

土壤溶解性有机碳在陆地生态系统碳循环中的作用*

李玲¹ 仇少君^{2**} 刘京涛¹ 刘庆¹ 陆兆华¹

(¹滨州学院山东省黄河三角洲生态环境重点实验室, 山东滨州 256603; ²中国农业科学院农业资源与农业区划研究所农业部植物营养与肥料重点实验室, 北京 100081)

摘要 土壤溶解性有机碳(DOC)是有机碳库的活跃组分,在陆地生态系统碳循环中发挥重要作用. 本文从碳循环重要性着手,综述了土壤DOC在土壤碳固持与温室气体排放中的作用;结合我国的现实情况(如土壤酸化、气候变暖等),探讨了土壤DOC的相关影响因素如土壤性质、环境因素、人为活动对土壤DOC的影响及作用机制,对进一步理解土壤DOC在陆地生态系统碳循环与温室气体减排中的作用具有重要意义.

关键词 溶解性有机碳 碳固持 碳排放 土壤

文章编号 1001-9332(2012)05-1407-08 **中图分类号** S153.6 **文献标识码** A

Roles of soil dissolved organic carbon in carbon cycling of terrestrial ecosystems: A review.

LI Ling¹, QIU Shao-jun², LIU Jing-tao¹, LIU Qing¹, LU Zhao-hua¹ (¹Shandong Province Key Laboratory of Eco-environmental Science for Yellow River Delta, Binzhou University, Binzhou 256603, Shandong, China; ²Ministry of Agriculture Key Laboratory of Plant Nutrition and Fertilization, Institute of Agricultural Resources and Regional Planning, Chinese Academy of Agricultural Sciences, Beijing 100081, China). -*Chin. J. Appl. Ecol.*, 2012, 23(5): 1407-1414.

Abstract: Soil dissolved organic carbon (DOC) is an active fraction of soil organic carbon pool, playing an important role in the carbon cycling of terrestrial ecosystems. In view of the importance of the carbon cycling, this paper summarized the roles of soil DOC in the soil carbon sequestration and greenhouse gases emission, and in considering of our present ecological and environmental problems such as soil acidification and climate warming, discussed the effects of soil properties, environmental factors, and human activities on the soil DOC as well as the response mechanisms of the DOC. This review could be helpful to the further understanding of the importance of soil DOC in the carbon cycling of terrestrial ecosystems and the reduction of greenhouse gases emission.

Key words: dissolved organic carbon; carbon sequestration; carbon emission; soil.

土壤碳库是陆地生态系统中最大的碳库,为大气碳库的3.3倍,陆地生物量的4.5倍^[1],其在维持全球碳平衡中具有重要作用. 土壤溶解性有机碳(dissolved organic carbon, DOC)是有机碳的活性组分,具有易流动、易分解、生物活性较高等特点,它既可以被矿质土壤吸附,也可以随土壤水分的运移而进入水体环境,从而参与更大范围的碳循环. 随着全球温室效应的日益加剧,特别是近年来泥炭地及河流中DOC含量呈明显升高趋势^[2-3],土壤DOC日益

引起土壤学、生态学和环境学界的高度关注. 当前,我国氮肥过量施用以及由此带来的土壤酸化^[4],气候变暖导致种植制度北界以及大气降水分布的变化^[5],城镇化建设不断加速而侵占大量农田以及土地整理带来土地利用方式的改变等,必将深刻地影响我国土壤有机碳和DOC的变化以及碳汇功能的发挥. 这些都要求我们加深对土壤DOC的认识和理解.

土壤DOC含量一般不超过土壤有机碳总量的2%^[6],但与较稳定的腐殖质组分相比,土壤DOC的降解速率较快^[7-8],并且对季节变化、土壤性质、施肥及土地利用方式等响应较快,是土壤有机碳矿化的中间环节^[9-10]和森林土壤碳损失的重要途径^[11],其含量和性质能够反映土壤有机碳的稳定性^[12],在

* 国家自然科学基金项目(41101220,41101277)、山东省优秀中青年科学家奖励基金项目(BS2011HZ001)、滨州学院博士基金项目(2008Y05,2006Y06)和中央级公益性科研院所基本科研业务费专项资金项目(2011-2)资助.

** 通讯作者. E-mail: shjunqiu@163.com
2011-07-10 收稿,2012-02-05 接受.

陆地生态系统碳循环中发挥重要作用.因此,本文从全球碳循环的角度,对土壤 DOC 在土壤碳素固持与温室气体释放中的作用及土壤 DOC 的主要内在和外在影响因素进行简要综述和探讨,并对土壤 DOC 研究进行初步展望.

1 土壤 DOC 的本质及测定

土壤 DOC 主要指土壤溶液中的溶解性有机碳组分或经过水、盐溶液等浸提剂获得的土壤中溶解性有机碳组分.土壤腐殖质、植物残体、根系分泌物及微生物的代谢产物是土壤 DOC 的重要来源^[13].按分子量大小,土壤 DOC 分为小分子有机酸、糖类、氨基酸等和大分子多糖、多肽等腐殖质组分^[13-14];按化合物的极性和电荷特性分为亲水酸性、中性和碱性以及疏水酸性、中性和碱性 6 种组分^[15].

土壤 DOC 的获取方法主要有破坏性采样法和非破坏性采样法.破坏性采样法是将土壤样品从田间原位取出,然后在实验室内获取土壤 DOC 样品,主要包括离心法、置换柱法、压榨法和提取法.非破坏性采样法指对土壤溶液进行田间原位采集,可以对作物生育期内土壤溶液中 DOC 进行动态监测,主要包括测渗计法(lysimeter)和吸杯法(suction cup),负压渗漏法或零压渗漏法是抽取土壤溶液的常用方法.

