#### DOI: 10.5846/stxb202106301742

唐玉祥,王全成,陈娟,时应贵,熊德成,胥超,陈仕东,杨智杰.中亚热带 13 种树种幼苗叶片和细根可溶性有机碳的数量特征和结构特征.生态学报,2022,42(12):4882-4891.

Tang Y X, Wang Q C, Chen J, Shi Y G, Xiong D C, Xu C, Chen S D, Yang Z J.Quantitative and structural characteristics of dissolved organic carbon in 13 tree seedling leaves and fine roots in the mid-subtropics. Acta Ecologica Sinica, 2022, 42(12):4882-4891.

# 中亚热带 13 种树种幼苗叶片和细根可溶性有机碳的 数量特征和结构特征

唐玉祥<sup>1,2</sup>,王全成<sup>1,2</sup>,陈 娟<sup>1,2</sup>,时应贵<sup>1,2</sup>,熊德成<sup>1,2</sup>,胥 超<sup>1,2</sup>,陈仕东<sup>1,2</sup>,杨智杰<sup>1,2,\*</sup> 1 福建师范大学地理科学学院,福州 350007 2 福建三明森林生态系统与全球变化野外科学观测站,三明 365002

摘要:植物叶片和细根输入的可溶性有机碳(Dissolved organic carbon, DOC)是森林生态系统最活跃的组成部分,对生态系统的 碳循环有重要作用。以中亚热带 13 种典型树种为研究对象,测定其幼苗叶片和细根(0-1 mm 和 1-2 mm)的碳氮含量,淋溶 产生的 DOC 浓度以及傅里叶红外光谱特征,分析不同树种和不同器官之间 DOC 的数量特征和结构特征。结果表明:(1)浙江 桂在叶片和细根(0-1 mm 和 1-2 mm)的总碳含量上最高,竹柏在叶片和 0-1 mm 细根的总碳含量上最低,观光木在 1-2 mm 细根的总碳含量上最低。花榈木和罗汉松在叶片的总氮含量上分别为最高和最低,木荚红豆和观光木分别在 0—1 mm和 1— 2 mm细根的总氮含量上最高,冬青在细根(0-1 mm 和 1-2 mm)的总氮含量上最低。(2)刨花楠、闽楠和浙江桂等樟科树种在 叶片淋溶产生的 DOC 浓度上最高,而罗汉松和和竹柏等罗汉松科树种在叶片淋溶产生的 DOC 浓度上最低;花榈木和木荚红豆 等红豆属树种在细根(0—1 mm 和 1—2 mm)淋溶产生的 DOC 浓度上最高;刨花楠、闽楠和浙江桂等樟科树种在细根(0—1 mm 和 1—2 mm)淋溶产生的 DOC 浓度上最低。(3)红外光谱显示,13 种树种叶片和细根淋溶产生 DOC 的红外光谱特征具有一定 的相似性,都有6个吸收峰和1个透射峰。浙江桂叶片淋溶产生的DOC在各个波段的吸收率上最高,冬青叶片最低;红豆杉细 根(0—1 mm 和 1—2 mm)淋溶产生的 DOC 在各个波段的吸收率上最高,木荚红豆 0—1 mm 细根淋溶产生的 DOC 在各个波段 吸收率上最低,丝栗栲1—2 mm 细根淋溶产生的 DOC 在各个波段吸收率上最低。研究表明在植物生物多样性较高的亚热带常 绿阔叶林,树种和器官类型在调节 DOC 的数量特征和结构特征上起重要作用,相关研究应充分考虑到不同材料之间的差异性。 气候变化下树种分布、降雨强度与频率的改变,将强烈影响森林中可溶性有机碳的数量与组成,从而影响到亚热带森林土壤微 生物活动与养分循环。因此,通过比较不同树种的叶片与细根产生的 DOC 数量与组成结构上的差异,为完善和补充气候变化 下亚热带常绿天然林碳循环研究提供科学依据。

关键词:中亚热带;叶片;细根;可溶性有机碳;傅里叶红外光谱

# Quantitative and structural characteristics of dissolved organic carbon in 13 tree seedling leaves and fine roots in the mid-subtropics

TANG Yuxiang<sup>1,2</sup>, WANG Quancheng<sup>1,2</sup>, CHEN Juan<sup>1,2</sup>, SHI Yinggui<sup>1,2</sup>, XIONG Decheng<sup>1,2</sup>, XU Chao<sup>1,2</sup>, CHEN Shidong<sup>1,2</sup>, YANG Zhijie<sup>1,2,\*</sup>

1 School of Geographical Sciences, Fujian Normal University, Fuzhou 350007, China

2 Research Station of Forest Ecosystem and Global Change, Sanming 365002, China

Abstract: Dissolved organic carbon (DOC) from plant leaves and fine roots is one of the most active compounds in forest ecosystem. In this study, we chose 13 tree seedlings in mid-subtropical evergreen broadleaves forest and measured leaves

基金项目:国家自然科学基金重点项目(31930071);国家 973 计划项目(2014CB954000)

