : DTP 和 DTN : DTP 则无显著相关性 (图 5)。

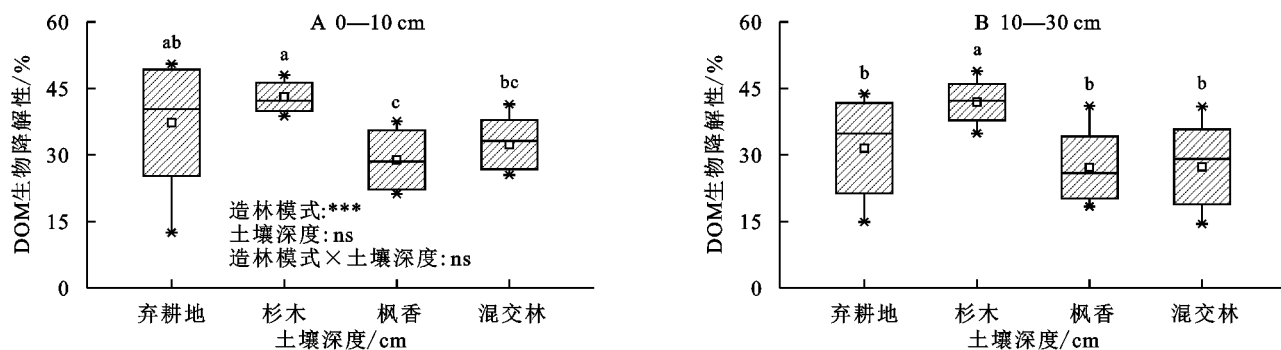


图 4 造林模式对土壤 DOM 生物降解性的影响

Fig. 4 Effect of afforestation models on soil DOM biodegradability

3 讨论

在森林生态系统中, 土壤 DOM 主要来源于植物凋落物、根系分泌物、土壤有机质以及微生物代谢产物^[2-3]。在本研究中, 与弃耕地相比, 退耕还林地土壤 DOC, DTN 和 DTP 浓度没有明显的变化趋势, 随着造林模式和土层深度而发生变化。一般而言, 退耕还林将显著增加植物初级生产力, 提高植物凋落物输入量, 增加植物源 DOM 输入量^[6-7]。因此, 退耕还林后

土壤 DOC, DTN 和 DTP 浓度变化趋势不一致的原因可能是由于不同树种间土壤微生物活性和有机质分解的差异所引起的。相对于枫香、木荷和草本植物而言, 杉木凋落物具有较低的营养含量和较高的木质素和次生代谢产物, 难以被微生物分解利用, 导致杉木凋落物淋溶产生的 DOC 在土壤表层大量积累^[13-14]。而且, 与其他 3 种土地利用类型相比, 杉木林具有较高的生产力, 能够产生更多的凋落物量, 导致凋落物源输入的 DOC 数量较高^[2,6]。因此, 在 0—

10 cm 土层深度中,杉木林土壤 DOC 浓度均显著高于弃耕地、枫香林和混交林,DTN 和 DTP 浓度则显著高于枫香林和混交林。相反地,枫香凋落物源 DOM 由于较高的养分浓度,极易被微生物利用^[15],难以在土壤中实现持续积累,导致枫香林土壤 DOC 浓度在 4 种土地利用类型中最低。在 10—30 cm 土层深度,退耕还林后 DOC 和 DTP 浓度均呈现不同程度的降低趋势。在亚热带地区,树木生长的主要限制性养分为磷素^[16]。相对于草本植物,树木的根系分布更深^[17]。因此,退耕还林后树木快速生长使得植物对磷素的需求量增加,植物根际分泌更多的磷酸

酶分解土壤有机物质以获取磷素^[16],导致土壤 DOC 和 DTP 浓度呈现降低的趋势。由于氮素不是亚热带森林的主要限制性养分^[18],退耕还林对 10—30 cm 土壤 DTN 浓度没有明显的影响。

