

DOI: 10.13758/j.cnki.tr.2022.03.002

周悦, 褚克坚, 苏良湖, 等. 农艺措施对土壤可溶性有机质的影响研究进展. 土壤, 2022, 54(3): 437–445.

## 农艺措施对土壤可溶性有机质的影响研究进展<sup>①</sup>

周悦<sup>1,2</sup>, 褚克坚<sup>2\*</sup>, 苏良湖<sup>1</sup>, 王赛尔<sup>1</sup>, 张龙江<sup>1</sup>, 蔡金榜<sup>1</sup>, 程虎<sup>3</sup>, 纪荣婷<sup>1\*</sup>

(1 生态环境部南京环境科学研究所, 南京 210042; 2 河海大学环境学院, 南京 210024; 3 南京林业大学生物与环境学院, 南京 210037)

**摘要:** 土壤可溶性有机质(DOM)是土壤有机物中的高活性组分, 在土壤养分的生物地球化学循环、重金属和有机污染物的迁移转化、土壤矿物质的活化及土壤肥力的保持等过程中发挥着重要作用。农艺措施可通过内外源同步作用显著影响土壤 DOM 的含量、组分及性质, 本文综述了近年来相关研究中不同农艺措施下土壤 DOM 的变化, 总结了不同耕作管理、种植制度、施肥措施以及新型土壤改良剂等对土壤 DOM 的影响。分析表明, 免耕加秸秆覆盖方式可显著提高土壤 DOM 含量, 与单一耕作相比轮作可提升土壤 DOM 含量, 绿肥配施有机肥较单一化肥施用可显著改善土壤 DOM 的组成和结构, 合理调控热解炭和水热炭等土壤调理剂的施用时间、施用量、C/N 等性质可优化土壤 DOM 结构和性能。本综述分析了农艺措施对土壤 DOM 的影响效果及作用途径, 指出了当前的研究热点和难点, 并对未来研究方向进行了展望, 可为今后合理的农艺措施管理和土壤健康调控提供科学指导。

**关键词:** 农艺措施; 可溶性有机质; 耕作措施; 施肥; 土壤改良剂

中图分类号: S158.5 文献标志码: A

### Effects of Agronomic Measures on Soil Dissolved Organic Matter: A Review

ZHOU Yue<sup>1,2</sup>, CHU Kejian<sup>2\*</sup>, SU Lianghu<sup>1</sup>, WANG Saier<sup>1</sup>, ZHANG Longjiang<sup>1</sup>, CAI Jinbang<sup>1</sup>, CHENG Hu<sup>3</sup>, JI Rongting<sup>1\*</sup>

(1 *Nanjing Institute of Environmental Sciences, Ministry of Ecology and Environment, Nanjing 210042, China*; 2 *College of Environment, Hohai University, Nanjing 210024, China*; 3 *College of Biology and the Environment, Nanjing Forestry University, Nanjing 210037, China*)

**Abstract:** Soil soluble organic matter (DOM) is a highly active component of soil organic matter, which plays an important role in regulating the biogeochemical cycle of soil nutrient elements, the migration and conversion of heavy metals and organic pollutants, the activation of soil minerals and the maintenance of soil fertility. Agronomic measures can significantly affect the content and composition of soil DOM through the simultaneous effect of internal and external sources. Through analyzing the changes of soil DOM in recent years under different agronomic measures in the related studies, the effects of different tillage methods, planting systems, fertilization and new soil ameliorants on the physicochemical properties and biological components of soil DOM were summarized in this review. The results showed that no-tillage combined with straw mulching could significantly increase soil DOM content. Compared with single tillage, the rotation could significantly increase soil DOM content, besides, green manure combined with organic fertilizer could significantly improve soil DOM composition and structure compared with single chemical fertilizer application. Applying soil conditioners such as pyrolysis biochar and hydrochar at appropriate time, amount and C/N ratio could optimize structure and performance of soil DOM. Meanwhile, the effect and mechanism of agronomic measures on soil DOM and the hot spots and difficulties of current research were discussed, and the future research directions were proposed. This review can provide scientific guidance for the rational management of agronomic measures and soil health regulation in the future.

**Key words:** Agronomic measures; Dissolved organic matter (DOM); Tillage; Fertilization; Soil amendments

可溶性有机质(dissolved organic matter, DOM) 广泛存在于水体和土壤等自然环境中, 其中土壤 DOM 通常是指土壤中活体微生物和植物根系释放的及植物残渣和可溶性颗粒部分分解后产生的可溶性

①基金项目: 生态环境部南京环境科学研究所中央级公益性科研院所基本科研业务专项(GYZX210504, GYZX210101)资助。

\* 通讯作者(kejianc@hhu.edu.cn; jirongting@nies.org)

作者简介: 周悦(1997—), 女, 河南济源人, 硕士研究生, 主要研究方向为农林废弃物安全利用及其环境效应。E-mail: zhouy0520@163.com

有机物质<sup>[1]</sup>。DOM 是由低分子量的游离氨基酸、碳水化合物、有机酸以及大分子量的多糖和腐殖质等组成的连续体或混合体,主要包含亲水氧基、氮和硫族官能团等<sup>[2]</sup>。土壤 DOM 的主要成分包括溶解性有机碳(DOC)、溶解性有机氮(DON)、溶解性有机磷(DOP)和溶解性有机硫(DOS)等,各组分间通过疏水作用、氢键和非共价相互作用稳定,并积极参与土壤碳、氮、磷、硫等养分的地球化学物质循环<sup>[3-4]</sup>,是评价土壤质量的重要指标。

从来源看,土壤 DOM 分为两种:一种是土壤内源性的,通过土壤微生物降解土壤有机质产生,例如土壤腐殖质、植物凋落物、根系分泌物等<sup>[5]</sup>;另一种是外源进入土壤的,主要是通过施用化肥、有机肥、绿肥等农事活动以及作物秸秆还田带入土壤,例如有机粪肥、废弃物堆肥、作物秸秆等<sup>[6]</sup>。农艺措施可从内外源同时对土壤 DOM 组分、特性产生影响,并在后期土壤培肥过程中发挥关键作用。因此,本研究拟以耕作管理、种植制度、施肥管理和新型土壤改良剂等农艺措施对土壤 DOM 的影响为研究对象,通过分析不同农艺措施对土壤 DOM 含量、组分、特性的定量影响,以达到为今后农艺措施管理提供科学建议的目标。

