

DOI: 10.13758/j.cnki.tr.2020.03.014

丁咸庆, 柏菁, 项文化, 等. 不同浸提剂处理森林土壤溶解性有机碳含量比较. 土壤, 2020, 52(3): 518–524.

不同浸提剂处理森林土壤溶解性有机碳含量比较^①

丁咸庆¹, 柏菁², 项文化¹, 侯红波², 彭佩钦^{2*}

(1 中南林业科技大学生命科学与技术学院, 长沙 410004; 2 中南林业科技大学环境科学与工程学院, 长沙 410004)

摘要: 为了解亚热带森林土壤溶解性有机碳(DOC)的特征规律, 采用培养离心的方法获取土壤溶液测得 DOC 含量, 对比传统水溶性有机碳 (WSOC) 提取法间的差异。选取湖南大山冲森林公园保存完好的 3 种亚热带典型次生林地, 按 10 cm 一层采集剖面土壤, 采用不同方法提取测定土壤 DOC 和 WSOC 含量, 分析与土壤理化指标的相关性及方法间的显著性关系。结果表明: ①典型森林土壤 DOC 或 WSOC 含量随土壤剖面深度的增加, 呈显著下降趋势。培养离心提取测得的土壤 DOC 含量明显较低, 仅 0.82 ~ 9.52 mg/kg, 超纯水浸提的风干土 WSOC 含量达 10.56 ~ 249.19 mg/kg, 而 0.5 mol/L K₂SO₄ 提取的鲜土 WSOC 含量达 155.70 ~ 576.94 mg/kg, 0.5 mol/L K₂SO₄ 浸提的干土 WSOC 含量最高, 达 158.94 ~ 797.56 mg/kg, 含量表现为: DOC < 干土超纯水浸提 WSOC < 鲜土 K₂SO₄ 浸提 WSOC < 干土 K₂SO₄ 浸提 WSOC; ②3 种次生林土壤 DOC 或 WSOC 含量存在显著差异, 不同方法测定的含量均表现为针叶林 < 常绿阔叶林 < 落叶林; ③培养离心法测得土壤 DOC 含量与其他测定方法间存在极显著正相关 ($P < 0.01$), 并且土壤 DOC 和 WSOC 均与土壤 pH、总有机碳、胡敏酸、富啡酸、全氮、全磷、速效态氮以及微生物生物量碳氮达到极显著相关 ($P < 0.01$), 与土壤含水率和容重显著相关 ($P < 0.05$)。培养离心法测得土壤 DOC 含量远低于水溶液提取 WSOC 含量, 该方法下的测得值更接近于原位土壤溶解性有机碳实际值。

关键词: 溶解性有机碳; 水溶性有机碳; 森林类型; 培养离心; 测定方法

中图分类号: S714; S153.6 **文献标志码:** A

Comparison of Dissolved Organic Carbon Contents in Forest Soils Extracted by Different Agents

DING Xianqing¹, BAI Jin², XIANG Wenhua¹, HOU Hongbo², PENG Peiqin^{2*}

(1 Faculty of Life Science and Technology, Central South University of Forestry and Technology, Changsha 410004, China; 2 Faculty of Environmental Science and Engineering, Central South University of Forestry and Technology, Changsha 410004, China)

Abstract: 0–10 cm soil samples were collected under three secondary forests in Dashanchong Forest Park in Hunan, the contents of dissolved organic carbon (DOC) and water-soluble organic carbon (WSOC) were measured with different extraction agents. The results showed that: 1) DOC and WSOC contents were decreased significantly with the increase of soil depth. DOC content measured by cultivation-centrifugation method was the lowest (only 0.82 – 9.52 mg/kg), followed by WSOC content extracted by ultra-pure water in air-dried soils (10.56 – 249.19 mg/kg), WSOC contents extracted by K₂SO₄ in fresh and air-dried soils were the highest (155.70 – 576.94 mg/kg and 158.94 – 797.56 mg/kg, respectively). The average content was in the order of DOC < WSOC extracted by ultra-pure water in air-dried soils < WSOC extracted by K₂SO₄ in fresh soils < WSOC extracted by K₂SO₄ in air-dried soils. 2) Significant differences were found in soil DOC or WSOC contents under three forests, and both DOC and WSOC contents determined by different methods were in the order of coniferous forests < evergreen broad-leaved forests < deciduous forest. 3) Extremely significant positive correlation was found between DOC contents measured by the cultivation-centrifugation method and other methods ($P < 0.01$). DOC or WSOC contents were extremely significantly correlated with soil organic carbon, humic acid, fulvic acid, total nitrogen, total phosphorus, available N, microbial biomass carbon, microbial biomass nitrogen and pH ($P < 0.01$), and significantly correlated with soil bulk density and soil water content ($P < 0.05$). DOC content measured by the cultivation-centrifugation method was far lower than WSOC content extracted by salt solution,

