

水稻秸秆腐解过程溶解性有机质红外光谱研究^①

倪文海¹, 刘欢¹, 刘振涛¹, 罗荣¹, 周江敏^{1*}, 陈华林¹, 葛世玫¹, 代静玉²

(1 温州大学生命与环境科学学院, 浙江温州 325027; 2 南京农业大学资源与环境科学学院, 南京 210095)

摘要: 采用傅里叶红外光谱(FTIR)分析方法研究了水稻秸秆不同腐解阶段产生溶解性有机质(dissolved organic matter, DOM)及其分组组分结构特征。结果表明, 水稻秸秆腐解过程中 DOM 组成成分的变化呈现出明显的阶段性。在第 0~3 天, 秸秆本身含有的糖类、氨基酸等小分子物质因微生物繁殖迅速消失; 第 3~63 天, 主要是秸秆中的半纤维素、纤维素的分解阶段, DOM 组成中多糖类、烷烃类物质呈现起伏性变化; 第 63 天后, 主要是腐殖化阶段, DOM 分子结构复杂化。各分组组分的结构特征有明显差异, 且各组分均随腐解延长而发生变化, 即多糖类物质减少, 芳香族物质增多, 分子结构复杂化。

关键词: 溶解性有机质; 红外光谱; 水稻秸秆

中图分类号: S154.1

溶解性有机质(dissolved organic matter, DOM)是生态系统中一类很活跃的化学物质, 对土壤、沉积物中各种物理、化学和生物过程具有重要的影响。植物残体、有机废弃物腐解过程产生的 DOM 一直以来备受关注, 它不仅影响土壤中金属离子、有机污染物的活性和迁移特性^[1], 同时它的迁移、矿化和稳定还与土壤有机质的积累和保存有密切关系^[2]。DOM 在土壤、生态、环境等领域已成为长盛不衰的研究热点。

水稻秸秆还田作为既废物处理又培肥土壤的双赢措施近年来得到广泛推广和应用。研究表明, 秸秆腐解大大增加土壤 DOM 的含量, 并促进土壤原有有机质的溶解^[3]; 同时改变 DOM 化学组成, 如增加溶解性糖、溶解性酚以及芳香族化合物的含量^[4]。红外光谱是近代研究有机质结构的重要手段之一, 可在不破坏样品本身的前提下直接分析有机质的主要官能团组成。特别是在调查环境条件改变对有机质的可能影响以及比较有机质组成结构差异时, 红外光谱成了广泛采用的工具, 如吴景贵等^[5-6]用红外光谱分析方法研究了玉米秸秆施用对土壤富里酸、胡敏酸组成和结构的影响, Benoît 等^[7]采用红外光谱分析了城市污水处理厂出水 DOM 的组成以及各组分的差异。本文以水稻秸秆为研究对象, 采用实验室好氧培养方法, 通过傅里叶红外光谱(FTIR)阐释腐解过程 DOM 组成和结构的动态变化, 为弄清 DOM 对污染物迁移行为的

影响机理提供依据, 也为秸秆还田的土壤有机碳固定和保存提供科学资料。

1 材料与方法

1.1 试验材料

供试水稻秸秆为温州郊区农田成熟收割后新鲜秸秆的地上部分, 风干粉碎后, 过 1 mm 筛, 供培养用。经测定, 总有机碳 366.19 g/kg, 总氮 6.00 g/kg, C/N 为 61.03, 溶解性有机碳(DOC)12.67 g/kg。

1.2 秸秆腐解试验

将秸秆与石英砂按 1:10(重量比)混合均匀, 加入足量去离子水使秸秆湿度达最大持水量的 80%, 放入培养箱中, 在 25°C ± 1°C 恒温培养 180 天, 每隔 5 天用称重法补充水分。培养初始加入新鲜土壤提取液 5 ml 作为接种液(取新鲜水稻土 10 g, 与 450 ml 蒸馏水混合, 振荡 2 h, 静置过夜, 上清液用定量滤纸过滤, 即为接种液, 经测试其 DOC 约为 0.1 mg/L, 不会对腐解过程 DOC 的产生有明显影响)。

1.3 DOM 提取和制备

在第 0、3、7、14、21、35、49、63、91 以及 180 天时, 加入一定量去离子水(秸秆石英砂混合重量的 2 倍), 200 r/min 振荡 2 h, 12 000 r/min 4°C 下离心 15 min, 上清液过 0.45 μm 微孔滤膜, 滤液即为 DOM 溶液。将 DOM 溶液电渗析法纯化, 冷冻干

基金项目: 国家自然科学基金项目(40506015)和浙江省自然科学基金项目(Y307068)资助。

* 通讯作者(11316432@qq.com)

