农业资源与环境学报 中文核心期刊 中国科技核心期刊
JOURNAL OF AGRICULTURAL RESOURCES AND ENVIRONMENT
欢迎投稿 http://www.aed.org.cn

浸提条件对土壤溶解性有机碳测定结果的影响

李亚林, 练金山, 任凤玲, 孙楠, 徐明岗

引用本文:
李亚林,练金山,任凤玲,孙楠,徐明岗. 浸提条件对土壤溶解性有机碳测定结果的影响[J]. 农业资源与环境学报, 2022, 39(4): 741–748.

在线阅读 View online: https://doi.org/10.13254/j.jare.2021.0306

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

广东典型镉污染稻田土壤镉的生物有效性测定方法及风险管控值初探
李吉宏, 聂达涛, 刘梦楠, 毛小云, 廖宗文, 陈娴
农业资源与环境学报. 2021, 38(6): 1094–1101 https://doi.org/10.13254/j.jare.2021.0549

秸秆碳对不同施肥水平低肥力土壤碳组分的影响
何振超, 苏瑶, 喻曼, 陈喜靖, 万美霞, 沈阿林
农业资源与环境学报. 2019, 36(3): 304–312 https://doi.org/10.13254/j.jare.2018.0120

海南北部滨海区不同土地利用模式下土壤DOM粒径分布与光谱特性
吴月颖, 吉恒宽, 吴蔚东, 吴治澎, 解钰, 符佩娇
农业资源与环境学报. 2020, 37(5): 654–665 https://doi.org/10.13254/j.jare.2020.0016

不同施肥处理下我国典型农田土壤对可溶性有机碳的吸附特征
梁远宇, 王小利, 徐明岗, 蔡岸冬, 孙楠, 吕艳超
农业资源与环境学报. 2022, 39(1): 72–79 https://doi.org/10.13254/j.jare.2020.0769

土壤溶解性有机质结构和组成对秸秆、牛粪及其堆肥产品输入的响应特征
田翔, 何天容, 尹德良, 冉澍, 汪妍, 周宪, 张舸
农业资源与环境学报. 2022, 39(3): 556–566 https://doi.org/10.13254/j.jare.2021.0068

关注微信公众号，获得更多资讯信息

李亚林, 练金山, 任凤玲, 等. 浸提条件对土壤溶解性有机碳测定结果的影响[J]. 农业资源与环境学报, 2022, 39(4): 741-748.
LI Y L, LIAN J S, REN F L, et al. Effects of extraction conditions on the concentration of dissolved organic carbon in soil[J]. *Journal of Agricultural Resources and Environment*, 2022, 39(4): 741-748.

开放科学 OSID

浸提条件对土壤溶解性有机碳测定结果的影响

李亚林, 练金山, 任凤玲, 孙楠*, 徐明岗

(中国农业科学院农业资源与农业区划研究所/耕地培育技术国家工程实验室, 北京 100081)

摘　要: 为探明不同浸提条件下土壤溶解性有机碳(DOC)测定含量和浸提率的变化规律, 增强各研究结果之间DOC测定含量的可比性。基于已公开发表的31篇文献, 建立了包含不同浸提条件下DOC测定含量(547组)和浸提率(390组)的数据库。采用数据整合分析方法(Meta-analysis), 量化不同浸提条件(浸提剂种类、浸提温度、水土质量比等)对DOC测定含量和浸提率的影响程度并分析了DOC测定含量与土壤性质之间的关系。结果表明, 浸提剂种类对DOC测定含量和浸提率具有显著影响, 与去离子水相比, KCl和K_2SO_4试剂均显著提高了浸提液中DOC测定含量(124.1%和118.8%)和浸提率(65.3%和17.2%), $CaCl_2$显著降低了DOC测定含量(57.9%)和浸提率(45.2%)。与室温条件(25 ℃)相比, 提高温度可以显著提升DOC测定含量(72.5%)和浸提率(65.2%), 且DOC增加量随温度的升高呈现出先减小后增大的趋势。DOC测定含量和浸提率均随浸提时间、土壤研磨粒径、水土质量比的增大而增加, 且DOC增加量与水土质量比呈极显著的线性相关。DOC测定含量和浸提率与土壤pH、有机碳、全氮等显著相关。综上, DOC测定含量和浸提率受土壤性质及浸提条件的显著影响, 在测定DOC含量时适宜采用KCl作为浸提剂, 在室温条件(25~30 ℃)下浸提1 h。

关键词: 土壤; 溶解性有机碳; 浸提条件; 浸提率; 水土质量比; 整合分析
中图分类号: S153.6　　**文献标志码**: A　　**文章编号**: 2095-6819(2022)04-0741-08　　**doi**: 10.13254/j.jare.2021.0306

Effects of extraction conditions on the concentration of dissolved organic carbon in soil

LI Yalin, LIAN Jinshan, REN Fengling, SUN Nan*, XU Minggang

(National Engineering Laboratory for Improving Quality of Arable Land, Institute of Agricultural Resources and Regional Planning, Chinese Academy of Agricultural Sciences, Beijing 100081, China)