①基金项目: 国家自然科学基金项目(31470629)资助。

* 通讯作者(pqpeng123@sina.com)

作者简介: 丁咸庆(1990—), 男, 安徽当涂人, 博士研究生, 研究方向为森林生态学。E-mail: dringxianqing@163.com

however, it was closer to the actual value of in-situ measured soil dissolved organic carbon.

Key words: Dissolved organic carbon (DOC); Water-soluble organic carbon (WSOC); Forest type; Cultivation centrifugation; Determination method

溶解于自然水体或土壤溶液中的有机碳组分,称之为溶解性有机碳 DOC (dissolved organic carbon)。土壤中可被纯水或盐溶液浸提出的有机碳组分,称之为水溶性有机碳 WSOC (water-soluble organic carbon)。为尽可能反映土壤 DOC 的规律特征,大多数研究采用 WSOC 替代 DOC 来进行测定、分析和研究^[1-3]。DOC 虽仅占土壤有机碳库的一小部分,但却是最活跃的组分之一^[4-6]。作为土壤养分(C、N、P、S)移动的载体因子^[7-9],它是土壤有机碳损失的重要途径,对分析土壤养分迁移转化、土壤有机质的生态化学过程具有实际意义^[10-12]。DOC 同时还能够吸附土壤中的重金属以及其他一些有害物质^[13-15],对土壤污染的解毒治理发挥着重要作用,因而已成为土壤学、环境化学和地球化学等诸多学科的研究热点^[16]。

土壤 DOC 主要来源于植物凋落物、植物根系分泌物、微生物及土壤腐殖质等^[17]。在土壤环境中,DOC 既是土壤生物化学过程的产物,又是土壤微生物生长、分解有机碳的重要能源,进而影响营养物质的供给和有效性^[18]。在森林生态系统中,土壤 DOC 的化学特性往往随植物物种组成的不同而异^[19-21]。由于森林土壤常年水分含量很低,在野外自然条件下无法直接获得土壤溶液,而浸提法 WSOC 测定值往往与自然状态下原位土壤的 DOC 含量相距甚远。为使不同森林类型不同土壤水分条件下的土壤溶液 DOC 的研究结果具有一定的可比性,本研究基于“饱和田间持水量-恒温培养-高速离心”的土壤溶液提取装置和测定方法进行 DOC 分析^[22]。

亚热带森林地区占我国面积 25% 以上,了解该地区土壤 DOC 含量特征及动态转化,可为土壤养分的循环及流失特供理论支持,防止森林土壤有机碳库损失、土壤肥力退化以及土地大面积流失等严重危害具有重要意义。为此,本研究选择亚热带典型森林土壤,测定分析剖面土壤 DOC 含量及其分布特征,探讨其受植被组成和土壤理化性质共同影响下的垂直分布规律,以期为进一步揭示森林生态系统中土壤碳成分组成及碳循环过程提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

研究地位于湖南省长沙县路口镇大山冲森林公园 (113°17' ~ 113°19'E, 28°23' ~ 28°24'N), 海拔高度 55 ~ 350 m, 属于典型亚热带大陆型季风湿润气候, 年均温度 16.7 ~ 17.6 °C, 极端高温 40 °C, 极端低温 -11 °C, 雨量充沛, 相对湿度较大, 年降雨量在 1 412 ~ 1 559 mm。土壤是由板岩和页岩发育而成的红壤。园区现存植被包括多种次生林类型, 其中包括马尾松针叶林、石栎-青冈常绿阔叶林和南酸枣落叶阔叶林等 3 种典型亚热带次生林类型。