土壤 DOC 的测定主要侧重于结构测定和浓度测定.结构测定主要采用 XAD 离子交换树脂、荧光光谱、紫外光谱、红外光谱和核磁共振等手段,分析 DOC 的化学组成及其所包含的化学基团种类.浓度分析主要包括湿烧法和干烧法,湿烧法主要采用过硫酸钾氧化法,而干烧法指高温(>700 °C)氧化法.通过浓度分析量化土壤 DOC,进而比较不同生态系统的 DOC 特性以表征其在碳循环中的作用.

2 DOC 与土壤固碳

2.1 矿质土壤对 DOC 的吸附

DOC 随土壤水分由表层向下淋洗而被下层矿质土壤所吸附的过程是矿质土壤固碳的一个重要途径^[16-18],22%~25%的矿质土壤碳源于 DOC 的固定^[14,19].裸地、割草地、荒地和旱作耕地的下层土壤 DOC 占有有机碳的比例均高于表层土壤^[20],这与 DOC 随土壤水分迁移而被土壤固持密不可分.不同生态系统土壤 DOC 对碳库的累积作用不同,林地土壤 40 cm 土层以下以 DOC 形式被土壤固定的碳量占该层土壤每年碳输入量的 22%,而牧草地 20 cm

土层以下仅为 2%;林地 1 m 内土层 20% 的碳是由 DOC 运移和固定所造成,相应的牧草地只有 9%^[18].被吸附的 DOC 如果矿化较快,那么 DOC 对碳库的累积作用就会减小,但有证据表明,被吸附的 DOC 具有较长的残留时间:首先,这可能与矿质土壤溶液中 DOC 的生物有效性较低有关^[18];其次,被吸附的 DOC 可能是疏水组分,具有较高的稳定性^[21-22];第三,被吸附 DOC 的矿化速率随矿质土壤吸附时间的延长而逐渐降低.有报道显示,1 年培养期内灰化土 Oi 层和 Oa 层 DOC 的矿化率下降幅度达 23%~64%^[19].因此,矿质土壤 DOC 的吸附过程有利于有机碳的累积,特别是对下层土壤有机碳的累积可发挥更大作用,DOC 在增加矿质土壤碳储量方面具有重要意义.

DOC 随土壤水分下渗而进入水体,可导致土壤碳库的损失.特别是近年来泥炭地集水区 DOC 浓度明显升高,例如,美国北部溪水中 DOC 浓度在 1970—1990 年的监测期内增加 30%~80%^[23],英国 198 个湖区、水库和河流在 1961—2002 年的监测期内 DOC 浓度明显增加的监测区比例达 77%^[24].因此,应加强合理的土地管理措施,降低土壤 DOC 的淋洗损失,更好地发挥土壤的碳汇功能.

2.2 根际碳淀积

植物光合作用产生的 30%~60% 净光合产物分布于植物的地下部分,其中 40%~90% 以根系分泌物、植物粘液、腐烂根系的形式进入土壤^[25].这种通过根边缘细胞的脱落、粘液层粘液的分泌、根际可溶物的被动扩散以及根表皮、皮层细胞的衰老等方式,将根部的有机、无机化合物释放到周围土壤的过程称为根系碳淀积^[26],它是土壤有机碳形成的重要来源^[27].植物根系分泌的有机物主要有糖、氨基酸、有机酸等,它们都是土壤 DOC 的重要组成部分,且 DOC 浓度与根际生物量具有很好的正相关关系.有研究表明,种植水稻的土壤溶液中 DOC 浓度是不种植水稻的 4 倍多^[28];在植物生长旺盛的春、夏季,针叶林和阔叶林根圈土壤(距主根 50 cm 以内)DOC 含量高于非根圈土壤 13%~27%^[29].可见,根际区根系淀积的有机分泌物明显影响 DOC 含量.同位素脉冲技术的运用进一步定量了根系对土壤有机碳的贡献.黑麦草根系在试验 8 d 后输入土壤的碳量占 ¹⁴C 同化量的 8.2%~27.7%,生长结束时黑麦草根系输入到地下的碳量达 50~60 g C·m⁻²^[30];冬小麦生长期结束后通过根系进入土壤的碳量占 ¹³CO₂ 的 1%~2.4%,且整个生育期内冬小麦植株输入到

土壤的碳量为 $34 \sim 51.4 \text{ mg C} \cdot \text{株}^{-1}$ ^[31]. 但植物通过根系淀积有机小分子活化土壤矿质养分的同时, 也能活化土壤原有的有机碳, 土壤原有的有机碳受根系淀积有机碳的影响有多大, 它们又有多少能通过 DOC 的微生物同化重新固定到土壤有机碳中, 目前尚不清楚. 根际本身是一个有机物转化十分活跃的区域, 土壤 DOC 在“土壤-微生物-植物”的“根际对话”中发挥的作用有多大, 有多少进入生物再转化, 又有多少被土壤固持均有待进一步深入研究.

3 土壤 DOC 与温室气体排放

3.1 土壤 DOC 与 CO₂ 排放

土壤呼吸释放的 CO₂ 主要由土壤微生物和植物根系呼吸而产生. 土壤 DOC 作为微生物易于吸收利用的有机碳源, 其含量高低直接影响微生物活性; 另外, 由于根系分泌物是土壤 DOC 的来源之一, 植物根系呼吸影响根系分泌物的产生量. 可见, 土壤 DOC 的产生与土壤呼吸过程密切相关^[12, 32-34].

DOC 含量的差异可引起土壤释放 CO₂ 量的不同. 发育于第三纪红色砂岩、第四纪红色粘土和花岗岩的砂壤土、粘土和砂土释放 CO₂ 通量存在明显季节性差异, 55.8% ~ 84.4% 的可变性来自于 DOC, 其中每个季节 3 种土壤释放 CO₂ 通量差异亦显著, 23.8% ~ 33.6% 的可变性来自于 DOC^[32]. 农田和森林土壤释放 CO₂ 量与土壤 DOC 的初始含量具有极显著线性相关关系^[10-12], 有机碳矿化速率的动态变化与 DOC 含量的变化趋势一致^[10]. 山桦林土壤 DOC 的损失与土壤呼吸产生的 CO₂ 量亦呈极显著线性相关 ($r=0.79, P<0.001$)^[7]. 这说明土壤 DOC 是土壤释放 CO₂ 的重要贡献者, 其含量控制土壤释放 CO₂ 量, 因此 DOC 含量可作为衡量土壤释放 CO₂ 量的一个重要指标.