收稿日期:2021-06-30; 网络出版日期:2022-02-11

\* 通讯作者 Corresponding author.E-mail: zhijieyang@fjnu.edu.cn

and fine roots extraction by water to study DOC production and composition. We measured carbon and nitrogen concentration of leaves and fine roots (0-1 mm and 1-2 mm), DOC concentration and composition by using Fourier transform infrared spectroscopy (FTIR) in this study. Our results show that (1) Cinnamonum chekiangense has the highest carbon concentration in leaves and fine roots (0-1 mm and 1-2 mm), Podocarpus nagi has the lowest carbon concentration in leaves and 0-1 mm fine roots, and Tsoongiodendron odorum has the lowest carbon concentration in 1-2 mm fine roots. Ormosia henryi has the highest nitrogen concentration in leaves, while Podocarpus macrophyllus has the lowest nitrogen concentration in leaves. Ormosia xylocarpa has the highest nitrogen concentration in 0-1 mm fine roots, and Tsoongiodendron odorum has the highest nitrogen concentration in 1-2 mm fine roots, while LIlex chinensis has the lowest nitrogen concentration in fine roots (0-1 mm and 1-2 mm). (2) Lauraceae species such as Machilus pauhoi, Phoebe bournei and Cinnamonum chekiangense have the highest DOC concentration from leaves leaching, while Podocarpus macrophyllus and Podocarpus nagi have the lowest DOC concentration from leaves leaching. Ormosia henryi and Ormosia *xylocarpa* have the highest DOC concentration from fine roots (0-1 mm and 1-2 mm) leaching, while *Machilus pauhoi*, Phoebe bournei and Cinnamomum chekiangense have the lowest DOC concentration from fine root (0-1 and 1-2 mm) leaching. (3) The infrared spectra showed that all 13 species in leaves and fine roots (0-1 mm and 1-2 mm) have similar infrared spectra by 6 absorption peaks and 1 transmission peak. The DOC produced by the leaching of Cinnamonum chekiangense leaves has the highest absorption rate in each band, and the LIlex chinensis leaves have the lowest one. The DOC produced by the leaching of Taxus chinensis fine roots (0-1 mm and 1-2 mm) has the highest absorption rate in each band. The DOC produced by the leaching of 0-1 mm fine roots of Ormosia xylocarpa has the lowest absorption rate in each band. The DOC produced by the leaching of 1-2 mm fine roots of Castanopsis fargesii has the lowest absorption rate in each band. Our study indicated that tree species and organ types played the important roles in regulating the quantitative and structural characteristics of DOC, and these differences should be fully taken into account in relevant studies, especially in subtropical evergreen broad-leaved forests with high plant biodiversity. It has been showed climate change would result transfer of tree species, rainfall intensity and frequency, strongly affecting the amount and composition of DOC, soil microbial activities and nutrient cycling in subtropical forests. Therefore, this study will improve our understanding on carbon cycle of subtropical evergreen natural forests in the future climate changes.

Key Words: mid-subtropical forest; leaf; fine root; dissolved organic carbon; Fourier transform infrared spectroscopy

可溶性有机碳(Dissolved organic carbon, DOC)是指能够通过 0.45 μm 滤膜的不同大小和结构的有机碳 组分,能够在各个库之间快速迁移,是森林生态系统中最为活跃的组成部分<sup>[1-2]</sup>。在高温多雨的热带亚热带 地区,丰富的降水通过对植被林冠层和凋落物层的淋溶作用产生大量的 DOC<sup>[3-4]</sup>,是土壤微生物主要的物质 和能量来源<sup>[5-7]</sup>,在湿润热带亚热带生态系统的生物地球化学过程中起着至关重要的作用<sup>[8-9]</sup>。

森林生态系统中,降雨对植物叶片和地表枯落物淋溶、根系及根系分泌物等是 DOC 产生的重要途径<sup>[10-13]</sup>。但是,目前有关 DOC 来源的研究大部分侧重于降雨对凋落物的淋溶作用,包括凋落物淋溶的 DOC 数量和质量特征、凋落物 DOC 输入的动态变化<sup>[8,14-15]</sup>,而有关新鲜叶片和细根等植物活体器官产生的 DOC 的数量和质量特征研究甚少。已有一些研究发现植物新鲜叶片输入的 DOC 含量高于凋落物<sup>[16]</sup>,例如,康根 丽发现芒萁(*Dicranopteris dichotoma*)新鲜叶片淋溶产生的 DOC 浓度高达 20 g/kg,远高于凋落物在淋溶过程 中产生的 DOC<sup>[16]</sup>。并且凋落物产生的 DOC 大部分为化学结构复杂、分解速度缓慢的腐殖质<sup>[8,17]</sup>,而新鲜叶 片淋溶的 DOC 的分子量相比凋落物更小、更容易被土壤微生物分解<sup>[18]</sup>。同时细根与新鲜叶片是生物量和养 分库中重要的动态组成部分,在植物水分与养分的吸收和储存的功能上远大于其他器官,对植物生长尤其重 要<sup>[19-20]</sup>,其产生的较高数量与质量的 DOC,将对森林碳库的运动变化和养分循环产生重要影响作用。

我国亚热带地区拥有世界上最典型并且面积最大的常绿阔叶林,其森林覆盖面积占全国森林总面积的

45.56%,是我国最重要的森林基地之一。该区生物多样性丰富,适合喜温暖湿润的壳斗科、樟科、木兰科等树种为主的常绿阔叶林的生长。不同树种影响 DOC 的数量和质量,如热带豆科植物与非豆科植物的 DOC 特征存在着显著的差异,豆科植物 DOC 的分子量和芳香化程度更高<sup>[21]</sup>,但是有关亚热带不同树种叶片与细根产生的 DOC 的数量与特征了解甚少。

因此,本研究选取福建省建瓯市万木林保护区内两年生树龄的13种典型树种幼苗为研究对象。采用去 离子水浸提法分别提取叶片和细根,比较叶片和细根产生的DOC数量及化学组成的差异,分析亚热带典型树 种鲜叶和细根之间产生DOC的数量差异和联系,为完善和补充亚热带常绿天然林碳循环研究提供科学依据。

#### 1 材料与方法

#### 1.1 样地设置

研究站点位于福建省建瓯市万木林自然保护区(27°02′28″—27°03′32″N,118°08′22″—118°09′23″E),该 区域位于武夷山东南侧,处于福建省建瓯市房道镇境内,最高峰的海拔为556 m,区内相对海拔高差322 m,面 积189 hm<sup>2</sup>。气候属于东亚典型的中亚热带湿润季风气候,全年温暖湿润,年平均温度18.7 ℃,年均降雨量 1670 mm,多年年均蒸发量1466 mm,空气的相对湿度为81%,无霜期长达277 d。地貌类型是我国东南地区 典型的低山丘陵地貌,区内植被为典型的中亚热带常绿阔叶林,土壤是常绿阔叶林发育在花岗岩上的山地红 壤,呈酸性。该保护区经过600多年封禁保护,森林覆盖率高达94.14%,蓄积量42814 m<sup>3</sup>,已经成为我国东南 地区的顶级自然群落<sup>[22]</sup>。诸多植物群落共存于保护区内,温暖湿润的气候特征造成该区以壳斗科、樟科、木 兰科等树种为乔木优势树种。