Abstract: To investigate the driving factors of the concentration of dissolved organic carbon (DOC) and its extraction efficiencies under different extraction conditions is conducive to enhancing the comparability of DOC concentration among the results of various research studies. A database containing DOC determination content (547 pairs) and extraction rate (390 pairs) under different extraction conditions was established based on 31 previously published studies. The influence of different extraction conditions (e.g., extractant, extraction temperature, water-to-soil ratio) on DOC determination content and extraction rate was quantified and the relationship between DOC determination content and soil properties was analyzed. Compared with deionized water, both KCl and K_2SO_4 significantly improved the DOC concentration (by 124.1% and 118.8%, respectively) and extraction efficiencies (by 65.3% and 17.2%, respectively), while $CaCl_2$ significantly reduced the DOC concentration (by 57.9%) and extraction efficiency (by 45.2%). A comparison of these values at room temperature (25 ℃) showed that the DOC concentration and extraction efficiencies increased (by 72.5% and 65.2%, respectively) with the increase in the DOC extraction temperature. Moreover, the DOC increment showed a trend of first decreasing and then increasing with the increase in temperature. In addition, both the DOC concentration and extraction efficiencies increased as the extraction time, soil particle

收稿日期: 2021-05-12　　**录用日期**: 2021-07-26
作者简介: 李亚林(1995—), 男, 河南永城人, 硕士研究生, 从事土壤碳循环研究。E-mail: henanyalin@163.com
***通信作者**: 孙楠　E-mail: sunnan@caas.cn
基金项目: 国家重点研发计划项目(2017YFC0503805); 国家自然科学基金项目(41620104006); 中央级公益性科研院所基本科研业务费(Y2017LM06)
Project supported: National Key R&D Program of China (2017YFC0503805); The National Natural Science Foundation of China (41620104006); Special Fund for Basic Scientific Research Business of Central Public Research Institutes (Y2017LM06)

size, and water-to-soil ratio increased. There were significant correlations between soil organic carbon and total nitrogen levels and pH, the important explanatory variables for the increase in DOC concentrations. The content of DOC extracted and the extraction rate were significantly affected by soil properties and extraction conditions. Therefore, when determining DOC content, KCl is suitable for extraction at room temperature(25~30 ℃) for 1 h.

Keywords: soil; dissolved organic carbon; extraction conditions; extraction efficiencies; water-to-soil ratio; Meta-analysis

随着全球气温和大气温室气体浓度的升高,学者对土壤碳库和全球碳循环的研究日益增多[1]。土壤有机碳(Soil organic carbon, SOC)储量约为大气中的3倍,并以CO_2、HCO_3^-和土壤溶解性有机碳(Dissolved organic carbon,DOC)的形式进入相邻圈层[2]。DOC是指能够溶解于水或盐溶液的一系列结构、大小不同的有机化合物[3]。土壤中适当的DOC含量在维持生态系统营养库的稳定性和降低环境污染方面均具有重要作用。一方面,DOC是土壤碳库最为活跃的组分之一[4],其主要来源于腐殖化的有机质、植物凋落物、根系分泌物以及土壤微生物[5],参与土壤C、N、P等养分元素的生物化学循环过程;另一方面,DOC具有较高的移动性,溶解后可随水体迁移,导致环境污染[6];此外,DOC是微生物可直接吸收利用的有机碳源,通过影响微生物代谢对CO_2、CH_4等温室气体的排放产生一定影响[7]。目前,国内外学者对DOC的来源、结构组成、影响因素以及生态环境效应进行了大量研究[8-10],在研究过程中不同的学者采用不同的研究方法测定DOC含量。李忠佩等[11]通过室内试验发现在红壤水稻土中,以去离子水作为浸提剂测定的DOC含量更接近田间实际情况,但去离子水浸提会导致土壤黏粒分散从而很难获得可供分析的清澈溶液[12]。HANEY等[13]利用去离子水和0.5 mol·L^{-1} K_2SO_4试剂作为浸提剂测定DOC含量,结果表明室温条件下,在低pH土壤中用去离子水测定的DOC含量比用0.5 mol·L^{-1} K_2SO_4试剂提高290%,在高pH土壤中则减少17%。也有研究发现用低浓度的盐溶液测定的DOC含量比用去离子水高[1],但DOC含量的高低与浸提温度、水土质量比等密切相关[14]。通常情况下,DOC含量会随着温度的升高显著增加[15-17],CHRIST等[18]对土壤淋洗发现DOC含量随温度升高呈指数性增加,但也有一些学者认为温度对DOC含量没有显著影响[19]。

综上所述,DOC的测定容易受浸提剂类型、浸提温度、水土质量比和土壤前处理方式等因素的影响[20-21],因而测定含量差异较大,导致很多研究结果之间无法进行横向比较。目前,对DOC含量的测定尚无统一的方法,因此,本研究通过搜集现有关于浸提方法对DOC含量影响的研究结果,采用整合分析(Meta-analysis)的方法,系统评价不同浸提方法对DOC测定含量的影响及其差异,以期为DOC测定方法的选择提供科学依据和参考。

1 材料与方法

1.1 数据搜集

本研究所用数据来自中国知网的中文文献以及Web of Science核心数据库的英文文献,通过输入检索词“土壤溶解性有机碳/Dissolved organic carbon”“浸提条件/Extraction conditions”“水土质量比/Water-to-soil ratio”和“浸提温度/Extraction temperatures”,筛选了2000—2020年发表的关于浸提方法对DOC测定含量和浸提率影响的相关研究文献。以25 ℃和2∶1水土质量比作为对照组,其余温度和水土质量比条件下(处理组)DOC含量与对照组DOC含量的差值为DOC增加量(ΔC_{DOC}, mg·kg^{-1})。DOC测定含量(mg·kg^{-1})为不同浸提条件下提取的土壤中DOC含量的测定值;DOC浸提率(DOC与SOC含量之比,%)为土壤中DOC测定含量(mg·kg^{-1})占土壤有机碳含量(SOC, g·kg^{-1})的百分数,其计算公式:

$$\text{DOC浸提率} = \frac{\text{DOC测定含量}}{\text{SOC含量} \times 1\,000} \times 100\% \quad (1)$$