作者简介: 倪文海(1990—), 男, 江苏泗阳人, 主要研究方向土壤有机质化学及其环境效应。E-mail: 1176375151@qq.com

燥。

1.4 DOM 分组

分别将第 0、21、63、180 天提取的 DOM 分成

5 个组分: 疏水碱性(HOB)、疏水酸性(HOA)、酸不溶(AIM)、疏水中性(HON)和亲水性(HIM)。具体步骤如图 1 所示。

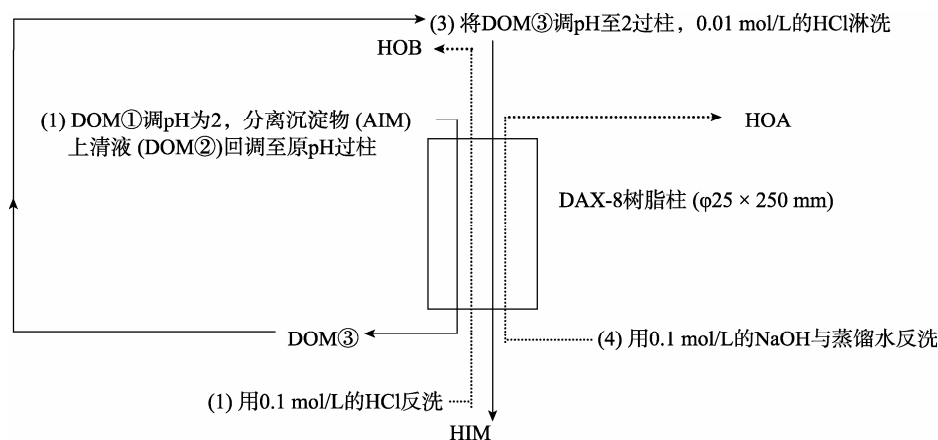


图 1 淋溶液 DOM 分组流程图

Fig. 1 Fractionation flow-chart of DOM in leachate

DAX-8 树脂在 0.1 mol/L NaOH 中浸泡 24 h，用丙酮和己烷抽提 24 h 以除去有机物，接着浸泡于甲醇中装柱，用甲醇洗去柱中的丙酮和己烷，最后用超纯水洗净甲醇直至出水 DOC 小于 1 mg/L。

(1) 将 DOM①(提取原液)用 6 mol/L HCl 调 pH 至 2，离心，将沉淀物用 0.1 mol/L NaOH 溶解，定容，测 DOC(AIM)；将上清液(DOM②)用 NaOH 调回至原 pH，以 1 ml/min 的流速过 DAX-8 树脂柱，接着用 1~2 倍树脂柱体积的超纯水洗净，过柱 DOM 合并洗液为 DOM③；

(2) 用 0.25 倍树脂柱的 0.1 mol/L HCl 反洗树脂柱，接着用 1.5 倍柱体积的 0.01 mol/L HCl 反洗，收集反洗液，定容，测 DOC(HOB)(注：由于 HOB 的浓度极低，本实验过程中未收集到足够的量以供红外光谱分析用，因而未获得 HOB 的红外光谱数据)；

(3) 将 DOM③重新用 6 mol/L HCl 调 pH 至 2 后以 1 ml/min 的流速过 DAX-8 树脂柱，接着用 1 倍柱体积 0.01 mol/L HCl 淋洗，非吸附成分即为 HIM；

(4) 用 0.25 倍柱体积、0.1 mol/L NaOH 反洗柱子，接着用 1.5 倍柱体积超纯水洗，收集反洗液，定容测 DOC(HOA)。

(5) 将 DAX-8 柱用泵抽干，倒出室温风干 15 h，用无水甲醇在索氏抽提器中洗净，溶于甲醇中的有机物为 HON。最后用旋转蒸发仪(40 °C)将甲醇去除，溶于超纯水中定容测 DOC。

为确保分组方法的准确性，每个 DOM 样品的分组均重复 3 次，各组分的标准差 < 5%，且回收率在

100% ± 10%。将收集到的各组分电渗析法纯化，冷冻干燥备用。

1.5 FTIR 光谱的测定

将 1 mg 冻干的 DOM 及其分组组分样品与 400 mg 干燥的 KBr 磨细混匀，在 10 t/cm² 下压成薄片并维持 2 min，用 FTIR 光谱仪(Bruker Equinox 55)测定并记录其光谱，扫描波数范围为 400 ~ 4 000 cm⁻¹，扫描精度为 4 cm⁻¹。

2 结果与讨论

2.1 水稻秸秆腐解过程中 DOM 红外光谱

图 2 为水稻秸秆不同腐解阶段 DOM 的红外光谱，吸收峰主要在 1 078 cm⁻¹(碳水化合物或多糖结构中 C-O 伸缩振动)、1 383 cm⁻¹(COO-伸展、酚的 OH 变形和 C-O 伸缩)、1 629 cm⁻¹(芳香族羧酸-C=O、烯烃和芳香基上 C=C 伸缩振动)、1 723 cm⁻¹(分子间或分子内-C=O 的伸缩振动)以及 3 000 ~ 2 800 cm⁻¹(脂肪族中-CH₃、-CH₂-的伸缩振动)和 3 300 ~ 3 500 cm⁻¹(-OH 和 N-H 的伸缩振动)^[8]。不同腐解阶段 DOM 中各吸收峰有规律地变化，表明 DOM 的化学组成逐渐发生变化。根据光谱变化的特点，DOM 组成结构的变化大致可分为 3 个阶段：

