

DOI:10.11766/trxb202312170531

CSTR: 32215.14.trxb202312170531

陈卓, 张丛志, 张佳宝, 赵炳梓, 潘慧. 天然腐殖质改性材料的特性及其在滴灌方式下对玉米的促生作用[J]. 土壤学报, 2025, 62 (2): 459–471.

CHEN Zhuo, ZHANG Congzhi, ZHANG Jiabao, ZHAO Bingzi, PAN Hui. Characteristics of Natural Humus Modified Materials and Their Growth-promoting Effects on Maize Under Drip Irrigation[J]. Acta Pedologica Sinica, 2025, 62 (2): 459–471.

天然腐殖质改性材料的特性及其在滴灌方式下对玉米的促生作用^{*}

陈 卓^{1, 2}, 张丛志², 张佳宝^{1, 2†}, 赵炳梓², 潘 慧³

(1. 山西农业大学资源环境学院, 山西太谷 030801; 2. 土壤与农业可持续发展国家重点实验室(中国科学院南京土壤研究所), 南京 210008; 3. 中向旭曜科技有限公司, 江苏江阴 214400)

摘要: 探讨了通过不同加工方法获得的两种天然腐殖质改性材料在滴灌条件下对玉米生长的影响。首先, 通过元素分析、扫描电镜和傅里叶变换红外光谱等手段分析了天然腐殖质材料砂磨液(M1)和全水溶硝基腐殖酸钾(M2)的物理和化学特性, 然后在田间试验中, 通过滴灌施用不同浓度(0.2、0.4、0.6、0.8、1.0、1.5、2.0 g·L⁻¹)和用量(650、1 300、1 950 L·hm⁻²)的两种材料, 研究了玉米植株的株高、生物量和产量的变化趋势。结果表明: 1) M1 和 M2 在化学组成和微观结构方面有显著区别。M1 的分子量较高, 结构复杂; M2 的分子量较低, 但腐殖质活性组分含量更高。2) 尽管施用 M1 和 M2 对玉米株高的影响不明显, 但却显著提升了玉米的生物量和产量。特别是 M2, 当其浓度为 1.0 g·L⁻¹、用量为 1 300 或 1 950 L·hm⁻²时, 玉米植株的生物量较 CK 分别显著增加 40.11%、40.74%, 产量较 CK 分别显著增加 25.75%、27.45%。总体而言, 滴灌施用 M1 和 M2 两种材料均能有效促进玉米生长, 其中 M2 在相同条件下表现出更大的生长潜力。综合成本等因素, 建议在田间施用 M2, 浓度为 1.0 g·L⁻¹、用量为 1 300 L·hm⁻²的组合。本研究为农业生产提供了新的视角和实践依据。

关键词: 天然腐殖质材料; 化学组成; 微观结构; 滴灌; 玉米生长

中图分类号: S147.3 文献标志码: A

Characteristics of Natural Humus Modified Materials and Their Growth-promoting Effects on Maize Under Drip Irrigation

CHEN Zhuo^{1, 2}, ZHANG Congzhi², ZHANG Jiabao^{1, 2†}, ZHAO Bingzi², PAN Hui³

(1. College of Resources & Environment, Shanxi Agricultural University, Taigu, Shanxi 030801, China; 2. State Key Laboratory of Soil and Sustainable Agriculture, Institute of Soil Science, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210008, China; 3. View Sino Orise Technology Limited Company, Jiangyin, Jiangsu 214400, China)

* 北大荒黑土地生态环境保护综合实验室一期项目 Phase I Project of the Beidahuang Black Soil Ecological Environment Protection Comprehensive Laboratory、安徽省重点研发计划项目(2023n06020056)、国家重点研发计划项目(2022YFD1500502)共同资助 Supported by the Key Science and Technology Project of Anhui Province, China (No. 2023n06020056), and the National Key R&D Program of China (No. 2022YFD1500502)

† 通讯作者 Corresponding author, E-mail: jbzhang@issas.ac.cn

作者简介: 陈卓(1997—), 男, 江西丰城人, 硕士研究生, 主要从事土壤地力提升研究。E-mail: chenz9703@163.com

收稿日期: 2023-12-17; 收到修改稿日期: 2024-05-05; 网络首发日期 (www.cnki.net): 2024-07-10

Abstract: 【Objective】This study aims to analyze the physicochemical properties of two natural humus-modified materials (M1 and M2) produced by different processing methods, compare the differences between the two materials, and investigate their effects at different concentrations on the growth of maize under drip irrigation conditions. The goal is to explore the most suitable application concentration and amount of humus under drip irrigation and provide new perspectives and practical bases for agricultural production. 【Method】The content of humus and its components in M1 (natural humus sand grinding fluid) and M2 (fully water-soluble potassium nitrohumate) was determined and the physical and chemical properties of the materials were analyzed through elemental analysis, scanning electron microscopy, and Fourier transform infrared spectroscopy (FTIR). Then, field experiments were designed to evaluate the effects of applying different concentrations (0.2, 0.4, 0.6, 0.8, 1.0, 1.5, 2.0 g·L⁻¹) and amounts (650, 1 300, 1 950 L·hm⁻²) of M1 and M2 on the height, biomass, and yield of maize. 【Result】The results showed that: 1) There were significant differences in chemical composition between M1 and M2. M1 had a higher content of humus, larger molecular weight, more complex structure, and stronger stability in soil. On the other hand, M2 had a lower total content of humus, a high content of fulvic acid (FA), a smaller molecular weight, and a lower degree of humification. 2) The microstructure of M1 and M2 differed. M1 had a rough and complex particle surface with uneven particle size while M2 exhibited a smoother and looser sponge-like appearance with no chaotic structure on the particle surface. FTIR analysis showed that M1 may contain more aromatic structures or carboxylate salts and silicate impurities while M2 may contain more carboxyl groups. 3) Although the application of M1 and M2 had little effect on plant height, it significantly increased the biomass and yield of maize. Especially for M2, when its concentration was 1.0 g·L⁻¹ and the amount was 1 300 or 1 950 L·hm⁻², the biomass of maize plants increased significantly by 40.11% and 40.74% and the yield increased significantly by 25.75% and 27.45%, respectively. 【Conclusion】The application of different concentrations and amounts of M1 and M2 effectively promoted the growth of maize, with M2 exhibiting greater growth potential under the same conditions. This may be attributed to the role of humus in improving soil structure, increasing and retaining soil moisture and nutrient content, activating specific biochemical pathways, and enhancing soil microbial activity, thereby improving the nutrient absorption efficiency and photosynthetic capacity of maize plants. Considering factors such as cost, it is recommended to apply M2 at a concentration of 1.0 g·L⁻¹ and an amount of 1 300 L·hm⁻² in the field to fully exploit its effects in promoting maize growth potential and increasing yield. This provides new perspectives and practical bases for the efficient utilization of humus in agriculture.

Key words: Natural humus materials; Chemical composition; Microstructure; Drip irrigation; Maize growth

在当今全球背景下，人口迅速增长和气候变化给农业系统带来了巨大压力，造成粮食安全面临重大挑战。确保足够的食物生产以满足不断增长的人口需求，同时应对环境限制，仍然是一个全球性的重要问题^[1]。化肥的广泛使用显著提高了作物产量，极大地推进了农业的发展，保证了粮食安全。然而，为追求高产，过量使用化肥对农业土壤、生态环境以及农产品的质量安全造成了严重的副作用^[2]。因此，既能增加作物产量，又能保护环境的创新和高效型农业实践就显得尤为重要。其中，腐殖质的应用成为一种备受关注的策略。

腐殖质是一种含有丰富碳氢化合物和功能基团的有机物，主要来源于动植物残体的分解和微生物的代谢过程^[3]，它在改善土壤肥力和植物生长方面发挥着关键作用^[4]。研究表明，施用腐殖质类物

质能够改良土壤，提高作物的产量和品质^[5-7]。例如，在土壤中添加腐殖质生物肥后，土壤中细菌和真菌数量显著增加^[5]。将腐殖质溶液在小麦拔节期施入土壤，能够显著提高冬小麦的生物量和籽粒产量^[6]。Kishor 等^[7]在一项两年的试验中也指出，叶面喷施腐殖质能够显著增加咖啡豆的产量。上述研究均突显了腐殖质在提高农业生产力方面的潜力。

传统方法中，腐殖质通常被直接施加于土壤或与化肥结合使用，这在改善土壤肥力和作物生产力方面被证明是有益的^[8]。然而，这些方式通常存在利用效率低、容易引起环境问题等弊端^[9]。因此，上述问题促使人们寻求更有针对性的应用方法，如滴灌。采用滴灌的方式施用腐殖质具有众多优势，包括更高效和更有针对性的应用、减少环境影响以及可能在促进作物生长方面带来更大的效果^[10-11]。