1.2 样地选择和样品采集

2015 年 1 月, 通过了解园区森林群落类型, 调查样地植被分布和土壤状况, 选取 3 种典型次生林地。通过挖取土壤剖面, 采集剖面土壤样品, 采样深度为 0 ~ 100 cm。样地信息见表 1。

表 1 采样地信息

Table 1 Site information of tested forest soil profiles

剖面编号	森林类型	土壤质地	海拔(m)	坡度和方向	GPS 位置
DSC001	针叶林	壤土	220 ~ 262	15° SW	28°24'45.89" N, 113°17'54.46" E
DSC002	常绿阔叶林	黏壤土	225 ~ 254	22° NW	28°24'45.89" N, 113°17'54.48" E
DSC003	落叶林	黏壤土	245 ~ 321	35° W	28°24'7.30" N, 113°18'46.11" E

采样时, 先去除地面凋落物, 按 10 cm 一层从下往上取 10 层, 每层各取 3 个环刀样和一个新鲜混合土样 1 kg。充分混匀后, 取其中一部分鲜土样立即储存于自封袋中, 置于 4 °C 保存; 剩余土样自然风干 1 ~ 2 周后, 木棒碾碎, 剔除可见石子和根系, 分别过 20 目和 100 目的尼龙筛后保存。由于剖面 DSC001

土壤厚度较低, 底层多石砾, 只取到 40 cm。剖面土壤基本理化性质见表 2。

1.3 土壤溶液 DOC 的获取方法

采用培养离心的方法来获得土壤溶液, 具体操作为: 土壤样品带回后, 立即开展土壤田间持水量值的测定。根据田间持水量值, 计算 300.0 g 混合水土样

品所需鲜土和需补充的超纯水质量。准确称取鲜土样品,置于 250 ml 烧杯或乐扣盒中,均匀添加所需超

纯水量,随后保鲜膜封口或封盖,并置于 25 °C 恒温恒湿培养箱中,避光培养 24 h。

表 2 剖面土壤基本理化性质
Table 2 Physiochemical properties of tested forest soils

剖面	土壤层次(cm)	pH(1:2.5)	黏粒 (<2 μm)(g/kg)	砂粒(>50 μm)(g/kg)	容重(g/cm)	孔隙度(%)	有机碳(g/kg)	全氮(g/kg)
DSC001	0~40	4.49	261.0	358.1	1.33	25.08	16.41	1.85
DSC002	0~40	4.21	281.1	221.9	1.20	18.33	24.97	2.52
	40~100	4.78	251.6	294.0	1.37	17.55	18.13	1.43
DSC003	0~45	4.28	355.5	205.3	1.08	14.02	31.05	2.60
	45~100	4.73	347.5	257.0	1.28	12.52	16.31	1.59

注:表中数值是按土壤层次取的平均值。

将培养后的土壤样品,全部转移装入 200 目的腈纶布袋中,并放入聚丙烯离心瓶,于超高速冷冻离心机(TG21KR,长沙东旺)4 °C,8 000 r/min 冷冻离心约 0.5 h。随后,拧开离心瓶底部的溶液收集盒,称取溶液质量(约 50.0 g),并将土壤溶液通过 0.45 μm 滤膜转入聚乙烯小瓶贮于 -20 °C 冰箱中保存待测。

1.4 分析测定方法

土壤容重、毛管孔隙度采用环刀法测定;pH 采用超纯水浸提,土水比 1:2.5,酸度计(pHS-3C,上海雷磁)测定;土壤机械组成采用比重计法,测得土壤各粒径颗粒所占比(黏粒<2 μm;粉粒 2~50 μm;砂粒>50 μm);土壤全氮和全磷采用凯氏定氮法消解,间断化学分析仪(Easychem plus,意大利希思迪)测定。土壤总有机碳采用重铬酸钾容量法-外加热法测定。

新鲜土壤离心溶液中溶解性有机碳 DOC 含量采用有机碳分析仪(TOC-VWP,日本岛津)测定。土壤水溶性有机碳 WSOC 采用 3 种浸提方法获得土壤浸提液,方法分别为:0.5 mol/L K₂SO₄ 浸提新鲜土样,土水比 1:3;超纯水浸提风干土样,土水比 1:10;

0.5 mol/L K₂SO₄ 浸提风干土,土水比 1:10,25 °C 水平振荡 0.5 h,转速 180 r/min,浸提液通过 0.45 μm 滤膜并保存待测。土壤水溶性有机碳 WSOC 含量与 DOC 含量的测定方法相同。