第一阶段第 0 ~ 3 天，秸秆易分解成分分解期。第 0 天 DOM 在 1 078、1 383、1 723 以及 2 962 cm⁻¹ 均显示较强的吸收峰，这是新鲜有机物料普遍含有的一些水溶性物质，主要是氨基酸、氨基糖、单糖、多糖以及蛋白质等，它们均为极具生物有效性的低分子

量化合物。在第 3 天 DOM 中这些吸收峰均明显减弱或消失, 其原因是微生物大量繁殖消耗所致^[9]。

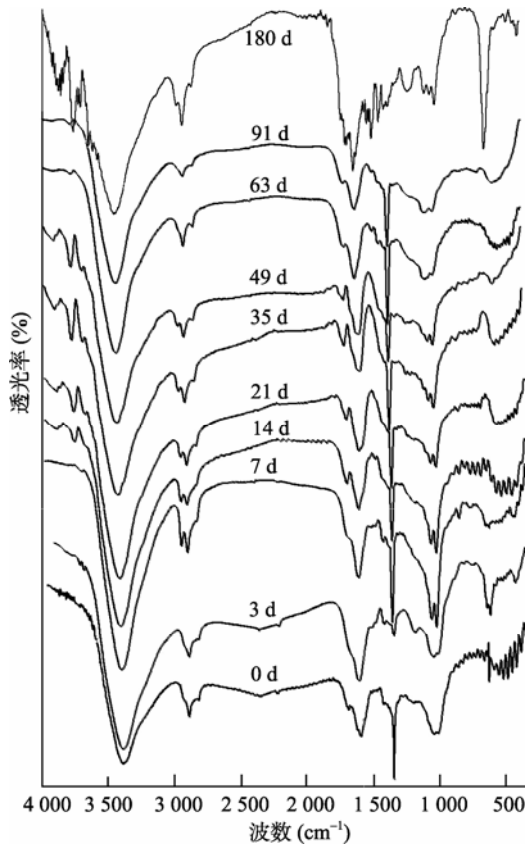


图 2 秸秆腐解过程中 DOM 的红外光谱

Fig. 2 IR spectra of DOM extracted from decomposition of straw

第二阶段第 3~63 天。第 7 天 DOM 中 $1\ 049\ \text{cm}^{-1}$ 出现了吸收峰, $1\ 078\ \text{cm}^{-1}$ 吸收峰显著增强, 共同形成尖锐的双峰; $2\ 962\ \text{cm}^{-1}$ 也出现了尖锐的吸收峰, 同时, $1\ 383\ \text{cm}^{-1}$ 吸收峰再次增强, 表明第 7 天 DOM 中出现了大量糖类、脂肪族烷烃类物质。至第 14 天与第 21 天 DOM 中这些吸收峰再次减弱; $1\ 723\ \text{cm}^{-1}$ 吸收峰则变尖锐, 表明有机酸含量增加。 $1\ 723\ \text{cm}^{-1}$ 吸收峰在第 35 天 DOM 中表现最强, 在第 49 天 DOM 中再次减弱, 至第 63 天 DOM 中退缩成小肩峰。在第 35 天 DOM 中 $1\ 049\ \text{cm}^{-1}$ 与 $1\ 078$ 、 $1\ 383$ 、 $2\ 800\sim 3\ 000\ \text{cm}^{-1}$ 的吸收峰又有所增强, 但至第 63 天 DOM 中, $1\ 049$ 、 $2\ 962\ \text{cm}^{-1}$ 吸收峰消失, $1\ 078\ \text{cm}^{-1}$ 双峰向高波数 $1\ 102\ \text{cm}^{-1}$ 转移, 此为取代基含有甲氧基的芳香化合物的 C-O 伸缩振动^[10], 为木质素降解产物。在此阶段, 多糖类、烷烃类物质呈现由多变少、再次增多后又减少的变化过程, 即出现了腐解以来的两次高峰。这是秸秆中半纤维素、纤维素分解所致。半纤维素、纤维素是秸秆中主要多糖类物质。很多好氧和厌氧的细菌与真菌都能分解半纤维素^[11]。纤维素则