为了更好地探讨 DOC 在土壤有机碳矿化中的作用, 韩成卫等^[35] 通过去除 DOC 研究了红壤水稻土有机碳的矿化状况, 发现去除 DOC 后土壤有机碳的累积矿化量平均下降 15.4%. 添加植物残体后, 牧草地表层土壤释放的 CO₂ 量与 DOC 的变化量呈极显著正相关关系 ($r=0.96, P<0.01$), 培养期内土壤释放的 CO₂ 主要归咎于 DOC 的损失^[36]. ¹⁴C 同位素标记试验进一步证实, 在培养初期土壤释放的 CO₂ 主要来自标记底物的 DOC^[37]. 为了减少土壤释放 CO₂ 量, 应充分发挥土壤微生物对土壤 DOC 的同化功能, 促进土壤 DOC 向有机碳的转化和累积.

3.2 土壤 DOC 与 CH₄ 排放

CH₄ 是重要的温室气体, 其温室效应是 CO₂ 的 25 倍^[38]. 湿地是 CH₄ 的重要排放源, 占全球 CH₄ 排放通量的比例达 20% 左右^[39]. 小叶樟湿地底层土壤 CH₄ 产生量大于表层, 其原因主要是由表层淋溶到底层的 DOC 为产 CH₄ 菌提供了能源^[40]. 毛茛苔草沼泽湿地孔隙水中 CH₄ 浓度的剖面分布特征与 DOC 一致, 孔隙水 CH₄ 浓度与 DOC 浓度呈显著正相关^[41]. 也有研究表明, 苔藓泥炭沼泽土 DOC 含量虽然为泥炭沼泽土的 2 倍, 但泥炭沼泽土产 CH₄ 量却明显高于苔藓沼泽土. 这是因为苔藓泥炭沼泽土中有机物质分解较快, 分解产生有机酸的比例较大, 而有机酸可抑制 CH₄ 的生成^[42]. 这说明不仅 DOC 的数量, 而且 DOC 的质量在控制 CH₄ 的产生中都发挥着重要作用.

淹水稻田排放的 CH₄ 量占全球人类活动排放量的 15% ~ 20%^[43]. 免耕处理能显著降低晚稻土壤 CH₄ 的排放量. 其原因是免耕后土壤有机碳量增加, 移栽早稻前的耕作犁地活动使产 CH₄ 微生物所需的 DOC 量比较充足, 但随着早稻的生长, DOC 含量降低, 限制晚稻种植期内产 CH₄ 微生物的能量供应, 从而抑制 CH₄ 的排放^[43]. 稻鱼及稻鸭共生系统中, CH₄ 排放的季节性变化与土壤 DOC 浓度的变化保持一致, 相关分析表明, CH₄ 排放量与 DOC 浓度呈显著正相关关系, 且 CH₄ 排放量与 DOC 浓度的相关度明显高于土壤微生物生物量碳和总有机质^[44-46]. 因此, 为了降低稻田土壤释放的 CH₄ 量, 应加强合理的耕作管理措施, 控制土壤 DOC 的产生量. 但 DOC 与 CH₄ 排放的相互作用仍有待深入研究, 以期从机理方面阐明 DOC 如何控制 CH₄ 的排放.

4 土壤 DOC 的影响因素

土壤 DOC 能影响土壤微生物活性, 平衡土壤有机碳库从可溶性到固态的变化, 反映土壤有机碳的组成. 但是, 土壤 DOC 本身是活性较高的土壤有机碳, 它易受土壤自身性质、环境因素和人为活动的变化而发生明显改变, 如土壤 pH、土壤水分、气候变化、氮肥施用、种植制度和土地开垦等. 而以上这些因素都是我国在保持经济快速发展和保障粮食需求时出现和面临的现实问题, 并日益受到关注, 因此, 主要阐述上述因子对土壤 DOC 的影响及作用机制.

4.1 土壤性质

4.1.1 土壤 pH pH 是影响土壤吸附 DOC 的重要因

素,主要通过化学和生物学过程来实现^[47-48].有研究认为,pH 为 4.5~5.0 时,土壤对 DOC 的吸附量最大,在较高或较低 pH 下,DOC 的吸附量都有所下降^[49-50].添加石灰后森林土壤 DOC 的淋洗量明显升高^[51],这主要是因为高 pH 条件下土壤中含铁氧化物及氢氧化物的表面正电荷减少,对 DOC 的吸附能力减弱^[48].相关分析表明,土壤 DOC 含量与 pH 呈负相关关系^[29,47,51],低 pH 条件下土壤 DOC 含量增加的主要原因如下^[52]:1) 低 pH 可降低土壤微生物数量和活性;2) 低 pH 可增加土壤 DOC 与土壤位点的结合,但经过提取过程可以释放出来;3) 低 pH 可降低 DOC 的质量,如多酚含量增大,从而降低 DOC 的生物有效性;4) 低 pH 促使 DOC 与铝离子络合,增加 DOC 的拮抗力.

4.1.2 土壤湿度 土壤含水量直接影响根际和土壤微生物活性,从而影响土壤 DOC 含量^[32].多数研究表明,淹水能增加土壤 DOC 含量^[10,53-54],淹水后森林土壤 DOC 含量增加 60%~100%^[53-54].但也有研究表明,土壤风干后 DOC 含量为田间湿度条件下的 3~5 倍^[55-56],这可能是因为风干导致土壤微生物的死亡及团聚体结构的破坏,从而引起土壤活性碳组分含量增加,而湿润条件下较高的微生物活性使 DOC 的周转加快,导致 DOC 含量降低.

