

红壤侵蚀退化地土壤对不同来源可溶性有机碳的吸附特征

曾 敏^{1,2}, 吕茂奎^{1,2}, 陈 坦^{1,2}, 邓 翠^{1,2},
张康靖^{1,2}, 聂阳意^{1,2}, 任寅榜^{1,2}, 谢锦升^{1,2}

(1. 福建师范大学地理科学学院, 福州 350007; 2. 湿润亚热带山地生态国家重点实验室培育基地, 福州 350007)

摘要: 选取南方典型红壤侵蚀退化地恢复后的马尾松林为研究对象, 通过在室内模拟芒萁 (*Dicranopteris dichotoma*) 和马尾松 (*Pinus massoniana*) 的鲜叶与凋落叶的浸提液在侵蚀退化地原状土柱的淋溶过程, 分析了植被恢复过程中马尾松林土壤对不同来源可溶性有机碳 (DOC) 吸附特征及影响因素。结果表明: (1) 红壤侵蚀退化地对不同来源 DOC 的吸附作用具有明显差异, 来自马尾松鲜叶的 DOC 平均截留量最大为 2.39 mg/kg, 来自芒萁鲜叶的 DOC 平均截留量最小为 1.67 mg/kg, 说明马尾松鲜叶的 DOC 更易被表层土壤吸附, 芒萁鲜叶的 DOC 更易进入深层土壤, 不同来源 DOC 组成和性质的差异是其主要原因。(2) 随着退化地的植被恢复, 土壤渗滤液的 DOC 浓度增加, 土壤截留 DOC 能力下降。土壤 DOC 截留量与粉粒和土壤 pH 呈正相关, 与土壤 DOC 含量、土壤有机碳含量和砂粒呈负相关, 其中土壤有机碳含量可以解释 DOC 截留量变化的 51.4%, 是影响土壤 DOC 截留能力的关键因素。(3) 光谱特征表明芳香类化合物、腐殖类物质易被土壤吸附, 吸附能力更强的物质可以解吸土壤中亲水性腐殖类物质。淋溶后 DOC 光谱特征的变化由不同来源 DOC 的化学组成和土壤有机碳的性质共同决定。红壤侵蚀退化地对不同植物来源的 DOC 吸附作用特征主要受 DOC 和土壤 SOC 性质的共同调控, 对进一步认识退化红壤的固碳机制具有重要参考价值。

关键词: 植被恢复; 可溶性有机碳 (DOC); 淋溶; 吸附

中图分类号: Q142.3; S153.6

文献标识码: A

文章编号: 1009-2242(2018)02-0191-07

DOI: 10.13870/j.cnki.stbcbx.2018.02.028

Adsorption Characteristics of Soil to Dissolved Organic Carbon Derived from Different Sources in Eroded Degraded Red Soil

ZENG Min^{1,2}, LÜ Maokui^{1,2}, CHEN Tan^{1,2}, DENG Cui^{1,2}, ZHANG Kangjing^{1,2},
NIE Yangyi^{1,2}, REN Yinbang^{1,2}, XIE Jinsheng^{1,2}

(1. School of Geographical Sciences, Fujian Normal University, Fuzhou 350007;

2. State Key Laboratory of Subtropical Mountain Ecology, Fuzhou 350007)

Abstract: *Pinus massoniana* forest after the restoration of eroded degraded land in the typical red soil of southern China was selected as the research object. Dissolved organic carbon (DOC) extracted from the fresh leaves and the leaf litter of *P. massoniana* and *Dicranopteris dichotoma* was leached through such soil cores of eroded degraded land in indoor simulation, and the adsorption characteristics and influencing factors of DOC from different sources in *P. massoniana* forest during vegetation restoration was analyzed. The results showed: (1) The adsorption of red soil eroded degraded land on DOC from different sources had obvious difference, the maximum of DOC average interception from the fresh leaves of *P. massoniana* was 2.39 mg/kg, the minimum of DOC average interception from the fresh leaves of *D. dichotoma* was 1.67 mg/kg. DOC from the fresh leaves of *P. massoniana* was more susceptible to surface soil adsorption, while DOC from the fresh leaves of *D. dichotoma* was easy to enter the deep soil, different sources of DOC composition and properties was the main reason for this difference. (2) With the increase of vegetation restoration years, the DOC concentration of soil leachate increased, and the soil interception ability of DOC decreased. DOC interception was positively correlated with the content of silt and soil pH, negatively correlated dissolved

organic carbon and soil organic carbon and the content of sand. Soil organic carbon content could explain 51.4% of the change of DOC interception, and is the key factor affecting the ability of soil DOC interception. (3) The spectral characteristics showed that aromatic compounds and humic substances were easily adsorbed by soil, and the substances with stronger adsorption capacity could desorb hydrophilic humic substances in soil. The change of DOC spectral characteristics after leaching was determined by the chemical composition of DOC from different sources and the properties of soil organic carbon. The adsorption characteristics of eroded degraded red soil on DOC from different plant sources was mainly controlled by DOC and soil SOC properties, and this provided important reference value for further understanding the mechanism of carbon sequestration in degraded red soil.