1.5 数据处理

采用 Excel 2013 和 SPSS 18.0 对数据进行统计分析,采用 CANOCO 4.5 进行 RDA 分析并绘制排序图。

2 结果与分析

2.1 森林土壤 DOC 含量剖面特征

3 种次生林剖面土壤 DOC 含量随剖面深度的增加呈显著下降趋势,深度 40 cm 之后含量基本稳定(图 1A)。剖面 DSC001 土壤 DOC 含量较其他两个剖面显著较低,DSC003 土壤 DOC 含量最高($P<0.05$),各剖面 DOC 平均含量及显著性差异见表 3。

2.2 森林土壤 WSOC 含量剖面特征

2.2.1 鲜土 WSOC 含量 采用 0.5 mol/L 的 K₂SO₄ 浸提鲜土,测得土壤 WSOC 含量剖面值见图 1B。各剖面 WSOC 含量值存在显著性差异($P<0.05$),落叶林

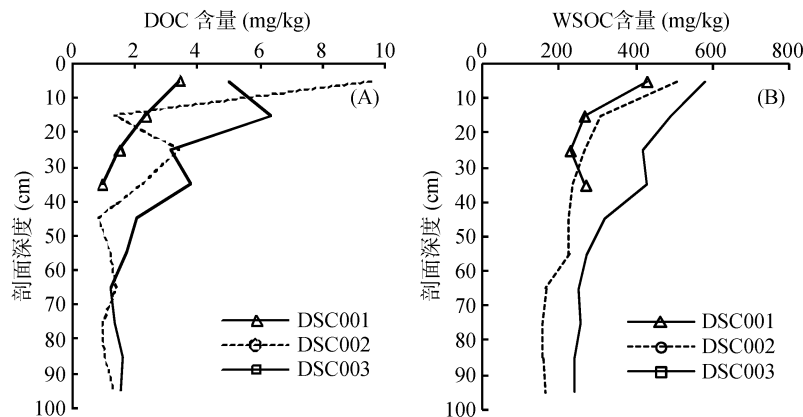


图 1 三种次生林土壤 DOC 含量及 K₂SO₄ 提取鲜土 WSOC 含量剖面特征
Fig. 1 DOC and WSOC contents extracted by K₂SO₄ in tested forest soils

表 3 三种次生林土壤 DOC 和 WSOC 含量及比值
Table 3 Average contents and ratios of DOC and WSOC in tested forest soils

剖面	土壤层次(cm)	DOC(mg/kg)	鲜土 K ₂ SO ₄ -WSOC(mg/kg)	鲜土 K ₂ SO ₄ -WSOC/DOC
DSC001	0~40	2.04 ± 1.08 bc	296.92 ± 88.52 bc	170.32 ± 80.73
DSC002	0~40	4.12 ± 3.70 ab	330.47 ± 122.89 b	117.04 ± 77.89
	40~100	1.12 ± 0.23 c	181.98 ± 33.28 c	139.88 ± 23.67
DSC003	0~45	4.57 ± 1.43 a	478.44 ± 73.20 a	109.92 ± 23.56
	45~100	1.57 ± 0.30 c	263.17 ± 28.97 bc	171.10 ± 24.98

注：表中小写字母不同表示剖面土壤各层次 DOC 或 WSOC 含量差异显著 ($P < 0.01$)，下同。

DSC003 剖面 0~40 cm 含量最高达 478.44 mg/kg，显著高于针叶林 DSC001 剖面的 296.92 mg/kg (表 3)。

2.2.2 风干土 WSOC 含量 鲜土风干后的土壤样品，分别采用超纯水和 0.5 mol/L K₂SO₄ 溶液两种浸提剂提取干土 WSOC 含量，测定值见图 2。超纯水提取的 0~40 cm 土壤 WSOC 含量，各样地剖面间无

显著性差异，而 K₂SO₄ 溶液提取的土壤 WSOC 含量，剖面 DSC002 和 DSC003 显著高于剖面 DSC001 ($P < 0.05$)。两种提取方法测得 40~100 cm 土壤 WSOC 含量均显著低于 0~40 cm 土层含量(表 4)。各样地剖面，K₂SO₄ 溶液提取的 WSOC 含量显著高于超纯水的提取含量，两种提取方法下的含量比值最高可达 13.8。