土壤的干湿交替过程明显影响土壤 DOC.经过两次风干、复水的循环后,土壤 DOC 含量增加 2~5 倍^[57].干湿交替 3 个月后,0~2 和 2~15 cm 土层 DOC 浓度都明显增加^[58].土壤干湿交替增加土壤 DOC 主要表现为两方面:1) 频繁的干湿交替破坏土壤结构,改变土壤的理化性质,促进土壤中非溶解性有机质与微生物的接触,加速其分解而增加土壤中可溶性有机物含量;2) 因为干燥过程中会引起微生物死亡,死亡的微生物产生大量的死细胞以及溶胞产物,当土壤再湿润时使 DOC 含量明显增加^[13,59].

4.2 环境因素

4.2.1 温度 温度升高加速土壤有机碳的矿化,同时促进土壤 DOC 的释放.一般认为,土壤 DOC 含量随着土壤温度的季节性上升和微生物活性的增强而增加^[60].例如,春、夏、秋季的土壤 DOC 含量高于冬季^[29,32,61];挪威低纬度地区(年均气温 5.5 °C)云杉林地土壤 DOC 含量明显高于高纬度地区(年均气温 1.2 °C)^[62];我国广西肯福样区(年均气温 19.9 °C)土壤 DOC 含量是湖南盘塘样区(年均气温 16.8 °C)的 1.8 倍^[6];德国巴伐利亚林地 Oi 层 DOC 浓度与温度显著相关,且 Oi 层、Oa 层、20 cm 土层 DOC 含

量均为 1998 年(年均气温 8.3 °C)高于 1997 年(年均气温 7.6 °C)^[63].这与较高温度延长植物的生长期,提高植物净初级生产力,增加植物生物量的形成速率,进而增加植物残体对土壤 DOC 的贡献密切相关.

但 Cookson 等^[64]对不同类型土壤进行室内培养试验发现,5 °C 条件下土壤 DOC 含量均明显高于 25 °C,较高培养温度下微生物数量的增加及土壤呼吸的增强可能导致 DOC 含量降低. Chow 等^[53]研究表明,3 种培养温度(10、20 和 30 °C)下土壤 DOC 含量相差不大,但整个培养过程中土壤有机碳的矿化量明显高于 DOC 的初始值,说明不仅 DOC 库而且土壤有机碳的其他库也参与了土壤有机碳的矿化.

4.2.2 CO₂浓度 自工业革命以来,大气中 CO₂浓度增加了 100 μL·L⁻¹以上^[38],是全球气候变暖和温度升高的主要贡献因素.鉴于土壤 DOC 在陆地生态系统碳循环中的作用,近几年,研究者开始关注 CO₂浓度升高对土壤 DOC 的影响.较多研究表明,CO₂浓度升高时,土壤 DOC 含量略有增加,但差异不显著^[65-66].CO₂浓度连续 4 年升高以后,5~10 cm 土层土壤溶液中 DOC 浓度基本不变^[67],同样说明 CO₂浓度升高对土壤溶液中 DOC 的影响较小.

水稻生长期,增加 CO₂浓度后表层(0~1 cm)和亚表层(1~10 cm)土壤 DOC 含量变化不大,但在厌氧且温度为 30 °C 的培养条件下,土壤 DOC 含量随着 CO₂浓度的升高明显增加^[9].英国 3 种湿地土壤 DOC 含量在增加 CO₂浓度条件下的增幅为 14%~61%^[2].这种变化主要是因为 CO₂浓度升高刺激植物的初级生产力,增强植物根系分泌物的产生量.但 Ellis 等^[68]对英国威尔士沼泽地的研究表明,升高 CO₂浓度后,土壤溶液中 DOC 含量降低 8.5%^[68].其原因可能是植物随着 CO₂浓度的升高刺激溶解性碳水化合物的产生,引起微生物生物量的增加,从而加速微生物对 DOC 的吸收利用,最终导致土壤 DOC 分解速度加快,使土壤 DOC 浓度降低.可见,CO₂浓度升高对土壤 DOC 的影响在不同地区并不一致,这可能与土壤类型、植被、地理位置和土壤有机碳含量高低等有关.因此,加强 CO₂浓度升高对不同地区不同类型土壤 DOC 影响的研究,能进一步了解土壤 DOC 含量的变化在全球碳循环中的作用,以及土壤 DOC 对 CO₂浓度升高的响应.

4.3 人为活动

4.3.1 氮肥施用 DOC 是活性有机质和土壤有机碳分解过程的中间产物,大量 DOC 的存在能促进氮肥

的固定,而氮肥施用的短时间内也能促进 DOC 含量的增加^[69],但在有机碳达到基本稳定时,施用氮肥并不能进一步提高土壤 DOC 含量^[69-70],长期的田间动态监测试验也证实了这一点^[71-72]。

林地不同土层土壤溶液中 DOC 浓度对氮肥的响应不同,15 cm 处 DOC 浓度变化不大,而 60 cm 处降低明显^[73]。这说明氮肥的施用一方面促进了 15~60 cm 土层对 DOC 的固持,另一方面增强了土壤微生物活性,加速了对活性碳组分的消耗。但增加氮沉降后林地土壤 DOC 淋失量的增加幅度达 30%^[74],其原因是 NO_3^- 沉积改变了矿质土壤的吸附能力,降低土壤有机质作为 DOC 的汇功能,进而减少了土壤有机质的形成。可见,氮肥的施用对 DOC 的影响并没有明确的结论,氮肥施用下土壤 DOC 的周转有待进一步深入研究。