由于高度结晶与致密结构而不易降解。本研究中秸秆经过磨碎处理, 部分纤维素的结晶结构和大分子间氢键破坏, 使之易与微生物接触而分解。Goyal 等^[12]也通过研究堆肥过程中木聚糖酶、纤维素酶活性的变化过程指出, 半纤维素、纤维素的旺盛分解主要在堆肥起始 60 天内。喻曼等^[13]研究稻草固体发酵过程微生物变化指出, 第 6 天微生物生物量最高, 随后逐渐减少; 半纤维素、纤维素先于木质素分解。本研究第 7 天 DOM 各吸收峰增强正是由于大量繁殖的微生物分解半纤维素、纤维素所致。

第三阶段第 63~180 天。第 91 天 DOM 与第 63 天 DOM 图谱很相似, 各吸收峰的强度基本不变, 表明两者化学组成无显著差异, 说明在此阶段秸秆中容易降解的物质已较少。总体而言, 第 91 天前各阶段 DOM 的谱形相似, 只是特征峰的吸收强度上有差异, 说明它们组成物质成分类似, 仅在不同物质的含量上存在差异。但在第 180 天 DOM 谱形则变化很大, 吸收峰显著增多, 官能团种类变得复杂多样。 $1\ 648\ \text{cm}^{-1}$ 和 $1\ 512\ \text{cm}^{-1}$ 、 $1\ 424\ \text{cm}^{-1}$ 吸收峰明显增强, 表明此阶段 DOM 中芳香环为主要组成结构。 $1\ 246\ \text{cm}^{-1}$ 为酚类中的 C-O 伸缩振动的特征吸收^[10], 其吸收强度也较大。另外, $1\ 401\ \text{cm}^{-1}$ (羧酸盐中 COO^- 的变形振动)、 $1\ 462\ \text{cm}^{-1}$ (脂肪族结构中甲基和亚甲基的变形振动) 以及 $1\ 531\sim 1\ 567\ \text{cm}^{-1}$ (酰胺 II 带) 处的吸收峰都尖锐而突出, 在 $1\ 043\sim 1\ 121\ \text{cm}^{-1}$ 处也出现 3 个尖锐的吸收峰, 表明烷基化合物、有机酸、酰胺成分以及糖类小分子物质以芳香环为核心发生聚合反应, 从而使 DOM 分子结构复杂化。吴景贵等^[5]也指出玉米秸秆分解 60 天后碳水化合物和酰胺化合物以木质素分解的产物为核心发生聚合作用。Wei 等^[14]研究发现, 城市固体垃圾堆肥 DOM 中出现高聚合度芳香族物质, 说明聚合作用的存在。可见, 此阶段主要是秸秆各种分解产物的腐殖化作用。

2.2 DOM 分组组分的红外光谱

2.2.1 HIM 不同组分的红外光谱如图 3 所示。从图 3 中可以看出, 不同阶段 HIM 组分的 FTIR 特征很相似, 在 $1\ 050\ \text{cm}^{-1}$ 和 $1\ 113\ \text{cm}^{-1}$ 处有突出的吸收峰, 为多糖类物质中的 C-O 的伸缩振动, 表明含大量碳水化合物是 HIM 组分的主要特征。周江敏等^[15]采用 CP/MAS- ^{13}C -NMR 研究黄泥土 DOM 中 HIM 组分, 烷氧基碳含量达 58%。Zhang 等^[16]利用红外光谱 (IR) 等研究污水处理厂出水 DOM 表明, 亲水性各组分在 $1\ 050\sim 1\ 250\ \text{cm}^{-1}$ 呈现强吸收峰。由此表明, 虽然 HIM 组分来源不同, 其主要组成成分都为碳水

化合物。然而,从图 3 中仍可看出,不同腐解阶段 HIM 组分各吸收峰的强弱有差异,表明虽同为 HIM 组分,其组成物质不尽相同。主要表现为 $1\ 050\ \text{cm}^{-1}$ 吸收峰随腐解时间推移逐渐减弱, $1\ 647\ \text{cm}^{-1}$ 、 $1\ 730\ \text{cm}^{-1}$ 则逐渐增强, I_{1050}/I_{1647} (多糖碳/芳香碳)强度比值从 2.47 下降到 1.28, I_{1050}/I_{1730} (多糖碳/羧基碳)强度比值从 3.26 下降到 1.43,表明 HIM 组分中碳水化合物减少,低分子有机酸增多。第 0 天时 HIM 组分经过本研究浓缩冻干处理呈粘胶状,其主要组成成分为低

聚糖类物质。

2.2.2 HOA HOA 组分与土壤富里酸的分离由于使用相似的提取与纯化方法(酸性条件下吸附于 XAD-8 树脂,用碱解吸),其结构特征也相似,主要由腐殖酸类物质组成,如芳香族酸、芳香族酚等,还有一些脂肪族有机酸^[16]。图 3 中 HOA 组分也主要在 $1\ 647\ \text{cm}^{-1}$ 和 $1\ 711\ \text{cm}^{-1}$ 呈现突出吸收峰,且随腐解时间推移不断增强。由此表明,腐殖酸类物质在腐解过程中不断积累。