## 1 土壤 DOM 的作用

土壤 DOM 仅占土壤有机质的一小部分,但其对土壤质量具有很强的指示性。DOM 在土壤聚集(形成有机金属络合物)、微生物的物质能量来源(碳源、氮源等)以及碳的储存、循环和有效养分供给等方面发挥着关键作用<sup>[7]</sup>。

研究土壤 DOM 的组成、含量及形态变化有助于更好地了解土壤碳氮循环及与之相关的地球生物化学过程。土壤 DOM 具有很强的溶解性,易通过土壤溶液转移<sup>[7]</sup>,大量 DOM 的转移可能会导致生态系统碳、氮收支方向的变化<sup>[8-11]</sup>。实际上,DOC 和 DON 在土壤总碳和总氮中的占比极低,一般不超过 2%,但其是土壤 DOM 中最具活力和生物有效性的组分<sup>[12]</sup>。其中,DOC 是土壤中微生物生长的主要能源物质,其含量和组分的变化直接影响微生物活性,进而改变土壤有机碳的矿化过程。研究表明,去除 DOM 后土壤有机氮的累积矿化量平均下降 15.4%<sup>[13]</sup>;而 DON 是土壤有机氮矿化和无机氮固定过程中重要的中间氮库,调控土壤铵态氮的供应和氮素的生物转化过程,是土壤有效养分的来源之一<sup>[14]</sup>。此外,土壤 DON 作为微生物的重要氮源,会抑制硝

化过程进而减缓硝态氮的产生,且其抑制程度随着 DOM 浓度的上升而增加,进一步影响土壤氮循环过程<sup>[15]</sup>。

DOM 可通过静电吸附、配体交换、络合、分配、氢键和阳离子桥联机制与土壤结合<sup>[16]</sup>,因此对土壤中的养分循环以及重金属和有机污染物的络合起到关键作用,源自土壤有机质的 DOM 可用于预测土壤中有有机、无机污染物的迁移转运过程<sup>[7]</sup>。由于含有羧基、羟基、巯基和甲氧基等活性基团,DOM 可作为重金属在土壤环境中迁移转化的“载体”或“配位体”,通过与重金属间的离子交换吸附、络合、螯合等一系列反应抑制或促进重金属在土壤中的吸附,影响重金属的沉淀、迁移转化和生物有效性,进一步影响生态环境安全和人类健康<sup>[17]</sup>。此外,DOM 中的羧基、酚类等酸性官能团可与部分重金属络合形成复合物,进而降低其植物毒性<sup>[18]</sup>。郭微等<sup>[17]</sup>研究发现,DOM 对重金属的影响主要包括以下方面:①改变土壤理化性质(如 pH 等);②DOM 自身组分等性质对土壤重金属吸附的影响;③通过络合和螯合作用,将重金属固定在土壤中。在实际土壤环境中,DOM 对重金属的影响机制要更为复杂,例如 Laurent 等<sup>[19]</sup>研究表明,DOM 浓度、芳香性和结合性的升高有助于提高土壤溶液中 Cu 的浓度,但可降低 Cu<sup>2+</sup> 活性,进而部分抵消土壤 Cu 含量升高带来的危害。

土壤 DOM 可增强土壤供肥能力,一是提高土壤养分的有效性,DOM 中的有机酸等组分可活化土壤矿物质,增强土壤微生物活性;二是 DOM 可促进植物对营养元素的吸收,例如促进作物根系对 Fe、Zn 等元素的吸收,从而提高作物产量,已有研究证实外源 DOM 施用可提高水稻植株的株高、根长、茎重等生长指标<sup>[20]</sup>;此外,DOM 容易被土壤微生物分解,因此其可通过激发土壤微生物活性,进一步提高微生物对土壤养分的吸收利用<sup>[7]</sup>。

## 2 农艺措施对土壤 DOM 的影响

土壤 DOM 易受到气候条件、耕作管理条件、土壤类型和土壤性质等多种因素影响<sup>[21]</sup>。其中,农艺措施是自然和人类活动的相互作用对农田土壤理化性质影响的综合过程,不同的农艺措施对土壤 DOM 可产生不同影响。

### 2.1 耕作管理对土壤 DOM 的影响

耕作管理可通过改变土壤有机质的输入和底物质量以及微生物降解的速率、程度和途径,进而影响土壤 DOM 的含量和性质<sup>[5]</sup>。

申军强等<sup>[22]</sup>通过田间试验发现,免耕加秸秆覆盖处理下土壤 DON 含量较常规施肥提高了 28.2%,表明该处理可显著提高土壤有机氮的矿化潜力,进而满足作物的氮素营养需求。对比不同耕作方式发现,传统翻耕显著降低了土壤 DOM 含量;随着耕作时间的持续,土壤 DOM 含量下降日益显著。这可能是由于翻耕影响了土壤结构的稳定性,导致有机碳难以固定到土壤中<sup>[23]</sup>,而免耕可减少对土壤的扰动来降低土壤碳、氮的矿化速率,降低有机质分解速率,进而有助于土壤 DOM 含量的增加<sup>[24-25]</sup>。张常仁等<sup>[26]</sup>在黑土玉米连作试验中验证了不同深度土壤 DOM 对耕作措施的影响,各土层土壤间 DOC 和 DON 含量差异显著,尤其在表层土壤表现更为明显;在免耕处理下,表层土壤 DOC 含量相较于传统耕作增加了 25.4%~27.8%,而 DON 含量在各耕作处理间变化不显著。刘霞娇等<sup>[27]</sup>研究也表明长期耕作扰动会增加土壤 DOM 淋失,导致土壤有机质的持续损失,同时也会增加氮素流失和水体污染风险。