尽管取得了一些进展,但关于腐殖质在滴灌方式下适宜的浓度、用量等问题仍存在明显的空白。本研究探索了滴灌方式下不同浓度和用量处理的天然腐殖质改性材料在农业中的应用效果。通过对两种不同加工方式得到的材料(M1和M2)进行细致的物理和化学特性分析,并结合田间试验,评估它们对玉米生长的影响。旨在探究滴灌方式下最适宜的腐殖质施用浓度和用量,从而为农业生产提供新的方向和实践依据。

1 材料与方法

1.1 试验区概况

试验场地位于河南省新乡市封丘县中国科学院封丘农业生态实验站($35^{\circ}01'N$, $114^{\circ}24'E$)。该地区属半干旱半湿润的暖温带季风气候,年均温度 $13.9^{\circ}C$,年均降水量 615 mm ,蒸发量约 1875 mm ,全年接

受的日照时数 $2300\sim2500\text{ h}$ 。土壤类型为典型的潮土,耕作层土壤质地为碱性壤土。

1.2 供试材料

本研究选取了两种由天然腐殖质材料(NFA,产自印度尼西亚)通过不同手段加工处理而成的改性材料作为试验样品。材料一(天然腐殖质材料砂磨液,M1)是将天然腐殖质材料破碎后配置成一定浓度的浆液,然后通过研磨机进行研磨,最终得到的粒径分布90%(D_{90})在 $30\text{ }\mu\text{m}$ 以下的浆液,再经过沉降、筛分去除杂质后获得的一种体系稳定的液体。材料二(全水溶硝基腐殖酸钾,M2)是将天然腐殖质材料破碎后,用一定浓度的硝酸溶液进行氧化降解,得到天然腐殖质材料的氧化物。然后将此氧化物加入一定浓度的氢氧化钾溶液中,经加热、提取、固液分离、干燥后得到的一种全水溶的黑色固体。相关材料均由中向旭曜科技有限公司提供。各材料的基本养分性质见表1。

表1 不同材料的基本养分性质

Table 1 Basic nutrient properties of different materials

样品 Sample	有机碳 Organic carbon/ (g·kg ⁻¹)	全氮 Total N/ (g·kg ⁻¹)	全磷 Total P/ (g·kg ⁻¹)	全钾 Total K/ (g·kg ⁻¹)	pH
NFA	$532.6 \pm 15.32\text{a}$	$8.51 \pm 1.39\text{b}$	$0.31 \pm 0.02\text{c}$	$0.17 \pm 0.00\text{b}$	$3.58 \pm 0.07\text{c}$
M1	$528.9 \pm 7.77\text{a}$	$6.93 \pm 0.21\text{b}$	$0.34 \pm 0.02\text{b}$	$0.17 \pm 0.00\text{b}$	$4.13 \pm 0.04\text{b}$
M2	$437.1 \pm 9.93\text{b}$	$28.00 \pm 0.91\text{a}$	$0.43 \pm 0.01\text{a}$	$171.8 \pm 2.57\text{a}$	$7.76 \pm 0.04\text{a}$

注:NFA、M1、M2分别代表天然腐殖质材料、材料一、材料二;表中氮、磷、钾的养分含量均为纯N、P、K的元素含量。同一列中的不同小写字母表示不同样品中养分含量差异显著($P<0.05$)。Note: NFA, M1, and M2 stand for natural humic acid material, material 1 and material 2, respectively. Nutrient contents of N, P, and K are listed based on the content of the element. Different lowercase letters in the same column indicated that the nutrient content in different samples was significantly different ($P<0.05$)。

1.3 试验设计

田间试验于2023年在封丘农业生态实验站进行,供试作物为玉米(郑单958),于6月11日播种,9月20日收获。本试验针对M1、M2两种材料,分别设置650(A1)、1300(A2)、1950(A3)L·hm⁻²三种不同用量处理,以及0.2(C1)、0.4(C2)、0.6(C3)、0.8(C4)、1.0(C5)、1.5(C6)、2.0(C7)g·L⁻¹七种不同浓度处理,外加不施用两种材料的CK(A0,C0),共计43个处理,每个处理设3次重复。不同浓度及用量组合对应的编号见表2。

试验采用微区设计,每个小区面积为 1 m^2 (1 m

$\times 1\text{ m}$),并通过完全随机区组设计进行小区排列。播种的株距为30 cm,行距为50 cm,每个小区内种植12株玉米。试验开始前,土壤($0\sim20\text{ cm}$)基础理化性质为:pH 7.93,土壤有机碳 $10.95\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$,全氮(TN) $0.80\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$,全磷(TP) $0.94\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$,全钾(TK) $15.47\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$,碱解氮(AN) $40.76\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,有效磷(AP) $32.24\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,速效钾(AK) $71.05\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 。

所有处理的施肥量均为:氮肥(N) $120\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$,磷肥(P_2O_5) $75\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$,钾肥(K_2O) $75\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$,所施化肥分别为尿素(含N 46%)、过磷酸钙(含 P_2O_5 16%)、硫酸钾(含 K_2O 45%)。在玉米播种前,

表 2 不同浓度及用量处理对应的编号

Table 2 The corresponding numbers treated with different concentrations and amounts

用量 Amounts/ (L·hm ⁻²)	浓度 Concentration / (g·L ⁻¹)						
	0.2	0.4	0.6	0.8	1.0	1.5	2.0
650	C1A1	C2A1	C3A1	C4A1	C5A1	C6A1	C7A1
1 300	C1A2	C2A2	C3A2	C4A2	C5A2	C6A2	C7A2
1 950	C1A3	C2A3	C3A3	C4A3	C5A3	C6A3	C7A3

注: CK (C0A0) 为不施用腐殖质材料的对照。下同。Note: CK (C0A0) was the control without humus materials. The same below.

将氮肥的 30% 以及全部磷、钾肥作为基肥施入, 剩余 70% 氮肥在大喇叭口期作为追肥施入。滴灌处理于拔节期开始进行第一次, 隔 7 d 后进行第二次, 于吐丝期进行第三次, 隔 7 d 后进行最后一次, 每次的用量及浓度如上所述。其他田间管理与当地常规田间管理相同。

1.4 材料分析与测定

腐殖质组分分析: 采用 0.1 mol·L⁻¹ NaOH 和 0.1 mol·L⁻¹ Na₄P₂O₇ 混合溶液提取胡敏酸 (HA)、富里酸 (FA)^[3], 然后通过重铬酸钾外加热法^[12]测定腐殖质 (Hus)、HA 及 FA 碳量。胡敏素 (Hu) 碳量用差减法得出, 即 Hu=Hus - HA - FA。

元素组成测定: 碳 (C)、氢 (H)、氮 (N)、硫 (S) 含量通过元素分析仪 (Elementar Vario EL cube, 德国) 测定。氧 (O) 的含量通过差减法计算得到, 并借助在马弗炉中 800 ℃ 加热 4 h^[13] 所测得的灰分数据进行校正。

粒径组成分析: 首先设置参数, 消除气泡, 开启超声和循环以测定背景值。随后, 取少量样品加入激光粒度分布仪 (Bettersize 2600, 百特, 辽宁丹东), 确保样品浓度处于测试范围内。待分散体系浓度稳定后, 开始测量。

扫描电子显微镜 (SEM) 观察: 将微量样品直接粘附在导电胶上, 并在溅射镀膜仪 (Quorum SC7620, 英国) 上以 10 mA 的电流喷金 45 s。随后, 使用扫描电子显微镜 (ZEISS Sigma 300, 德国) 拍摄样品形貌。在成像过程中, 加速电压设定为 3 kV, 采用 SE2 二次电子探测器。

傅里叶变换红外光谱 (FTIR) 分析: 通过采用 KBr 压片法对不同材料的红外光谱进行测定。首先, 将 1~2 mg 的粉末样品和 200 mg 的纯 KBr 均匀研磨后放入模具中, 然后用油压机将其压成透明薄片。

随后, 将样片放入红外光谱仪 (Thermo Nicolet iS50, 美国) 中进行分析。测试范围为波数 400~4 000 cm⁻¹, 扫描次数为 32, 分辨率为 4 cm⁻¹。

1.5 玉米样品采集与测定

玉米样品于 2023 年 9 月收获时进行采集。对每个小区内中间两列的玉米植株进行采集, 测定株高和生物量。收获小区内所有的玉米, 测定产量。

玉米的株高用卷尺测定, 生物量和产量用电子天平进行测定。

然后根据小区的产量, 估算出每公顷玉米的产量, 计算过程如下:

$$\text{产量} / (\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}) = \left(\frac{100}{0.3} + 1 \right) \times \left(\frac{100}{0.5} + 1 \right) \times \frac{\text{小区产量}}{12}$$