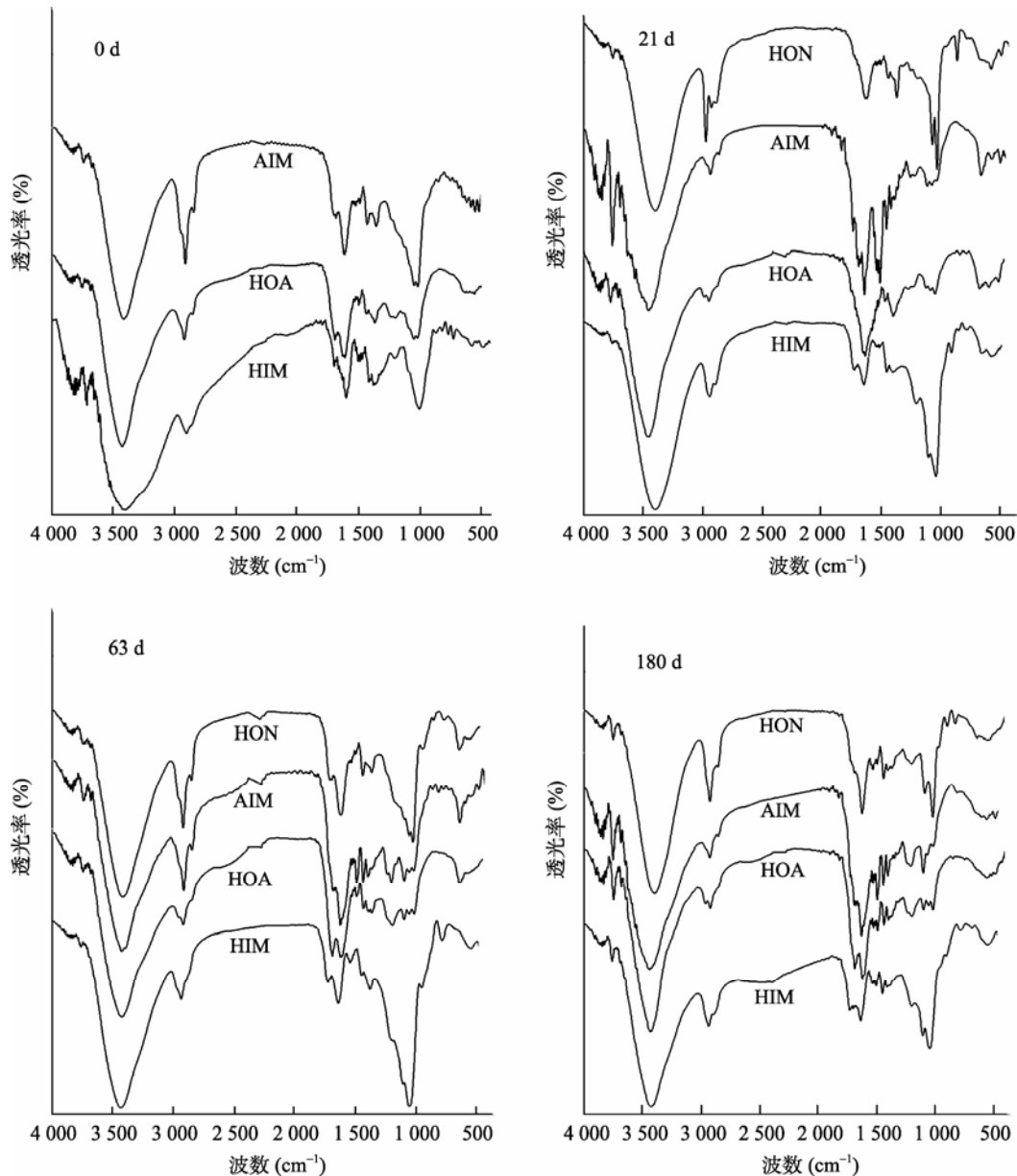


图 3 秸秆不同腐解阶段 HIM、HOA、AIM 以及 HON 组分的红外光谱

Fig. 3 IR spectra of HIM, HOA, AIM and HON fractions extracted from straw at different decay stages

2.2.3 AIM AIM 组分与土壤胡敏酸的提取过程相似,化学性质相同说明两者组成结构上也相似。周

江敏等^[15]指出,AIM 组分与土壤胡敏酸相比较,含更多多糖类物质,而脂肪族物质减少,主要组成物质

是多酚类、腐殖质结合的碳水化合物。从图谱中可以看出 AIM 组分与 HOA 组分的 FTIR 图谱较相似,在 $1\ 646\ \text{cm}^{-1}$ 、 $1\ 710\ \text{cm}^{-1}$ 也呈现强吸收峰,但 $1\ 646\ \text{cm}^{-1}$ 吸收峰明显强于 HOA 组分, $1\ 710\ \text{cm}^{-1}$ 吸收峰则比 HOA 组分弱,只呈现肩峰。表明 AIM 组分中游离羧基的含量较少,多以分子内缔合的形式存在^[6]。在 AIM 组分中, $1\ 512\ \text{cm}^{-1}$ 也呈现较强的吸收峰,是芳香基上的 C=C 的伸缩振动,进一步说明芳香环是 AIM 组分的主要结构。