#### 1.2 样品采集

选择万木林内 13 种典型树种(分别为:杉科(Taxodiaceae)红豆杉(Taxus chinensis)、木兰科(Magnoliaceae)观光木(Tsoongiodendron odorum)、木犀科(Oleaceae)八月桂(Osmanthus fragrans)、豆科(Leguminosae)木荚红豆(Ormosia xylocarpa)、蝶形花科(Papilionaceae)花榈木(Ormosia henryi)、冬青科(Aquifoliaceae)冬青(LIlex chinensis)、壳斗科(Fagaceae)罗浮栲(Castanopsis faberi)、壳斗科(Fagaceae)丝栗栲(Castanopsis fargesii)、罗汉松科(Podocarpaceae)罗汉松(Podocarpus macrophyllus)、罗汉松科(Podocarpaceae)竹柏(Podocarpus nagi)、樟科(Lauraceae)刨花楠(Machilus pauhoi)、樟科(Lauraceae)闽楠(Phoebe bournei)、樟科(Lauraceae)浙江桂(Cinnamomum chekiangense))为研究对象,除了观光木叶片为膜质,八月桂叶片为草质,其余树种叶片均为革质。于 2017年4月在保护区育苗基地中选择生长状况良好、树龄为2年的幼苗进行取样。在供试幼苗的东、南、西、北4个方位和上、中、下3个位置分别采集对生长旺盛的典型枝条进行取样,重复3株。将带有叶片的枝条在现场按照每一种类同一个体所收集的新鲜叶片进行混合,混匀后再利用四分法抽取一定数量的叶片,放进自封袋保存。将一小半叶片样品先于 120℃下杀青2h,并在 80℃的温度下烘干48h以上,直到叶片质量恒定,用球磨仪将烘干鲜叶粉碎,再将粉碎物放于1 mm 筛内过筛,将过筛物质贮存在干燥箱中用于测定碳氮含量,其余叶片样品用于淋溶实验。

根系取样采用全挖法,仔细地将根系周围土屑去除直至可以辨认出根系分枝的结构,然后将其放至冰盒中以保持其活性。回到实验室后,用低温去离子水将细根表面上的杂质和土壤清理干净,对根系进行分级,分出 0—1 mm 细根、1—2 mm 细根两个径级,然后装入带标记的自封袋并放入 0℃储存柜保存。将一小半不同径级的细根在 80℃烘箱里分开烘干 48 h 以上,直到细根质量恒定,将烘干的细根粉碎并用 1 mm 筛进行过筛,然后将过筛的物资贮存在干燥箱中用于测定碳氮含量,其余样品用于淋溶实验。

# 1.3 指标测定

采用去离子水浸提法对各个树种的叶片和细根进行 DOC 提取<sup>[16]</sup>。具体的步骤为:将3部分器官的样品加入常温去离子水(水样比20:1,质量比),进行充分摇匀,浸泡静置24h后,在250次/min的速度下振荡30 min,再将液体离心10 min(4000 r/min),用0.45 μm 滤膜对离心后的溶液过滤(压力为—0.09 MPa),得到的

滤液中含有的有机物<sup>[16]</sup>。采用有机碳分析仪(TOC—VCPH, Shimadzu, Kyoto, Japan)测定滤液中的 DOC 含量,提取 DOC 的当日将以上指标进行测定。称取 8—10 mg 粉碎的样品进行包样,将包好的样品放入样盘待测,采用碳氮元素分析仪(Vario MAX CN, Germany)测定烘干叶片和细根待测样品的 C、N 含量。

傅里叶红外光谱测定:每个树种各取 1 mg 混合冷冻之后的 DOC 干燥样与 400 mg 干燥的 KBr(光谱纯) 磨细混匀,在 10 t/cm<sup>2</sup>的压强下压成薄片并维持 1 min,用 FTIR 光谱仪(Nicolet Magna FTIR 550)分析红外光 谱,波谱扫描范围为 4000—400 cm<sup>-1</sup>,每个样品扫描 64 次并记录其光谱<sup>[23]</sup>,红外吸收峰的主要归属参照 Kaise 等的文献<sup>[24]</sup>。

1.4 统计分析

使用单因素方差分析(ANOVA)和 LSD 的事后检验用于统计分析 13 种树种以及它们植物器官(叶片,细根(0-1 mm)和细根(1-2 mm))的 DOC 浓度的差异。采用 Pearson 相关系数来评价分析不同因子之间的相关关系。采用 SPSS 22.0 软件下进行统计分析,显著性水平为α=0.05。相关图表用 Origin 9.0 软件制作完成。

#### 2 结果

#### 2.1 13 种树种叶片和细根(0-1 mm 和 1-2 mm)的碳氮含量

同一器官不同树种之间的总碳含量存在显著性差异(表1,P<0.05)。其中,浙江桂在叶片和细根(0—1 mm和1—2 mm)的总碳含量上最高,分别为492.70、507.21 g/kg和480.39 g/kg;竹柏在叶片和0—1 mm细根的总碳含量上最低,分别为414.37 g/kg和419.56 g/kg;观光木在1—2 mm细根的总碳含量上最低,其值为430.30 g/kg。并且同一树种不同器官之间的总碳含量也存在显著性差异(表1,P<0.05)。细根(0—1 mm和1—2 mm)总碳含量高于叶片的树种有红豆杉、冬青、罗浮栲和竹柏;叶片总碳含量高于细根(0—1 mm和1—2 mm)的树种有八月桂、花榈木、丝栗栲和闽楠;0—1 mm细根总碳含量高于叶片和1—2 mm细根的树种有观光木、木荚红豆、罗汉松、刨花楠和浙江桂。