地膜覆盖技术能够改变土壤温度和水分等条件,在我国北方寒旱区广泛应用。土壤 DOM 本身易受到温度、水分等条件变化影响,因此地膜覆盖对土壤 DOM 也会产生较大影响。在武佳颖等<sup>[28]</sup>试验中,覆膜处理降低了土壤 DOM 中芳香性和低络氨酸类蛋白质组分的占比,增加了腐殖化程度,提高了类富里酸和微生物代谢产物占比。原因可能是覆膜能够增加土壤水分并升高土壤温度,进而促进了土壤 DOM 的转化<sup>[3]</sup>。同时根据使用地膜颜色的不同,土壤 DOM 变化又呈现出不同的变化趋势,白色地膜由于透光性强,易于促进 DOM 的光解,此类地膜覆盖下土壤类腐殖酸组分增加较明显,腐殖化程度增加;黑色地膜覆盖下水分含量高,土壤中类富里酸组分增加明显,芳香性更强<sup>[28]</sup>。

总的来说,相比传统翻耕模式,免耕加秸秆覆盖等保护性措施可显著提高土壤 DOM 含量进而改善土壤肥力。地膜覆盖可通过调节土壤温度和水分状况来影响土壤 DOM 的含量与性质。但由于各试验的背景条件不同,受自然环境等不同因素驱动影响,具体的研究结果间仍存在较大差异,不同耕作管理措施间的交互作用影响及对土壤 DOM 作用程度的量化研究仍有待进一步加强。

## 2.2 种植制度对土壤 DOM 的影响

Li 等<sup>[29]</sup>通过 Meta 分析发现与未种植作物处理相比,种植作物显著提升了土壤 DOM 含量。与单一栽培相比,轮作可显著提高土壤 DOM 含量<sup>[30]</sup>,且轮作

方式改变了植物凋落物、根系分泌物等的数量和种类,进而改变土壤 DOM 的来源,影响了土壤有机碳的固定过程及微生物的活性,使得 DOM 的组成和性质随之改变。

土壤 DOM 的含量与性质对不同作物种植类型的响应也有所不同。李瑞鑫<sup>[20]</sup>研究表明不同种植模式下土壤 DOC 含量介于 71.6~179.6 mg/kg,土壤 DOP 含量介于 0.8~11.0 mg/kg,变异度较大。其中,设施蔬菜种植模式更有利于提高土壤 DOM 含量,而燕麦地和青贮玉米地中土壤 DOM 腐殖化程度较低,易被降解,试验中不同种植类型土壤 DOM 含量顺序为:设施菜地>露地菜地>马铃薯地>青贮玉米地>草地>燕麦地,其原因可能是设施菜地的高肥高水模式,增加了土壤 DOM 中大分子类腐殖酸的含量,而低肥低水的燕麦地则相反,促进了土壤 DOM 中小分子类蛋白质和富里酸含量增加。黄慧<sup>[31]</sup>通过田间试验研究了桃园、玉米地、葡萄园、蔬菜地 4 种土地利用方式下土壤 DOM 的时空变化,不同土地利用方式下土壤 DOM 含量差异明显,例如 7 月份土壤整个剖面层 DOC 的平均含量顺序为:玉米地(48.3 mg/kg)>桃园(41.4 mg/kg)>葡萄园(23.2 mg/kg)>蔬菜地(19.6 mg/kg)。这一结果随着季节变化和土层的深度均会发生较大改变。这可能是由于作物种植类型的改变,营养物质的输入发生变化,影响了土壤的理化性质,进而导致土壤微生物活动和养分转化过程的变化<sup>[8]</sup>。此外,由于不同作物生长期所需养分的不同,施肥种类和施肥量的改变也进一步导致了土壤 DOM 含量的显著差异。但上述结果也易受到不同耕作及施肥方式的影响,如何准确分析不同种植制度对土壤 DOM 的影响及作用过程,仍需进一步探明。

## 2.3 施肥措施对土壤 DOM 的影响

施肥作为重要的农艺措施,是影响土壤 DOM 的关键因素(表 1)。目前主要施肥方式包括单施化肥、有机肥、绿肥,以及不同肥料的组合施用,各外源肥料的施用均可改变土壤 DOM 的含量和性质,其中以单一施用有机肥对土壤 DOM 的提升效果最为显著<sup>[27]</sup>。研究表明,施肥对土壤 DOM 的影响主要表现在两个方面,一是外源肥料施用是土壤 DOM 的重要来源,另一方面施肥可通过影响土壤微生物活动及作物根系生长而加剧耕层土壤 DOM 的消耗和分解,进而影响 DOM 的含量和性质<sup>[32]</sup>。

化肥处理主要通过影响土壤微生物活性及作物生长而影响土壤 DOM 的含量及结构。王萍<sup>[33]</sup>在灰漠土中研究表明,与不施肥相比,只施用化肥后土壤

表 1 不同施肥措施对土壤 DOM 的影响  
Table 1 Effects of different fertilization on soil DOM

施肥分类	文献来源	主要化学组分		荧光组分				特性			主要物质	
		DOC	DON	类富里酸	类络氨酸	类腐殖酸	类蛋白质	腐殖度	芳香度	疏水性	糖、醇及羧酸类物质	酰胺类物质
化肥	[34, 36-38]	↑ <sup>[34]</sup> ↓ <sup>[36]</sup>	a+182.0%	↑		↑						↑
绿肥	[37-38, 40]	a+16.0% <sup>[37]</sup> a+29.0%	a+257.0%	↑								↑
化肥+绿肥	[38]		↑					↑				
商业有机肥	[37-38]	a+37.0%	a+334.0%					↑	↑			
粪肥	[20]			↓	先↑后↓	↑	先↑后↓	↑				
化肥+粪肥	[22, 34]	a+29.7% <sup>[22]</sup>	a+41.3% <sup>[22]</sup> b+27.5% <sup>[34]</sup>	↑				↑	↑	↑		
秸秆有机肥	[26, 39-42]	先↓后↑	↑	↑		↑			↑		↓	
化肥+秸秆有机肥	[5, 34]	b+72.5%						↑	↑	↑		
沼液有机肥	[44, 46]					↑						

注: a 表示不施肥情况下的标准值, b 表示单施化肥情况下的标准值; ↑ 表示施肥处理后的该组分较不施肥处理显著增加, ↓ 表示施肥处理后的该组分较不施肥处理显著下降。