另外,在第 0 天 DOM 中 AIM 仅占 7.88%(很难分离,因此未做红外光谱测试),至第 180 天 DOM, AIM 组分已达 63.9%,在降解过程中表现为逐渐积累。由此进一步说明, AIM 组分主要由芳香族类稳定物质组成,是腐殖化作用的产物。

从图谱中还可看出,3 个不同阶段 AIM 组分一些特征峰的吸收强度有一定差异。第 21 天 AIM 组分中 $1\ 514 \sim 1\ 547\ \text{cm}^{-1}$ 吸收峰最强,表明酰胺类物质含量最多。而糖类、烷烃类物质则在第 63 天 AIM 组分中最多。至第 180 天 AIM 组分中, $1\ 040$ 、 $1\ 083\ \text{cm}^{-1}$ 吸收峰很弱并逐渐向 $1\ 124\ \text{cm}^{-1}$ 转移,表明糖类成分与芳香环高度缩合。

2.2.4 HON 周江敏等^[15]研究表明, HON 组分主要由碳水化合物、长链脂肪酸、烷基醇和带有少量功能团的腐殖质组成。本研究 HON 组分的主要特征是在 $2\ 974$ 、 $2\ 926$ 、 $2\ 859$ 以及 $1\ 460\ \text{cm}^{-1}$ 都呈现很强的吸收峰,表明 HON 组分中含大量甲基、亚甲基和次甲基,即脂肪族烷烃类物质含量很高,这是 HON 组分区别于其他 3 个组分的重要特征。此吸收峰随腐解进行不断减弱。另外, HON 组分在 $1\ 050$ 、 $1\ 078\ \text{cm}^{-1}$ 也呈现很强的吸收峰,表明含大量多糖物质,且随腐解进行含量不断减少。而 $1\ 640\ \text{cm}^{-1}$ 吸收峰则随腐解进行有所增强,表明芳香族物质增多。

总之,不同组分的 FTIR 谱形有明显差异,表明在主要结构和官能团组成上有较大差别,且随腐解推移发生变化。大体而言,随着腐解深入多糖类逐渐减少,而芳香族增多,分子结构复杂化。

3 讨论

有机物料的微生物降解是一个缓慢的过程。水稻秸秆化学组成中除了半纤维素、纤维素以及木质素三大主要成分外,还含有氨基酸、氨基糖、单糖、多糖以及蛋白质等水溶性物质。不同成分因其化学结构、存在形态不同,其降解途径、降解速率也不同。在秸

秆降解产物、微生物代谢产物、微生物死亡残骸的共同影响下,秸秆腐解产生 DOM 其化学组成和结构特征是一个动态变化的过程。

腐解初始,秸秆中氨基酸、氨基糖、单糖、多糖以及蛋白质等水溶性物质是 DOM 的主要来源,这些物质大部分具有亲水性,此时 DOM 中 HIM 组分含量高达 76.3%(图 4)。这些物质诱导微生物大量繁殖, DOM 含量^[17]及其中 HIM 组分含量都迅速减少, DOM 红外光谱的变化表现出糖类、低分子有机酸的吸收峰明显减弱或消失。这与鸡粪堆肥过程中 DOC 的变化相一致^[18-19],堆肥初期 DOC 大部分为简单化合物,并因降解而剧烈下降,随后复杂物质开始分解,腐殖质不断合成。DOM 物质组成日益复杂。Don 和 Kalbitz^[20]研究表明,有机物料旺盛分解期 DOM 主要来源于纤维素和木质素等的降解产物以及微生物代谢产物,此时 DOM 含丰富的羧酸类物质、强氧化木质多酚类物质以及芳香族和脂肪族物质,碳水化合物和氨基糖减少,糖醛酸和半乳糖增多,疏水性较强;而来源于微生物残骸的 DOM 则含有丰富的己糖、碳水化合物、氨基糖,亲水性较强。本研究培养第 3 天后秸秆旺盛分解,大量繁殖的微生物分解半纤维素、纤维素、木质素等成分, DOC 含量迅速增高^[17],在此阶段红外光谱变化复杂,多糖类、烷烃类物质呈现先增多后减少、再增多后又减少的变化过程。DOM 分组组成中 HIM 持续减少, HOA、AIM 不断增多,表明腐殖酸类物质逐渐增加。