4.3.2 种植制度 不同的种植制度短期内即可引起土壤 DOC 的改变,其主要受作物种植和作物残体分解的影响^[13]。绿肥-早稻-晚稻(或小麦-早稻-晚稻)种植制度下土壤 DOC 浓度高于小麦-水稻(或小麦/玉米间作水稻)种植制度^[75],高粱-小麦-大豆种植制度下土壤 DOC 含量明显高于小麦-大豆和大豆连作^[76],这主要与三熟制有较多植物残体投入有关。种植豆科植物或豆科植物参与轮作,土壤 DOC 含量通常会增加,增加幅度达 6~15 $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ ^[77]。其原因是豆科植物的生物固氮作用使其根和残茬的 C/N 较低,导致其分解较快^[78],从而提高了土壤 DOC 含量。但总体上关于不同种植制度对 DOC 影响的研究仍较缺乏。

4.3.3 土地开垦 随着全球人口数量和粮食需求的增加,大量的森林、草地、湿地和撂荒地被开垦为农田,加速了土壤有机碳的分解,引起土壤 DOC 含量的迅速减少^[79]。如草甸土壤开垦耕作 1 年后,土壤 DOC 含量仅为未开垦土壤的 45%,而且随着耕作年限的增加,DOC 含量逐渐减少^[79]。我国三江平原湿地耕作 1~15 年后,土壤 DOC 含量减少 55%~73%^[80]。甘肃高山区草地耕作 28 年后表层(0~10 cm)土壤 DOC 含量降低 40%,10~30 cm 土层降低 11%~16%^[81]。德国东北部的退化湿地土壤 DOC 含量明显低于保持较完整的湿地,且退化湿地土壤 DOC 的腐殖化程度较高^[82-83]。但我国亚热带区荒地开垦后短期内引起土壤 DOC 含量增加,经长期耕作后土壤 DOC 含量会降低^[84]。森林砍伐耕种玉米后,最初 7 年的土壤 DOC 含量升高 2~5 倍,但 30 年后土壤 DOC 含量降低 60%~70%^[85]。这说明土地开

垦过程扰动了土壤碳循环的进程,加速了活性碳库的周转速率。结构测定表明,未受扰动或扰动较小的土壤 DOC 的分子量较小,芳香族化合物数量较少,可利用性较高^[79],而一旦被开垦即可引起 DOC 的较快消耗。因此,在研究土壤肥力保持和培育的同时,深入探讨土壤 DOC 的含量及分子构成变化,能够进一步明确究竟有多少土壤 DOC 以及哪部分土壤 DOC 更能促进土壤有机碳的提高。

5 结 语

土壤 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,随着土壤在全球碳循环中发挥碳汇功能的作用日益明显,土壤 DOC 在碳循环中的作用也越来越受到重视。农田生态系统是受人类活动影响最强烈的生态系统,对维持全球碳平衡具有不可忽视的贡献,但目前国内外对农田生态系统土壤 DOC 的累积规律及其在碳循环中的作用研究相对较少。土壤 DOC 的作用机制研究大多是在室内培养条件下进行,这需要原位研究土壤 DOC 的含量、性质和质量,进而对室内培养条件下土壤 DOC 的作用机制进行验证。另外,土壤 DOC 的数量和质量以及源库转化对土壤性质、外源底物的质量和性质以及环境变化的响应机制,仍有待进一步深入研究。这些研究如果能结合当前最先进的分子和蛋白技术、同位素探针技术、光谱分析技术等创造性地鉴定土壤 DOC 本质以及在土壤有机碳矿化和固持中的作用,并结合模型从分子水平和全球碳循环角度有效地模拟和描述土壤 DOC 的功能及其源库转化特性,将更好地明确土壤 DOC 在碳循环中的作用。

参考文献

- [1] Lal R. Soil carbon sequestration impacts on global climate change and food security. *Science*, 2004, **304**: 1623-1627
- [2] Freeman C, Fenner N, Ostle NJ, *et al.* Export of dissolved organic carbon from peatlands under elevated carbon dioxide levels. *Nature*, 2004, **430**: 195-198
- [3] Wallage ZE, Holden J, McDonald AT. Drain blocking: An effective treatment for reducing dissolved organic carbon loss and water discoloration in a drained peatland. *Science of the Total Environment*, 2006, **367**: 811-821
- [4] Guo JH, Liu XJ, Zhang Y, *et al.* Significant acidification in major Chinese croplands. *Science*, 2010, **327**: 1008-1010
- [5] Yang X-G (杨晓光), Liu Z-J (刘志娟), Chen F (陈