Table 1Total carbon (TC)	oncentration in leaves and	fine roots of 13 tree species (Mea	$an \pm SE, n = 3$ )
树种 Tree species	叶片 Leaf	细根(0—1 mm) 0—1 mm fine root	细根(1-2 mm) 1-2 mm fine root
红豆杉 Taxus chinensis	$431.87 \pm 0.50 \mathrm{bG}$	436.07±0.26aF	436.61±0.18aE
观光木 Tsoongiodendron odorum	$433.01 \pm 1.66 \text{bG}$	436.46±0.16aF	$430.30{\pm}0.50\mathrm{bF}$
八月桂 Osmanthus fragrans	$476.60{\pm}0.50{\rm aCD}$	$444.10 \pm 1.28 cEF$	$460.81 \pm 0.51 \mathrm{bC}$
木荚红豆 Ormosia xylocarpa	$475.03{\pm}0.51{\rm bCD}$	486.41±1.20aB	$460.32 \pm 0.74 \text{cC}$
花榈木 Ormosia henryi	482.95±1.01aB	$478.04 \pm 1.57 aBC$	$455.66 \pm 1.29 \text{bC}$
冬青 LIlex chinensis	472.38±3.71aD	$478.53 \pm 0.38 \mathrm{aBC}$	474.31±0.39aB
罗浮栲 Castanopsis faberi	$430.14{\pm}0.18{\rm cG}$	448.96±0.49aE	$437.82{\pm}0.17{\rm bE}$
丝栗栲 Castanopsis fargesii	452.70±1.87aF	451.20±1.25aE	$439.29{\pm}1.25\mathrm{bE}$
罗汉松 Podocarpus macrophyllus	458.47±1.13aE	$464.48 \pm 4.49 aD$	451.86±2.23aD
竹柏 Podocarpus nagi	$414.37 \pm 0.36 \text{bH}$	$419.56{\pm}6.67{\rm bG}$	452.55±0.59aD
刨花楠 Machilus pauhoi	$461.60{\pm}0.92\mathrm{bE}$	470.38±0.16aCD	460.33±0.22bC
闽楠 Phoebe bournei	478.99±0.13aBC	479.04±2.70aBC	472.34±2.26aB
浙江桂 Cinnamomum chekiangense	$492.70 \pm 0.37 \text{bA}$	507.21±0.70aA	480.39±0.51aA

表1 13 树种叶片和细根的总碳含量(平均值±标准误差,n=3)/(g/kg)

不同的大写字母表示同一器官不同树种之间的总碳含量存在显著差异,不同的小写字母表示同一树种不同器官之间的总碳含量存在显著 差异(P<0.05)

不同树种同一器官之间的总氮含量存在显著性差异(表 2, P<0.05)。其中,花榈木和罗汉松分别在叶片的总氮含量上为最高和最低,其值分别为 25.35 g/kg 和 12.18 g/kg;木荚红豆在 0—1 mm 细根的总氮含量上最高,观光木在 1—2 mm 细根的总氮含量上最高,而冬青在细根(0—1 mm 和 1—2 mm)的总氮含量上最低,

两个径级分别为 4.02 g/kg 和 4.00 g/kg。并且同一树种不同器官之间的总氮含量也存在显著性差异(表 2, P<0.05)。叶片总氮含量高于细根(0-1 mm 和 1-2 mm)的树种有红豆杉、观光木、八月桂、花榈木、冬青、罗 浮栲、丝栗栲、罗汉松、竹柏、刨花楠和浙江桂;0—1 mm 细根总氮含量高于叶片和 1—2 mm 细根的树种有木 荚红豆和闽楠。

表 2 13 树种叶片和细根的总氮含量(平均值±标准误差,n=3)/(g/kg) Table 2 Total nitrogen (TN) concentration in leaves and fine roots of 13 tree species (Mean $\pm$ SE, n=3)

树种 Tree species	叶片 Leaf	细根(0—1 mm) 0—1 mm fine root	细根(1—2 mm) 1—2 mm fine root
红豆杉 Taxus chinensis	14.21±0.12aE	9.72±0.16bE	8.94±0.03cE
观光木 Tsoongiodendron odorum	16.47±0.25aC	16.16±0.02aB	$14.19 \pm 0.17 \mathrm{bA}$
八月桂 Osmanthus fragrans	13.03±0.21aF	$11.84 \pm 0.15 \text{bD}$	11.35±0.22bC
木荚红豆 Ormosia xylocarpa	$16.10 \pm 0.09 \mathrm{bCD}$	18.71±0.38aA	7.08±0.08cFG
花榈木 Ormosia henryi	25.35±0.57aA	15.17±0.09bC	$13.07 \pm 0.24$ cB
冬青 LIlex chinensis	16.64±0.29aC	$4.02 \pm 0.09 \mathrm{bH}$	$4.00\pm0.10$ bI
罗浮栲 Castanopsis faberi	16.79±0.03aC	8.42±0.12cF	9.22±0.08bE
丝栗栲 Castanopsis fargesii	18.59±0.13aB	15.48±0.36bBC	$10.39 \pm 0.15 \mathrm{cD}$
罗汉松 Podocarpus macrophyllus	12.18±0.08aG	$10.98 \pm 0.14 \mathrm{bD}$	$7.05 \pm 0.10 \mathrm{cFG}$
竹柏 Podocarpus nagi	12.75±0.26aFG	8.29±0.22bF	6.49±0.21cG
刨花楠 Machilus pauhoi	$15.58 \pm 0.03 aD$	14.66±0.09bC	12.39±0.21cB
闽楠 Phoebe bournei	$13.33 \pm 0.07 \mathrm{bF}$	14.71±0.68aC	$7.44 \pm 0.49 \mathrm{cF}$
浙江桂 Cinnamomum chekiangense	13.51±0.09aEF	$6.40 \pm 0.03 \mathrm{bG}$	$4.87 \pm 0.05 \mathrm{cH}$