Keywords: vegetation restoration; dissolved organic carbon (DOC); leaching; adsorption

可溶性有机碳(dissolved organic carbon, DOC)是土壤有机质中的活跃组分,影响土壤养分循环、微生物活动和土壤有机质分解和转化过程,在全球碳循环过程中起着重要作用^[1]。

在森林生态系统中,DOC 一般来源于植物凋落物、植物根系分泌物、微生物和土壤腐殖质^[2],目前研究认为新近凋落物是土壤 DOC 的主要来源^[3]。DOC 的淋溶在生态系统的净平衡中起着重要作用^[4],但植被和凋落物淋溶的 DOC 对土壤有机碳积累的贡献和影响机制却不清楚。在森林生态系统内部,每年有 115~500 kg/hm² 的 DOC 通过凋落物层向土壤矿质层输入,占年凋落物碳总量的 35%^[5]。土壤凋落物层中 DOC 浓度最高是未分解的凋落物层,新鲜凋落物释放的 DOC 多为小分子可溶解的有机物,而半分解凋落物释放的 DOC 芳香化合物增多^[6]。林冠层也是土壤 DOC 来源之一,大气降水通过林冠层时,对叶面和枝条淋洗和淋溶,穿透雨中 DOC 浓度,最高可达 18.3 mg/L^[7]。由于土壤的吸附和解吸作用,林冠层和凋落物层通过降雨淋溶的 DOC 进入土壤矿质层后不仅浓度改变^[8],化学组成也发生变化^[9],从而影响土壤有机碳的传输和积累^[10]。一般认为芳香族化合物、疏水性化合物以及复杂大分子等一系列化学性质稳定的有机物优先被土壤吸附^[11],而烷烃和简单的碳水化合物则容易随着土壤溶液进入深层土壤^[12]。难分解组分是 DOC 在被土壤吸附过程中可以受到保护的先决条件^[13],而亲水性化合物等不稳定化合物不容易被吸附且生物稳定性差,容易被疏水性化合物发生替代吸附^[14]。DOC 在土壤中的吸附行为还受到土壤理化性质的影响。土壤中的铁铝氧化物和土壤黏粒可以吸附大量 DOC^[15]。土壤有机质对于 DOC 吸附的影响目前还存在争议,有学者认为有机质含量增加,不利于 DOC 的吸附^[16];也有学者认为随着土壤有机质增加,DOC 的吸附量也会增加^[17]。土壤 pH 对于 DOC 吸附的影响是复杂的,目前对 pH 的影响尚无统一论^[18]。

尽管开展了不少 DOC 迁移的相关研究,但大多集中在温带^[19],而在热带亚热带森林地区相关研究比较缺乏,来自降雨淋溶的 DOC 对土壤有机碳贡献及其影响机制尚不清楚。林下植被是森林生态系统的重要组成部分,但其产生的 DOC 的作用基本被忽略。在南方侵蚀红壤恢复的马尾松林(*Pinus massoniana*)中,林下植被尤其是芒萁(*Dicranopteris dichotoma*)大量覆盖地表,通过降雨淋溶将产生大量 DOC,但这种来源的 DOC 如何影响土壤有机碳积累还不清楚。

南方红壤区是我国仅次于黄土高原的水土流失区。该区植被破坏严重,土壤有机碳含量极低,而植被恢复显著增加了土壤有机碳含量和储量^[20]。为了探讨来自降雨淋溶的不同植物来源的 DOC 对土壤碳积累的作用,本文选择南方典型红壤侵蚀退化地恢复后的马尾松林为研究对象,研究不同来源的 DOC 在侵蚀退化地表层土壤中的迁移变化,旨在为进一步阐明退化红壤植被恢复过程中土壤有机碳积累机制提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

研究区位于福建省长汀县河田镇(25°33′—25°48′N, 116°18′—116°31′E),海拔 300~500 m,属中亚热带典型季风气候区,年均气温 17.5~19.2℃,年均降水量 1 700 mm,年均蒸发量 1 403 mm,平均日照时间 1 924.6 h,平均无霜期 260 d,≥10℃积温为 4 100~4 650℃。研究区土壤主要是中粗粒花岗岩发育的红壤,抗蚀能力较差,因此本区是我国水土流失最严重的地区之一。地带性植被为中亚热带常绿阔叶林,但原有植被基本已被破坏,现有主要是马尾松人工林和次生林,林下植被为芒萁,树种结构单一,生长较差。

1.2 原状土柱的制备

2014 年 5 月,以时空代换的方法在河田镇选择 3 个土壤母质相同但植被恢复年限不同的马尾松林,分别是未治理、恢复 13 年和恢复 31 年的马尾松林,每个马尾松林选择 2 种处理:自然形成的林下芒萁覆盖地和林下裸地。每个马尾松林芒萁覆盖地设立 3 个 20 m×20 m 的

标准样地,对照为芒萁覆盖地相邻的自然形成的无芒萁覆盖的林下裸露地。样地基本概况见表 1。

原状土柱采用内径 58 mm、外径为 63 mm、高度为 11 cm 的 PVC 管制备。将 PVC 管砸入土壤表层 0—10 cm 土层,缓慢拔出并及时在两端盖上盖子以保证土柱完整性,每个样地各取 5 个点。将芒萁覆盖样地的土柱样品标记为 MQ,林下裸地样地的土柱样品标记为 CK,对应的不同恢复年限的马尾松林(未治理、恢复 13 年、恢复 31 年)分别为 MQ₁、MQ₂、MQ₃ 以及 CK₁、CK₂、CK₃。