- 阜). The possible effects of global warming on cropping systems in China. I. The possible effects of climate warming on northern limits of cropping systems and crop yields in China. *Scientia Agricultura Sinica* (中国农业科学), 2010, **43**(2): 329–336 (in Chinese)
- [6] Li L (李玲), Xiao H-A (肖和艾), Su Y-R (苏以荣), *et al.* Effects of land use on the content of soil dissolved organic carbon in the typical landscape units in subtropical red earth region. *Scientia Agricultura Sinica* (中国农业科学), 2008, **41**(1): 122–128 (in Chinese)
- [7] Andreasson F, Bergkvist B, Bååth E. Bioavailability of DOC in leachates, soil matrix solution and soil water extracts from beech forest floors. *Soil Biology and Biochemistry*, 2009, **41**: 1652–1658
- [8] Bu X, Ding J, Wang L, *et al.* Biodegradation and chemical characteristics of hot-water extractable organic matter from soils under four different vegetation types in the Wuyi Mountains, southeastern China. *European Journal of Soil Biology*, 2011, **47**: 102–107
- [9] Cheng W, Inubushi K, Yagi K, *et al.* Effects of elevated carbon dioxide concentration on biological nitrogen fixation, nitrogen mineralization and carbon decomposition in submerged rice soil. *Biology and Fertility of Soils*, 2001, **34**: 7–13
- [10] Li Z-P (李忠佩), Zhang T-L (张桃林), Chen B-Y (陈碧云). Dynamics of soluble organic carbon and its relation to mineralization of soil organic carbon. *Acta Pedologica Sinica* (土壤学报), 2004, **41**(4): 544–552 (in Chinese)
- [11] Gielen B, Neirynek J, Luyssaert S, *et al.* The importance of dissolved organic carbon fluxes for the carbon balance of a temperate Scots pine forest. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2011, **151**: 270–278
- [12] Zhao M, Zhou J, Kalbitz K. Carbon mineralization and properties of water-extractable organic carbon in soils of the south Loess Plateau in China. *European Journal of Soil Biology*, 2008, **44**: 158–165
- [13] Kalbitz K, Solinger S, Park JH, *et al.* Controls on the dynamics of dissolved organic matter in soil: A review. *Soil Science*, 2000, **165**: 277–304
- [14] Neff JC, Asner GP. Dissolved organic carbon in terrestrial ecosystems: Synthesis and a model. *Ecosystems*, 2001, **4**: 29–48
- [15] Leenheer JA. Comprehensive approach to preparative isolation and fractionation of dissolved organic carbon from natural waters and wastewaters. *Environmental Sciences and Technology*, 1981, **5**: 578–587
- [16] Hansson K, Kleja DB, Kalbitz K, *et al.* Amounts of carbon mineralised and leached as DOC during decomposition of Norway spruce needles and fine roots. *Soil Biology and Biochemistry*, 2010, **42**: 178–185
- [17] Schwendenmann L, Veldkamp E. The role of dissolved organic carbon, dissolved organic nitrogen, and dissolved inorganic nitrogen in a tropical wet forest ecosystem. *Ecosystems*, 2005, **8**: 339–351
- [18] Sanderman J, Amundson R. A comparative study of dissolved organic carbon transport and stabilization in California forest and grassland soils. *Biogeochemistry*, 2008, **89**: 309–327
- [19] Kalbitz K, Schwesig D, Rethemeyer J, *et al.* Stabilization of dissolved organic matter by sorption to the mineral soil. *Soil Biology and Biochemistry*, 2005, **37**: 1319–1331
- [20] Yu W-T (宇万太), Ma Q (马强), Zhao X (赵鑫), *et al.* Changes of soil active organic carbon pool under different land use types. *Chinese Journal of Ecology* (生态学杂志), 2007, **26**(12): 2013–2016 (in Chinese)
- [21] Ciglasch H, Lilienfein J, Kaiser K, *et al.* Dissolved organic matter under native Cerrado and *Pinus caribaea* plantations in the Brazilian savanna. *Biogeochemistry*, 2004, **67**: 157–182
- [22] Qualls RG. Biodegradability of dissolved organic from decomposing fractions of carbon leached leaf litter. *Environmental Science & Technology*, 2005, **39**: 1616–1622
- [23] Schindler DW, Curtis PJ, Bayley S, *et al.* Climate-induced changes in the dissolved organic carbon budgets of boreallakes. *Biogeochemistry*, 1997, **36**: 9–28
- [24] Worrall F, Harriman R, Evans CD, *et al.* Trends in dissolved organic carbon in UK rivers and lakes. *Biogeochemistry*, 2004, **70**: 369–402
- [25] Lynch JM, Whipps JM. Substrate flow in the rhizosphere. *Plant and Soil*, 1990, **129**: 1–10
- [26] Zhang F-S (张福锁), Shen J-B (申建波), Feng G (冯固), *et al.* Rhizosphere Ecology: Processes and Management. Beijing: China Agricultural University Press, 2009 (in Chinese)
- [27] Kuzyzkov Y, Simiagina SV. A novel method for separating root-derived organic components from root respiration in non-sterilized soils. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science*, 2001, **164**: 511–517
- [28] Lu Y, Watanabe A, Kimura M. Contribution of plant-derived carbon to soil microbial biomass dynamics in a paddy rice microcosm. *Biology and Fertility of Soils*, 2002, **36**: 136–142
- [29] Wang L-F (王连峰), Pan G-X (潘根兴), Shi S-L (石盛莉), *et al.* Dissolved organic carbon in soil solution of paludals udalfs in Mt. Lushan forest under impact of acid deposition. *Plant Nutrition and Fertilizer Science* (植物营养与肥料学报), 2002, **8**(1): 29–34 (in Chinese)
- [30] Kuzyakov Y, Kretschmar A, Stahr K. Contribution of *Lolium perenne* rhizodeposition to carbon turnover of pasture soil. *Plant and Soil*, 1999, **213**: 127–136
- [31] Qi X (齐鑫), Wang J-G (王敬国). Distribution and translocation of assimilated C pulse-labeled with ¹³C for winter wheat (*Triticum aestivum* L.), as affected by nitrogen supply. *Journal of Agro-Environment Science* (农业环境科学学报), 2008, **27**(6): 2524–2530 (in Chinese)
- [32] Lou Y, Li Z, Zhang T, *et al.* CO₂ emissions from subtropical arable soils of China. *Soil Biology and Biochemistry*, 2004, **36**: 1835–1842
- [33] Bengtson P, Bengtsson G. Rapid turnover of DOC in