这些研究结果表明,亚热带地区退耕还林将改变土壤 DOM 的数量,但具体的变化趋势取决于造林树种。由于亚热带地区降雨量大,森林土壤 DOM 容易通过地表径流或淋溶等途径进入内陆水体,导致水体出现污染的现象^[2-3]。因此,为了维持区域水体质量,在亚热带地区实施退耕还林时造林树种应优先考虑阔叶树种。

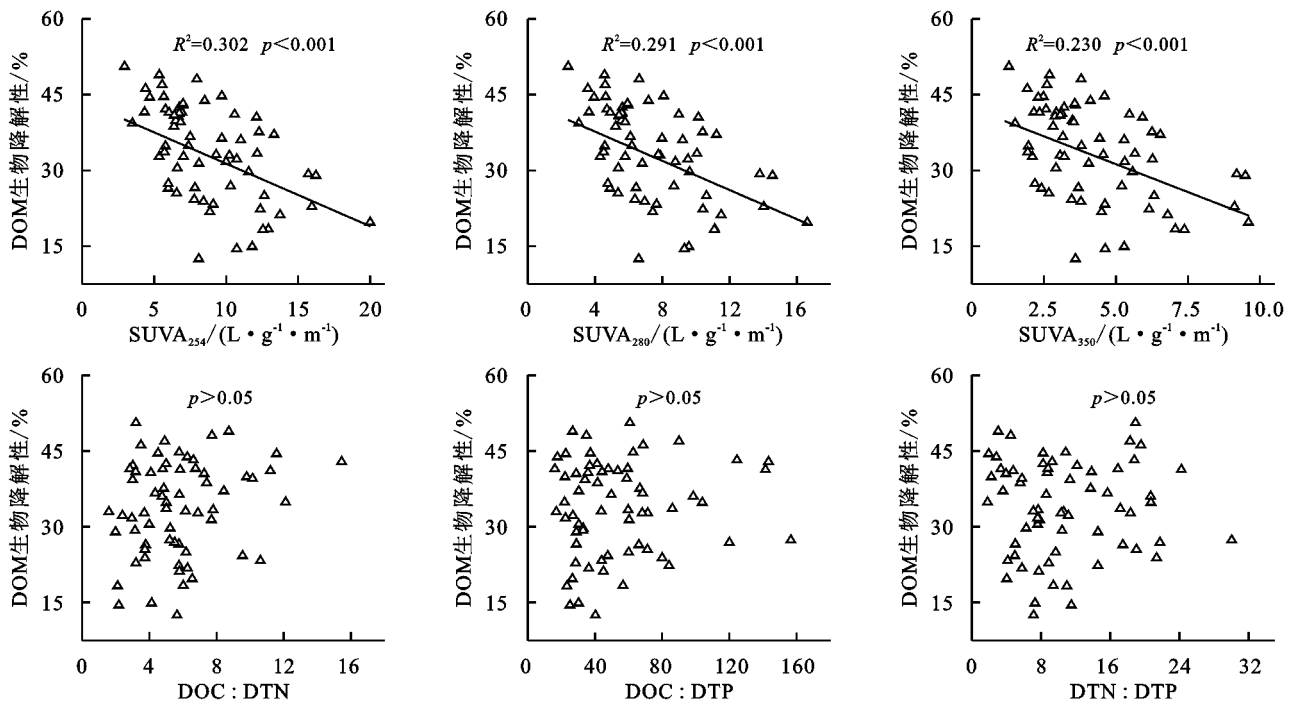


图5 土壤 DOM 生物降解性与其初始属性的相关性分析

Fig. 5 Correlation analyses between soil DOM biodegradability and its initial properties