DOM 主要组分仍是类富里酸物质, 其中胡敏酸类物质显著增加, 而类蛋白质组分逐渐消失, 得出无机肥施用会简化土壤 DOM 荧光物质结构的结论。其原因可能是土壤矿物和微生物间的相互作用对土壤 DOM 影响较大, 长期施肥显著改变了 DOM 中  $\text{Ca}^{2+}$ 、 $\text{Fe}^{3+}$ 、 $\text{Al}^{3+}$  的浓度, 而这些离子与 DOM 的相互作用又会进一步影响 DOM 的稳定过程<sup>[33]</sup>。谢军等<sup>[34]</sup>在中性紫色水稻土中的研究表明, 与不施肥处理相比, 长期施用氮磷钾肥可在一定程度上提高 0 ~ 40 cm 土层 DOM 含量, 但增幅明显低于氮磷钾配施秸秆或有机肥处理, 其原因可能是缺乏有机物料的投入, 秸秆或有机肥在腐熟过程会释放 DOM, 同时激发微生物活性。对于 DON, 有关研究表明土壤 DON 的含量和氮肥施用量呈正相关<sup>[35]</sup>, 这与土壤氮素矿化能力有关, 通过降低 C/N, 促进微生物在分解有机质过程中的养分释放, 进而增加土壤中有效氮的含量<sup>[34]</sup>。也有部分研究结果表明化肥施用会降低土壤 DOM 含量, 其原因可能与不同区域土壤类型、环境条件以及化肥种类有关。倪进治等<sup>[36]</sup>研究表明, 免耕条件下, 与不施肥相比, 单施化肥处理土壤 DOM 下降了 15.3%, 其原因可能与氮肥施入有关, 过量的氮肥施用促进了微生物的繁殖, 该过程中消耗了大量碳源, 进而导致了土壤 DOM 的降低。<sup>13</sup>C 核磁共振图谱分析表明, 单施化肥、不同用量化肥配施秸秆等处理下土壤 DOM 中 C 的结构均主要以碳水化合物

C、羧基 C 和长链脂肪 C 组成<sup>[36]</sup>。不同施肥处理下 DOM 中碳水化合物 C 的相对含量均最高, 约为 DOM 总量的 1/3; 其次是羧基 C 和长链脂肪 C; 酚 C 占 DOM 的百分含量最低, 不足 4%。氮磷钾处理下土壤 DOM 中的碳水化合物 C 含量最高, 碳水化合物 C 易被微生物分解利用, 因此该施肥处理下土壤 DOM 的含量最低<sup>[37]</sup>。

与化肥相比, 施用绿肥和有机肥后, 土壤 DOM 含量的增加更为明显。常单娜<sup>[37]</sup>研究表明, 种植绿肥后, 土壤 DOC 含量较不施肥处理增加了 29%, DON 含量增加了 257%, 并显著影响了土壤 DOM 中糖、醇及羧酸类物质组分的含量。与施用秸秆和有机肥不同, 绿肥可作为种植模式纳入到农田生态系统中, 其在生长过程中分泌的根系分泌物也是土壤 DOM 的重要来源之一。豆科绿肥的高固氮性能使其含氮量远大于一般的农作物秸秆和有机肥, 这部分氮被微生物固定后成为土壤 DOM 的重要来源。与周国朋等<sup>[38]</sup>研究结果相一致, 土壤 DOC 含量的增长均与绿肥的 C/N 呈负相关, 种植前翻压绿肥各处理土壤 DOC 含量均较高, 其中紫云英+60% 化肥、紫云英+80% 化肥、紫云英+100% 化肥 3 种处理下的 DOC 含量呈逐步上升趋势, 即随着配施化肥量的增加, 土壤 C/N 逐渐下降, 土壤 DOC 含量逐渐增加。

长期施用有机肥会显著增加土壤中 DOM 的含量<sup>[19]</sup>, 常单娜<sup>[37]</sup>试验结果也验证了这一结论, 有机

肥处理后土壤中的 DOC 含量增加了 37%, DON 含量增加了 334%。李瑞鑫<sup>[20]</sup>通过试验对比了不同用量猪粪有机肥对土壤 DOM 含量及其组分的影响,结果表明随着有机肥用量的增加土壤 DOC 和 DOP 含量均呈上升趋势。荧光和紫外光谱参数分析结果表明,随着有机肥用量的增加,土壤 DOM 中类腐殖酸组分呈上升趋势,类蛋白组分呈先升后降趋势,土壤 DOM 腐殖化程度呈增加趋势,芳香性下降,土壤腐熟程度呈抛物线型变化,表明过量施用有机肥会增加土壤中大分子有机物含量,降低土壤供肥能力和微生物活性;总体来看,当土壤有机肥用量为 16 t/hm<sup>2</sup> 时,土壤 DOM 中的腐殖质类物质组分含量较多且土壤腐熟度最高,土壤肥力最佳。化肥配施绿肥和有机肥,通常可达到更好的效果。在周国朋等<sup>[38]</sup>研究中,绿肥配施全量化肥可使黄泥土中 DON 含量显著提高,原因可能是较高的化肥用量提供了微生物氮源,从而提升了土壤固氮能力;绿肥配施化肥也提高了土壤 DOM 的分子量和腐殖化程度,这可能是其促进了土壤中高稳定性有机质的进一步活化、降解。在大蒜种植试验中,申军强等<sup>[22]</sup>研究表明有机倍增(双倍牛粪配施化肥)处理下土壤 DOC 含量最高,达 53.9 g/kg,相对不施肥组增加了 29.7%。谢军等<sup>[34]</sup>通过长期试验研究了不同施肥模式对土壤 DOM 含量及其结构特征的影响,在 0~20 cm 土层,相比单施化肥,化肥配施秸秆和猪粪有机肥处理下土壤 DON 含量分别增加了 72.5% 和 27.5%,两种处理下土壤 DOC 含量的增加幅度也较大,表明长期化肥配施秸秆或有机肥能够显著提高土壤 DOM 的含量。相比 20~40 cm 和 40~60 cm 土层,0~20 cm 土层土壤 DOM 含量对不同施肥模式最为敏感,其主要原因是有机物料的腐熟过程主要发生在耕层,且有机物料的投入增加了根际微生物的活性<sup>[32]</sup>。从紫外-可见吸收光谱来看,在 0~20 cm 表层土壤中,化肥配施秸秆和有机肥均能显著提高土壤 DOM 的共轭结构和腐殖化程度,增加紫外光谱吸收值(SUVA<sub>254</sub>, SUVA<sub>260</sub> 和 SUVA<sub>280</sub>)及吸收系数  $\alpha_{355}$ ,降低吸光度比值( $\alpha_{250}/\alpha_{365}$ ),表明该土层 DOM 分子的芳香度、疏水性和分子量增加,且不同土层的紫外光谱指数 A<sub>300</sub>/A<sub>400</sub> 值均大于 3.5,表明该处理下土壤 DOM 主要以富里酸为主。