2.2 13 种树种叶片和细根(0-1 mm 和 1-2 mm)淋溶产生的 DOC 浓度

同一器官不同树种淋溶产生的 DOC 浓度存在显著性差异(表 3, P<0.05)。其中,刨花楠、闽楠和浙江桂 等樟科树种在叶片淋溶产生的 DOC 浓度上最高,分别为 10.37、15.28、12.76 g/kg;罗汉松和竹柏等罗汉松科 树种在叶片淋溶产生的 DOC 浓度上最低,分别为 0.87、0.54 g/kg;花榈木和木荚红豆等红豆属树种在细根 (0-1 mm 和 1-2 mm) 淋溶产生的 DOC 浓度上最高,在 0-1 mm 和 1-2 mm 两个径级分别为 22.21、17.81 g/kg(花榈木)和19.22、22.04 g/kg(木荚红豆);另外,八月桂在1-2 mm 细根淋溶产生的 DOC 浓度上也较 高,其值为21.41g/kg;而刨花楠、闽楠和浙江桂等樟科树种在细根(0-1mm和1-2mm)淋溶产生的DOC

表 3	13 树种叶片和细根的可溶性有机碳浓度(平均值±标准误差,n=3)/	′( mg/ kg
表う	13 树种叶斤和细根的可溶性有机咴浓度(平均值±标准误差,n=3)/	′(mg∕kg

ble 3	Dissolved organic carbon	(DOC)	concentration in leaves and fine roots of 13 tree species	Mean±SE,	n=3	)
-------	--------------------------	-------	---	----------	-----	---

Table 3 Dissolved organic carbon	(DOC) concentration in leave	ves and fine roots of 13 tree speci	ies (Mean $\pm$ SE, $n=3$ )
树种	叶片	细根(0-1 mm)	细根(1-2 mm)
Tree species	Leaf	0-1 mm fine root	1-2 mm fine root
红豆杉 Taxus chinensis	2.06±0.36cFG	12.91±1.45aB	6.86±0.63bCD
观光木 Tsoongiodendron odorum	$2.23 \pm 0.28 \text{bFG}$	8.28±0.22aCDE	6.82±1.07aCD
八月桂 Osmanthus fragrans	$5.82 \pm 1.10 \text{bDE}$	$5.06 \pm 1.65 \text{bEFG}$	21.41±1.48aA
木荚红豆 Ormosia xylocarpa	$4.08 \pm 0.21 \text{bEF}$	19.22±1.34aA	22.05±3.04aA
花榈木 Ormosia henryi	2.11±0.30cFG	22.22±1.51aA	$17.81 \pm 0.13 \text{bA}$
冬青 LIlex chinensis	$3.49 \pm 0.70 \text{bEFG}$	10.46±0.81aBCD	$8.45 \pm 0.80 \mathrm{aBCD}$
罗浮栲 Castanopsis faberi	$3.33 \pm 0.05 \text{bEFG}$	$3.93 \pm 0.08 \mathrm{bFG}$	$6.08 \pm 0.66 \mathrm{aCD}$
丝栗栲 Castanopsis fargesii	$8.06 \pm 1.37 aCD$	11.04±1.41aBC	11.61±0.92aB
罗汉松 Podocarpus macrophyllus	$0.87 \pm 0.12 \mathrm{bG}$	7.14±0.20aDEF	9.77±1.37aBC
竹柏 Podocarpus nagi	$0.55 \pm 0.13 \mathrm{cG}$	10.93±0.32aBC	$8.20\pm0.39$ bBCD
刨花楠 Machilus pauhoi	$10.38 \pm 0.74 aBC$	$3.53 \pm 0.56 \mathrm{bG}$	7.75±1.17aBCD
闽楠 Phoebe bournei	15.28±1.23aA	4.41±0.13bFG	$4.91\pm0.44\mathrm{bD}$
浙江桂 Cinnamomum chekiangense	12.76±2.02aAB	2.56±0.15cG	$4.87 \pm 0.31 \mathrm{bD}$

4887

浓度上最低,在 0—1 mm 和 1—2 mm 两个径级的浓度分别为 3.52、7.74 g/kg(刨花楠)和 4.41、4.91 g/kg(闽 楠)和 2.56、4.87 g/kg(浙江桂)。同一树种不同器官之间淋溶产生的 DOC 浓度也存在显著性差异(表 3, P< 0.05)。除了刨花楠、闽楠和浙江桂等樟科树种以外,其余的树种细根(0—1 mm 和 1—2 mm)淋溶产生的 DOC 浓度均大于叶片。相关分析显示,而叶片与细根(0—1 mm 和 1—2 mm)之间,淋溶产生的 DOC 浓度无 显著相关关系(图 1, P> 0.05)。



图 1 叶片与细根之间可溶性有机碳浓度相关分析 Fig.1 Correlation analysis of dissolved organic carbon (DOC) concentration between leaves and fine roots

2.3 13 种树种叶片和细根(0-1 mm 和 1-2 mm)淋溶产生 DOC 的红外光谱特征

傅里叶红外光谱通过有机物在不同波数的透射率(或者是吸收率)大小来反映有机物的不同官能团特 征<sup>[23-24]</sup>。本研究 13 种树种叶片和细根淋溶产生 DOC 的红外光谱特征具有一定的相似性(图 2),都有 6 个 吸收峰(对应图中透射率极小值位置),有1个透射峰(对应图中透射率极大值的位置),分别在(3400±50)、 (2950±50)、(2000±150)、(1650±50)、(1400±50)、(1050±50)、(600±50) cm<sup>-1</sup>波数的位置。13 种树种叶片 和细根淋溶产生 DOC 在(3400±50)、(1650±50)、(1050±50) cm<sup>-1</sup>波数的位置为较强的吸收峰,其中在 (3400±50) cm<sup>-1</sup>波数的位置峰较宽,而在(1650±50)、(1050±50) cm<sup>-1</sup>波数的位置峰较窄,表明这些 DOC 中 羧酸、醇类、苯酚、芳香族、糖类等有机物的含量较多。在(2950±50)、(1400±50)、(600±50) cm<sup>-1</sup>波数的位置 为较弱的吸收峰,表明这些 DOC 中脂肪族、饱和的 C-H 结构、羧酸化合物中 O-H 结构和苯环 C-H 结构的 含量较少。在(2000±150) cm<sup>-1</sup>波数有1个较强的透射峰,表明这些 DOC 中缺少 C = C 结构和取代苯类物 质。但是同一器官淋溶产生的 DOC 在不同树种之间的红外光谱吸收率存在显著差异(P< 0.05)。浙江桂叶 片淋溶的 DOC 在各个波段的吸收率最高,冬青叶片最低;红豆杉细根(0-1 mm 和1-2 mm)淋溶产生的 DOC 在各个波段吸收率最高,木荚红豆0—1 mm 细根最低,丝栗栲1—2 mm 细根最低。同一树种不同器官之间淋 溶产生的 DOC 的红外光谱也存在显著差异(P< 0.05)。细根(0-1 mm 和 1-2 mm)淋溶产生的 DOC 吸收率 高于叶片的树种有红豆杉、观光木、冬青、罗浮栲、丝栗栲、罗汉松和刨花楠;叶片淋溶产生的 DOC 吸收率高于 细根(0—1 mm 和 1—2 mm)的有浙江桂;0—1 mm 细根淋溶产生的 DOC 吸收率高于叶片和 1—2 mm 细根的 树种有八月桂、竹柏和闽楠;1-2 mm 细根淋溶产生的 DOC 吸收率高于叶片和 0-1 mm 细根的树种有木荚红 豆和花榈木。