1.6 数据处理

利用 Excel 2019 进行试验数据处理, 用 SPSS 27 对试验数据进行方差分析和显著性检验, 处理间差异采用邓肯 (Duncan) 多重比较方法, 显著性水平为 0.05, 使用 Origin 2023b 进行绘图。

2 结果

2.1 不同材料中腐殖质组分及可溶性碳含量

由于加工手段的不同, 导致两种材料的组分产生了不同的变化。表 3 展示了不同材料样品中的腐殖质及其组分和可溶性碳^[14]的含量。可以看出, NFA 中的腐殖质含量最高, 其总碳量达到了 388.9 g·kg⁻¹。经加工处理后, M1 的腐殖质及其组分和可溶性碳的含量较 NFA 无显著变化, M2 则产生了较大的变化。就两种改性材料而言, M1 的腐殖质含碳量为 386.2 g·kg⁻¹, 显著高于 M2。在 M1 中, 胡敏酸 (HA)

是其主要的腐殖质组分, 含碳量为 $303.4 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$, 占腐殖质总量的 78.56%, 显著高于 M2。M1 中还含有较高的惰性腐殖质组分胡敏素 (Hu), 占其腐殖质总量的 18.43%。然而, M1 中的可溶性碳 (DOC) 含量极低, 仅为 $0.91 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 。反观 M2, 与 M1 相比其腐殖质含量明显减少, 总碳量仅为 $319.2 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 。M2 中腐殖质的主要组分是富里酸 (FA), 含碳量达

到了 $242.5 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$, 占其腐殖质总量的 75.98%。而其惰性腐殖质组分 Hu 的含量仅占了腐殖质总量的 0.96%。同时, M2 中的 DOC 含量高达 $310.7 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$, 远高于 M1 中的含量。总体而言, M2 的腐殖质总量低于 M1。然而, 分析腐殖质组分的含量表明, M2 主要减少了惰性腐殖质 Hu 的比例, 而其活性组分 FA 和 HA 的总量与 M1 相当。

表 3 不同样品腐殖质及其组分的总碳量和可溶性碳含量

Table 3 Total carbon content of humus and its components and dissolved carbon values in different samples

样品 Sample	富里酸 Fulvic acid/ (g·kg ⁻¹)	胡敏酸 Humic acid/ (g·kg ⁻¹)	胡敏素 Humin/ (g·kg ⁻¹)	PQ %/	腐殖质 Humus/ (g·kg ⁻¹)	可溶性碳 Dissolved carbon/ (g·kg ⁻¹)
NFA	$14.58 \pm 4.38\text{b}$	$305.8 \pm 18.32\text{a}$	$68.53 \pm 19.68\text{a}$	$95.41 \pm 1.52\text{a}$	$388.9 \pm 11.19\text{a}$	$1.12 \pm 0.13\text{b}$
M1	$11.60 \pm 0.93\text{b}$	$303.4 \pm 12.9\text{a}$	$71.19 \pm 19.23\text{a}$	$96.32 \pm 0.17\text{a}$	$386.2 \pm 5.68\text{a}$	$0.91 \pm 0.17\text{b}$
M2	$242.5 \pm 3.01\text{a}$	$73.60 \pm 10.81\text{b}$	$3.08 \pm 1.30\text{b}$	$23.23 \pm 2.85\text{b}$	$319.2 \pm 7.25\text{b}$	$310.7 \pm 5.29\text{a}$

注: PQ, 碱溶态腐殖质中胡敏酸的百分含量。同一列中的不同小写字母表示不同样品相同组分间差异显著 ($P<0.05$)。下同。
Note: PQ, percentage of humic acid in alkaline-extractable Hus. Different lowercase letters in the same column indicated significant differences between the same components of different samples ($P<0.05$). The same as below.

2.2 不同材料的元素组成特征

表 4 展示了天然腐殖质材料 NFA 及其产物 M1、M2 的 C、H、N、S、O 各元素的含量。M1 与 NFA 之间的各元素含量虽然略有差异, 但并未产生显著变化, 相比之下, M2 的 C、N、O 元素含量与 NFA 和 M1 相比则表现出显著差异, 与 M1 相比, M2 的

C/N 比由于 C 元素含量的降低和 N 元素含量的增加而显著降低。C/H 和 C/N 比的变化反映了材料样品有机质的化学结构变化^[15], 比如分子的缩合度和化学稳定性。一般地, 较高的 C/N 比意味着有机物较难被微生物分解, 因此, M1 和 M2 的施用可能会对植物产生不同的影响。

表 4 不同样品的元素组成

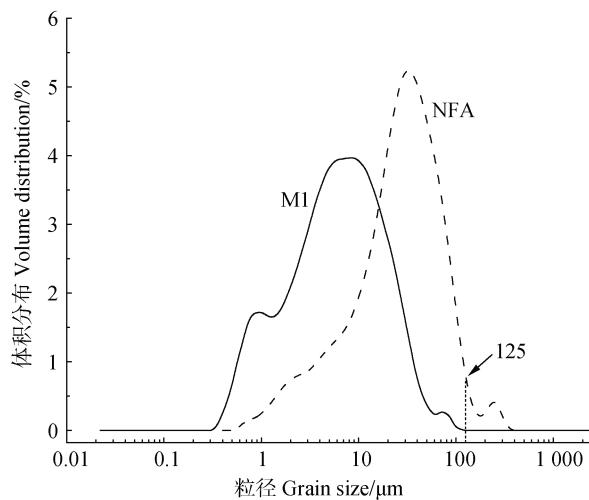
Table 4 Elemental composition of different samples

样品 Sample	C/ (g·kg ⁻¹)	H/ (g·kg ⁻¹)	N/ (g·kg ⁻¹)	O/ (g·kg ⁻¹)	C/H	C/N
NFA	$524.0 \pm 3.63\text{a}$	$36.26 \pm 2.78\text{a}$	$8.51 \pm 1.39\text{b}$	$429.4 \pm 3.11\text{a}$	$14.49 \pm 1.01\text{a}$	$62.37 \pm 9.73\text{a}$
M1	$519.2 \pm 0.25\text{a}$	$39.24 \pm 0.62\text{a}$	$6.93 \pm 0.21\text{b}$	$431.2 \pm 2.29\text{a}$	$13.23 \pm 0.20\text{a}$	$74.95 \pm 2.26\text{a}$
M2	$441.2 \pm 1.04\text{b}$	$35.44 \pm 2.11\text{a}$	$28.00 \pm 0.91\text{a}$	$319.6 \pm 1.62\text{b}$	$12.47 \pm 0.71\text{a}$	$15.77 \pm 0.48\text{b}$

2.3 不同材料的粒径分布及微形态特征

粒径分布通常用来评估材料中颗粒的尺寸分布, 是材料非常重要的一个参数, 影响着材料的反应性、溶解度和机械强度等性质。图 1 展示了不同材料的粒径分布特征。可以看出, NFA 的粒径分布呈现为一个较宽的峰, 这意味着其颗粒尺寸分布相对较广。相比之下, 加工处理后得到的 M1, 显示出

较窄的粒径分布峰, 且峰值在较小的粒径处, 说明其颗粒尺寸分布较窄, 且集中在较小的尺寸范围内。此外, 滴灌材料需满足粒径小于 120 目 (125 μm) 的要求, 才能保证不会堵塞滴头^[16]。而经加工后, M1 在 125 μm 处的体积分布为 0, 符合滴灌的条件。与 NFA 相比, M1 的颗粒尺寸一致性更高, 较小的颗粒增加了比表面积, 可能有利于提高养分的利用效率。



注: M2 由清液干燥制得, 为全水溶, 故无粒径分布特征。

Note: M2 is prepared by drying the clear liquid, which is completely soluble in water, so it has no particle size distribution characteristics.