秸秆还田也在一定程度上促进了土壤 DOM 含量的增加。张常仁等<sup>[26]</sup>认为这与秸秆周围形成的土壤微生物活动层有关,外源秸秆的输入在增加土壤可利用碳源的同时激发了微生物对氮源的需求,尤其是

秸秆际区域。朱利霞<sup>[39]</sup>认为秸秆施用提高了土壤中碳的周转速率,促进了土壤有机质的更新,同时显著降低土壤氮的潜在气态损失,增加土壤氮含量。Gao 等<sup>[40]</sup>研究发现随着小麦秸秆的分解,土壤 DOM 组分的分子量降低,而亲水性组分的分子量增加。Dilling 和 Kaiser<sup>[41]</sup>研究表明,在凋落物降解后期,土壤 DOM 组分中芳香族化合物和木质素化合物的组分含量增加。根据王瑞<sup>[42]</sup>试验结果,施加秸秆的水稻土在培养前期(初始 5 d 内),土壤 DOC 浓度急剧降低至 20 mg/kg 左右;培养中期(5~25 d),DOC 浓度在 20~40 mg/kg 波动;培养后期(25 d 后),土壤 DOC 浓度缓慢增加。培养初期,土壤 DOC 浓度急剧降低的原因可能是微生物活性的恢复,开始大量消耗 DOC 用于自身生长繁殖,达到峰值后开始小范围波动;后期上升可能是因为秸秆施用后,其在微生物的作用下,分解释放 DOM,这其中一部分与类蛋白质物质作用并转化为较为稳定的类胡敏酸和富里酸物质<sup>[26]</sup>。

沼液作为有机肥应用是一种具有潜力的畜禽粪便污水资源化方法。研究表明,猪沼液中含有大量营养物质,可作为肥料施入农田以改善养分吸收和土壤结构,降低施肥成本<sup>[43]</sup>,同时增加土壤中有机质的含量,特别是 DOM<sup>[44]</sup>。然而过量施用猪沼液也存在着潜在风险<sup>[45]</sup>,因此施用时需合理控制用量。Yan 等<sup>[44,46]</sup>的试验表明,猪沼液的施用显著提高了土壤中 DOM 的含量,腐殖质类物质和蛋白质类物质的含量均有所增加,其中以蛋白质类物质含量的增加最为明显。随着时间的推移,DOM 浓度降低,腐殖质占比呈先升后降的趋势,蛋白质类物质比例下降。土壤 DOM 中分子结构简单、分子量较低的蛋白质类组分被转化为分子结构更复杂、分子量更高的腐殖质类组分,这些腐殖质也可被微生物利用。对比不同 C/N 沼液的施用效果,C/N 为 12 的沼液对土壤 DOC 和荧光溶解有机物(FDOM)含量的提高幅度最大,分别为 40.9% 和 66.3%,而 C/N 为 8.8 的沼液对玉米生长、土壤腐殖化、FDOM 的生物有效性和蛋白质类组分的转化利用促进作用最强。

综合来看,绿肥和有机肥具有成本低廉、可循环利用、种类丰富等优点,对提高土壤 DOM 含量和改善土壤肥力具有重要作用,然而目前研究主要聚焦于 DOM 含量与性质的变化效果,对于微生物-植物-有机肥的耦合作用机制研究较少。此外,分析技术上,基于新兴的质谱技术进行分子水平的机制研究较少。

## 2.4 新兴土壤改良/修复剂(热解炭、水热炭等)对土壤 DOM 的影响

近年来,生物质炭由于其在土壤改良方面的优异效果引起了广泛关注,根据制备过程可将其分为热解炭和水热炭<sup>[47]</sup>。研究表明,热解炭可改变土壤中 DOM 的组成,直接或间接地控制了土壤重金属等污染物的移动性与生物蓄积性,在土壤环境应用中表现了巨大潜力<sup>[48]</sup>。水热炭可高效炭化湿生生物质,制备过程环保无毒、能耗低,在土壤改良与修复等方面也表现了广阔的应用前景<sup>[49]</sup>。热解炭和水热炭本身作为外源有机物,尤其是水热炭携带大量的 DOM,其施入土壤中可直接改变土壤 DOM 的含量和组成;另外由于其具有较大的比表面积、丰富的表面官能团、较高的疏水性等,是良好的环境吸附剂,对土壤 DOM 等各类化合物具有较好的吸附潜能<sup>[50]</sup>。因此,研究热解炭、水热炭等新型土壤改良剂对土壤 DOM 的影响,可为其科学施用提供指导。