为了避免搜集文献带来的偏差,本研究采用以下标准进行文献筛选:①同一独立试验必须包含明确的处理组和对照组(表1);②至少有SOC、DOC和浸提率等指标中的两个;③每个处理重复次数≥3;④所有试验均采用表层土壤(0~20 cm)。此外,对于每个独立试验还收集了试验时间、气候类型、地理位置(经度和纬度)、土壤基础理化性质等相关信息。经筛选,共获得31篇符合标准的研究文献,包含547组DOC测定含量数据和390组DOC浸提率数据。在数据提取过程中,根据文献中直接给出的平均值和标准误(*SE*),转换为相应的标准差(*SD*):

$$SD = SE \times \sqrt{n} \quad (2)$$

式中:n是重复次数。若该文献中无SD或SE,则根据本研究所收集的文献中给出的*SDs*(SD_{x1}、SD_{x2}、…、

表1 土壤溶解性有机碳测定含量综合分析涉及的因素

Table 1 Factors involved in the Meta-analysis of soil dissolved organic carbon(DOC) concentrations

因素 Factor	处理组 Treatment	对照组 Control
浸提剂种类 Extractant type	$CaCl_2$、KCl、K_2SO_4	去离子水
水土质量比 Water-to-soil ratio	>2∶1	≤2∶1
土壤研磨粒径 Soil particle size/mm	>2	≤2
浸提温度 Extractant temperature/℃	>25	≤25
浸提时间 Extractant time/h	>1	≤1

SD_{xi}、…、SD_{xk})或SEs(SE_{x1}、SE_{x2}、…、SE_{xi}、…、SE_{xk})和相对应的重复次数(N_{x1}、N_{x2}、…、N_{xi}、…、N_{xk})计算得出SD[22],具体公式为:

$$SD=\sqrt{\sum_{i=1}^{k}\left(\frac{\partial M}{\partial x_i}\times SD_{xi}\right)^2}=\sqrt{\sum_{i=1}^{k}\left(\frac{\partial M}{\partial x_i}\times\sqrt{N_{xi}}\,SE_{xi}\right)^2} \tag{3}$$

1.2 研究方法

整合分析是利用同类研究的多个相互独立的研究结果进行定量分析,从而获得相对综合性结论的研究方法。由于整合分析增大了分析样本量,同时也提升了统计的检验效能,因此,其结论较单一研究结论更具参考价值。本研究使用Metawin 2.0进行整合分析,采用效应比值的自然对数(lnRR)来量化不同浸提方法对DOC测定含量和浸提率的效应[23]:

$$\ln RR=\ln\frac{\bar{X}_t}{\bar{X}_c}=\ln\bar{X}_t-\ln\bar{X}_c \tag{4}$$

式中:RR为响应比;$\bar{X}_t$为处理组DOC测定含量或浸提率的平均值;$\bar{X}_c$为对照组DOC测定含量或浸提率的平均值。平均值的变异系数V、权重系数w_{ij}、权重响应比RR_{++}、RR_{++}的标准误(S)以及95%CI可通过以下公式计算[24]。

$$V=\frac{SD_t^2}{n_t\bar{X}_t^2}+\frac{SD_c^2}{n_c\bar{X}_c^2} \tag{5}$$

$$w_{ij}=\frac{1}{V} \tag{6}$$

$$RR_{++}=\frac{\sum_{i=1}^{m}\sum_{j=1}^{k_i}w_{ij}\times RR_{ij}}{\sum_{i=1}^{m}\sum_{j=1}^{k_i}w_{ij}} \tag{7}$$

$$S(RR_{++})=\sqrt{\frac{1}{\sum_{i=1}^{m}\sum_{j=1}^{k_i}w_{ij}}} \tag{8}$$

$$95\%CI=RR_{++}\pm 1.96S(RR_{++}) \tag{9}$$

式中:SD_t和SD_c分别代表处理组和对照组的标准差,n_t和n_c分别代表处理组和对照组的样本数。通过分析得到每一组数据的效应比值,利用数据标准差计算权重加权平均数后得出其95%置信区间(95%CI)。若置信区间包含0,说明不同浸提方法对DOC测定含量或浸提率无显著影响;若置信区间全部大于0,说明不同浸提方法对DOC测定含量或浸提率具有显著正效应,即显著增加DOC测定含量或浸提率(P<0.05);若置信区间全部小于0,说明不同浸提方法对DOC测定含量或浸提率具有显著负效应,即显著降低了DOC测定含量或浸提率(P<0.05)[25]。

由于纳入整合分析的文献在研究条件、地点、时间、对象和研究者等方面不尽相同,不同研究异质性的存在使各研究中变量关系效应的估计也不同。因此,在合并技术资料的响应比得出加权平均数之前,需要对各试验处理及各试验结果间进行异质性检验。如果各研究之间的差异很大,即存在明显的异质性,直接计算合并得出效应量会造成结果的不可靠和不稳定。异质性检验结果(表2)表明,各试验数据结果间存在明显异质性,因此选用随机效应模型(P<0.001)。

1.3 数据分析

为了进一步分析某一特征因素对DOC测定含量或浸提率的影响,将数据划分为不同的亚组,如浸提剂种类、浸提温度、水土质量比等。此外,采用SPSS 18.0进行数据分析和显著性检验(P<0.05),用Origin 2021制图,各因素对DOC测定含量的影响程度的重要度采用R语言中的软件包Random Forest进行计算[26]。