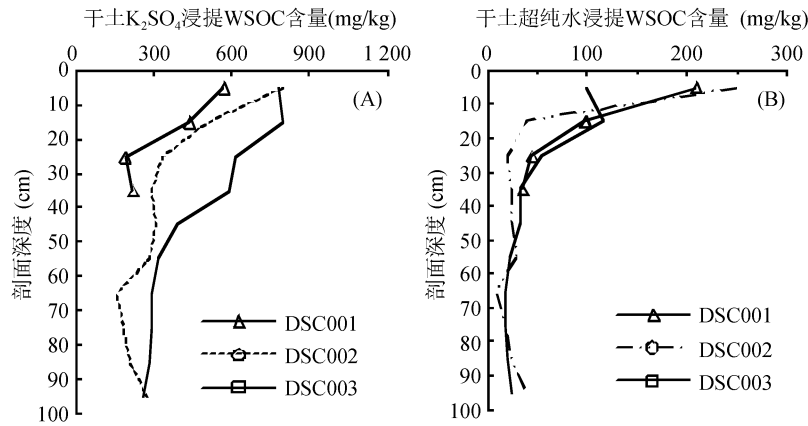


图 2 超纯水和 K₂SO₄ 提取测得风干土壤 WSOC 含量剖面特征
Fig. 2 WSOC contents in air-dried soils extracted by pure water and K₂SO₄

表 4 不同提取方法测得土壤 WSOC 含量对比
Table 4 Comparison of WSOC contents measured by different extraction methods

剖面	土壤层次 (cm)	干土超纯水-WSOC(mg/kg)	干土 K ₂ SO ₄ -WSOC(mg/kg)	干土 K ₂ SO ₄ -WSOC/干土超纯水-WSOC	干土 K ₂ SO ₄ -WSOC/鲜土 K ₂ SO ₄ -WSOC
DSC001	0~40	96.06 ± 79.43 a	352.6 ± 180.32 bc	4.44 ± 1.43 b	1.15 ± 0.41 b
DSC002	0~40	83.28 ± 110.91 a	481.39 ± 228.69 b	11.13 ± 5.64 a	1.42 ± 0.21 a
	40~100	24.73 ± 9.97 b	207.85 ± 48.81 c	10.20 ± 3.54 a	1.29 ± 0.30 ab
DSC003	0~45	76.02 ± 39.05 a	694.53 ± 109.67 a	10.95 ± 5.02 a	1.45 ± 0.13 a
	45~100	22.88 ± 2.94 b	305.79 ± 48.08 bc	13.77 ± 2.47 a	1.16 ± 0.06 b

K₂SO₄ 溶液提取的鲜土和风干土 WSOC 含量同样存在显著差异，两者之间的比值见表 4。尽管比值接近 1，但鲜土的提取土水比是 1:3，风干土的提取土水比为 1:10，因此土壤在风干之后，相较于鲜土 WSOC 含量显著提高了 3~4 倍。

2.2.3 不同测定方法土壤 DOC 和 WSOC 含量的相关

性分析 通过相关性分析，获得 DOC 与 WSOC 含量之间的相关性程度(表 5)。结果表明，无论是风干土样还是新鲜土样，不同测定方法之间均存在极显著的正相关关系。特别是，0.5 mol/L K₂SO₄ 浸提风干土和新鲜土下的 WSOC 含量相关系数最高，达 0.923($P < 0.01$)。

表 5 不同测定方法 DOC 和 WSOC 含量测定值的相关性分析
Table 5 Correlation between DOC and WSOC contents measured by different extraction methods

	培养离心 DOC	鲜土 K ₂ SO ₄ -WSOC	干土 K ₂ SO ₄ -WSOC	干土超纯水-WSOC
培养离心 DOC	1			
鲜土 K ₂ SO ₄ -WSOC	0.685**			
干土 K ₂ SO ₄ -WSOC	0.799**	0.923**		
干土超纯水-WSOC	0.845**	0.548**	0.723**	1