Zhang 等<sup>[51]</sup>试验结果表明,在相同的施肥条件下,添加热解炭显著提高了土壤 DOM 的含量,其中 DOC 的平均浓度从 84.0 mg/kg 上升到 144.3 mg/kg,主要包含类黄腐酸、类腐殖酸和类色氨酸 3 种成分,这些成分(尤其是类腐殖酸)的荧光强度随着热解炭添加量的增加而增强。热解炭通过将其易矿化和可提取部分炭释放到土壤溶液中,并将天然土壤有机质吸附到其孔隙结构中改变土壤 DOM 组成。林颖等<sup>[52]</sup>与李瑞鑫<sup>[20]</sup>的试验研究验证了热解炭的长期施入会显著改变农田土壤 DOM 组分,其总体变化趋势为大分子量腐殖酸类物质不断增加,而小分子量蛋白质物质逐渐减少。刘杰云等<sup>[53]</sup>研究中也提到,热解炭本身携带的部分 DOC 及其高 pH,导致其施入到不同类型农田土壤后,土壤 DOC 含量均有 4.4%~35.5% 的增幅,但土壤 DON 含量显著降低,这可能是热解炭消耗掉自身 DON 后,又将土壤环境中的 DON 吸附到自身孔隙中,同时土壤微生物在有机碳分解过程中对 N 的消耗降低了土壤 DON 含量,这与芮绍云等<sup>[54]</sup>研究结果一致。Smebye 等<sup>[55]</sup>研究表明,利用热解炭进行土壤改良可促进土壤中 DOM 的释放,例如在酸性棕壤中施入果壳热解炭后,土壤 pH 从 4.9 升高至 8.7,土壤 DOC 浓度增加了 15 倍,且土壤 DOM 的组成向芳香度更高的方向发展,这一变化可能是由于热解炭中微孔中发生的尺寸排阻效应所致,较小的脂肪族 DOM 比分子量较大的芳香族分子更容易吸附到热解炭上,而芳香族分子较大而无法进入微孔,导致

土壤 DOM 的芳香度更高。郑翔宇<sup>[56]</sup>通过连续 5 a 热解炭田间施用试验发现,施用初期,25.0、75.0 和 125.0 t/hm<sup>2</sup> 热解炭添加组土壤 DOC 浓度较未添加组分别增加 2.0%、30.2% 和 38.0%,表明低剂量热解炭对土壤 DOC 含量影响不大,而大剂量热解炭施用可显著提高土壤 DOC 浓度;连续施用 5 a 后,各处理 DOC 浓度接近,热解炭的长期效应主要体现在对土壤 DOM 荧光组分的影响。根据 SUVA<sub>254</sub> 和 S<sub>R</sub> 值的变化可以发现,热解炭添加后,相比未添加组土壤 DOM 中富里酸和类色氨酸的降低速度较慢;而 BIX 值随时间逐渐降低,DOM 自生源贡献降低,说明土壤 DOM 的生物利用性提高;结合 FI 值分析表明热解炭处理下的土壤 DOM 来源以陆生源为主,微生物来源次之;因此,热解炭对土壤改良作用和固碳能力的发挥具有一定的时间效应,但如何合理控制热解炭的施用量,高效发挥热解炭对土壤 DOM 和农田肥力的调控作用,仍需进一步研究。

水热炭在温室气体减排、水体净化和土壤修复等方面具有很大的应用前景<sup>[49]</sup>。由于水热炭的低温水热炭化制备过程,与常规热解炭相比,水热炭中常携带更多的 DOM,适宜施用量下水热炭中的 DOM 可发挥对作物生长的积极效应<sup>[52]</sup>,但水热炭 DOM 中含有的有机酚类和醛类等物质,在过量施用情况下可能会对土壤微生物活性产生抑制作用<sup>[57]</sup>。根据 Sun 等<sup>[58]</sup>研究结果,与未施用水热炭的对照土壤相比,加入水热炭后土壤有机碳含量增加了 1.0%~3.0%,腐殖酸含量上升了 13.4%~27.0%,这表明水热炭施用能提高土壤中有机碳和腐殖酸组分的含量。进一步分析表明,土壤 DOM 中类蛋白质和类碳水化合物相对丰度从 16.3% 和 10.9% 分别下降到 5.7%~10.8% 和 1.8%~3.3%。相比之下,稠合多环芳香族和类木质素组分含量分别从 9.6% 和 39.6% 增加到 14.3%~17.9% 和 50.0%~57.4%。这些组分的改变可能是因为水热炭优先吸附芳香度较高、极性较低的土壤有机碳组分,从而增加了土壤 DOM 的芳香性;另一方面是水热炭的施用改变了土壤微生物群落结构,从而影响了微生物对有机碳的调节作用,并改变了土壤 DOM 的腐殖化程度。Bargmann 等<sup>[57]</sup>研究了水热炭的施加对于土壤 DON 含量的影响,结果表明水热炭施入后土壤中 DON 含量显著下降,进而影响土壤 NO<sub>3</sub><sup>-</sup> 的含量,且施用高 C/N、高 DOC 和低矿物氮含量的水热炭时,这一变化趋势尤为明显。实际表现为:在添加水热炭后,NO<sub>3</sub><sup>-</sup> 浓度在第一周迅速降低至接近 0

左右,4周后,NO<sub>3</sub><sup>-</sup>浓度持续升高,在8周后升至初始浓度的82.0%。其原因可能是水热炭施入后激发了微生物活性,导致土壤微生物对氮素的固定降低了土壤氮素有效性和植株对氮素的吸收。值得注意的是,施用过高C/N的水热炭会导致植物缺氮,因此后续水热炭田间应用中也应进一步关注水热炭的C/N等性质。

### 3 结论与展望

土壤DOM正凭借着极高的活跃性和生物有效性为土壤健康和地球生物化学循环等研究提供更好的指示效果。如何更好地运用农艺措施强化对土壤DOM的调控作用,改善土壤健康质量,提升农田养分管理效率,值得研究者进一步深入探讨。

1) 免耕和秸秆覆盖等保护性措施有助于提高土壤DOM含量,进而起到提升土壤肥力、增加作物产量的功效。但需要注意的是,在耕作方式和种植制度对土壤DOM的影响研究中,由于气候和环境条件的差异,有些相同措施在不同的试验中得到的效果可能不同甚至相反,因此,在后续利用农艺措施调控土壤DOM过程中,有必要强化DOM与不同环境条件的交互作用研究并尽量考虑气候、海拔、土壤类型、土壤特性等性质变化进行综合调控。

2) 在施肥措施对土壤DOM影响调控研究中,相比单一化肥,绿肥和有机肥有着低成本和环境友好的显著优势,然而当前研究仍主要聚焦于施肥方式对DOM中养分元素含量的变化,对于不同施肥方式对DOM调控的主要作用机制及微生物-植物-有机肥对DOM的耦合作用机制研究较少。