第 63 天后为秸秆腐解的后期阶段,秸秆中易降解物质已很少, DOC 含量基本不变^[17]; DOM 主要由难降解物质组成^[17],因而在此阶段 DOM 物质组成相对稳定。至第 180 天 DOM 红外光谱特征有显著变化,这是逐渐腐殖化作用的结果。在此阶段, HIM 含量逐渐趋于稳定, HOA 开始逐渐降低,而 AIM 迅速增加并成为 DOM 的主要组成成分。至第 180 天 DOM, AIM 已增至 63.9%。根据 AIM 的分离方法以及光谱特征,可以推断腐殖化作用是这个阶段的主要特征。张丰松等^[21]也研究表明,猪粪和牛粪经过堆腐后, DOM 中蛋白质、脂肪和碳水化合物等有机物在微生物作用下被分解,部分被合成为大分子量的类腐殖酸荧光物质,除生成大量的类富里酸外,类胡敏酸物质的芳香度和腐殖化程度均随之提高。李鸣晓等^[19]也指出,堆肥进行时样品 DOM 中的非腐殖质物质不断转化为腐殖质类物质,并且腐殖质物质的芳构化及分子量增加,腐殖化程度加大。与本研究结果一致。在整个腐解过程中, HIM 与 AIM 是主要变化的两个组

分, HIM 从 76.32%(第 0 天 DOM) 降到 9.21%(第 180 天 DOM), AIM 则正好相反, 随腐解进行不断增多。表明在秸秆腐解过程中, DOM 由亲水性向疏水性转变, 分子结构由简单变复杂。

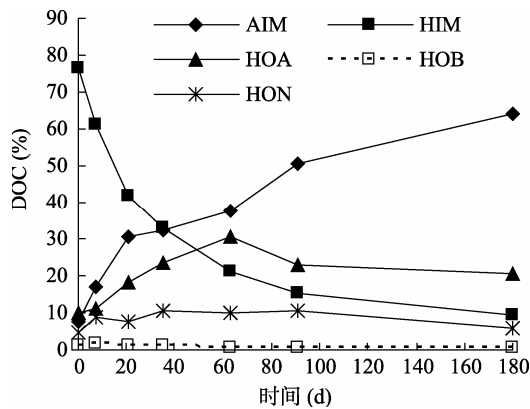


图 4 DOM 分组组成的动态变化

Fig. 4 Dynamic changes of DOM constitutions

4 结论

(1) 4 个分组组分主要结构和官能团组成有显著差别。HIM 组分主要由多糖类物质组成, 还包括低分子量有机酸; HOA 组分和 AIM 组分与土壤腐殖酸组成相似, 含有大量芳香族、羧酸成分, 但 HOA 组分含更多游离羧基, AIM 组分的羧酸根则主要以分子内缔合的形式存在; HON 组分中含大量烷烃类物质和多糖。同时, 各分组组分的结构特征在不同腐解阶段有差异, 总体表现为随腐解深入各组分组成物质中多糖类减少, 芳香族物质增多, 分子结构复杂化。

(2) 根据 DOM 的红外光谱变化特征, 以及各分组组分的结构特征和含量消长规律, 表明水稻秸秆腐解过程中 DOM 组成成分的变化呈现出明显的阶段性。在第 0~3 天, 秸秆本身含有的糖类、氨基酸等小分子物质因微生物繁殖迅速消失; 第 3~63 天, 主要是秸秆的旺盛分解阶段, DOM 组成中多糖类、烷烃类物质呈现起伏性变化; 第 63 天后, 主要是腐殖化阶段, DOM 分子结构复杂化。

参考文献:

[1] Kalbitz K, Solinger S, Park JH, Michalzik B, Matzner E. Controls on the dynamics of dissolved organic matter in soils: A review[J]. *Soil Science*, 2000, 165(4): 277-304

[2] Kalbitz K, Kaiser K. Contribution of dissolved organic matter to carbon storage in forest mineral soils[J]. *Journal of Plant Nutrient and Soil Science*, 2008, 171: 52-60

[3] 卢萍, 单玉华, 杨林章, 韩勇. 秸秆还田对稻田土壤溶液中溶解性有机质的影响[J]. *土壤学报*, 2006, 43(5): 746-741

[4] 周江敏, 陈华林, 唐东民, 祝亮. 秸秆施用后土壤溶解性有机质的动态变化[J]. *植物营养与肥料学报*, 2008, 14(4): 678-684

[5] 吴景贵, 王明辉, 姜亦梅, 徐岩. 玉米秸秆还田后土壤胡敏酸变化的谱学研究[J]. *中国农业科学*, 2005, 38(7): 1394-1400

[6] 吴景贵, 王明辉, 姜亦梅, 吴江. 施用玉米植株残体对土壤富里酸组成、结构及其变化的影响[J]. *土壤学报*, 2006, 43(1): 133-141

[7] Benoît P, Clouzot L, Varrault G, Tusseau M, Verger A, Mouchel J. Dissolved organic matter from treated effluent of a major wastewater treatment plant: Characterization and influence on copper toxicity[J]. *Chemosphere*, 2008, 73: 593-599