在本研究中,退耕还林后土壤 DOC : DTN : DTP 化学计量比没有一致性的变化规律,升高、降低和无显著变化 3 种趋势并存。土壤 DOM 中碳氮磷之间的化学计量关系主要受凋落物输入化学组成、植物生长的养分需求以及土壤微生物群落组成等因素的影响^[2-3]。与弃耕地相比,退耕还林地植物生物量更大,因此植物根系对养分的需求量更大,使得土壤溶解性养分出现降低趋势^[16]。而且,树木的凋落物养分浓度通常都低于草本植物^[19],导致表层土壤输入的有机物质具有较高的 C : N 和 C : P。因此,退耕还林增加了 0—10 cm 土壤 DOC : DTN 和 DOC : DTP。相对于表层土壤,深层土壤 DOC : DTN : DTP 化学计量比受树木凋落物质量和根系的影响可能较小^[20]。因此,退耕还林对 10—30 cm 土壤 DOC : DTP 和 DTN : DTP 基本无显著影响。土壤 DOM 由于其较高的生

物可利用性,是植物和土壤微生物养分的主要来源^[2]。这意味着,亚热带地区退耕还林将降低土壤养分的有效性,加剧土壤养分的限制作用。

土壤 DOM 的 $SUVA_{254}$, $SUVA_{280}$ 和 $SUVA_{350}$ 值可以指示 DOM 的芳香化程度, $SUVA$ 值越高, DOM 的芳香化程度更高^[12]。在森林生态系统中,植物凋落物的化学组成,尤其是木质素、酚类等惰性碳组分,决定了土壤 DOM 的芳香化程度^[14-15]。本研究中,退耕还林对土壤 DOM 的 $SUVA$ 值的影响趋势随着造林树种而发生变化,这可能是由于树种间凋落物化学组成的差异造成的。在亚热带森林中,落叶阔叶树种凋落物比常绿阔叶树种和针叶树种具有更高的多酚类物质,凋落物源 DOM 芳香化程度更高;同样地,针叶林树种凋落物源 DOM 的芳香化程度显著低于阔叶树种^[14-15]。植物凋落物是森林土壤 DOM 的主要

来源之一^[2-3]。因此,在4种土地利用类型中,枫香林0—10 cm 土壤 DOM 芳香化程度最高,而杉木林10—30 cm 土壤 DOM 芳香化程度最低。

土壤 DOM 生物降解性影响土壤温室气体排放和有机质积累等关键过程,在土壤碳和养分循环中有重要意义^[2,21]。在0—10 cm 和10—30 cm 深度,杉木林土壤 DOM 生物降解性在4种土地利用类型中最高,而枫香林土壤 DOM 生物降解性最低。然而,在亚热带地区,落叶阔叶树种凋落物源 DOM 生物降解性则显著高于常绿针叶树种^[15,22],这表明,树种对土壤与凋落物源 DOM 生物降解性的影响并不一致。一般而言,DOM 生物降解性主要受养分有效性和 DOC 化学结构的影响^[11,21-22]。在本研究中,土壤 DOC : DTN : DTP 化学计量比与土壤微生物生物量 C : N : P 比值(60 : 7 : 1)极为接近^[23],这意味着退耕还林后养分有效性可能不是限制土壤 DOM 生物降解性的主要因素,因此土壤 DOM 生物降解性与 DOC : DTN,DOC : DTP 和 DTN : DTP 没有显著相关性。然而,土壤 DOM 生物降解性与 $SUVA_{254}$, $SUVA_{280}$ 和 $SUVA_{350}$ 值呈显著负相关关系,这表明,退耕还林后土壤 DOM 芳香化程度变化趋势是决定其生物降解性变化的主要因素。孙颖等^[24]在亚热带米楮林的研究也发现,土壤 DOM 化学结构复杂性程度越高,生物降解性越低。而且,Chen 等^[11]也发现,在亚热带次生林中,土壤 DOM 生物降解性随着芳香化程度和分子质量的增加而呈现降低的趋势。这些研究结果表明,碳质量是决定亚热带森林土壤 DOM 生物降解性的主要因素。同时,本研究也指出,在亚热带地区,农田造林树种主要通过改变 DOC 化学结构影响土壤 DOM 的生物降解性。