2 结果与分析

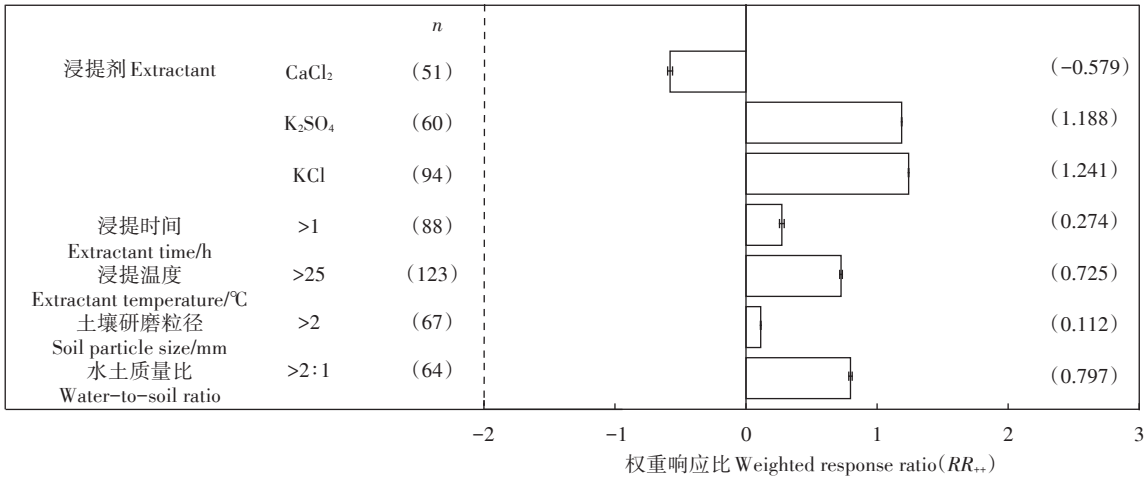
2.1 不同浸提方法对DOC测定含量的影响

整合分析结果(图1)显示,浸提剂种类和浸提条件对DOC测定含量的影响程度存在显著差异。相比于去离子水,对不同的浸提剂种类比较发现,$CaCl_2$浸提下土壤样品中的DOC测定含量的提升幅度显著低于K_2SO_4、KCl浸提。与去离子水相比,K_2SO_4和KCl试剂对DOC测定含量均有显著提升,分别提高了118.8%和124.1%(P<0.05)。但DOC测定含量在K_2SO_4和KCl浸提之间无显著差异。然而,$CaCl_2$浸提剂显著降低了DOC测定含量(降幅57.9%,P<0.05)。DOC测定含量均随着浸提时间、浸提温度、土壤研磨粒径和水土质量比的增加而显著增加,相比于对照组,处理组DOC测定含量的升幅分别为27.4%、72.5%、11.2%和79.7%。

表2 不同处理间的异质性(Q_t)自由度和显著性检验

Table 2 Heterogeneity(Q_t) and probability among observations in different treatments

项目 Item	DOC测定含量 DOC extraction concentration			浸提率 Extracting efficiency		
	df	Q_t	*P*	*df*	Q_t	*P*
浸提剂种类 Extractant type	204	1 165 672	<0.001	134	15 519	<0.001
水土质量比 Water-to-soil ratio	63	6 314	<0.001	51	28 959	<0.001
土壤研磨粒径 Soil particle size	66	34 372	<0.001	6	51	<0.001
浸提温度 Extractant temperature	122	233	<0.001	106	13 873	<0.001
浸提时间 Extractant time	87	677	<0.001	85	789	<0.001



图中柱形图和误差线分别代表响应比及其95%的置信区间，*n*代表样品观测个数。下同

Bar charts and error bars denote the overall mean response ratio and 95% confidence interval, respectively. *n*: Number of observations. The same below

图1 不同浸提方法对DOC测定含量的影响

Figure 1 Effects of extractant methods on measured soil dissolved organic carbon(DOC) concentrations

2.2 不同浸提方法对DOC浸提率的影响

不同浸提剂种类、浸提条件对DOC浸提能力影响显著不同(图2)。与去离子水相比，K_2SO_4和KCl均显著增加DOC浸提率，升幅分别为17.2%和65.3%，但$CaCl_2$显著降低了DOC浸提率，降幅为45.2%。不同浸提条件下，DOC浸提率随浸提时间、浸提温度和水土质量比的增加而升高，但升幅略有差异(图2)，与对照组相比，处理组DOC浸提率的升幅分别为27.3%、65.2%和72.3%。不同土壤研磨粒径间DOC浸提率差异较大。相比≤2 mm土壤粒径，2 mm以上土壤粒径下DOC浸提率显著提高，升幅为13.2%。总体而言，浸提条件不同，DOC浸提率具有显著差异。

2.3 浸提温度和水土质量比与DOC增加量的关系

图3结果表明，浸提温度对DOC增加量有显著的影响(P<0.01)。在30~80 ℃范围内，DOC增加量随温度的升高呈现出先减小后增大的趋势，且DOC增加量曲线和零点有两个交界点(分别为48 ℃和63 ℃)，表明DOC测定含量在48 ℃左右时达到最大值，之后随温度增加逐渐减小，并在63 ℃左右时达到最小值，随后继续增大。不同水土质量比与DOC增加量的拟合曲线(图4)表明，随着水土质量比的增大，溶解进入到土壤溶液中的DOC增加量呈直线增加，且达到极显著水平(P<0.01)，这表明水土质量比对DOC测定含量有重要的影响。