- temperate forests accounts for increased CO₂ production at elevated temperatures. *Ecology Letters*, 2007, **10**: 783–790
- [34] Moore TR, Paré D, Boutin R. Production of dissolved organic carbon in Canadian forest soils. *Ecosystems*, 2008, **11**: 740–751
- [35] Han C-W (韩成卫), Li Z-P (李忠佩), Liu L (刘丽), *et al.* Influence of dissolved organic matter on transformations of carbon and nitrogen in paddy soils in subtropical China. *Ecology and Environment* (生态环境), 2006, **15**(6): 1300–1304 (in Chinese)
- [36] Marschner B, Kalbitz K. Controls of bioavailability and biodegradability of dissolved organic matter in soils. *Geoderma*, 2003, **113**: 211–235
- [37] Li L (李玲), Xiao H-A (肖和艾), Tong C-L (童成立), *et al.* Responses of active organic carbon in upland soil and paddy soil of red earth region to exogenous organic substrates: A laboratory incubation study. *Chinese Journal of Ecology* (生态学杂志), 2008, **27**(12): 2178–2183 (in Chinese)
- [38] Solomon S, Qin D, Manning M, *et al.* IPCC. Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge: Cambridge University Press, 2007
- [39] Aselmann I, Crutzen PJ. Global distribution of natural freshwater wetlands and rice paddies, their net primary productivity, seasonality and possible methane emission. *Journal of Atmosphere Chemistry*, 1998, **32**: 3257–3264
- [40] Ge R-J (葛瑞娟), Song C-C (宋长春), Yang G-S (杨桂生), *et al.* Effects of exogenous nitrogen on methane production from *Deyeuxia angustifolia* marsh in different plant growth phases. *Acta Scientiae Circumstantiae* (环境科学学报), 2010, **31**(10): 2070–2077 (in Chinese)
- [41] Yang W-Y (杨文燕), Song C-C (宋长春), Zhang J-B (张金波). Seasonal dynamics of dissolved organic carbon and nitrogen and correlativity between their concentration and methane flux in the freshwater marsh. *Acta Scientiae Circumstantiae* (环境科学学报), 2006, **26**(10): 1745–1750 (in Chinese)
- [42] Chanton JP, Bauer JE, Glaser PA, *et al.* Radiocarbon evidence for the substrates supporting methane formation within northern Minnesota peatlands. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 1995, **59**: 3663–3668
- [43] Li D, Liu M, Cheng Y, *et al.* Methane emissions from double-rice cropping system under conventional and no tillage in southeast China. *Soil and Tillage Research*, 2011, **113**: 77–81
- [44] Datta A, Nayak DR, Sinhababu DP, *et al.* Methane and nitrous oxide emission from an integrated rainfed rice-fish farming system of eastern India. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 2009, **129**: 228–237
- [45] Zhan M, Cao C, Wang J, *et al.* Dynamics of methane emission, active soil organic carbon and their relationship in wetland integrated rice-duck systems in Southern China. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, 2011, **89**: 1–13
- [46] Wang ZP, Lindau CW, Delaune RD, *et al.* Methane emission and entrapment in flooded rice soils as affected by soil properties. *Biology and Fertility of Soils*, 1993, **16**: 163–168
- [47] Li S-F (李淑芬), Yu Y-C (俞元春), He S (何晟). Correlation between dissolved organic carbon and soil factors the forest soil in southern China. *Journal of Zhejiang Forestry College* (浙江林学院学报), 2003, **20**(2): 119–123 (in Chinese)
- [48] Wang G-M (王良梅), Zhou L-X (周立祥). Dynamics of dissolved organic matter in terrestrial ecosystem and its environmental impact. *Chinese Journal of Applied Ecology* (应用生态学报), 2003, **14**(11): 2019–2025 (in Chinese)
- [49] Jardine PM, McCarthy JE, Weber NL. Mechanisms of dissolved organic carbon adsorption on soil. *Soil Science Society of America Journal*, 1989, **53**: 1378–1385
- [50] Yu Y-C (俞元春), He S (何晟), Li B-K (李炳凯), *et al.* The dissolved organic carbon (DOC) adsorption and its influence factor on the soil of Chinese fir plantation. *Journal of Nanjing Forestry University* (Natural Science) (南京林业大学学报·自然科学版), 2005, **29**(2): 14–18 (in Chinese)
- [51] Andersson S, Nilsson SI, Saetre P. Leaching of dissolved organic carbon (DOC) and dissolved organic nitrogen (DON) in mor humus as affected by temperature and pH. *Soil Biology and Biochemistry*, 2000, **32**: 1–10
- [52] Kemmitt SJ, Wright D, Goulding KWT, *et al.* pH regulation of carbon and nitrogen dynamics in two agricultural soils. *Soil Biology and Biochemistry*, 2006, **38**: 898–911
- [53] Chow AY, Tanji KK, Gao S, *et al.* Temperature, water content and wet-dry cycle effects on DOC production and carbon mineralization in agricultural peat soils. *Soil Biology and Biochemistry*, 2006, **38**: 477–488
- [54] Christ MJ, David MB. Temperature and moisture effects on the production of dissolved organic carbon in a spodosol. *Soil Biology and Biochemistry*, 1996, **28**: 1191–1199
- [55] Jones DL, Willett VB. Experimental evaluation of methods to quantify dissolved organic nitrogen (DON) and dissolved organic carbon (DOC) in soil. *Soil Biology & Biochemistry*, 2006, **38**: 991–999
- [56] Akagi J, Zsolnay Á, Bastida F. Quantity and spectroscopic properties of soil dissolved organic matter (DOM) as a function of soil sample treatments: Air-drying and pre-incubation. *Chemosphere*, 2007, **69**: 1040–1046
- [57] Merckx R, Brans K, Smolders E. Decomposition of dissolved organic carbon after soil drying and rewetting as an indicator of metal toxicity in soils. *Soil Biology & Biochemistry*, 2001, **33**: 235–240
- [58] Lundquist EJ, Jackson LE, Scow KM. Wet-dry cycles affect dissolved organic carbon in two California agricultural soils. *Soil Biology and Biochemistry*, 1999, **31**: 1031–1038