1.3 土壤基本理化性质

土壤 pH 采用奥豪斯 STARTER 300 测定,水土

重量比为 2.5 : 1;土壤有机碳含量采用土壤元素分析仪(Vario MAX-1,Elementar,德国)测定;土壤粒粒分析采用粒径分析仪(SEDIMAT 4 - 12,德国)测定;DOC 浓度采用岛津 TOC-VCPH 总有机碳分析仪测定。具体的测定方法和步骤参见《土壤农业化学分析方法》^[21]。土壤基本理化性质见表 2。

表 1 样地基本概况

恢复 年限	优势种	平均 树高/m	平均 胸径/cm	密度/ (株·hm ⁻²)	芒萁 覆盖度/%	坡度/ (°)
Y0	马尾松+芒萁	2.0	3.1	1741	15	19
Y13	马尾松+芒萁	7.0	7.4	3341	90	8
Y31	马尾松+芒萁	13.7	14.0	1433	85	11

表 2 土壤的主要理化性质

样地	可溶性有机碳/ (mg·kg ⁻¹)	土壤有机碳/ (g·kg ⁻¹)	pH	砂粒/%	粉粒/%	黏粒/%
CK ₁	3.60±0.64b	1.51±0.10e	5.00±0.05a	43.23±0.14e	37.85±0.14b	18.92±0.21c
MQ ₁	8.64±1.33b	6.10±1.02c	4.78±0.10b	43.28±0.15d	33.85±0.07c	22.88±0.12b
CK ₂	11.49±3.03b	6.66±0.98c	4.71±0.01b	31.42±0.72f	39.06±0.11a	29.53±0.77a
MQ ₂	48.00±12.36a	9.91±0.19b	4.46±0.08c	46.93±0.21b	31.26±0.27d	21.65±0.48b
CK ₃	8.60±2.34b	4.55±0.61d	4.96±0.09a	43.09±0.46c	29.83±0.77d	27.07±0.31a
MQ ₃	39.38±6.47a	11.70±0.40a	4.72±0.05a	58.03±0.16a	19.78±0.35e	20.99±0.21b

注:表中数字后不同小写字母表示样地差异显著($p<0.05$)。下同。

1.4 初始 DOC 溶液制备

用凋落物框收集样地内新近马尾松凋落叶,并采集芒萁的鲜叶和凋落叶,马尾松鲜叶的收集采用高枝剪在样地的不用方向随机选择马尾松采集。芒萁、马尾松的鲜叶和凋落叶收集后,分别均匀混合,按照植物与水重量比 1 : 20 的比例,加入超纯水混合静置 24 h,然后用 0.45 μm 玻璃纤维滤膜抽滤,分别得到芒萁、马尾松的鲜叶和凋落叶浸提液。用岛津 TOC-VCPH 总有机碳分析仪测定土壤浸提液 DOC 含量。本研究为了比较不同来源的 DOC 的淋溶,同时在亚热带森林生态系统中,针叶林穿透雨 DOC 的浓度在 3.7~11.8 mg/L^[15],将浸提液稀释成 10 mg/L 的淋溶液用于淋溶试验。芳香化指数(AI)用紫外可见分光光度计(UV-2450, Shimadzu, Kyoto, Japan)测定 254 nm 下的吸光度。日立 F7000 仪器(F7000, Hitachi, Tokyo, Japan)测定腐殖化指数(HIX),激发和发射光栅狭缝宽度为 5 nm,扫描速度为 1 200 nm/min,固定激发波长为 254 nm,发射波长范围为 300~480 nm。基本性质见表 3。

表 3 不同来源 DOC 的芳香化指数与腐殖化指数

浸提液 类型	DOC 含量/ (mg·L ⁻¹)	芳香化 指数	腐殖化 指数
芒萁鲜叶	10	1.46±0.10c	0.13±0.02d
马尾松鲜叶	10	0.98±0.08d	0.55±0.02c
芒萁凋落叶	10	2.28±0.11a	1.29±0.03a
马尾松凋落叶	10	1.60±0.14b	1.06±0.05b

1.5 模拟淋溶

在 PVC 管的顶部和底部铺上一层玻璃纤维并在布氏漏斗上铺层微孔滤膜,使 DOC 能均匀的淋溶并且防止土壤流失。将土柱放置在布氏漏斗上,分别取 200 mL 4 种不同来源的 DOC 淋溶液和作为对照的等量的超纯水,匀速淋溶原状土柱,用广口瓶收集渗滤液,并用量筒测量渗滤液体积,每个土柱淋溶 1 次,每个处理 3 次重复。土壤渗滤液过 0.45 μm 微孔滤膜,测定土壤渗滤液 DOC 含量、芳香化指数和腐殖化指数。

1.6 数据处理

土壤 DOC 截留量: $Q=(C_0\times V_0-C_1\times V_1)/M$
式中: Q 为土壤 DOC 截留量(mg/kg); C_0 、 C_1 分别为初始 DOC 淋溶液和渗滤液 DOC 的浓度(mg/L); V_0 、 V_1 分别为初始 DOC 淋溶液和渗滤液 DOC 的体积(L); M 为土柱内的土重(kg)。

芳香化指数(AI)用来衡量 DOC 溶液中芳香化合物含量的高低。计算公式是:

$$AI=100\times UV_{254}/(b\times DOC)$$

式中: AI 为芳香化指数; UV_{254} 表示 254 nm 的紫外吸光值(cm^{-1}); b 为紫外吸收光程(1 cm); DOC 为样品的浓度(mg/L)。