图 2 13 树种叶片和细根的红外光谱特征



### 3 讨论

# 3.1 13 种树种叶片和细根淋溶产生 DOC 的数量特征

树种差异是影响 DOC 数量的重要因素<sup>[3,25]</sup>,这与 Michalzik 等温带森林的研究结果相一致<sup>[26]</sup>。本研究中,刨花楠、闽楠和浙江桂等樟科树种在叶片淋溶的 DOC 浓度上最高,而罗汉松和竹柏等罗汉松科树种在叶 片淋溶产生的 DOC 浓度上最低,这可能与二者之间叶片的不同结构组成和物质含量有关,同时相关分析结果 显示叶片淋溶产生的 DOC 浓度与总碳含量呈显著正相关(P<0.05)。刨花楠、闽楠和浙江桂等樟科树种在叶 片总碳含量上较高,可以为 DOC 的淋溶产生提供基础物质,此外,樟科树种叶片的气孔导度良好,能够通过气 孔会发出一些芳香性有机化合物,在淋溶实验中可能产生更多数量的 DOC<sup>[27]</sup>。而罗汉松和竹柏等罗汉松科 树种叶片不仅碳、氮含量低,且叶片的气孔导度差,因此不利于 DOC 的淋溶产生。康根丽等对比马尾松 (*Pinus massoniana*)和芒萁(*Dicranopteris dichotoma*)新鲜叶片淋溶实验发现芒萁叶片淋溶产生的 DOC 浓度显 著高于马尾松,叶片的结构特征差异是影响其淋溶产生 DOC 浓度的重要因素<sup>[16]</sup>。另外,樟科树种生长较快, 属于竞争型树种,能够快速吸收养分维持自身生长,因此在生长过程中将大量养分以淋溶作用归还至土壤中, 从而增加 DOC 的产生,而罗汉松科植物生长缓慢,属于忍耐型树种,其主要的养分用于自身的生长和器官的 构建,因此淋溶产生的 DOC 浓度较少。

在本研究中,除了刨花楠、闽楠和浙江桂等樟科树种细根(0—1 mm 和 1—2 mm)淋溶产生的 DOC 浓度低 于叶片以外,其余树种细根(0—1 mm 和 1—2 mm)淋溶产生的 DOC 浓度均高于叶片,同时相关分析显示叶片 淋溶产生的 DOC 浓度与细根(0—1 mm 和 1—2 mm)之间相关性较弱(图 1,*P*>0.05),表明植物不同器官会影 响其 DOC 浓度,并且地上器官与地下器官在养分释放的联系上不紧密,这可能与两种器官自身的结构组成和 执行功能的差异有关,细根是植物主要吸收养分的器官,大量的光合产物通过根系分泌物向土壤输入大量的 碳水化合物,从而增加 DOC 的浓度<sup>[20]</sup>;而叶片是植物重要储存养分的器官,也是植物光合作用的场所,叶片 通过光合作用形成碳水化合物更多用于储存和转化<sup>[28]</sup>,因此大多数树种淋溶的 DOC 的浓度会低于细根。而 刨花楠、闽楠和浙江桂等樟科树种细根(0—1 mm 和 1—2 mm)的总碳浓度较高,但是淋溶产生的 DOC 浓度最 低,也低于其叶片淋溶产生的 DOC 浓度,其原因可能是樟科树种根系结构较为坚硬,质地较为致密<sup>[29]</sup>,含有 的 C 组分大部分为结构性的难溶解高分子化合物,孔隙较少,不利于 DOC 的淋溶释放,因此细根淋溶产生的 DOC 浓度最低。

3.2 13 种树种叶片和细根淋溶产生 DOC 的结构特征

通常而言,DOC 是一系列复杂的有机分子混合体,除了含有分子量较低的有机酸、糖类和氨基酸等分子量较低的有机物,还包括脂肪类、芳香类等分子量较高的有机结构<sup>[30]</sup>。DOC 除了在分子量上的差别以外,在不同的树种和器官下淋溶产生的 DOC 组成结构和可降解性也有所不同<sup>[31-32]</sup>,但是不同的树种和器官之间 DOC 含有的基本信息仍然具有一定的相似性<sup>[24, 33-34]</sup>,这与本研究发现 13 种树种叶片和细根(0—1 mm 和 1—2 mm)红外光谱表现具有 6 个明显吸收峰的结果一致(图 2)。