4 结论

在武夷山西坡地区,退耕还林改变土壤 DOM 的含量、C : N : P 生态化学计量比和芳香化程度,但变化的趋势和幅度取决于造林树种。而且,营造枫香林和枫香-木荷混交林降低了土壤 DOM 生物降解性,而营造杉木林则增加了土壤 DOM 生物降解性。此外,土壤 DOM 生物降解性与其初始芳香化程度呈显著负相关关系,而与 C : N : P 化学计量比无显著相关关系。这些研究结果表明,在亚热带地区,退耕还林工程中造林树种的选择是影响土壤 DOM 数量及质量的主要因素,而且碳化学组成是决定退耕还林后土壤 DOM 生物降解性格局形成的主要因素。这些研究结果为准确理解和评价亚热带地区退耕还林工程土壤有机质动态和生态服务功能提供了理论基础。

参考文献(References):

- [1] 渠晨晨,任稳燕,李秀秀,等.重新认识土壤有机质[J].科学通报,2022,67(10):913-923.
Qu C C, Ren W Y, Li X X, et al. Revisit soil organic matter [J]. Chinese Science Bulletin, 2022,67(10):913-923.
- [2] Neff J C, Asner G P. Dissolved organic carbon in terrestrial ecosystems: Synthesis and a model[J]. Ecosystems, 2001,4(1):29-48.
- [3] Guo Z Y, Wang Y H, Wan Z M, et al. Soil dissolved organic carbon in terrestrial ecosystems: Global budget, spatial distribution and controls[J]. Global Ecology and Biogeography, 2020,29(12):2159-2175.
- [4] 李小孟,孟庆俊,高波,等.溶解性有机质对重金属在土壤中吸附和迁移的影响[J].科学技术与工程,2016,16(34):314-319.
Li X M, Meng Q J, Gao B, et al. Effects of dissolved organic matter on adsorption and migration of heavy metals in soil[J]. Science Technology and Engineering, 2016,16(34):314-319.
- [5] 黎鹏,张勇,李夏浩祺,等.黄土丘陵区不同退耕还林措施的土壤碳汇效应[J].水土保持研究,2021,28(4):29-33.
Li P, Zhang Y, Li X H Q, et al. Effect of soil carbon sink in the hilly region of the Loess Plateau under grain for green project[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2021,28(4):29-33.
- [6] Yue X, Zhang T Y, Shao C L. Afforestation increases ecosystem productivity and carbon storage in China during the 2000s[J]. Agricultural and Forest Meteorology, 2021,296:108227.
- [7] Smal H, Ligęza S, Pranagal J, et al. Changes in the stocks of soil organic carbon, total nitrogen and phosphorus following afforestation of post-arable soils: A chronosequence study[J]. Forest Ecology and Management, 2019,451:117536.
- [8] 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.
- [9] Li C J, Li C Z, Zhao L H, et al. Soil dissolved carbon and nitrogen dynamics along a revegetation chronosequence of *Caragana korshinskii* plantations in the Loess hilly region of China[J]. Catena, 2022,216:106405.
- [10] Zhang D X, Chen X Y, Fu G J, et al. Dissimilar evolution of soil dissolved organic matter chemical properties during revegetation with arbor and shrub in desertified land of the Mu Us Desert[J]. Science of the Total Environment, 2022, 815:152904.
- [11] Chen H M, Shi F X, Xu J W, et al. Tree mycorrhizal type controls over soil water-extractable organic matter quantity and biodegradation in a subtropical forest of Southern China[J]. Forest Ecology and Management,