图 1 不同材料的粒径分布图

Fig. 1 Particle size distribution of different materials

不同材料的元素组成和粒径分布有所差异, 使得它们的微观形态特征具有可比性。图 2 通过不同放大倍数下的扫描电镜图像展示了 NFA(图 2a~图 2d)、M1(图 2e~图 2h) 和 M2(图 2i~图 2l) 三种材料的微观形态。由图 2a~图 2d 可以观察到, NFA 的微形态呈现出相对较大、不规则的颗粒和块状结构, 材料的表面粗糙, 颗粒之间的黏结程度不一。相比之下, 图 2e~图 2h 的图像中的颗粒看起来更加紧密和粗糙, 表明在加工过程中, M1 的颗粒尺寸减小, 表面形成了更多小碎片和颗粒。这种尺寸的减小可能增加了材料的比表面积, 从而可能提升了 M1 的吸附能力。而图 2i~图 2l 的图像展现了更加均匀和平滑的表面, 这表明 M2 在加工过程中可能获得了较好的结构一致性以及改善的其他物理性能。

2.4 不同材料的红外光谱特征

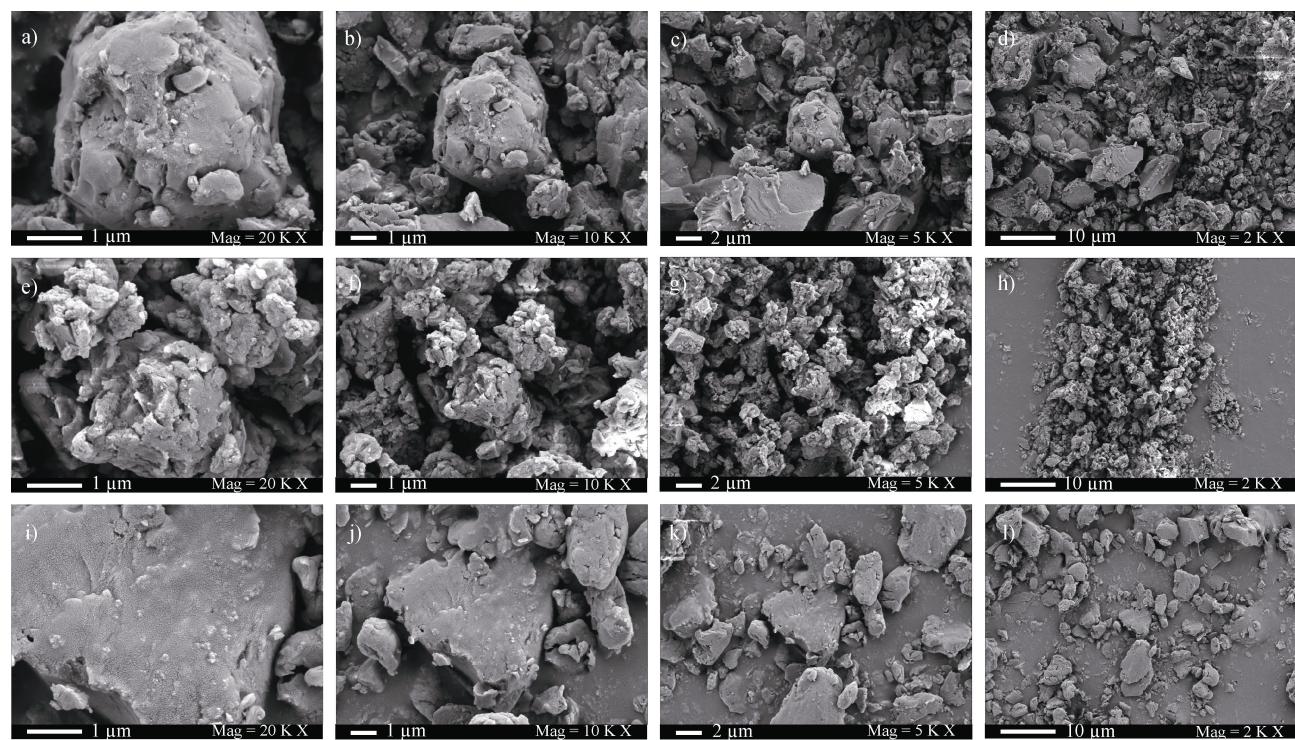
傅里叶变换红外光谱(FTIR)分析是一种用于识别材料中化学键和分子结构的重要方法。通过分析图 3 所示的 NFA、M1 和 M2 的 FTIR 谱图, 可以了解这些材料中不同化学键的振动特征。在 $3414\text{--}3423\text{ cm}^{-1}$ 处的宽峰表示有羟基($-\text{OH}$)的伸缩振动, 说明材料中可能存在醇类、酚类或者羧酸^[17-18]; $2921\text{--}2922\text{ cm}^{-1}$ 处的峰指示了 C-H 键的伸缩振动, 表明材料中可能存在甲基($-\text{CH}_3$)或者亚甲基

($-\text{CH}_2-$)^[19]; $1617\text{--}1621\text{ cm}^{-1}$ 附近的吸收峰可能表示芳香环上的 C=C 键或羧酸中 C=O 键的不对称伸缩振动^[18, 20]; $1383\text{--}1384\text{ cm}^{-1}$ 处的吸收峰通常与酚类化合物的-OH 变形振动和羧酸的 C-O 伸缩振动有关^[17]; $1100\text{--}1300\text{ cm}^{-1}$ 区间的吸收峰则可能归属于 C-N 键的伸缩振动^[18], 表明了氨基($-\text{NH}_3^+$)的存在。 1112 cm^{-1} 处的峰可能与 C-N 或 C-O 的伸缩振动相关^[21]; 而在 1034 cm^{-1} 处的吸收峰, 通常与多糖中 C-O 的伸缩振动有关, 或是硅酸盐杂质的 Si-O 伸缩振动^[18, 22]。对比 M1 和 M2, 可以看出: M1 在 $3414\text{--}3423\text{ cm}^{-1}$ 和 $2921\text{--}2922\text{ cm}^{-1}$ 处显示出较 M2 更强的伸缩振动峰, 这表明 M1 中含有更多的羟基和 C-H 键数量, 也可能意味着两种材料之间 C-H 键结构存在差异。M1 在 $1617\text{--}1621\text{ cm}^{-1}$ 也表现出较 M2 更尖锐的吸收峰, 可能意味着 M1 中双键含量增加, 或者是受到氢键作用的影响。而 M2 在 1384 cm^{-1} 处的显示出较 M1 更强的吸收峰, 表明 M2 中可能含有更多的羧基。同时, 1112 cm^{-1} 处的峰为 M2 所独有, 这说明 M2 可能含有氮或氧含量较高的官能团, 如羧基或者氨基。M1 在 1034 cm^{-1} 处呈现出一处吸收峰, 表明 M1 中可能含有较多的硅酸盐杂质。此外, M1 在 1000 cm^{-1} 以下展现出多个明显的峰, 而 M2 较少, 这可能意味着 M1 含有更复杂的官能团或分子结构。

2.5 滴灌方式下玉米植株的株高、生物量和产量

本研究观察了不同处理条件下玉米植株株高的变化(表 5)。可以看出, 虽然滴灌施用 M1 或 M2 导致玉米植株株高有所不同, 但差异并不显著。然而, 同样的处理条件下, M1 或 M2 对玉米植株的生物量(以干物质量计)产生了显著影响(表 6)。具体而言: 施用 M1 时, 不同浓度下的处理均有助于提升生物量。用量为 A1 时, 随着浓度的增加, 生物量逐渐增大, 特别是当浓度达到 C6 或 C7 时, 分别较 CK 显著增加了 13.94% 和 15.93%。用量为 A2 和 A3 时, 所有浓度处理均显著增加了生物量。其中用量为 A2 时, C6 浓度下生物量达到最大, 为 352.0 g, 较 CK 显著增加了 29.47%。用量为 A3 时, C5 浓度下生物量取得最大值, 达到 353.8 g, 较 CK 增加了 30.12%。

施用 M2 时, 随着浓度的增加, 生物量大体呈现出增加的趋势。用量为 A1 时, C3~C7 浓度处理



注: a~d 为 NFA, e~h 为 M1, i~l 为 M2, 从左到右依次为放大 20 000、10 000、5 000、2 000 倍。Note: a~d stands for NFA, e~h stands for M1, i~l stands for M2, and from left to right stands for magnification of 20 000, 10 000, 5 000, 2 000 times.

图 2 不同材料的扫描电镜图

Fig. 2 Scanning electron micrographs of different materials

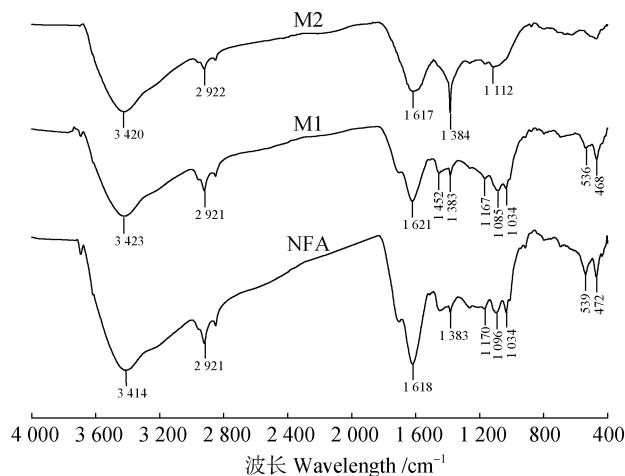


图 3 三种材料的红外光谱特征

Fig. 3 Fourier transform infrared spectroscopic characteristics of different materials

下生物量均显著高于 CK, 浓度为 C7 时生物量达到最大, 为 344.1 g, 较 CK 显著增加了 26.58%。在用量为 A2 和 A3 时, 生物量随着浓度的增加均呈现先增后减的趋势, 且均在浓度为 C5 时取得最大值, 分别为 380.9 g、382.6 g, 较 CK 显著增加了 40.11%、40.74%。