傅里叶红外光谱的结果发现浙江桂叶片淋溶产生的 DOC 吸收率在各个波段是 13 种树种里面最高,在 (3400±50)、(2950±50)、(1650±50)、(1400±50)、(1050±50)、(600±50) cm<sup>-1</sup>波数的位置的吸收率能分别高 至91%、81%、90%、83%、94%、和83%,说明叶片含有较为丰富的芳香类、脂肪类、酚类等具有大分子量官能 团的疏水性有机质,同时羧酸,醇类物质含量也较高,这可能是因为浙江桂叶片的碳含量和淋溶产生的 DOC 浓度最高以及樟科树种易挥发出的高芳香性大分子物质的特征有关,这些较难降解的 DOC 更容易被吸附到 土壤中达到稳定和缓慢降解<sup>[35-37]</sup>,从而促进土壤有机碳的积累<sup>[38]</sup>。而冬青叶片淋溶产生的 DOC 的吸收率 在各个波段最低,表明叶片含有糖类、氨基酸等小分子物质相对较多,分子结构相对简单,其原因可能是淋溶 产生的 DOC 浓度较低,而高分子量的 DOC 不容易淋溶释放。此外,罗汉松和竹柏等罗汉松科叶片淋溶产生 的 DOC 的吸收率在各个波段也较低,表明其 DOC 主要是一些结构简单小分子有机物组成,原因可能是罗汉 松科树种的养分吸收能力较弱,叶片的碳氮含量及其淋溶的 DOC 浓度几乎最低,叶片储存的养分更多为一些 小分子有机物。红豆杉细根(0-1 mm 和 1-2 mm)淋溶产生的 DOC 在各个波段吸收率最高,其 DOC 浓度也 较高, 而丝栗栲 1—2 mm 细根淋溶产生的 DOC 在各个波段的吸收率最低, 其 DOC 浓度也较低, 这些结果说明 高分子量的有机化合物是 DOC 主体,贡献了 DOC 浓度的大部分。但是,木荚红豆 0-1 mm 细根淋溶产生的 DOC 在各个波段吸收率最低,但其总碳、总氮以及淋溶产生的 DOC 浓度却高于大部分树种,其原因可能跟木 荚红豆根系的根瘤菌固氮形成大量的氨基酸有关<sup>[39]</sup>,而氨基酸的分子结构相对简单,因此可能在淋溶过程中 较多的氨基酸等小分子释放,因此在红外光谱中更容易透射。

#### 4 结论

本研究通过对中亚热带 13 种典型树种叶片和细根(0—1 mm 和 1—2 mm)的淋溶产生的 DOC 数量特征 和结构特征差异分析。叶片淋溶产生的 DOC 浓度与其碳含量呈正相关,叶片的结构特征(例如气孔导度和叶 片材质)可能是影响 DOC 浓度的重要性质。大部分细根淋溶产生的 DOC 浓度高于叶片,但是叶片和细根在 DOC 淋溶的数量特征无明显的联系,这可能是地上器官与地下器官各自执行的不同功能有关。DOC 的结构 特征也会受到树种的差异而改变,这与树种之间吸收养分的能力和特有结构密切相关。因此,未来研究中应 关注树种差异以及植物不同部位产生的 DOC 对亚热带森林土壤生物地球化学循环的影响。

#### 参考文献(References):

- [1] McDowell W H. Dissolved organic matter in soils-future directions and unanswered questions. Geoderma, 2003, 113(3/4): 179-186.
- [2] Lu S B, Chen C R, Zhou X Q, Xu Z H, Bacon G, Rui Y C, Guo X M. Responses of soil dissolved organic matter to long-term plantations of three coniferous tree species. Geoderma, 2012, 170: 136-143.
- [3] 万菁娟,郭剑芬,纪淑蓉,任卫岭,司友涛,杨玉盛.不同来源可溶性有机物对亚热带森林土壤 CO<sub>2</sub>排放的影响. 植物生态学报, 2015, 39(7): 674-681.
- [4] Wang M, Tian Q X, Liao C, Zhao R D, Wang D Y, Wu Y, Li Q X, Wang X G, Liu F. The fate of litter-derived dissolved organic carbon in forest soils: results from an incubation experiment. Biogeochemistry, 2019, 144(2): 133-147.
- [5] Kaiser K, Kalbitz K. Cycling downwards-dissolved organic matter in soils. Soil Biology and Biochemistry, 2012, 52: 29-32.
- [6] 熊丽,杨玉盛,朱锦懋,司友涛,万菁娟,谢锦升.可溶性有机碳在米槠天然林不同土层中的迁移特征.生态学报,2015,35(17): 5711-5720.
- [7] Zhou W J, Lu H Z, Zhang Y P, Sha L Q, Schaefer D A, Song Q H, Deng Y, Deng X B. Hydrologically transported dissolved organic carbon influences soil respiration in a tropical rainforest. Biogeosciences, 2016, 13(19): 5487-5497.
- [8] Zhou W J, Sha L Q, Schaefer D A, Zhang Y P, Song Q H, Tan Z H, Deng Y, Deng X B, Guan H L. Direct effects of litter decomposition on soil dissolved organic carbon and nitrogen in a tropical rainforest. Soil Biology and Biochemistry, 2015, 81: 255-258.
- [9] Wang M, Liao C, Tian Q X, Wang D Y, Wu Y, Tang Y N, Liu F. Dissolved organic matter characteristics and important site factors in a subtropical mountain forest in central China. Forest Science, 2020, 66(1): 49-57.
- [10] Kalbitz K, Meyer A, Yang R, Gerstberger P. Response of dissolved organic matter in the forest floor to long-term manipulation of litter and throughfall inputs. Biogeochemistry, 2007, 86(3): 301-318.
- [11] Le Mellec A, Meesenburg H, Michalzik B. The importance of canopy-derived dissolved and particulate organic matter (DOM and POM) comparing throughfall solution from broadleaved and coniferous forests. Annals of Forest Science, 2010, 67(4): 411-.
- [12] Uselman S M, Qualls R G, Lilienfein J. Quality of soluble organic C, N, and P produced by different types and species of litter: root litter versus leaf litter. Soil Biology and Biochemistry, 2012, 54: 57-67.
- [13] 蔡丹,杨秀虹, 雷秋霜, 方志文, 王诗忠, 仇荣亮, 杨燕花. 华南典型树种凋落叶的野外分解和溶解性有机质溶出动态. 应用生态学报, 2016, 27(9): 2823-2830.
- [14] Scheibe A, Gleixner G. Influence of litter diversity on dissolved organic matter release and soil carbon formation in a mixed beech forest. PLoS One, 2014, 9(12): e114040.
- [15] 万菁娟,郭剑芬,刘小飞,纪淑蓉,任卫岭,吴君君,杨玉盛. 杉木和米槠凋落叶 DOM 对土壤碳矿化的影响. 生态学报, 2015, 35(24): 8148-8154.
- [16] 康根丽,杨玉盛,司友涛,刘翥,杨智杰.马尾松与芒萁鲜叶及凋落物水溶性有机物的溶解特征和光谱学特征.热带亚热带植物学报, 2014,22(4):357-366.
- [17] Klotzbücher T, Kaiser K, Stepper C, van Loon E, Gerstberger P, Kalbitz K. Long-term litter input manipulation effects on production and properties of dissolved organic matter in the forest floor of a Norway spruce stand. Plant and Soil, 2012, 355(1/2): 407-416.
- [18] 康根丽,杨玉盛,司友涛,尹云锋,刘翥,陈光水,杨智杰.米槠人促更新林与杉木人工林叶片及凋落物溶解性有机物的数量和光谱学特征.生态学报,2014,34(8):1946-1955.
- [19] 黄锦学, 凌华, 杨智杰, 卢正立, 熊德成, 陈光水, 杨玉盛, 谢锦升. 中亚热带细柄阿丁枫和米槠群落细根的生产和死亡动态. 生态学报, 2012, 32(14): 4472-4480.
- [20] 熊德成,黄锦学,杨智杰,卢正立,陈光水,杨玉盛,谢锦升.亚热带六种天然林树种细根养分异质性.生态学报,2012,32(14):