2.4 不同浸提剂下土壤性质对DOC测定含量影响的重要度

由于DOC在养分供应、物质循环等方面具有重要作用，因此，不同浸提剂下土壤性质对DOC测定含量的影响程度能够反映出浸提剂是否适宜。整体来看，相比于其他因素，土壤pH是影响DOC测定含量的主要因素，其相对重要度为14.75%，其次是SOC和全氮(TN)含量，重要度分别是11.85%和11.43%(图5a)。与去离子水相比，不同浸提剂(K_2SO_4、KCl和$CaCl_2$)下DOC测定含量影响幅度的主控因素存在差

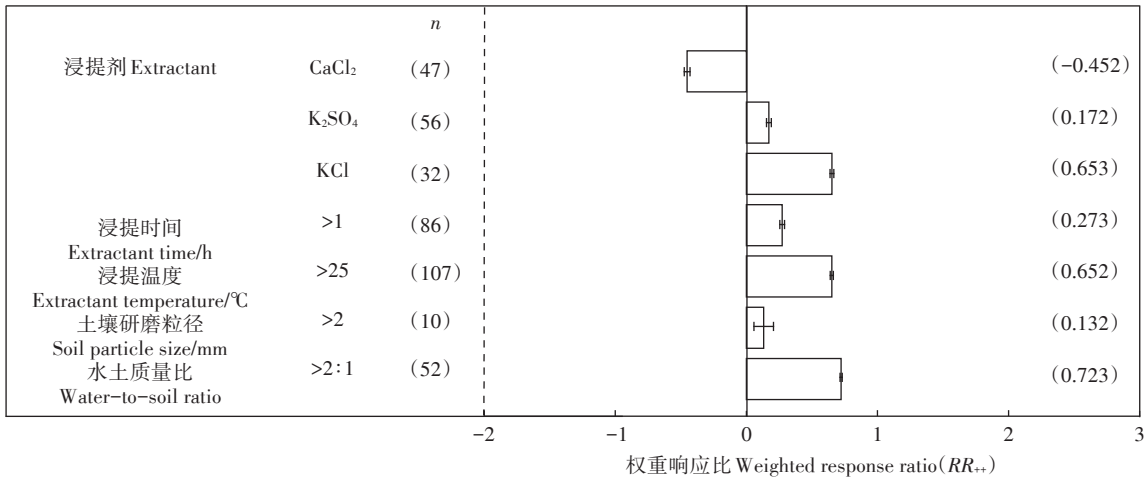
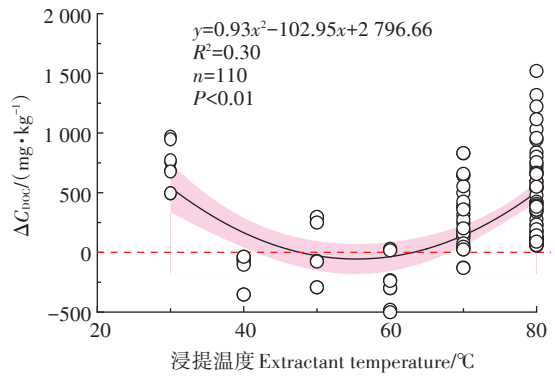


图2 不同浸提方法对DOC浸提率的影响

Figure 2 Effects of extractant methods on measured soil dissolved organic carbon(DOC) extraction rate