腐殖化指数(HIX)是发射光谱中 $\Sigma 435\sim 480\text{ nm}$ 与 $\Sigma 300\sim 345\text{ nm}$ 的面积比,腐殖化指数越大,说明 DOC 中分子结构越复杂,腐殖类物质含量也越高。

利用 Excel 2013 和 SPSS 19.0 软件进行数据统计分析,使用单因素方差分析对数据进行差异显著性检验,显著水平设定为 $\alpha=0.05$ 。用 Origin 9.0 软件进行相关图表的绘制。

2 结果与分析

2.1 土壤渗滤液 DOC 浓度变化

与初始 DOC 淋溶液浓度(10 mg/L)相比,所有样地原状土柱淋溶后的渗滤液 DOC 浓度均显著下降(图 1)。林下裸地处理(CK)的土壤渗滤液 DOC 浓度显著低于林下芒萁覆盖处理(MQ)($P<0.05$),CK 的土壤渗滤液 DOC 浓度比初始浓度平均降低了

58%,而 MQ 的平均降低了 33%。随着植被恢复年限的增加,恢复 13 年的林下裸地(CK₂)和恢复 31 年的林下裸地(CK₃)的土壤渗滤液 DOC 浓度分别是未治理林下裸地处理(CK₁)的 1.51 倍和 1.47 倍;但 MQ 之间无显著差异。4 种不同来源的 DOC 淋溶液淋溶原状土柱后,除 MQ₁ 样地外,淋溶马尾松鲜叶后的土壤渗滤液 DOC 浓度都最低,平均浓度 5.33 mg/L;芒萁鲜叶的浓度最高,平均为 7.00 mg/L,芒萁和马尾松凋落叶相差不大,说明马尾松鲜叶淋溶的 DOC 更容易被表层土壤吸附,而芒萁鲜叶淋溶的 DOC 更容易进入深层土壤。

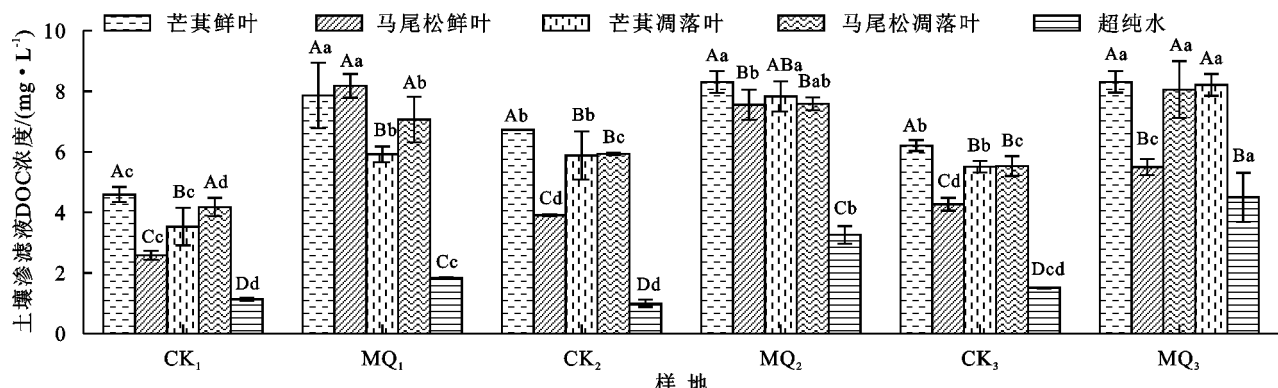


图 1 不同来源 DOC 淋溶原状土柱后土壤渗滤液 DOC 浓度

2.2 土壤 DOC 截留量与土壤性质的相关性

土柱淋溶 DOC 溶液后,CK 的土壤 DOC 截留量均显著高于 MQ($P<0.05$),CK 的土壤 DOC 截留量平均为 2.51 mg/kg, MQ 土壤的平均截留量为 1.51 mg/kg(图 2)。4 种不同来源的 DOC 在土壤中的截

留量存在差异。淋溶马尾松鲜叶淋溶液后的土壤 DOC 截留量最大(MQ₁ 除外),平均为 2.39 mg/kg;淋溶芒萁鲜叶淋溶液后的土壤 DOC 截留量最小,平均为 1.67 mg/kg;而芒萁和马尾松凋落叶淋溶液的截留量无显著差异,分别平均为 2.05,1.93 mg/kg。