4343-4351.

- [21] Ye Q H, Wang Y H, Zhang Z T, Huang W L, Li L P, Li J T, Liu J S, Zheng Y, Mo J M, Zhang W, Wang J J. Dissolved organic matter characteristics in soils of tropical legume and non-legume tree plantations. Soil Biology and Biochemistry, 2020, 148: 107880.
- [22] 林恬,郑怀舟,王健,黄志鸿,朱锦懋. 福建万木林自然保护区 12 种优势植物叶碳、氮含量及其与热值的关系. 福建师范大学学报:自然 科学版, 2018, 34(5): 56-66.
- [23] 纪宇皝, 张秋芳, 周嘉聪, 游章湉, 徐鹏程, 林伟盛, 陈岳民, 杨玉盛. 亚热带地区竞争型和忍耐型树种叶片可溶性有机质数量及光谱学特征. 生态学报, 2018, 38(11): 3998-4007.
- [24] Kaiser K, Zech W. Natural organic matter sorption on different mineral surfaces studied by DRIFT spectroscopy. Sciences of Soils, 1997, 2: 71-74.
- [25] Smolander A, Kitunen V. Comparison of tree species effects on microbial C and N transformations and dissolved organic matter properties in the organic layer of boreal forests. Applied Soil Ecology, 2011, 49: 224-233.
- [26] Michalzik B, Kalbitz K, Park J H, Solinger S, Matzner E. Fluxes and concentrations of dissolved organic carbon and nitrogen a synthesis for temperate forests. Biogeochemistry, 2001, 52(2): 173-205.
- [27] 周琦, 王金凤, 徐永勤, 夏淑芳, 沈凤强, 徐卢雨, 陈卓梅. 樟树叶片挥发性有机物释放季节动态和日动态变化规律. 广西植物, 2020, 40(7): 1021-1032.
- [28] 孙梅,田昆,张贇,王行,管东旭,岳海涛.植物叶片功能性状及其环境适应研究.植物科学学报,2017,35(6):940-949.
- [29] 卓鸣秀. 亚热带常绿阔叶林 8 种樟科树种细根化学计量特征. 亚热带资源与环境学报, 2019, 14(1): 17-22.
- [30] Kalbitz K, Solinger S, Park J H, Michalzik B, Matzner E. Controls on the dynamics of dissolved organic matter in soils: a review. Soil Science, 2000, 165(4): 277-304.
- [31] Kiikkilä O, Kitunen V, Smolander A. Dissolved soil organic matter from surface organic horizons under birch and conifers: Degradation in relation to chemical characteristics. Soil Biology and Biochemistry, 2006, 38(4): 737-746.
- [32] Xu J W, Ding Y D, Li S L, Mao R. Amount and biodegradation of dissolved organic matter leached from tree branches and roots in subtropical plantations of China. Forest Ecology and Management, 2021, 484: 118944.
- [33] Yano Y, Lajtha K, Sollins P, Caldwell B A. Chemical and seasonal controls on the dynamics of dissolved organic matter in a coniferous old-growth stand in the pacific northwest, USA. Biogeochemistry, 2004, 71(2): 197-223.
- [34] Traversa A, D'Orazio V, Senesi N. Properties of dissolved organic matter in forest soils: Influence of different plant covering. Forest Ecology and Management, 2008, 256(12): 2018-2028.
- [35] Kalbitz K, Schwesig D, Rethemeyer J, Matzner E. Stabilization of dissolved organic matter by sorption to the mineral soil. Soil Biology and Biochemistry, 2005, 37(7): 1319-1331.
- [36] Hunt J F, Ohno T, Fernandez I J. Influence of foliar phosphorus and nitrogen contents on chemical properties of water extractable organic matter derived from fresh and decomposed sugar maple leaves. Soil Biology and Biochemistry, 2008, 40(7): 1931-1939.
- [37] Wagai R, Mayer L M. Sorptive stabilization of organic matter in soils by hydrous iron oxides. Geochimica et Cosmochimica Acta, 2007, 71(1): 25-35.
- [38] Kalbitz K, Kaiser K. Contribution of dissolved organic matter to carbon storage in forest mineral soils. Journal of Plant Nutrition and Soil Science, 2008, 171(1): 52-60.
- [39] 焦健,田长富.根瘤菌共生固氮能力的进化模式.微生物学通报,2019,46(2):388-397.