评估某种材料对作物的影响, 最直观的方法是测定作物的产量变化。图 4 展示了不同处理对玉米产量的影响。由图 4a 可以看出, M1 施用量的不同会影响玉米产量。A1 用量下, 随着浓度的增加, 玉米产量也随之增加, 浓度 C7 时产量最高, 达到 $11\ 081\ \text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$, 较 CK 显著增加了 12.33%。A2 和 A3 用量下, 产量随浓度的增加呈现出先增后减的趋势。用量为 A2 时产量在浓度为 C6 下最高, 而用量为 A3 时产量在浓度为 C5 下最高, 分别为 $11\ 578\ \text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 和 $11\ 647\ \text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$, 较 CK 分别显著增加 17.37% 和 18.06%。

在浓度相同时, 随着 M1 用量的增加, 玉米产量也逐渐增加。浓度为 C1 和 C2 时, 虽然各用量均增加了产量, 但是与 CK 相比无显著差异。浓度为 C3、C4、C5 时, A2 和 A3 用量水平均显著增加了产量, 且均在用量为 A3 时产量最大, 分别为 $11\ 029$ 、 $11\ 247$ 、 $11\ 647\ \text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$, 较 CK 分别增加了 11.80%、14.01%、18.06%。浓度为 C6 和 C7 时, 所有用量均显著增加了产量, 特别是在用量为 A3 时, 产量分

表5 不同处理下玉米植株的株高

Table 5 Plant height of maize under different treatments /cm

处理 Treatment	M1			M2		
	A1	A2	A3	A1	A2	A3
C0	226.0 ± 17.69Aa					
C1	227.7 ± 5.13Aa	234.0 ± 8.54Aa	237.0 ± 15.39Aa	230.0 ± 2.00Aa	234.0 ± 16.09Aa	235.7 ± 18.58Aa
C2	237.0 ± 14.80Aa	235.7 ± 6.66Aa	229.0 ± 1.00Aa	230.8 ± 7.11Aa	232.0 ± 17.59Aa	233.0 ± 7.21Aa
C3	236.5 ± 11.30Aa	240.7 ± 9.81Aa	240.3 ± 17.04Aa	233.2 ± 12.36Aa	235.3 ± 8.62Aa	238.0 ± 13.00Aa
C4	234.2 ± 4.19Aa	245.5 ± 8.85Aa	236.5 ± 9.26Aa	241.2 ± 8.40Aa	241.5 ± 8.67Aa	238.0 ± 6.24Aa
C5	240.0 ± 3.04Aa	236.3 ± 10.26Aa	245.7 ± 13.82Aa	240.8 ± 15.78Aa	244.0 ± 10.58Aa	246.3 ± 10.07Aa
C6	241.2 ± 9.41Aa	236.1 ± 1.27Aa	241.5 ± 3.77Aa	236.3 ± 8.02Aa	240.3 ± 8.14Aa	242.3 ± 3.06Aa
C7	239.7 ± 7.75Aa	241.3 ± 8.74Aa	238.3 ± 2.31Aa	242.5 ± 6.54Aa	239.5 ± 11.46Aa	244.0 ± 5.29Aa

注：同行不同大写字母代表 M1 (M2) 在相同浓度不同用量处理间差异显著 ($P<0.05$)，同列不同小写字母代表 M1 (M2) 在相同用量、不同浓度处理间差异显著 ($P<0.05$)。浓度、用量及其交互作用对玉米株高均无显著作用。下同。Note: Different uppercase letters in the same line represented M1 (M2) had significant differences between treatments at the same concentration and different amounts ($P<0.05$) . Different lowercase letters in the same column represented M1 (M2) had significant differences between treatments at the same amount and different concentrations ($P<0.05$) . Concentration, amount and their interaction had no significant effect on maize plant height. The same as below.

表6 不同处理下玉米植株的生物量

Table 6 The biomass of maize under different treatments /g

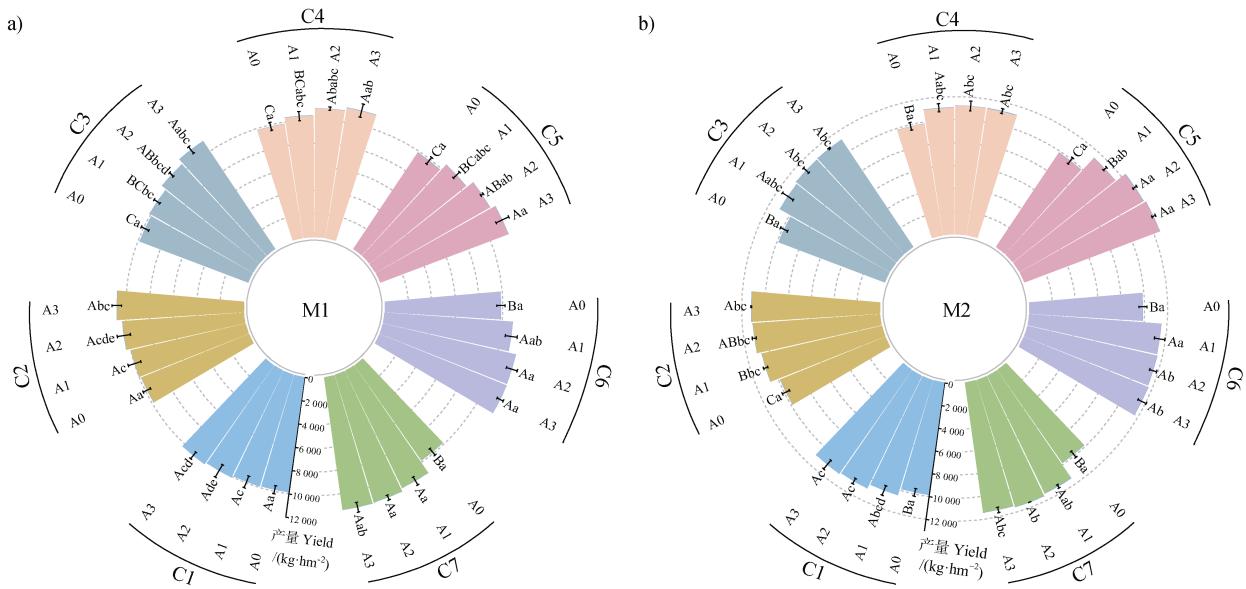
处理 Treatment	M1			M2		
	A1	A2	A3	A1	A2	A3
C0	271.9 ± 23.54Ab	271.9 ± 23.54Ac	271.9 ± 23.54Ab	271.9 ± 23.54Ac	271.9 ± 23.54Ad	271.9 ± 23.54Ac
C1	284.4 ± 23.08Aab	307.9 ± 13.04Ab	322.1 ± 34.64Aa	290.3 ± 20.83Abc	300.7 ± 28.65Acd	314.3 ± 16.99Ab
C2	292.0 ± 14.14Aab	312.4 ± 17.21Ab	333.8 ± 10.26Aa	304.5 ± 20.04Aabc	317.6 ± 19.25Abc	322.7 ± 9.63Ab
C3	299.9 ± 15.44Bab	307.9 ± 23.44ABb	325.9 ± 10.6Aa	321.4 ± 20.53Aab	327.2 ± 21.13Abc	328.6 ± 27.99Ab
C4	299.7 ± 22.89Aab	331.5 ± 15.77Aab	320.6 ± 14.21Aa	316.0 ± 23.87Aab	345.6 ± 12.15Aab	342.4 ± 23.07Ab
C5	307.9 ± 13.04Aab	308.1 ± 17.39Ab	353.8 ± 20.17Aa	330.1 ± 10.95Aab	380.9 ± 14.98Aa	382.6 ± 34.82Aa
C6	309.8 ± 22.52Ba	352.0 ± 5.62Ba	348.6 ± 18.87Aa	323.5 ± 29.54Bab	350.5 ± 25.32Aab	354.9 ± 12.16Aab
C7	315.2 ± 13.69Ba	330.2 ± 22.77Aab	328.7 ± 12.26Aa	344.1 ± 25.25Aa	347.6 ± 19.68Aab	344.8 ± 6.4Aab

注：M1 的浓度对玉米生物量有极显著的影响，而 M2 的浓度对生物量有显著的影响。此外，M1 和 M2 的用量均对生物量有极显著的影响。然而，浓度和用量之间的交互作用对生物量无显著影响。Note: The concentration of M1 has a highly significant effect on the biomass of maize, whereas the concentration of M2 has a significant effect on biomass. Additionally, the amounts of M1 and M2 both have highly significant effects on biomass. However, the interaction between concentration and amount does not have a significant effect on biomass.