阴影部分表示95%置信区间。下同

The shaded region is the 95% confidence interval. The same below

图3 浸提温度与DOC增加量(ΔC_{DOC})关系

Figure 3 Relationship between DOC increment(ΔC_{DOC}) and extraction temperature

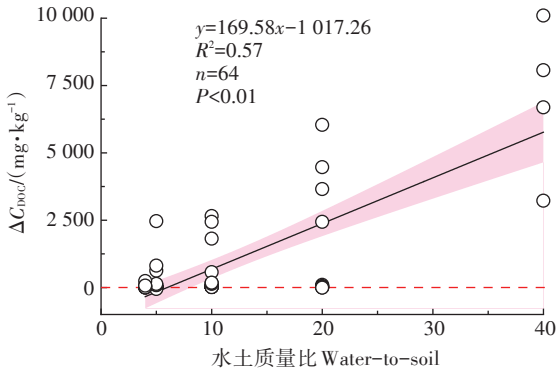


图4 水土质量比与DOC增加量(ΔC_{DOC})关系

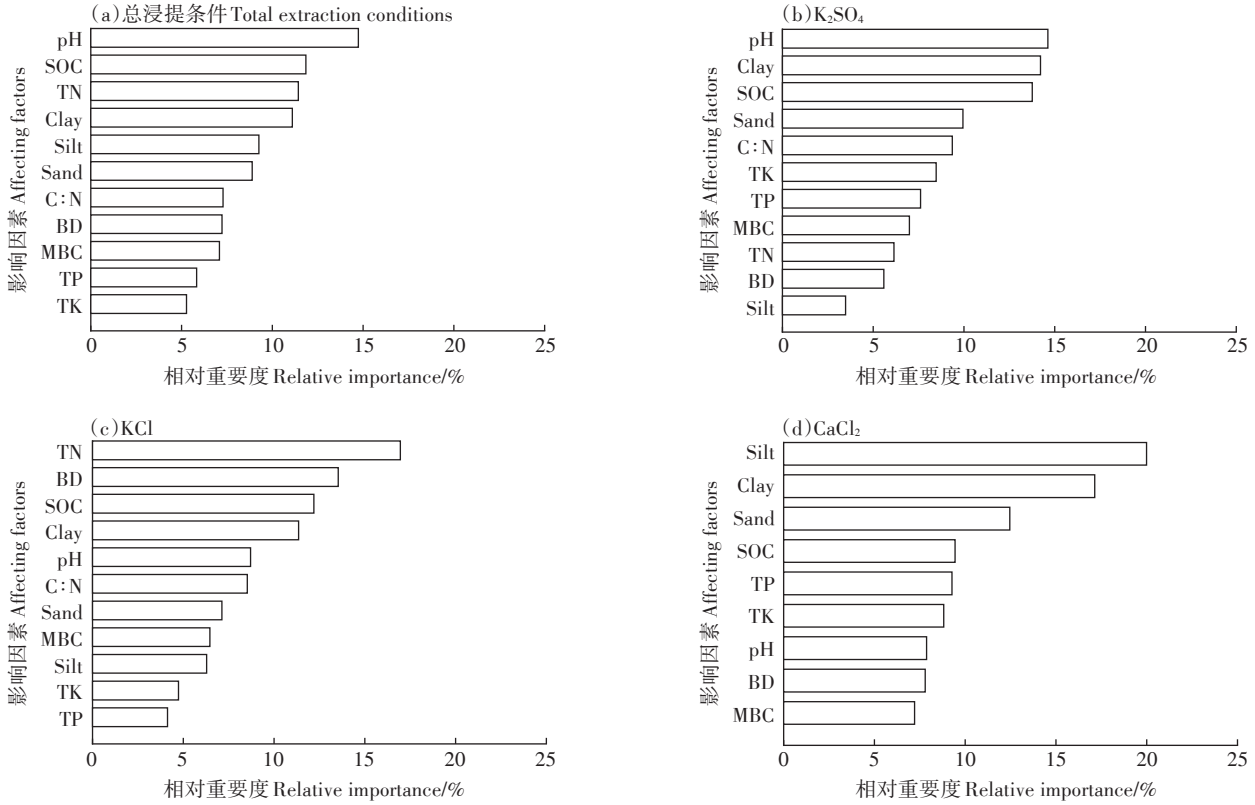
Figure 4 Relationship between DOC increment(ΔC_{DOC}) and water−to−soil ratio

异。对于浸提剂K_2SO_4,土壤pH、黏粒含量和SOC含量是影响DOC测定含量的主要因素,其相对重要度分别为14.62%、14.21%和13.76%(图5b);对于浸提剂KCl,TN含量是影响DOC测定含量的主要因素,其次是土壤容重(BD)和SOC含量(图5c);对于浸提剂$CaCl_2$,土壤质地对DOC测定含量的影响较大,其中粉粒、黏粒和砂粒含量的重要度分别为19.99%、17.14%和12.45%,SOC含量的重要度也达到了9.44%(图5d)。

3 讨论

3.1 浸提剂种类对DOC测定含量和浸提率的影响

本研究表明,浸提剂种类显著影响DOC测定含量和浸提率。与去离子水相比,钾盐(K_2SO_4和KCl)对DOC测定含量的提升幅度显著高于钙盐($CaCl_2$),这可能与部分矿物结合态有机质被释放有关[27]。RENNERT等[28]的研究表明去离子水可以溶解出更多具有芳香性和高分子量的疏水化合物,而盐类可以提取出更多吸附在带电土壤基质表面的亲水化合物。一方面,浸提剂中的一价阳离子(K^+)与多价阳离子(Ca^{2+}和Mg^{2+})交换,从而使吸附在黏土矿物表面或被有机物−多价阳离子复合物固定的有机化合物溶解,进而导致更多固定的有机团聚体分解为DOC[29];另一方面,$CaCl_2$对土壤中高缩合的有机碳素的提取能力较弱[30]。而且,$CaCl_2$本身是一种温和试剂,溶液中的Ca^{2+}可以同时被黏土颗粒表面的负电荷和有机化合物的羧基基团吸附,或者被来自不同有机化合物的两个负电荷吸附,从而导致$CaCl_2$试剂浸提条件下DOC



SOC-土壤有机碳，TN-全氮，MBC-微生物量碳，Clay-黏粒含量，Silt-粉粒含量，Sand-砂粒含量，BD-土壤容重，C:N-SOC:TN，TP-全磷，TK-全钾
SOC-Soil organic carbon，TN-Total nitrogen，MBC-Microbial biomass carbon，Clay-The content of clay，Silt-The content of silt，Sand-The content of sand，BD-Bulk density，C:N-SOC:TN，TP-Total phosphorus，TK-Total potassium

图5 影响DOC测定含量的主要因素

Figure 5 The main factors affecting the DOC concentrations

测定含量的增幅明显低于其他试剂(K_2SO_4和KCl)浸提[31]。与去离子水相比，KCl试剂对DOC测定含量的提升幅度略高于K_2SO_4试剂，差异不显著($P>0.05$)，但KCl试剂对DOC浸提率的提升幅度显著高于K_2SO_4试剂($P<0.05$，图1和图2)。这与杨小燕等[32]在黑土上的研究结果不一致，该研究发现K_2SO_4试剂对DOC测定含量的影响显著高于KCl试剂。产生这种现象的原因可能是不同土壤间的理化性质具有明显差异。最近的研究表明土壤对DOC的吸附能力取决于SOC含量和铁氧化物含量，二者呈现显著正相关关系[33]。本研究还发现在不同浸提剂条件下，土壤理化性质(pH、SOC和TN含量)均显著影响DOC测定含量，其重要度为17.31%~38.03%(图5)。