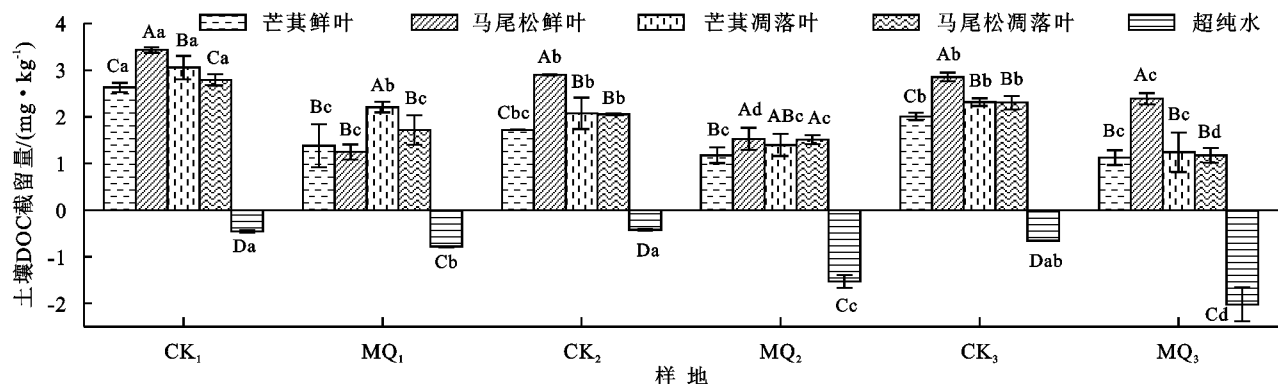


图 2 不同来源 DOC 淋溶原状土柱后土壤 DOC 截留量

用所有样品的土壤 DOC 截留量($n=72$)与土壤基本理化性质进行皮尔逊相关分析,表明土壤 DOC 截留量与土壤粉粒含量和土壤 pH 呈显著正相关关系,与土壤 DOC 含量、土壤有机碳含量以及土壤砂粒含量呈显著负相关关系,但和土壤黏粒无显著相关关系(图 3)。

2.3 土壤渗滤液芳香化指数和腐殖化指数的变化

不同来源的 DOC 淋溶液淋溶原状土柱后,不仅浓度发生改变,化学组成也发生变化。与初始 DOC 淋溶

液的芳香化指数(AI)相比,除马尾松鲜叶淋溶液淋溶 MQ₃ 土柱外,土壤渗滤液的 AI 值均显著降低(表 4),其中 CK 的土壤渗滤液 AI 值显著小于 MQ。芒萁鲜叶、马尾松鲜叶、芒萁凋落叶和马尾松凋落叶淋溶液淋溶 CK 土柱后渗滤液的 AI 值平均分别降低了 72%,51%,76%和 59%,淋溶 MQ 土柱后渗滤液的 AI 值平均分别降低了 50%,12%,69%和 34%。

与芳香化指数相比,土壤渗滤液的腐殖化指数(HIX)变化更为复杂(表 5)。与初始的 HIX 值相比,

芒萁鲜叶和马尾松凋落叶淋溶液淋溶 CK₁、CK₂ 和 MQ₁ 土柱后 HIX 值无显著差异;而淋溶 MQ₂、MQ₃ 和 CK₃ 土柱后,HIX 值显著增加。芒萁鲜叶渗滤液 HIX 值(0.07~0.40)显著低于马尾松凋落叶渗滤液 HIX 值(0.74~2.72)。马尾松鲜叶淋溶液淋溶所有样地原状土柱后,HIX 值都显著增加,平均约增加 86.1%,变化范围为 0.78~1.26。芒萁凋落叶淋溶液淋溶 MQ₃ 土柱后 HIX 值显著增加,其余样地的

HIX 值均降低,变化范围为 0.66~2.34,并且 MQ 的土壤渗滤液 HIX 值大于 CK 的,同时随着植被恢复年限的增加,土壤渗滤液 HIX 值有增加的趋势。

光谱特征值与环境因子的相关性分析得出(表 6),AI 值的变化量与土壤有机碳和土壤 DOC 呈极显著负相关关系,HIX 值的变化量与植被恢复年限、土壤有机碳和土壤 DOC 呈极显著负相关关系,与土壤 pH 呈显著正相关关系。