别达到 $11\ 618\ \text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 和 $11\ 389\ \text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ ，较 CK 分别增产了 17.77% 和 15.45%。

图 4b 显示了 M2 在不同浓度和用量水平下对玉米产量的影响。可以看出，三种滴灌用量下，玉米产量均随浓度的增加呈先增后减的趋势。用量为 A1

时，产量在浓度 C6 下达到最大，为 $11\ 499\ \text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ ，较 CK 显著提高了 16.56%。用量为 A2 和 A3 时，玉米产量均在浓度为 C5 处取得最大，分别为 $12\ 405$ 、 $12\ 572\ \text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ ，较 CK 显著增加 25.75%、27.45%。



注: 图 a、图 b 分别表示 M1 和 M2 在不同浓度和用量下的产量, 同一颜色的条形图表示施用浓度相同, 用量不同。大写字母表示浓度相同、用量不同时, 处理间差异显著; 小写字母表示用量相同、浓度不同时 ($P<0.05$)。Note: Figures a and b represent the yields of M1 and M2 at different concentrations and amounts, respectively. The bar chart of the same color indicates that the application concentration is the same and the amount are different. The uppercase letters indicate that when the concentration is the same and the amounts are different, the difference between the treatments is significant; the lowercase letters indicate that the difference was significant ($P<0.05$) when the amounts were the same and the concentration was different.

图 4 不同处理下玉米的产量

Fig. 4 Maize yield under different treatments

在浓度相同时, 除浓度为 C7 之外, 随着 M2 用量的增加, 玉米产量基本上呈现出增加的趋势。

浓度为 C1 时, A2 和 A3 用量显著增加了玉米的产量, 用量为 A3 时产量最大为 $11\ 015\ \text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$, 较 CK 提高了 11.66%。浓度为 C2~C7 时, M2 在不同用量下均显著提高了产量, 最大产量为 $11\ 193\sim12\ 572\ \text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$, 较 CK 增加了 13.46%~27.45%。

2.6 两种材料间玉米的产量以及不同浓度、用量与产量的关系

通过图 4 可以看出 M1 和 M2 单独对玉米产量的影响。为了深入了解这两种材料间的产量关系, 图 5 对 M1、M2 在八种效果较好的浓度和用量组合 (C5A2、C5A3、C6A1、C6A2、C6A3、C7A1、C7A2、C7A3) 下玉米产量进行了比较。结果显示, 在相同浓度用量水平下, M2 的增产效果普遍好于 M1。特别是在浓度用量为 C5A2 和 C5A3 组合下, M2 的产量较 M1 分别显著提高 10.90% 和 7.95%。同时, 图 5 也展示了同一种材料在不同的处理水平下的产量变化。对于 M1 而言, 其产量在 C5A3 处理水平下最高, 达到 $11\ 647\ \text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 。而对于 M2, 其在 C5A2

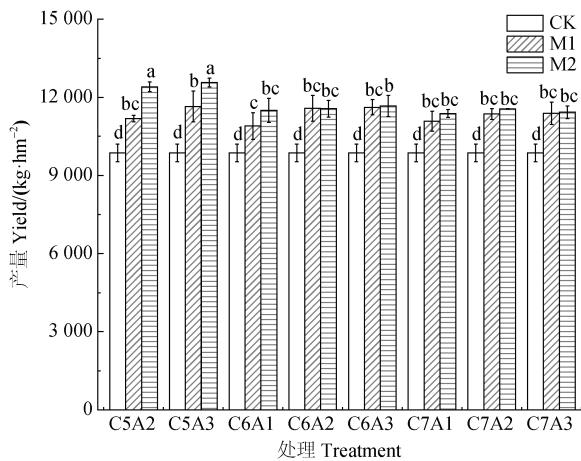
和 C5A3 的处理下产量较高, 分别为 $12\ 405\ \text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 和 $12\ 572\ \text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$, 显著优于其他处理。

产量的提高受滴灌材料的浓度、用量等多个因素的影响。单独的浓度或者用量虽然能看出产量变化的趋势, 但多因素联合作用下对产量的影响更能说明问题。图 6 的多元回归分析结果显示, M1 和 M2 的浓度与用量对玉米产量有显著影响。具体而言, 施用 M1 时, 产量 60% 的变异可通过浓度和用量的水平来解释, 而 M2 的不同浓度和用量水平能解释产量 41% 的变异性。这表明 M1 和 M2 对产量的影响程度不同, 并且这种影响是多个因素共同作用的结果。

3 讨 论

3.1 两种天然腐殖质改性材料的差异

富里酸 (FA) 和胡敏酸 (HA) 是腐殖质的活性组分^[3], 它们在促进植物生长、增强养分吸收、改善土壤条件、增强抗逆性和提高病虫害抵抗力等方面均发挥重要作用。不同的是, FA 的分子量较小, 有助于增强植物营养的吸收和利用; 而 HA 分子量



注: 不同小写字母代表差异显著($P<0.05$)。Note: Different lowercase letters represent significant differences ($P<0.05$)。

图5 一定浓度、用量下玉米的产量

Fig. 5 The yield of maize under certain concentrations and amounts
较大, 主要作用是改善土壤结构, 增加土壤的保水

和保肥能力^[23]。从表3可以看出, 加工处理对M1和M2产生了不同的影响。与M1相比, 加工处理使得M2中的腐殖质总量减少, 同时FA含量显著增加。该变化可能是由于加工过程中, M2中腐殖质惰性组分Hu被除去, 同时, 部分子量较大的HA被转化为了分子量较小的FA^[24], 这可能提高了M2的生物活性, 增加了对植物的有效性。碱溶态腐殖质中HA的百分含量(PQ)是衡量腐殖质腐殖化程度的一个重要指标^[13]。M1的PQ值高于M2, 表明M1的腐殖化程度更高, 结构更复杂, 在土壤中的稳定性更强^[25]。此外, C/H和C/N比值也是反映腐殖化程度的重要指标, 通常值越大, 腐殖化程度越高^[15], 腐殖质越难被微生物利用。M2的上述比值均低于M1, 进一步说明M2的腐殖化程度较低, 这与PQ的结果一致。总而言之, 加工处理改变了M1和M2的腐殖质组成, 从而可能影响它们在促进植物生长方面的效果。

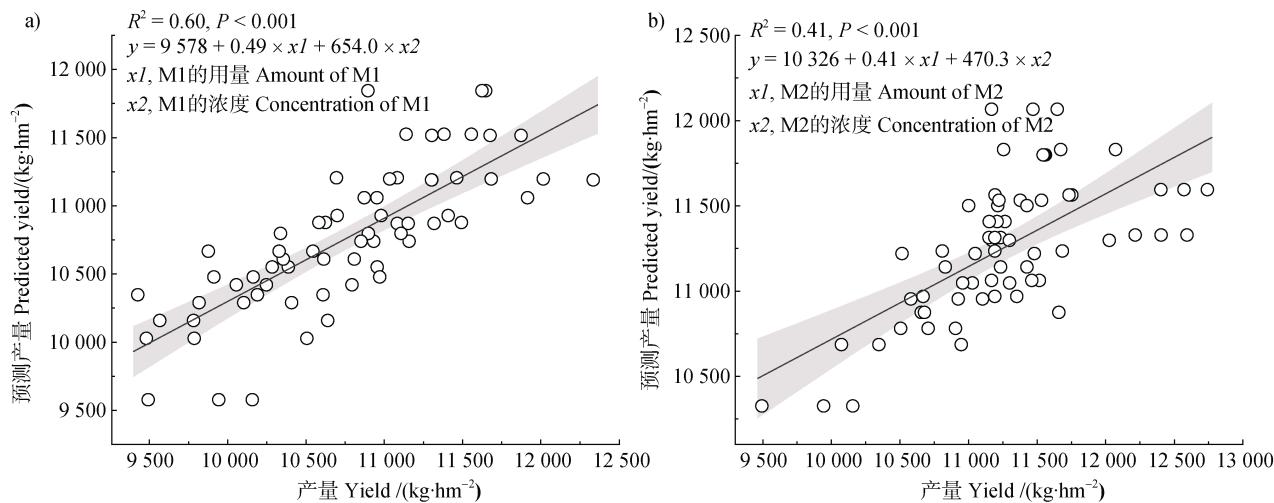


图6 不同浓度、用量处理对玉米产量的回归分析(a. M1; b. M2)

Fig. 6 Regression analysis of different concentrations and amounts of maize yield (a. M1; b. M2)