3) 新兴的土壤改良/修复剂,如热解炭、水热炭等,其对土壤DOM及肥力的影响仍存在两面性,不合理的施用会出现抑制土壤活性,对微生物和植物生长产生毒害作用等情况。如何合理控制新型土壤改良剂的施用比例,最大化发挥其正面作用并消除其不利影响,这些问题仍有待探索。

4) 在分析不同农艺措施对土壤DOM的影响时,也注意到DOM反作用于植物、重金属迁移转运等方面的影响及作用机制方面的研究较为空缺。此外,目前农艺措施对土壤DOM的影响研究仍主要侧重于对其含量和基本性质的影响,其变化机制等深层机理仍有待进一步研究,如何利用傅里叶变换离子回旋共振质谱等新兴技术发展进一步从分子角度探明DOM的变化机制,也逐渐成为下一步的研究焦点。

### 参考文献:

- [1] 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 & Pharmacology*, 2013, 158(4): 207-215.
- [2] Chen W, Westerhoff P, Leenheer J A, et al. Fluorescence excitation-emission matrix regional integration to quantify spectra for dissolved organic matter[J]. *Environmental Science & Technology*, 2003, 37(24): 5701-5710.
- [3] Marschner B, Kalbitz K. Controls of bioavailability and biodegradability of dissolved organic matter in soils[J]. *Geoderma*, 2003, 113(3/4): 211-235.
- [4] 韩成卫, 李忠佩, 刘丽, 等. 溶解性有机质在红壤水稻土碳氮转化中的作用[J]. *生态环境*, 2006, 15(6): 1300-1304.
- [5] 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.
- [6] 高树芳, 王果, 方玲. 溶解性有机质对水稻生长及元素吸收的影响[J]. *福建农业大学学报*, 2001, 30(1): 87-90.
- [7] Gmach M R, Cherubin M R, Kaiser K, et al. Processes that influence dissolved organic matter in the soil: A review[J]. *Scientia Agricola*, 2020, 77(3): e20180164.
- [8] Neff J C, Hooper D U. Vegetation and climate controls on potential CO<sub>2</sub>, DOC and DON production in northern latitude soils[J]. *Global Change Biology*, 2002, 8(9): 872-884.
- [9] Evans C D, Monteith D T, Cooper D M. Long-term increases in surface water dissolved organic carbon: Observations, possible causes and environmental impacts[J]. *Environmental Pollution*, 2005, 137(1): 55-71.
- [10] Chantigny M H. Dissolved and water-extractable organic matter in soils: A review on the influence of land use and management practices[J]. *Geoderma*, 2003, 113(3/4): 357-380.
- [11] Xu Z H. On the nature and ecological functions of soil soluble organic nitrogen (SON) in forest ecosystems[J]. *Journal of Soils and Sediments*, 2006, 6(2): 63-66.
- [12] Ros G H, Hoffland E, Temminghoff E J M. Dynamics of dissolved and extractable organic nitrogen upon soil amendment with crop residues[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2010, 42(12): 2094-2101.
- [13] Biederbeck V O, Janzen H H, Campbell C A, et al. Labile soil organic matter as influenced by cropping practices in an arid environment[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 1994, 26(12): 1647-1656.
- [14] 周建斌, 陈竹君, 郑险峰. 土壤可溶性有机氮及其在氮素供应及转化中的作用[J]. *土壤通报*, 2005, 36(2): 244-248.
- [15] 崔敏, 冉炜, 沈其荣. 水溶性有机质对土壤硝化作用过程的影响[J]. *生态与农村环境学报*, 2006, 22(3): 45-50.
- [16] Mavi M S, Marschner P, Chittleborough D J, et al. Salinity and sodicity affect soil respiration and dissolved organic