注: * 表示相关性达到 $P < 0.05$ 显著水平, ** 表示相关性达到 $P < 0.01$ 显著水平, 下同。

2.3 DOC-WSOC 与土壤理化指标的相关性

2.3.1 与土壤理化指标间的相关系数 表 6 列出了土壤 DOC、WSOC 与土壤理化指标间的相关系数。从表 6 可见, 不同测定方法下土壤 DOC 和 WSOC 与

土壤总有机碳、胡敏酸、富啡酸、全氮、全磷、有效态氮、微生物生物量碳氮和 pH 均达到极显著相关关系 ($P < 0.01$), 与土壤容重和土壤含水率存在一定的显著相关关系 ($P < 0.05$)。

表 6 DOC 和 WSOC 与土壤理化指标的相关系数
Table 6 Correlation coefficients between DOC, WSOC and soil physiochemical properties

土壤理化指标	DOC	鲜土 K ₂ SO ₄ -WSOC	干土 K ₂ SO ₄ -WSOC	干土超纯水-WSOC
有机碳	0.740**	0.840**	0.879**	0.551**
全氮	0.894**	0.909**	0.931**	0.809**
全磷	0.620**	0.826**	0.746**	0.638**
有效氮	0.869**	0.905**	0.938**	0.726**
胡敏酸	0.650**	0.805**	0.840**	0.608**
富里酸	0.751**	0.895**	0.920**	0.654**
微生物生物量碳	0.803**	0.778**	0.843**	0.688**
微生物生物量氮	0.775**	0.783**	0.846**	0.685**
pH	-0.685**	-0.787**	-0.802**	-0.534**
黏粒	0.037	0.389	0.275	-0.232
粉粒	0.151	0.036	0.135	-0.101
砂粒	-0.132	-0.318	-0.301	0.245
田间持水量	0.307	0.353	0.339	0.467*
含水率	0.274	0.599**	0.561**	-0.012
孔隙度	0.008	-0.082	-0.130	0.236
土壤容重	-0.617**	-0.841**	-0.800**	-0.397

注: *表示相关性达到 $P < 0.05$ 显著水平, **表示相关性达到 $P < 0.01$ 显著水平。

2.3.2 与土壤理化指标的二维排序图 图 3 绘制了土壤 DOC、WSOC 与土壤理化指标的二维排序图 (RDA)。从图中可见, 不同测定方法下土壤 DOC 和 WSOC 含量与土壤总有机碳、胡敏酸(HA)、富啡酸(FA)、全氮、全磷、有效态氮、微生物生物量碳氮(MBC/MBN)和 pH 均达到极显著相关关系。并且, 0.5 mol/L K₂SO₄ 浸提风干土和新鲜土下的 WSOC 含量与土壤总有机碳具有更高的相关系数, 而超纯水浸提 WSOC 含量与土壤总有机碳的相关系数相对较低。

3 讨论

DOC 是陆地生态系统中极为活跃的有机碳组分,

它是连接土壤圈层与其他圈层的重要物质形式^[5], 虽然仅仅占土壤有机质总量极小的一部分, 但却可能是土壤有机质中最具生物有效性的组分, 是地表水和地下水中溶解性有机质的重要来源, 其淋失是土壤有机质损失的重要途径^[23]。大量有关土壤 DOC 垂直分布的研究均说明其含量会随着土层深度增加明显下降, 且土壤有机碳垂直分布格局受到植被类型等各种因素的影响^[24-26]。本研究结果表明, 随着土壤剖面深度的增加土壤 DOC 的含量均呈现出明显递减的趋势, 不同森林类型土壤 DOC 含量也存在显著差异, 基本表现为针叶林 < 常绿阔叶林 < 落叶林, 说明土壤 DOC 呈现明显地带性分布特征, 受植被组成及土壤性质等