3.2 浸提温度和水土质量比对DOC测定含量和浸提率的影响

与室温(25 ℃)浸提相比，增加浸提温度使DOC测定含量和浸提率显著提高。在30~80 ℃范围内，DOC测定含量在48 ℃左右达到最大值，之后随温度增加逐渐减小，并在63 ℃左右达到最小值，随后继续增大(图3)。温度的升高加速了分子热运动，提高了溶解性有机物在滞膜层中的分子扩散速度[22,29]，进而增加了DOC的释放速率。当温度达到一定限度(50 ℃左右)后，温度升高会导致溶解性有机物发生絮凝作用，使其分子量增加、分子扩散系数降低，因而DOC释放速率也降低[21]。当温度继续升高(≥60 ℃)时，高温导致有机结构破坏、溶酶细胞水解，同时电离有机物质和无机胶体，使得DOC测定含量大幅提高[34]。

水土质量比对DOC测定含量和浸提率有重要的影响，与对照(≤2∶1水土比)相比，处理组(>2∶1水土比)的DOC测定含量和浸提率显著提升，增幅分别为79.7%和72.3%(图1和图2)；另外DOC测定含量随水土质量比的提高而增加(图4)。这可能是因为溶液中的离子浓度随水土质量比的增大而降低，使土壤孔隙中更多易解吸的DOC向水体中释放；而且水土质量比的提高会增强土壤颗粒的分散性，改变土壤与

DOC交换位点的有效性，导致与土壤结合能量低的DOC释放。此外，水土质量比的提高会打破DOC在土壤固液两相界面的吸附-解吸平衡，促进亲水性DOC释放，进而提升溶液中DOC的测定含量[21,35]。

4　结论

本研究采用Meta分析方法探究了DOC测定含量和浸提率对不同浸提条件的响应，结论如下：

（1）与去离子水作浸提剂相比，KCl和K_2SO_4浸提剂显著提高了DOC测定含量和浸提率，而$CaCl_2$浸提剂显著降低了DOC测定含量和浸提率。

（2）DOC测定含量随着浸提时间、浸提温度、土壤研磨粒径和水土质量比的增加而提高，且其提升幅度显著不同。

（3）土壤pH、SOC含量是影响DOC测定含量的主要因素，但不同浸提剂下各主控因素有所不同。

综上所述，浸提剂种类、浸提时间、浸提温度、水土质量比以及土壤性质均对DOC测定含量和浸提率有显著影响，在测定DOC含量时适宜采用KCl作为浸提剂，在室温条件（25~30 ℃）下浸提1 h。

参考文献：

[1] JONES D L, WILLETT V B. Experimental evaluation of methods to quantify dissolved organic nitrogen (DON) and dissolved organic carbon (DOC) in soil[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2006, 38(5): 991-999.

[2] DAVIDSON E A, TRUMBORE S E, AMUNDSON R. Biogeochemistry: Soil warming and organic carbon content[J]. *Nature*, 2000, 408(6814): 789-790.

[3] BOLAN N S, ADRIANO D C, KUNHIKRISHNAN A, et al. Dissolved organic matter: Biogeochemistry, dynamics, and environmental significance in soils[J]. *Advances in Agronomy*, 2011, 110: 1-75.

[4] LI M F, WANG J, GUO D, et al. Effect of land management practices on the concentration of dissolved organic matter in soil: A meta-analysis[J]. *Geoderma*, 2019, 344: 74-81.

[5] Al-REASI H A, YUSUF U, SMITH D S, et al. The effect of dissolved organic matter (DOM) on sodium transport and nitrogenous waste excretion of the freshwater cladoceran (*Daphnia magna*) at circumneutral and low pH[J]. *Comparative Biochemistry and Physiology Part C: Toxicology and Pharmacology*, 2013, 158(4): 207-215.

[6] ZHANG M, ZHANG H. Co-transport of dissolved organic matter and heavy metals in soils induced by excessive phosphorus applications[J]. *Journal of Environmental Sciences*, 2010, 22: 598-606.

[7] CHANTIGNY M H, HARRISON-KIRK T, CURTIN D, et al. Temperature and duration of extraction affect the biochemical composition of soil water-extractable organic matter[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2014, 75: 161-166.

[8] 姜培坤, 徐秋芳. 施肥对雷竹林土壤活性有机碳的影响[J]. 应用生态学报, 2005(2): 253-256. JIANG P K, XU Q F. Effects of fertilization on soil active organic carbon under *Phyllostachys praecox* stand[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2005(2): 253-256.

[9] CANCES B, PONTHIEU M, CASTREC-ROUELLE M, et al. Metal ions speciation in a soil and its solution: Experimental data and model results[J]. *Geoderma*, 2003, 113: 341-355.

[10] STROBEL B W. Influence of vegetation on low-molecular-weight carboxylic acids in soil solution: A review[J]. *Geoderma*, 2001, 99: 169-198.

[11] 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. LI Z P, JIAO K, WU D F. Soluble organic C content of paddy in subtropical China in relation to extraction conditions[J]. *Soils*, 2005, 37(5): 512-516.

[12] 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.

[13] HANEY R L, FRANZLUEBBERS A J, HONS F M, et al. Soil C extracted with water or K_2SO_4: pH effect on determination of microbial biomass[J]. *Canadian Journal of Soil Science*, 1999, 79(4): 529-533.