从扫描电镜观察两种材料(图2), 可以发现M1具有粗糙和复杂的颗粒表面, 呈现出不均匀的粒径, 这可能是由于M1的FA和HA两种组分的颗粒相互缠结在一起^[26], 并且Hu含量较高。相比之下, M2则表现出较为光滑、疏松的海绵状外观, 其颗粒表面无杂乱的结构^[17, 26], 这或许与其腐殖质组分主要为分子量较小的FA, 而且几乎不含有惰性组分Hu有关^[24]。在FTIR谱图(图3)中, 可以注意到一些关键的吸收峰发生了变化。M1和M2的吸收峰在3 414~3 423 cm⁻¹范围内出现了微小的移动, 可

能是由于加工过程中-OH的氢键环境发生变化, 这可能是由于物理或化学作用引起的结构变化, 如M1加工过程中的物理剪切可能导致部分氢键断裂, 而M2的加工可能涉及更复杂的化学变化, 从而影响了羟基的氢键^[22]。在2 921~2 922 cm⁻¹范围内, M1显示出较M2更强的吸收峰, 表明加工过程可能增加了脂肪族C-H链的数量, 这可能是由于物理剪切导致某些长链烷烃结构暴露, 或者是化学处理改变了脂肪族结构^[22]。在1 617~1 621 cm⁻¹范围内, M1的吸收峰更明显, 表明M1可能含有更多的芳香结构或

羧基盐, 这可能是由于加工处理导致芳香结构的凝聚或某些羧基的脱羧^[27], 会使得 M1 更难被植物利用。而在 1 034 cm⁻¹ 处, M2 的吸收峰强度较 M1 减弱, 可能是由于加工过程中多糖被降解或硅酸盐杂质被去除^[28]。总之, 两种材料具有不同的官能团, 因此可能对土壤中的微生物群落产生不同的影响, 从而影响作物的根系生态系统, 进而影响作物生长。

3.2 不同浓度和用量的天然腐殖质改性材料对玉米生长的影响

腐殖质是植物生物刺激素的组成部分, 可影响植物的生理过程、养分吸收和植物生长, 从而提高作物产量^[29]。本研究通过滴灌不同浓度和用量的 M1 与 M2, 观察了玉米植株在株高、生物量和产量上的变化。株高方面, 尽管不同浓度和用量的 M1、M2 处理对玉米植株的株高均有一定影响(表 5), 但这种影响并不显著, 表明在株高增长方面, M1 和 M2 对玉米植株的促进作用受限, 说明玉米株高的增长可能对于腐殖质并不敏感, 也可能是因为受其自身基因型的控制, 王相平等^[30]在施用腐殖质对棉花株高的影响试验中也得到了相同的结论。

在生物量方面, M1 和 M2 的施用在不同程度上显著增加了玉米的干物质量, 尤其是在高浓度处理下, 表现出了与 CK 的显著差异。由表 6 可知, 不同用量下玉米植株的生物量达到最大时的浓度并不相同。施用 M1, 在用量分别为 A1、A2、A3 时, 玉米植株的生物量在浓度分别为 C7、C6 和 C5 时达到最大。对于 M2 而言, 同样表现出随着滴灌浓度的增加, 生物量逐步提高, 其效果在用量为 A2 或 A3 时更为明显, 尤其是在 C5 浓度下, 生物量的增加最为显著。前人的研究也表明, 施用腐殖质后小麦^[6]、玉米^[31]、棉花^[32]等作物的生物量均有所增加。该结果表明, 虽然施用 M1 或 M2 后玉米株高增长受限, 但玉米植株可能通过增加叶片大小、叶片厚度或其他形态特征来增加其生物量。

产量方面, M1 和 M2 的应用显著提高了玉米的产量(图 4), 高珊等^[33]的研究也证实了该观点, 这可能是因为腐殖质分子的结构中含有丰富的活性官能团, 能够络合肥料和土壤中的养分, 从而提高养分的利用率^[5]。浓度和用量相同时, 施用 M2 的效果普遍优于施用 M1。在某些特定的处理组合下, 如 C5A2 和 C5A3, 施用 M1 和 M2 的产量存在显著差异(图 5)。这可能是由于以下原因: 第一, M2 在

这些特定的浓度和用量条件下发挥出了更强的信号分子的作用, 从而诱导了植物激素的产生^[34], 使玉米中生长素(IAA)和赤霉素(GA)的含量得到了不同程度的增加^[35], 进而促进了玉米籽粒的充实和增产。第二, 相比于 M1, M2 的聚合度更低、分子量更小, 吸附在玉米根系上之后增加了质膜上质子泵(H⁺-ATPase)的数量, 从而促进 H⁺向细胞外运输, 导致细胞壁酸化变软, 促进根系伸长, 帮助植物更有效地吸收土壤中的营养物质, 进而促进植物生长发育, 提高作物产量^[36]。第三, 腐殖质对植物生长的促进作用可能归因于其羧基团, 腐殖质中的羧基越多, 其促进效果越明显^[37]。本研究中, FTIR 谱图分析显示 M2 中的羧基含量高于 M1(图 3), 与 Jing^[37]等的观点相符。第四, M2 的无机养分含量高于 M1, 尤其是氮和钾(表 1)。这些养分可被植物直接吸收。氮有助于增加叶绿素的合成, 从而增强植物的光合作用^[38]; 钾有助于调节植物的水分状态, 通过控制气孔的开闭来调节水分蒸腾, 提高作物对水分的利用效率, 并促进养分在植物体内的运输^[38], 最终增加产量。此外, 通过多次少量的滴灌施用, 可频繁补充浅层土壤中的养分, 从而降低淋溶损失的风险^[39], 导致硝态氮和有效钾在根区附近累积。

综合而言, 滴灌施用 M1 和 M2 能够有效提升玉米的生物量和产量, 这可能与它们的作用机制密切相关。腐殖质能够通过激活某些特定的生物化学途径, 增加植物体内生长激素的含量, 提高植物的养分吸收效率, 从而促进植物的生长发育。由于 M2 中活性腐殖质含量更高, 在相同条件下可能更有效地促进了玉米植株的生长。尽管本研究在腐殖质浓度及用量的选择上提供了新的见解, 并为精准农业和可持续农业的发展提供了意见, 但仍有许多问题有待进一步研究, 比如 M1 和 M2 在不同土壤类型和气候条件下的效果、长期应用的影响以及其作用机制等。

4 结 论

本研究比较了两种不同方式制备的天然腐殖质改性材料(M1 和 M2)的理化特性, 以及这两种材料在不同用量和浓度下通过滴灌施用对玉米生长的影响。M1 和 M2 在化学组成、分子量和微观结构上存在明显差异。M1 分子量较高, 结构较复杂; M2 分子量较

低，活性腐殖质含量较高。施用这两种材料在不同程度上显著增加了玉米的生物量和产量，特别是M2，在浓度为 $1.0\text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$ 、用量为 $1\,300$ 或 $1\,950\text{ L}\cdot\text{hm}^{-2}$ 下表现较佳，产量分别达到 $12\,405\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 、 $12\,572\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ ，较CK显著增加了 25.75% 、 27.45% 。综合考虑成本等因素，建议在田间施用时采用浓度为 $1.0\text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$ 、用量为 $1\,300\text{ L}\cdot\text{hm}^{-2}$ 的M2。

参考文献 (References)