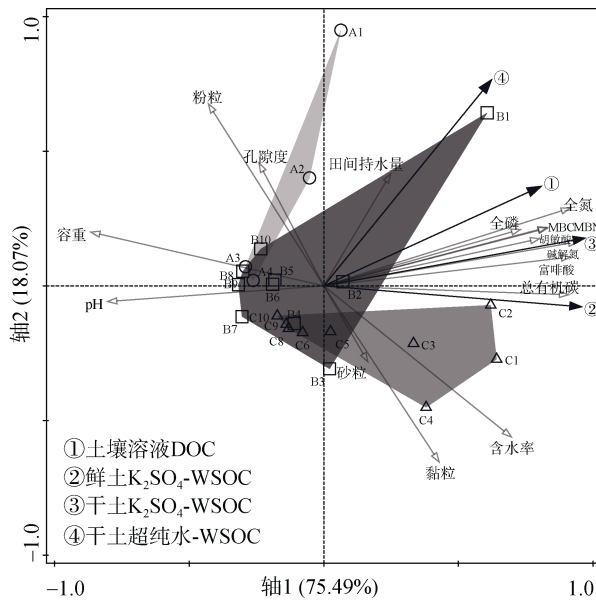


图3 土壤 DOC 和 WSOC 与土壤理化指标的二维排序图 (RDA)

Fig. 3 2D sorting map of soil DOC, WSOC and soil physiochemical properties (RDA)

影响明显，因此 DOC 可能对森林土壤有机碳的组成特征及新旧组分的演替起重要作用。

有关森林生态系统 DOC 含量随剖面变化特征及迁移规律的研究，国内开展的多以超纯水或 K_2SO_4 浸提 WSOC 表征。本研究结果表明典型森林土壤 DOC 含量在不同测定方法间存在显著差异，其中培养离心方法获得的 DOC 在 $6.07 \sim 0.54 \text{ mg/kg}$ 之间，远低于 WSOC 含量，不同测定方法间基本表现为： $DOC < \text{超纯水浸提 WSOC} < \text{鲜土 } K_2SO_4 \text{ 浸提 WSOC} < \text{风干土 } K_2SO_4 \text{ 浸提 WSOC}$ ，尽管含量差异较大，但方法之间存在极显著相关关系。有研究表明，在相同浓度下，用 K_2SO_4 提取的 WSOC 量最高，并建议针对不同的研究目的和土壤条件要建立适用的提取方法^[27]。本研究结果表明，风干土 K_2SO_4 提取 WSOC 效率都明显高于其他方法，说明 K_2SO_4 从土壤中提取了额外的水溶性有机碳。不同提取方法提取的 WSOC 的具体组分到底有何差异需要进一步探究，而直接获得土壤溶液，测定分析的结果可能更接近于实际值。

通过分析土壤 DOC 与土壤理化指标间的相关性，表明土壤理化性质对 DOC 的影响显著。土壤 DOC 与胡敏酸和富啡酸极显著相关，表明了 DOC 的重要来源。同时，微生物在土壤中扮演重要角色，参与土壤有机碳物质的分解利用和再循环，因而 DOC 与微生物生物量碳氮极显著相关。由于土壤 DOC 强的迁移性，其将深刻影响森林生态系统碳氮循环过程，并在陆地生态系统碳氮循环过程中扮演相当重要的

角色。

4 结论

亚热带典型森林土壤 DOC 和 WSOC 含量随土壤剖面深度的增加，均呈下降趋势，森林植被类型显著影响土壤 DOC 和 WSOC 含量。培养离心方法测定的 DOC 含量显著低于其他提取方法，不同测定方法间存在极显著相关性。土壤 DOC 和 WSOC 均与土壤有机碳、胡敏酸、富啡酸、全氮、全磷、有效态氮、微生物生物量碳氮和 pH 达到极显著相关，与土壤容重和土壤含水率达到显著相关。