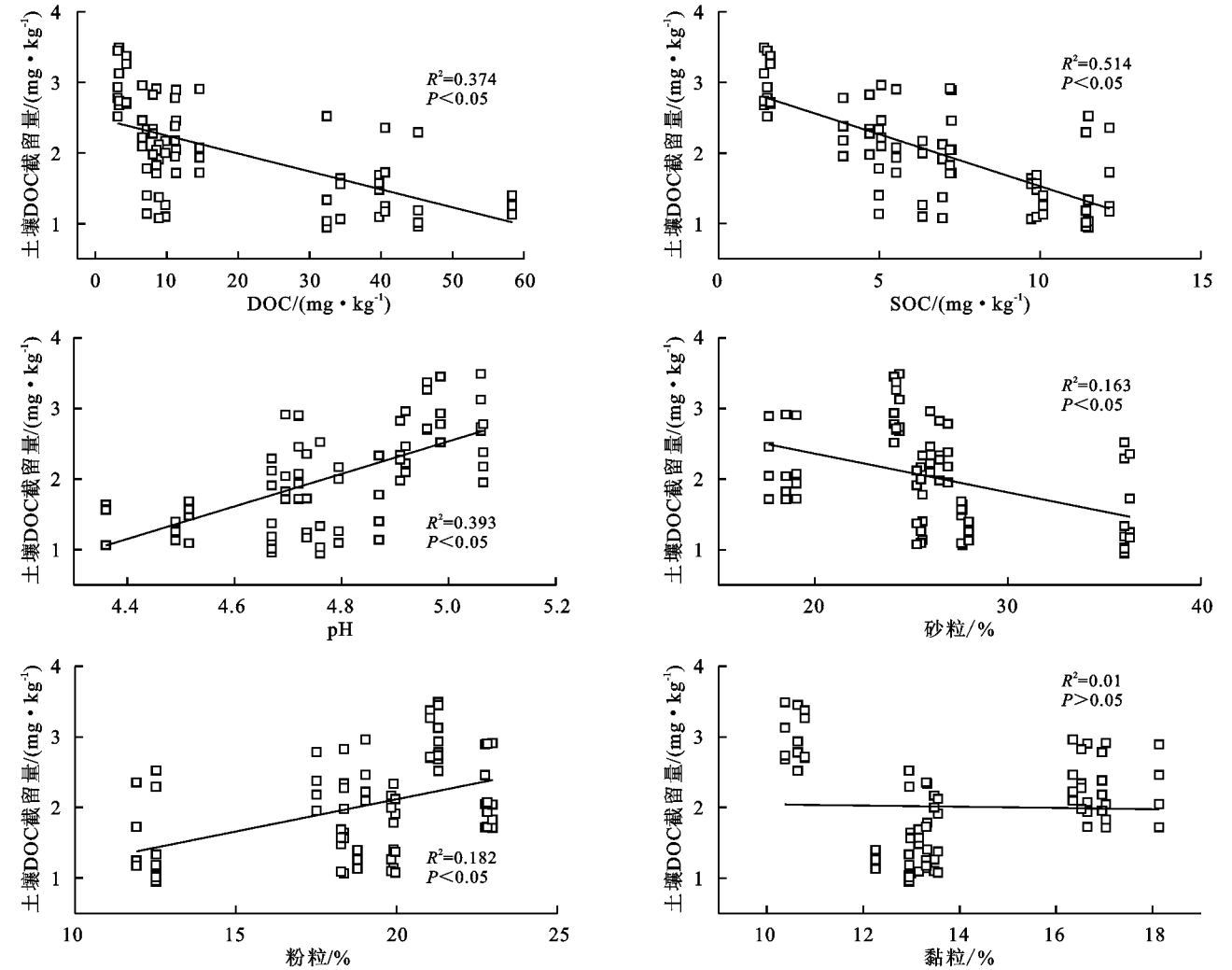


图 3 土壤 DOC 截留量与土壤性质的相关性

表 4 土壤渗滤液芳香化指数

浸提液类型	初始值	CK ₁	MQ ₁	CK ₂	MQ ₂	CK ₃	MQ ₃
芒萁鲜叶	1.45±0.03a	0.46±0.05de	0.66±0.04c	0.33±0.06e	0.52±0.10cd	0.41±0.04de	0.99±0.17b
马尾松鲜叶	0.92±0.02a	0.32±0.07e	0.66±0.06c	0.40±0.03d	0.77±0.03b	0.63±0.05c	0.99±0.02a
芒萁凋落叶	2.28±0.04a	0.36±0.06f	0.47±0.03e	0.72±0.07c	0.64±0.09cd	0.57±0.13de	1.04±0.14b
马尾松凋落叶	1.56±0.02a	0.57±0.03c	0.73±0.10c	0.59±0.01c	1.14±0.18b	0.76±0.16c	1.23±0.03b
超纯水	0	0.07±0.01d	0.24±0.01b	0.09±0.01d	0.36±0.01a	0.16±0.01c	0.35±0.05a

表 5 土壤渗滤液腐殖化指数

浸提液类型	初始值	CK ₁	MQ ₁	CK ₂	MQ ₂	CK ₃	MQ ₃
芒萁鲜叶	0.13±0.01c	0.10±0.02c	0.07±0.02c	0.13±0.01c	0.40±0.12a	0.26±0.03b	0.29±0.07b
马尾松鲜叶	0.55±0.01d	0.96±0.06bc	0.78±0.09c	1.03±0.02b	1.04±0.11b	1.06±0.11b	1.26±0.20a
芒萁凋落叶	1.29±0.01b	0.66±0.13d	0.83±0.32d	1.12±0.02bc	1.01±0.20bc	0.91±0.03cd	2.34±0.19a
马尾松凋落叶	1.06±0.03cd	0.74±0.02d	0.82±0.07cd	0.99±0.02cd	1.68±0.10b	1.10±0.08c	2.72±0.41a
超纯水	0	0.81±0.04d	1.13±0.15cd	1.45±0.07bc	1.85±0.13b	1.44±0.15c	2.46±0.51a

表 6 光谱特征值与环境因子的相关性

光谱 特征值	DOC 来源	植被恢复 年限	SOC	DOC	pH
AI 变化量	0.191	-0.230	-0.341**	-0.312**	0.19
HIX 变化量	0.004	-0.49**	-0.557**	-0.513**	0.248*

注: * 表示 $P < 0.05$; ** 表示 $P < 0.01$ 。

3 讨论

吸附与解吸是土壤的重要特性之一,而不同植物来源的 DOC 由于性质不同可能显著影响土壤的吸附与解吸特征。本研究中,DOC 淋溶原状土柱后渗滤液 DOC 浓度均显著降低,其中来自马尾松鲜叶的 DOC 被土壤截留最多,其次为来自芒萁凋落叶和马尾松凋落叶的 DOC,而来自芒萁鲜叶的 DOC 截留量最少。这说明马尾松鲜叶浸提的 DOC 更易被表层土壤吸附,而芒萁鲜叶浸提的 DOC 更多地进入深层土壤。已有研究表明植物的叶片质量和结构的差异导致不同来源的 DOC 的化学组成和性质有较大差异^[1],而 DOC 化学组成的不同对于土壤吸附 DOC 有重要影响,芳香类物质、疏水性化合物和复杂大分子化合物一般优先被土壤吸附^[11],因为这类物质体积大,比表面积也比较大,流动较慢,更容易和土壤矿物质表面的吸附点位结合^[22]。本研究中,凋落叶的 DOC 比鲜叶的有更多的芳香类物质和腐殖质类物质(表 3),因此相同浓度的芒萁和马尾松凋落叶淋溶的 DOC 比芒萁鲜叶 DOC 更利于表层土壤吸附。然而来自马尾松鲜叶的 DOC 被土壤截留的量却最大,淋溶后所有处理的土壤渗滤液的腐殖化指数均增加(表 5),这可能是由于来自马尾松鲜叶淋溶液中疏水性的 DOC 可将土壤中的原有的腐殖质类物质置换出来,从而增加了土壤吸附点位,使更多的组分被土壤吸附。