- [59] Wu J, Brookes PC. The proportional mineralization of microbial biomass and organic matter caused by air-drying and rewetting of a grassland soil. *Soil Biology & Biochemistry*, 2005, **37**: 507–515
- [60] Bonnett SAF, Ostle N, Freeman C. Seasonal variations in decomposition processes in a valley-bottom riparian peatland. *Science of the Total Environment*, 2006, **370**: 561–573
- [61] Kawahigashi M, Sumida H, Yamamoto K. Seasonal changes in organic compounds in soil solutions obtained from volcanic ash soils under different land uses. *Geoderma*, 2003, **113**: 381–396
- [62] Frcöberg M, Berggren D, Bergkvist B. Concentration and fluxes of dissolved organic carbon (DOC) in three Norway spruce stands along a climatic gradient in Sweden. *Biogeochemistry*, 2006, **77**: 1–23
- [63] Solinger S, Kalbitz K, Matzner E. Controls on the dynamics of dissolved organic carbon and nitrogen in a central European deciduous forest. *Biogeochemistry*, 2001, **55**: 327–349
- [64] Cookson WR, Osman M, Marschner P, *et al.* Controls on soil nitrogen cycling and microbial community composition across land use and incubation temperature. *Soil Biology and Biochemistry*, 2007, **39**: 744–756
- [65] Ross DJ, Tate KR, Newton PCD, *et al.* Carbon and nitrogen pools and mineralization in a grassland organic soil at a New Zealand carbon dioxide spring. *Soil Biology and Biochemistry*, 2001, **33**: 849–852
- [66] Li Z, Yagi K, Sakai H, *et al.* Influence of elevated CO₂ and nitrogen nutrition on rice plant growth, soil microbial biomass, dissolved organic carbon and dissolved CH₄. *Plant and Soil*, 2004, **258**: 81–90
- [67] Hagedorn F, Blaser P, Siegwolf R. Elevated atmospheric CO₂ and increased N deposition effects on dissolved organic carbon-clues from $\delta^{13}\text{C}$ signature. *Soil Biology and Biochemistry*, 2002, **34**: 355–366
- [68] Ellis T, Hill PW, Fenner N, *et al.* The interactive effects of elevated carbon dioxide and water table draw-down on carbon cycling in a Welsh ombrotrophic bog. *Ecological Engineering*, 2009, **35**: 978–986
- [69] Adams AB, Harrison RB, Sletten RS, *et al.* Nitrogen-fertilization impacts on carbon sequestration and flux in managed coastal Douglas-fir stands of the Pacific Northwest. *Forest Ecology and Management*, 2005, **220**: 313–325
- [70] Gregorich EG, Rochette P, Mcguire S, *et al.* Soluble organic carbon and carbon dioxide fluxed in maize fields receiving spring-applied manure. *Journal of Environmental Quality*, 1998, **27**: 209–214
- [71] McDowell WH, Magill AH, Aitkenhead-Peterson JA, *et al.* Effects of chronic nitrogen amendment on dissolved organic matter and inorganic nitrogen in soil solution. *Forest Ecology and Management*, 2004, **196**: 29–41
- [72] Sjöberg G, Bergkvist B, Berggren D, *et al.* Long-term N addition effects on the C mineralization and DOC production in mor humus under spruce. *Soil Biology and Biochemistry*, 2003, **35**: 1305–1315
- [73] Xu X, Han L, Luo X, *et al.* Effects of nitrogen addition on dissolved N₂O and CO₂, dissolved organic matter, and inorganic nitrogen in soil solution under a temperate old-growth forest. *Geoderma*, 2009, **151**: 370–377
- [74] Smemo KA, Zak DR, Pregitzer KS. Chronic experimental NO₃⁻ deposition reduces the retention of leaf litter DOC in a northern hardwood forest soil. *Soil Biology and Biochemistry*, 2006, **38**: 1340–1347
- [75] Ni JZ, Xu JM, Xie ZM, *et al.* Changes of labile organic carbon fractions in soils under different rotation systems. *Pedosphere*, 2004, **14**: 103–109
- [76] Dou F, Wright AL, Hons FM. Depth distribution of soil organic C and N after long-term soybean cropping in Texas. *Soil and Tillage Research*, 2007, **94**: 530–536
- [77] Chantigny MH, Angers DA, Prvost D, *et al.* Dynamics of soluble organic C and C-mineralization in cultivated soils with varying N fertilization. *Soil Biology and Biochemistry*, 1999, **31**: 543–550
- [78] Yang J-C (杨景成), Han X-G (韩兴国), Huang J-H (黄建辉), *et al.* The dynamics of soil organic matter in cropland responding to agricultural practices. *Acta Ecologica Sinica* (生态学报), 2003, **23**(4): 787–796 (in Chinese)
- [79] Zhang J-B (张金波), Song C-C (宋长春), Yang W-Y (杨文燕). Influence of land-use type on soil dissolved organic carbon in the Sanjiang Plain. *China Environmental Science* (中国环境科学), 2005, **25**(3): 343–347 (in Chinese)
- [80] Zhang J, Song C, Yang W. Effects of cultivation on soil microbiological properties in a freshwater marsh soil in Northeast China. *Soil and Tillage Research*, 2007, **93**: 231–235
- [81] Li X, Li F, Singh B, *et al.* Soil management changes organic carbon pools in alpine pastureland soils. *Soil and Tillage Research*, 2007, **93**: 186–196
- [82] Kalbitz K, Geyer S. Different effects of peat degradation on dissolved organic carbon and nitrogen. *Organic Geochemistry*, 2002, **33**: 319–326
- [83] Kalbitz K. Properties of organic matter in soil solution in a German fen area as dependent on land use and depth. *Geoderma*, 2001, **104**: 203–214
- [84] Li L (李玲), Zhu H-H (朱捍华), Su Y-R (苏以荣), *et al.* Effects of rice straw incorporation *in situ* and *ex situ* on soil organic C and active organic C in agricultural soils in red soil hilly region. *Scientia Agricultura Sinica* (中国农业科学), 2009, **42**(3): 926–933 (in Chinese)
- [85] Delprat L, Chassin P, Linéres M, *et al.* Characterization of dissolved organic carbon in cleared forest soils converted to maize cultivation. *European Journal of Agronomy*, 1997, **7**: 201–210

作者简介 李玲,女,1978年生,博士,讲师.主要从事土壤环境与生态研究. E-mail: lling7856@163.com

责任编辑 杨弘