- matter dynamics differentially in soils varying in texture[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2012, 45: 8–13.
- [17] 郭微, 戴九兰, 王仁卿. 溶解性有机质影响土壤吸附重金属的研究进展[J]. *土壤通报*, 2012, 43(3): 761–768.
- [18] 缪闯和, 吕贻忠. 黑土、潮土和红壤可溶性有机质的光谱特征及结构差异[J]. *土壤*, 2021, 53(1): 168–172.
- [19] Laurent C, Bravin M N, Crouzet O, et al. Increased soil pH and dissolved organic matter after a decade of organic fertilizer application mitigates copper and zinc availability despite contamination[J]. *Science of the Total Environment*, 2020, 709: 135927.
- [20] 李瑞鑫. 不同农艺措施对冀北坝上土壤溶解性有机质组分特征的影响[D]. 张家口: 河北北方学院, 2019.
- [21] Sparling G, Chibnall E, Pronger J, et al. Estimates of annual leaching losses of dissolved organic carbon from pastures on Allophanic Soils grazed by dairy cattle, Waikato, New Zealand[J]. *New Zealand Journal of Agricultural Research*, 2016, 59(1): 32–49.
- [22] 申军强, 刘宏斌, 胡万里, 等. 不同农艺措施对土壤有机质组分和氮素流失风险的影响[J]. *西南农业学报*, 2013, 26(4): 1578–1584.
- [23] 罗珠珠, 黄高宝, 张仁陟, 等. 长期保护性耕作对黄土高原旱地土壤肥力质量的影响[J]. *中国生态农业学报*, 2010, 18(3): 458–464.
- [24] 范如芹, 梁爱珍, 杨学明, 等. 耕作与轮作方式对黑土有机碳和全氮储量的影响[J]. *土壤学报*, 2011, 48(4): 788–796.
- [25] 王淑兰, 王浩, 李娟, 等. 不同耕作方式下长期秸秆还田对旱作春玉米田土壤碳、氮、水含量及产量的影响[J]. *应用生态学报*, 2016, 27(5): 1530–1540.
- [26] 张常仁, 杨雅丽, 程全国, 等. 不同耕作模式对东北黑土微生物群落结构和酶活性的影响[J]. *土壤与作物*, 2020, 9(4): 335–347.
- [27] 刘霞娇, 段亚峰, 叶莹莹, 等. 耕作扰动对喀斯特土壤可溶性有机质及其组分迁移淋失的影响[J]. *生态学报*, 2018, 38(19): 6981–6991.
- [28] 武佳颖, 武敏桦, 闫静琪, 等. 春玉米覆膜对土壤溶解性有机质光谱特征的影响[J]. *河北北方学院学报(自然科学版)*, 2020, 36(11): 27–33, 44.
- [29] 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.
- [30] Hao Y, Lal R, Owens L B, et al. Effect of cropland management and slope position on soil organic carbon pool at the North Appalachian Experimental Watersheds[J]. *Soil and Tillage Research*, 2002, 68(2): 133–142.
- [31] 黄慧. 成都龙泉驿区不同土地利用方式下土壤可溶性有机质含量的研究[D]. 成都: 四川师范大学, 2013.
- [32] 赵海超, 刘景辉, 赵宝平, 等. 施肥对不同肥力春玉米田土壤溶解性有机质的影响[J]. *生态环境学报*, 2014, 23(8): 1286–1291.
- [33] 王萍. 长期施肥下灰漠土溶解性有机质的稳定机制研究[D]. 南京: 南京农业大学, 2016.
- [34] 谢军, 赵亚南, 陈轩敬, 等. 长期不同施肥对土壤溶解性有机质含量及其结构特征的影响[J]. *光谱学与光谱分析*, 2018, 38(7): 2250–2255.
- [35] 段鹏鹏, 丛耀辉, 徐文静, 等. 氮肥与有机肥配施对设施土壤可溶性氮动态变化的影响[J]. *中国农业科学*, 2015, 48(23): 4717–4727.
- [36] 倪进治, 徐建民, 谢正苗, 等. 不同施肥处理下土壤水溶性有机碳含量及其组成特征的研究[J]. *土壤学报*, 2003, 40(5): 724–730.
- [37] 常单娜. 我国主要绿肥种植体系中土壤可溶性有机物特性研究[D]. 北京: 中国农业科学院, 2015.
- [38] 周国朋, 曹卫东, 白金顺, 等. 多年紫云英-双季稻下不同施肥水平对两类水稻土有机质及可溶性有机质的影响[J]. *中国农业科学*, 2016, 49(21): 4096–4106.
- [39] 朱利霞. 不同调控措施对旱作农田土壤碳氮及微生物学特性的影响[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2018.
- [40] Gao J K, Lv J L, Wu H M, et al. Impacts of wheat straw addition on dissolved organic matter characteristics in cadmium-contaminated soils: Insights from fluorescence spectroscopy and environmental implications[J]. *Chemosphere*, 2018, 193: 1027–1035.
- [41] Dilling J, Kaiser K. Estimation of the hydrophobic fraction of dissolved organic matter in water samples using UV photometry[J]. *Water Research*, 2002, 36(20): 5037–5044.
- [42] 王瑞. 秸秆添加对土壤温室气体排放和溶解性有机碳 DOC 组分的影响[D]. 武汉: 华中农业大学, 2018.
- [43] Bachmann S, Gropp M, Eichler-Löbermann B. Phosphorus availability and soil microbial activity in a 3 year field experiment amended with digested dairy slurry[J]. *Biomass and Bioenergy*, 2014, 70: 429–439.
- [44] Yan L L, Liu Q P, Liu C, et al. Effect of swine biogas slurry application on soil dissolved organic matter (DOM) content and fluorescence characteristics[J]. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 2019, 184: 109616.
- [45] Niyungeko C, Liang X Q, Shan S D, et al. Synergistic effects of anionic polyacrylamide and gypsum to control phosphorus losses from biogas slurry applied soils[J]. *Chemosphere*, 2019, 234: 953–961.
- [46] Yan L L, Liu C, Zhang Y D, et al. Effects of C/N ratio variation in swine biogas slurry on soil dissolved organic matter: Content and fluorescence characteristics[J]. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 2021, 209: 111804.
- [47] Paustian K, Lehmann J, Ogle S, et al. Climate-smart soils[J]. *Nature*, 2016, 532: 49–57.
- [48] 王湛, 李银坤, 徐志刚, 等. 生物质炭对土壤理化性状及氮素转化影响的研究进展[J]. *土壤*, 2019, 51(5): 835–842.
- [49] Pecchi M, Baratieri M. Coupling anaerobic digestion with gasification, pyrolysis or hydrothermal carbonization: A review[J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2019, 105: 462–475.



- [50] 韩晨, 侯朋福, 薛利红, 等. 麦秸水热炭及其改良产物对水稻产量和稻田氨挥发排放的影响[J]. 环境科学, 2021, 42(7): 3451–3457.
- [51] Zhang A F, Zhou X, Li M, et al. Impacts of biochar addition on soil dissolved organic matter characteristics in a wheat-maize rotation system in Loess Plateau of China[J]. *Chemosphere*, 2017, 186: 986–993.
- [52] 林颖, 索慧慧, 王坤, 等. 生物炭添加对旱作农田土壤溶解性有机质及其动态影响的定位研究[J]. 水土保持学报, 2018, 32(6): 149–155.
- [53] 刘杰云, 邱虎森, 汤宏, 等. 生物质炭对双季稻水稻土壤微生物生物量碳、氮及可溶性有机碳氮的影响[J]. 环境科学, 2019, 40(8): 3799–3807.
- [54] 芮绍云, 袁颖红, 周际海, 等. 改良剂对旱地红壤微生物量碳、氮及可溶性有机碳、氮的影响[J]. 水土保持学报, 2017, 31(5): 260–265.
- [55] Smebye A, Alling V, Vogt R D, et al. Biochar amendment to soil changes dissolved organic matter content and composition[J]. *Chemosphere*, 2016, 142: 100–105.
- [56] 郑翔宇. 施用生物炭对冬小麦生长及土壤水溶性有机碳的影响[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2019.
- [57] Bargmann I, Rillig M C, Kruse A, et al. Initial and subsequent effects of hydrochar amendment on germination and nitrogen uptake of spring barley[J]. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science*, 2014, 177(1): 68–74.
- [58] Sun K, Han L F, Yang Y, et al. Application of hydrochar altered soil microbial community composition and the molecular structure of native soil organic carbon in a paddy soil[J]. *Environmental Science & Technology*, 2020, 54(5): 2715–2725.