土壤性质是影响土壤吸附 DOC 的重要因素。首先,土壤有机碳含量对土壤 DOC 吸附具有很大影响。本研究中林下裸露地(CK)的土壤 DOC 截留量平均为 2.51 mg/kg,显著高于芒萁覆盖地(MQ)土壤的平均截留量(1.51 mg/kg),这是由于 CK 样地土壤有机碳含量显著低于 MQ 样地,这为 DOC 的吸附提供了更多的表面积和吸附点位,使得 CK 样地有更强的吸附能力。相关性分析进一步表明,土壤有机碳含量与土壤 DOC 截留量呈显著负相关(图 3),是影响土壤 DOC 截留能力的关键因素。多数研究也表明随着土壤有机碳含量的增加,土壤 DOC 的截留量减少^[23]。土壤有机碳影响 DOC 的吸附主要是通过影响土壤电荷种类和密度^[15]以及减少吸附剂的粗糙度和表面积^[13]等方式降低土壤对 DOC 的吸附能力。其次,土壤机械组成也是影响 DOC 截留量的重要因素。本研究表明土壤 DOC 截留量与土壤砂粒

呈负相关,与土壤粉粒呈正相关,与土壤黏粒相关性不显著。前人的研究表明黏粒是土壤截留 DOC 的主要因素,黏粒含量与土壤截留量成正相关关系^[15]。黏粒由于有较大的比表面积和表面电荷,能够提供更多的吸附点位,对于 DOC 的吸附能力更强。本研究可能是由于粉粒含量较高造成,从而导致黏粒含量关系不密切。再次,土壤 pH 也是影响土壤 DOC 吸附的重要影响因素,但目前并没有得出一致的结果。本研究中土壤 DOC 截留量随着土壤 pH 值增加而增加。俞元春等^[18]用杉林土壤模拟试验得出,pH 5.0 时土壤对 DOC 的吸附最强,在 pH 7.0 时土壤对 DOC 的吸附最弱;Kalbitz 等^[24]表明,pH 在 3.5~4.5 范围内,DOC 的吸附率随 pH 的升高而降低,在 pH 4.5~5.5 时,有相同趋势但是不显著;而 Kaiser 等^[13]认为大部分土壤 pH 值介于 3.5~6.0 对 DOC 的吸附能力影响不显著。这些研究的土壤有机碳含量以及机械组成等不同,从而可能导致不同研究的土壤 pH 与土壤 DOC 吸附关系存在较大差异。

外源 DOC 进入土壤过程中也会对土壤原有 DOC 产生解吸作用,导致渗滤液中 DOC 化学结构的变化。本研究发现 MQ 土壤渗滤液的芳香类化合物显著大于 CK。超纯水淋溶后结果表明,MQ 样地土壤原有 DOC 的 AI 值高于 CK 样地,同时 MQ 样地 DOC 的截留量低于 CK,所以 MQ 样地吸附的芳香类物质小于 CK 样地。淋溶后 DOC 腐殖化指数变化更复杂,来自马尾松鲜叶的 DOC 淋溶后渗滤液的腐殖类物质均增加,而芒萁鲜叶和马尾松凋落叶在 MQ₂、MQ₃ 和 CK₃ 样地的渗滤液腐殖类物质亦增加,这是由于淋溶过程中发生了替代吸附或解吸,亲水性化合物、小分子以及微生物代谢产物等化合物不容易被吸附,即使吸附后稳定性也差,容易解吸或被疏水性化合物替代吸附^[11]。本研究中虽然渗滤液腐殖类物质增加,但是 DOC 浓度和芳香化指数却下降,说明新加入的 DOC 置换出土壤中原有的部分亲水性腐殖类物质。替代吸附主要发生在土壤有机碳含量高的样地,超纯水淋溶结果可以看出这些样地本身腐殖类物质较高,相关分析发现(表 6)AI 值和 HIX 值的变化量主要与土壤关系密切,但是不同来源 DOC 的光谱特征值在相同土柱中的淋溶结果不尽相同,说明不同来源 DOC 的化学组成和土壤有机碳本身的性质共同决定了 DOC 在淋溶土柱后的变化。

DOC 是深层土壤有机碳的重要来源,特别是土壤矿物质对于 DOC 的吸附被认为是深层土壤固定有机碳的主要过程^[11],被吸附的 DOC 因为与矿物质的吸附使其稳定性增加,生物有效性降低,有利于有机碳的积累^[25]。红壤侵蚀退化地早期有机碳含量

低,土壤截留能力强,有机碳积累快,而植被恢复增加了土壤表层有机碳的含量(表2),限制了土壤的DOC吸附能力^[23],截留量减少,土壤截留DOC的能力降低,表层土壤有机碳积累变慢,更多的DOC将进入更深层的土壤从而被吸附固定。本研究中马尾松鲜叶的DOC更易被表层土壤吸附,有利于表层土壤有机碳的积累。而芒萁鲜叶DOC更多的进入深层土壤,侵蚀红壤恢复的马尾松林中芒萁大量覆盖地表,产生大量DOC,并且已有研究表明土壤截留DOC的能力随着土层的深度增加而增加^[18],深层土壤有更大的截留能力,所以芒萁鲜叶淋溶的DOC能够更有利于深层有机碳的积累,这对于进一步理解侵蚀土壤有机碳恢复机制具有重要意义。