[8] 李云霞, 索全伶, 贺文智, 李春萍, 黄延春. 黄芩素的分离纯化与结构表征[J]. *光谱学与光谱分析*, 2008, 28(8): 1895-1899

[9] Bernd M, Andrew DN. Chemical and biological process leading to the neutralization of acidity in soil incubated with litter materials[J]. *Soil Biology & Biochemistry*, 2000, 32: 805-813

[10] Hussain ANA, Elizabeth CM, Robert FD, Patrick GH. Changes in the compound classes of dissolved organic matter along an estuarine transect: A study using FTIR and ^{13}C NMR[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 2010, 74(13): 3815-3838

[11] Kögel-Knabner I. The macromolecular organic composition of plant and microbial residues as inputs to soil organic matter[J]. *Soil Biology & Biochemistry*, 2002, 34: 139-162

[12] Goyal S, Dhull SK, Kapoor KK. Chemical and biological changes during composting of different organic wastes and assessment of compost maturity[J]. *Bioresource Technology*, 2005(96): 1584-1591

[13] 喻曼, 曾光明, 陈耀宁, 郁红艳, 黄丹莲, 陈芙蓉. PLFA 法研究稻草固态发酵中的微生物群落结构变化[J]. *环境科学*, 2007, 28, (11): 2603-2608

[14] Wei Z, Xi B, Wang S, Xu J, Zhou Y, Liu H. Fluorescence characteristic changes of dissolved organic matter during municipal solid waste composting[J]. *Journal of Environmental Sciences*, 2005, 17(6): 953-956

[15] 周江敏, 代静玉, 潘根兴. 应用光谱分析技术研究土壤水溶性有机质的分组及其结构特征[J]. *光谱学与光谱分析*, 2004, 24(9): 1060-1065

[16] Zhang H, Qua J, Liu H, Zhao X. Characterization of isolated fractions of dissolved organic matter from sewage treatment plant and the related disinfection by-products formation potential[J]. *Journal of Hazardous Materials*,

- 2009, 164(2/3): 1 433-1 438
- [17] Chen H, Zhou J, Huang W, Yu W, Wan Z. Biodegradability of dissolved organic matter derived from rice straw[J]. *Soil Science*, 2009 (174): 143-150
- [18] 何小松, 席北斗, 魏自民, 李鸣晓, 安达, 余红, 刘鸿亮. 堆肥过程中水溶性有机物常规荧光与固体表面荧光光谱比较[J]. *农业工程学报*, 2010, 26(10): 272-275
- [19] 李鸣晓, 何小松, 刘骏, 席北斗, 赵越, 魏自民, 姜永海, 苏婧, 胡春明. 鸡粪堆肥水溶性有机物特征紫外吸收光谱研究[J]. *光谱学与光谱分析*, 2010, 30(11): 3 081-3 085
- [20] Don A, Kalbitz K. Amounts and degradability of dissolved organic carbon from foliar litter at different decomposition stages[J]. *Soil Biology & Biochemistry*, 2005, 37: 2 171-2 179
- [21] 张丰松, 李艳霞, 杨明, 冯成红, 李帷, 晏维金. 畜禽粪便堆肥溶解态有机质三维荧光光谱特征及 Cu 络合[J]. *农业工程学报*, 2011, 27(1): 314-319

Study on Fourier-transform Infrared Spectra of Dissolved Organic Matters Extracted from Rice Straw at Different Decay Stages

NI Wen-hai¹, LIU Huan¹, LIU Zhen-tao¹, LUO Rong¹, ZHOU Jiang-min^{1*}, CHEN Hua-lin¹,
GE Shi-mei, DAI Jing-yu²

(1 *School of Life and Environmental Sciences, Wenzhou University, Wenzhou, Zhejiang 325000, China;*
2 *College of Resources and Environmental Sciences, Nanjing Agricultural University, Nanjing 210095, China*)

Abstract: Fourier-transform infrared spectra (FTIR) was used to study the characteristics of dissolved organic matters (DOM) extracted from rice straw at different decay stages. The results showed that there were three stages for the dynamic change of DOM properties during decay: at the first stage (0-3 d), the low-weight-molecular sugar, amino-acid diminished rapidly due to the microorganism growth; at the second stage (3-63 d), the content of polysaccharides and aliphatic hydrocarbons in DOM leveled off in a range which was caused by the decomposition of hemi-cellulose and cellulose; after 63 d, it was the humification stage of DOM indicating by the polymerization of carbohydrates and aliphatic hydrocarbons based on the core of aromatic rings, which induced the more complicated molecular structure of DOM. At different stages, the structural properties of the fractions varied with decay indicating by the decrease of polysaccharides and increase of aromatic components.

Key words: Dissolved organic matter (DOM), Fourier-transform infrared spectra (FTIR), Rice straw