- 2023,535:120900.
- [12] Hansen A M, Kraus T E C, Pellerin B A, et al. Optical properties of dissolved organic matter (DOM): Effects of biological and photolytic degradation[J]. *Limnology and Oceanography*, 2016,61(3):1015-1032.
- [13] 蒲嘉霖,刘亮.亚热带森林凋落物分解特征及水文效应[J].*水土保持研究*,2019,26(6):165-170.
Pu J L, Liu L. Hydrology functions and decomposition characteristics of litter in subtropical forest [J]. *Research of Soil and Water Conservation*, 2019,26(6):165-170.
- [14] Li H, Wu F Z, Yang W Q, et al. The losses of condensed tannins in six foliar litters vary with gap position and season in an alpine forest[J]. *iForest-Biogeosciences and Forestry*, 2016,9(6):910-918.
- [15] Ding Y D, Xie X Y, Ji J H, et al. Tree mycorrhizal effect on litter-leached DOC amounts and biodegradation is highly dependent on leaf habits in subtropical forests of Southern China[J]. *Journal of Soils and Sediments*, 2021,21(11):3572-3579.
- [16] Cui E Q, Lu R L, Xu X N, et al. Soil phosphorus drives plant trait variations in a mature subtropical forest [J]. *Global Change Biology*, 2022,28(10):3310-3320.
- [17] 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 H, Song D S, Zhou P, 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.
- [18] 周正虎,王传宽.微生物对分解底物碳氮磷化学计量的响应和调节机制[J].*植物生态学报*,2016,40(6):620-630.
Zhou Z H, Wang C K. Responses and regulation mechanisms of microbial decomposers to substrate carbon, nitrogen, and phosphorus stoichiometry[J]. *Chinese Journal of Plant Ecology*, 2016,40(6):620-630.
- [19] Han W X, Fang J Y, Guo D L, et al. Leaf nitrogen and phosphorus stoichiometry across 753 terrestrial plant species in China[J]. *New Phytologist*, 2005,168(2):377-385.
- [20] Lu S B, Chen C R, Zhou X Q, et al. Responses of soil dissolved organic matter to long-term plantations of three coniferous tree species[J]. *Geoderma*, 2012,170:136-143.
- [21] 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.
- [22] Wu P P, Ding Y D, Li S L, et al. Carbon, nitrogen and phosphorus stoichiometry controls interspecific patterns of leaf litter-derived dissolved organic matter biodegradation in subtropical plantations of China[J]. *iForest-Biogeosciences and Forestry*, 2021,14(1):80-85.
- [23] Cleveland C C, Liptzin D. C : N : P stoichiometry in soil: Is there a "Redfield ratio" for the microbial biomass[J]. *Biogeochemistry*, 2007,85(3):235-252.
- [24] 孙颖,高颖,陈惠,等.亚热带米槠林不同更新方式对土壤可溶性有机质降解性的影响[J].*应用生态学报*,2020,31(4):1073-1082.
Sun Y, Gao Y, Chen H, et al. Effects of different regeneration patterns on soil dissolved organic matter degradation in *Castanopsis carlesii* forests of subtropical China[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2020,31(4):1073-1082.



(上接第51页)

- [26] Zhu T B, Zhang J B, Meng T Z, et al. Tea plantation destroys soil retention of NO_3^- and increases N_2O emissions in subtropical China[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2014,73:106-114.
- [27] Bollmann A, Conrad R. Influence of O_2 availability on NO and N_2O release by nitrification and denitrification in soils [J]. *Global Change Biology*, 1998,4(4):387-396.
- [28] Confalonieri R, Bellocchi G, Tarantola S, et al. Sensitivity analysis of the rice model WARM in Europe: Exploring the effects of different locations, climates and methods of analysis on model sensitivity to crop parameters[J]. *Environmental Modelling & Software*, 2010,25(4):479-488.
- [29] DeJonge K C, Ascough J C, Ahmadi M, et al. Global sensitivity and uncertainty analysis of a dynamic agroecosystem model under different irrigation treatments [J]. *Ecological Modelling*, 2012,231:113-125.
- [30] Confalonieri R, Bellocchi G, Bregaglio S, et al. Comparison of sensitivity analysis techniques: A case study with the rice model WARM[J]. *Ecological Modelling*, 2010,221(16):1897-1906.
- [31] Qin F L, Zhao Y C, Shi X Z, et al. Sensitivity and uncertainty analysis for the DeNitrification-DeComposition model, a case study of modeling soil organic carbon dynamics at a long-term observation site with a rice-bean rotation [J]. *Computers and Electronics in Agriculture*, 2016,124:263-272.