[14] BURTON J, CHEN C, XU Z, et al. Soluble organic nitrogen pools in adjacent native and plantation forests of subtropical Australia[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2007, 39(11): 2723-2734.

[15] CHANTIGNY M H, CURTIN D, BEARE M H. Influence of temperature on water extractable organic matter and ammonium production in mineral soils[J]. *Soil Science Society of America Journal*, 2010, 74(2): 517-524.

[16] CURTIN D, WRIGHT C E, BEARE M H, et al. Hot water-extractable nitrogen as an indicator of soil nitrogen availability[J]. *Soil Science Society of America Journal*, 2006, 70: 1512-1521.

[17] MARTINEZ C E, JACOBSON A R, MCBRIDE M B. Aging and temperature effects on DOC and elemental release from a metal contaminated soil[J]. *Environmental Pollution*, 2003, 122: 135-143.

[18] CHRIST M J, DAVID M B. Dynamics of extractable organic carbon in spodosol forest floors[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 1996, 28(9): 1171-1179.

[19] CHAPMAN P J, WILLIAMS B L, HAWKINS A. Influence of temperature and vegetation cover on soluble inorganic and organic nitrogen in a spodosol[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2001, 33(7/8): 1113-1121.

[20] 李太魁, 郭战玲, 寇长林, 等. 提取方法对土壤可溶性有机碳测定结果的影响[J]. 生态环境学报, 2017, 26(11): 1878-1883. LI T K, GUO Z L, KOU C L, et al. Effects of extraction conditions on the test results of soil dissolved organic carbon[J]. *Ecology and Environmental Sciences*, 2017, 26(11): 1878-1883.

[21] KAISER K, KAUPENJOHANN M, ZECH W. Sorption of dissolved organic carbon in soils: Effects of soil sample storage, soil-to-solution ratio and temperature[J]. *Geoderma*, 2001, 99(3/4): 317-328.

[22] LI S Q, ZHENG X H, LIU C Y, et al. Influences of observation method, season, soil depth, land use and management practice on soil dissolvable organic carbon concentrations: A meta-analysis[J]. *Science of*

the Total Environment, 2018, 631/632: 105-114.

[23] FENG J G, ZHU B. Global meta-analysis of soil respiration and its components in response to phosphorus addition[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2019, 135: 38-47.

[24] REN F L, ZHANG X B, LIU J, et al. A synthetic analysis of greenhouse gas emissions from manure amended agricultural soils in China [J]. *Scientific Reports*, 2017, 7(1): 8123.

[25] HAN X, CONG X, DUNGAIT J A J, et al. Straw incorporation increases crop yield and soil organic carbon sequestration but varies under different natural conditions and farming practices in China: A system analysis[J]. *Biogeosciences*, 2018, 15: 1933-1946.

[26] BREIMAN L. Random forests[J]. *Machine Learning*, 2001, 45: 5-32.

[27] QUALLS R G. Comparison of the behavior of soluble organic and inorganic nutrients in forest soils[J]. *Forest Ecology and Management*, 2000, 138(1/2/3): 29-50.

[28] RENNERT T, GOCKEL K F, MANSFELDT T. Extraction of water-soluble organic matter from mineral horizons of forest soils[J]. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science*, 2007, 170(4): 514-521.

[29] REEMTSMA T, BREDOW A, GEHRING M. The nature and kinetics of organic matter release from soil by salt solutions[J]. *European Journal of Soil Science*, 2010, 50(1): 53-64.

[30] MATLOU M C, HAYNES R J. Soluble organic matter and microbial biomass C and N in soils under pasture and arable management and the leaching of organic C, N and nitrate in a lysimeter study[J]. *Applied Soil Ecology*, 2006, 34(2/3): 160-167.

[31] 林滨, 陶澍, 刘晓航. 土壤与沉积物中水溶性有机物释放动力学研究[J]. 环境科学学报, 1997, 17(1): 8-13. LIN B, TAO S, LIU X H. Release kinetics of water soluble organic compounds from soil and sediments[J]. *Acta Scientiae Circumstance*, 1997, 17(1): 8-13.

[32] 杨小燕, 范瑞英, 王恩姮, 等. 浸提条件对黑土表层土壤溶解性有机碳浸提量的影响[J]. 北京林业大学学报, 2013, 35(5): 68-72. YANG X Y, FAN R Y, WANG E H, et al. Effects of extraction conditions on topsoil dissolved organic carbon concentration of black soil [J]. *Journal of Beijing Forestry University*, 2013, 35(5): 68-72.

[33] 梁远宇, 王小利, 徐明岗, 等. 长期不同施肥土壤对可溶性有机碳的吸附特征[J]. 植物营养与肥料学报, 2021, 27(11): 1915-1925. LIANG Y Y, WANG X L, XU M G, et al. Adsorption characteristics of dissolved organic carbon by soils under different fertilization models [J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizer*, 2021, 27(11): 1915-1925.

[34] NELSON P N, DICTOR M C, SOULAS G. Availability of organic carbon in soluble and particle-size fractions from a soil profile[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 1994, 26(11): 1549-1555.

[35] 林滨, 陶澍. 沉积物中水溶性天然有机物吸着系数的动态测定[J]. 地理科学, 1996, 16(2): 164-169. LIN B, TAO S. Determination of sorption coefficient of water-soluble organic matter in sediment[J]. *Scientia Geographica Sinica*, 1996, 16(2): 164-169.