4 结论

(1)不同来源的DOC在原状土柱淋溶过程中均有部分DOC被土壤吸附,马尾松鲜叶的渗滤液浓度最小,为5.33 mg/L,土壤DOC截留量最多,为2.39 mg/kg;芒萁鲜叶的渗滤液浓度最大,为7.00 mg/L,土壤DOC截留量最少,为1.67 mg/kg,说明马尾松鲜叶DOC更易被表层土壤吸附,芒萁鲜叶的DOC更易进入深层土壤。随植被恢复年限和芒萁覆盖的增加,土壤渗滤液的DOC浓度增加,土壤截留DOC能力下降。

(2)土壤DOC截留量与粉粒和土壤pH呈正相关,与土壤DOC含量、土壤有机碳含量和砂粒呈负相关,其中土壤有机碳含量是影响土壤DOC截留能力的关键因素。红壤侵蚀退化地随着土壤有机碳含量增加,表层土壤DOC的截留能力减弱,土壤有机碳积累变慢,更多的DOC将进入更深层的土壤从而被吸附固定。

(3)光谱特征表明芳香类化合物、腐殖类物质易被土壤吸附,但吸附能力更强的物质可以解吸土壤中亲水性腐殖类物质,土壤自身腐殖类物质的多寡也将影响DOC淋溶液的光谱变化。DOC光谱特征的变化由DOC的化学组成和土壤有机碳的性质共同决定。

参考文献:

- [1] Kalbitz K, Meyer A, Yang R, et al. Response of dissolved organic matter in the forest floor to long-term manipulation of litter and throughfall inputs[J]. *Biogeochemistry*, 2007, 86(3): 301-318.
- [2] 杨玉盛,林瑞余,李庭波,等. 森林凋落物淋溶中的溶解有机物与紫外-可见光谱特征[J]. *热带亚热带植物学报*, 2004, 12(2): 124-128.
- [3] Kalbitz K, Solinger S, Park J H, et al. Controls on the dynamics of dissolved organic matter in soils: A review

- [J]. *Soil Science*, 2000, 165(4): 277-304.
- [4] Kindler R, Siemens J, Kaiser K, et al. Dissolved carbon leaching from soil is a crucial component of the net ecosystem carbon balance[J]. *Global Change Biology*, 2010, 17(2): 1167-1185.
- [5] Kalbitz K, Kaiser K. Contribution of dissolved organic matter to carbon storage in forest mineral soils[J]. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science*, 2010, 171(1): 52-60.
- [6] Klotzbücher T, Kaiser K, Stepper C, et al. Long-term litter input manipulation effects on production and properties of dissolved organic matter in the forest floor of a Norway spruce stand[J]. *Plant and Soil*, 2012, 355(1): 407-416.
- [7] 吕茂奎,谢锦升,江森华,等. 米槎常绿阔叶次生林和杉木人工林穿透雨和树干径流可溶性有机质浓度和质量的比较[J]. *应用生态学报*, 2014, 25(8): 2201-2208.
- [8] Scott E E, Rothstein D E. The dynamic exchange of dissolved organic matter percolating through six diverse soils[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2014, 69(1): 83-92.
- [9] 赵满兴,王文强,周建斌. 温度对土壤吸附有机肥中可溶性有机碳、氮的影响[J]. *土壤学报*, 2013, 50(4): 842-846.
- [10] Neff J C, Asner G P. Dissolved organic carbon in terrestrial ecosystems: Synthesis and a model[J]. *Ecosystems*, 2001, 4(1): 29-48.
- [11] 黄倩,吴靖霆,陈杰,等. 土壤吸附可溶性有机碳研究进展[J]. *土壤*, 2015, 47(3): 446-452.
- [12] 熊丽,杨玉盛,万菁娟,等. 可溶性有机碳在土壤剖面淋溶过程中的分馏[J]. *应用生态学报*, 2015, 26(5): 1289-1296.
- [13] Kaiser K, Guggenberger G, Derenne S, et al. The role of DOM sorption to mineral surfaces in the preservation of organic matter in soils[J]. *Organic Geochemistry*, 2000, 31(7/8): 711-725.
- [14] Jagadamma S, Mayes M A, Zinn Y L, et al. Sorption of organic carbon compounds to the fine fraction of surface and subsurface soils[J]. *Geoderma*, 2014, 213(1): 79-86.
- [15] 韩成卫,李忠佩,刘丽,等. 溶解性有机碳在红壤水稻土中的吸附及其影响因素[J]. *生态学报*, 2008, 28(1): 445-451.
- [16] 李太魁,杨小林,寇长林,等. 可溶性有机碳在紫色土中的吸附及影响因素分析[J]. *生态环境学报*, 2016, 25(11): 1836-1841.
- [17] Mayes M A, Heal K R, Brandt C C, et al. Relation between soil order and sorption of dissolved organic carbon in temperate subsoils[J]. *Soil Science Society of America Journal*, 2012, 76(3): 1027.
- [18] 俞元春,何晟,李炳凯,等. 杉林土壤溶解有机碳吸附及影响因素分析[J]. *南京林业大学学报(自然科学版)*, 2005, 29(2): 15-18.