- [1] Shen J B, Bai Y, Wei Z, et al. Rhizobiont: An interdisciplinary innovation and perspective for harmonizing resources, environment, and food security[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2021, 58 (4): 805—813. [申建波, 白洋, 韦中, 等. 根际生命共同体: 协调资源、环境和粮食安全的学术思路与交叉创新[J]. 土壤学报, 2021, 58 (4): 805—813.]
- [2] Coskun D, Britto D T, Shi W M, et al. Nitrogen transformations in modern agriculture and the role of biological nitrification inhibition[J]. *Nature Plants*, 2017, 3 (6): 17074.
- [3] Jarukas L, Ivanauskas L, Kasparaviciene G, et al. Determination of organic compounds, fulvic acid, humic acid, and humin in peat and sapropel alkaline extracts[J]. *Molecules*, 2021, 26 (10): 2995.
- [4] Luo W Q, Zhao X, Wang G T, et al. Humic acid and fulvic acid facilitate the formation of vivianite and the transformation of cadmium via microbially-mediated iron reduction[J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2023, 446: 130655.
- [5] Sun H Y, Sun Y Z, Zhou L, et al. Effects of chemical fertilizer reduction combined with humic acid bio-fertilizer on soil biological properties and dry matter mass of maize[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2022, 33 (3): 677—684. [孙海燕, 孙义卓, 周娈, 等. 化肥减量配施腐植酸生物肥对土壤生物学性质和玉米干物质量的影响[J]. 应用生态学报, 2022, 33 (3): 677—684.]
- [6] Liang Y Y, Wang Z P, Shi Q Z, et al. Effects of fulvic acid with different molecular weights on growth and nutrient utilization of winter wheat[J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizers*, 2023, 29 (2): 308—322. [梁媛媛, 王泽平, 史秋哲, 等. 不同分子量黄腐酸对冬小麦生长和养分吸收利用的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2023, 29 (2): 308—322.]
- [7] Kishor M, Jayakumar M, Gokavi N, et al. Humic acid as foliar and soil application improve the growth, yield and quality of coffee(cv. C × R) in Western Ghats of India[J]. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 2021, 101 (6): 2273—2283.
- [8] Rasouli F, Nasiri Y, Asadi M, et al. Fertilizer type and humic acid improve the growth responses, nutrient uptake, and essential oil content on *Coriandrum sativum* L[J]. *Scientific Reports*, 2022, 12 (1): 7437.
- [9] Tyagi J, Ahmad S, Malik M. Nitrogenous fertilizers: Impact on environment sustainability, mitigation strategies, and challenges[J]. *International Journal of Environmental Science and Technology*, 2022, 19 (11): 11649—11672.
- [10] Yang M H, Zhang L, Xu S T, et al. Effect of water soluble humic acid applied to potato foliage on plant growth, photosynthesis characteristics and fresh tuber yield under different water deficits[J]. *Scientific Reports*, 2020, 10 (1): 7854.
- [11] Selim E M, Mosa A A, El-Ghamry A M. Evaluation of humic substances fertigation through surface and subsurface drip irrigation systems on potato grown under Egyptian sandy soil conditions[J]. *Agricultural Water Management*, 2009, 96 (8): 1218—1222.
- [12] Lu R K. Analytical methods for soil and agrochemistry[M]. Beijing: China Agricultural Science and Technology Press, 2000. [鲁如坤. 土壤农业化学分析方法[M]. 北京: 中国农业科技出版社, 2000.]
- [13] Xu J S, Zhao B Z, Chu W Y, et al. Chemical nature of humic substances in two typical Chinese soils (upland vs paddy soil): A comparative advanced solid state NMR study[J]. *Science of the Total Environment*, 2017, 576: 444—452.
- [14] 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.
- [15] Liu X M, Hou Y, Li Z, et al. Hyperthermophilic composting of sewage sludge accelerates humic acid formation: Elemental and spectroscopic evidence[J]. *Waste Management*, 2020, 103: 342—351.
- [16] Coelho R D, de Almeida A N, de Oliveira Costa J, et al. Mobile drip irrigation (MDI): Clogging of high flow emitters caused by dragging of driplines on the ground and by solid particles in the irrigation water[J]. *Agricultural Water Management*, 2022, 263: 107454.
- [17] Rashid T, Sher F, Jusoh M, et al. Parametric optimization and structural feature analysis of humic acid extraction from lignite[J]. *Environmental Research*, 2023, 220: 115160.
- [18] Shen Y W, Lin H T, Gao W S, et al. The effects of humic acid urea and polyaspartic acid urea on reducing nitrogen loss compared with urea[J]. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 2020, 100 (12): 4425—4432.
- [19] Luo H W, Liu C Y, He D Q, et al. Interactions between polypropylene microplastics (PP-MPs) and humic acid influenced by aging of MPs[J]. *Water Research*, 2022, 222: 118921.
- [20] Li H H, Zhang T, Tsang D C W, et al. Effects of external additives : Biochar , bentonite , phosphate , on co-composting for swine manure and corn straw[J]. *Chemosphere*, 2020, 248: 125927.
- [21] Pucić I, Jurkin T. FTIR assessment of poly (ethylene

- oxide) irradiated in solid state, melt and aqueous solution[J]. *Radiation Physics and Chemistry*, 2012, 81(9): 1426—1429.
- [22] Guo X J, Li C W, Zhu Q L, et al. Characterization of dissolved organic matter from biogas residue composting using spectroscopic techniques[J]. *Waste Management*, 2018, 78: 301—309.
- [23] Ampong K, Thilakarathna M S, Gorim L Y. Understanding the role of humic acids on crop performance and soil health[J]. *Frontiers in Agronomy*, 2022, 4: 848621.
- [24] Song G X, Simpson A J, Hayes M H B. Compositional changes in the humin fraction resulting from the long-term cultivation of an Irish grassland soil: Evidence from FTIR and multi-NMR spectroscopies[J]. *Science of the Total Environment*, 2023, 880: 163280.
- [25] Zheng Y Y, Zhang J B, Tan J, et al. Chemical composition and structure of humus relative to sources[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2019, 56(2): 386—397. [郑延云, 张佳宝, 谭钧, 等. 不同来源腐殖质的化学组成与结构特征研究[J]. 土壤学报, 2019, 56(2): 386—397.]
- [26] Dai S X, Zhao L, Teng Y, et al. Effect of composition and microstructure of humic acid on 3, 3', 4, 4'-tetrachlorobiphenyl sorption[J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2018, 25(15): 14656—14665.
- [27] Tang Y F, Li X W, Dong B, et al. Effect of aromatic repolymerization of humic acid-like fraction on digestate phytotoxicity reduction during high-solid anaerobic digestion for stabilization treatment of sewage sludge[J]. *Water Research*, 2018, 143: 436—444.
- [28] Xaba S A, Igberase E, Osayi J, et al. Optimization of primary sewage sludge and coal lignite by microwave-assisted pyrolysis for the production of bio-oil[J]. *Environmental Technology*, 2022, 43(5): 658—672.
- [29] Wang Y H, Lu Y L, Wang L, et al. Analysis of the molecular composition of humic substances and their effects on physiological metabolism in maize based on untargeted metabolomics[J]. *Frontiers in Plant Science*, 2023, 14: 1122621.
- [30] Wang X P, Yang J S, Zhang S J, et al. Effects of different amendments application on cotton growth and soil properties in arid areas[J]. *Ecology and Environmental Sciences*, 2020, 29(4): 757—762. [王相平, 杨劲松, 张胜江, 等. 改良剂施用对干旱盐碱区棉花生长及土壤性质的影响[J]. 生态环境学报, 2020, 29(4): 757—762.]
- [31] Zhou L P, Yuan L, Zhao B Q, et al. Effects of single-sided application of humic acid on maize root growth[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2022, 55(2): 339—349. [周丽平, 袁亮, 赵秉强, 等. 腐殖酸单侧刺激对玉米根系生长的影响[J]. 中国农业科学, 2022, 55(2): 339—349.]
- [32] Guo X S, Su X R, Fan Z Q, et al. Effects of combined application of controlled-release urea and humic acid on growth and antioxidant system of cotton seedlings under salt stress[J]. *Soils*, 2021, 53(1): 112—117. [郭新送, 苏秀荣, 范仲卿, 等. 盐分胁迫下控释尿素配施腐植酸对棉花幼苗生长和抗氧化系统的影响[J]. 土壤, 2021, 53(1): 112—117.]
- [33] Gao S, Yang J S, Yao R J, et al. Effects of soil amelioration measures mitigating soil salinity and improving crop P uptake in coastal area of North Jiangsu[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2020, 57(5): 1219—1229. [高珊, 杨劲松, 姚荣江, 等. 改良措施对苏北盐渍土盐碱障碍和作物磷素吸收的调控[J]. 土壤学报, 2020, 57(5): 1219—1229.]
- [34] Zhou L P, Yuan L, Zhao B Q, et al. Advances in humic acid structures and their regulatory role in maize roots[J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizers*, 2022, 28(2): 334—343. [周丽平, 袁亮, 赵秉强, 等. 腐植酸的组成结构及其对作物根系调控的研究进展[J]. 植物营养与肥料学报, 2022, 28(2): 334—343.]
- [35] Nardi S, Pizzeghello D, Muscolo A, et al. Physiological effects of humic substances on higher plants[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2002, 34(11): 1527—1536.
- [36] Nardi S, Pizzeghello D, Gessa C, et al. A low molecular weight humic fraction on nitrate uptake and protein synthesis in maize seedlings[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2000, 32(3): 415—419.
- [37] Jing J Y, Zhang S Q, Yuan L, et al. Humic acid complex formation with urea alters its structure and enhances biomass production in hydroponic maize[J]. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 2022, 102(9): 3636—3643.
- [38] Sinha D, Tandon P K. An overview of nitrogen, phosphorus and potassium: Key players of nutrition process in plants[M]//Mishra K, Tandon P K, Srivastava S. Sustainable solutions for elemental deficiency and excess in crop plants. Singapore: Springer, 2020: 85—117.
- [39] Liu Y H, Feng X Y, Dong G H, et al. Effect of fertilization frequency on soil water, nitrogen transport and tomato yield under alternate partial root-zone drip irrigation[J]. *Soils*, 2023, 55(5): 983—990. [刘宇航, 冯许钰, 董光华, 等. 分根区交替滴灌施肥频率对土壤水氮运移及番茄产量的影响[J]. 土壤, 2023, 55(5): 983—990.]

(责任编辑: 陈荣府)