参考文献：

- [1] 黄伟生, 彭佩钦, 苏以荣, 等. 洞庭湖区耕地利用方式对土壤活性有机碳的影响[J]. 农业环境科学学报, 2006, 25(3): 756-760.
- [2] 刘振花, 陈立新, 王琳琳. 红松阔叶混交林不同演替阶段土壤活性有机碳的研究[J]. 土壤通报, 2009, 40(5): 1098-1103.
- [3] 宇万太, 马强, 赵鑫, 等. 不同土地利用类型下土壤活性有机碳库的变化[J]. 生态学杂志, 2007, 26(12): 2013-2016.
- [4] 郑永红, 胡友彪, 张治国. 煤矿复垦区重构土壤溶解性有机碳空间分布特征[J]. 土壤, 2017, 49(5): 977-981.
- [5] 银莲, 徐星凯, 景元书. 2 种方法测定溶解性有机碳和总氮含量比较研究[J]. 环境科学与技术, 2015, 38(9): 17.
- [6] 唐伟祥, 孟凡乔, 张煜, 等. 不同土壤有机碳测定方法的比较[J]. 土壤, 2018, 50(3): 552-557.
- [7] Kalbitz K, Solinger S, Park J, et al. Controls on the dynamics of dissolved organic matter in soils: A review[J]. Soil Science, 2000, 165(4): 277-304.
- [8] 孔范龙, 郝敏, 吕宪国, 等. 三江平原环型湿地土壤溶解性有机碳的时空变化特征[J]. 土壤学报, 2013, 50(4): 847-852.
- [9] 王明慧, 王国兵, 阮宏华, 等. 苏北沿海不同土地利用方式土壤水溶性有机碳含量特征[J]. 生态学杂志, 2012, 31(5): 1165-1170.
- [10] 吕茂奎, 谢锦升, 周艳翔, 等. 红壤侵蚀地马尾松人工林恢复过程中土壤非保护性有机碳的变化[J]. 应用生态学报, 2014, 25(1): 37-44.
- [11] 王磊, 应蓉蓉, 石佳奇, 等. 土壤矿物对有机质的吸附与固定机制研究进展[J]. 土壤学报, 2017, 54(4): 805-818.
- [12] 吴健敏, 郝敏, 孔范龙, 等. 土壤溶解性有机碳(DOC)动态变化影响因素研究进展[J]. 地质论评, 2013, 59(5): 953-961.
- [13] 焦坤, 李忠佩. 土壤溶解有机质的含量动态及转化特征的研究进展[J]. 土壤, 2005, 37(6): 593-601.
- [14] Xia G, Ball W P. Adsorption-partitioning uptake of nine low-polarity organic chemicals on a natural sorbent[J]. Environmental Science & Technology, 1999, 33(2): 262-269.

- [15] Li G, Khan S, Ibrahim M, et al. Biochars induced modification of dissolved organic matter (dom) in soil and its impact on mobility and bioaccumulation of arsenic and cadmium[J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2018, 348(20): 100–108.
- [16] 李淑芬, 俞元春, 何晟. 土壤溶解有机碳的研究进展[J]. *土壤与环境*, 2002, 11(4): 422–429.
- [17] 柳敏, 宇万太, 姜子绍, 等. 土壤溶解性有机碳 (DOC) 的影响因子及生态效应[J]. *土壤通报*, 2015, 38(4): 136–142.
- [18] 曹建华, 潘根兴, 袁道先. 不同植物凋落物对土壤有机碳淋失的影响及岩溶效应[J]. *第四纪研究*, 2000, 20(4): 359–366.
- [19] 王风芹, 田丽青, 宋安东, 等. 华北刺槐林与自然恢复植被土壤微生物量碳、氮含量四季动态[J]. *林业科学*, 2015, 51(3): 16–24.
- [20] Kalbitz K, Kaiser K. Contribution of dissolved organic matter to carbon storage in forest mineral soils[J]. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science*, 2008, 171(1): 52–60.
- [21] 李永夫, 姜培坤, 刘娟, 等. 施肥对毛竹林土壤水溶性有机碳氮与温室气体排放的影响[J]. *林业科学*, 2010, 46(12): 165–170.
- [22] 彭佩钦, 赖婧, 丁咸庆. 一种土壤溶解性氮的提取方法及装置 CN104833563A[P]. 2015-08-12.
- [23] 徐基胜, 赵炳梓. 可溶性有机碳在典型土壤上的吸附行为及机理[J]. *土壤*, 2017, 49(2): 314–320.
- [24] 王棣, 耿增超, 余雕, 等. 秦岭典型林分土壤活性有机碳及碳储量垂直分布特征[J]. *应用生态学报*, 2014, 25(6): 1569–1577.
- [25] 霍莉莉, 邹元春, 郭佳伟, 等. 垦殖对湿地土壤有机碳垂直分布及可溶性有机碳截留的影响[J]. *环境科学*, 2013, 34(1): 283–287.
- [26] 盛浩, 宋迪思, 王翠红, 等. 土壤溶解性有机碳四种测定方法的对比和转换 [J]. *土壤*, 2015, 47(6): 1049–1053.
- [27] 李忠佩, 焦坤, 吴大付. 不同提取条件下红壤水稻土溶解有机碳的含量变化[J]. *土壤*, 2005, 37(5): 512–516.