

DOI: 10.11686/cyxb2024472

http://cyxb.magtech.com.cn

卢小倩, 陈金露, 杨卫君, 等. 氮肥减量配施腐植酸对北疆滴灌玉米田土壤真菌群落的影响. 草业学报, 2025, 34(10): 120-131.

LU Xiao-qian, CHEN Jin-lu, YANG Wei-jun, et al. Effects of nitrogen fertilizer reduction combined with humic acid on soil fungal communities in drip irrigated maize fields in northern Xinjiang. Acta Prataculturae Sinica, 2025, 34(10): 120-131.

## 氮肥减量配施腐植酸对北疆滴灌玉米田土壤真菌群落的影响

卢小倩<sup>1,2</sup>, 陈金露<sup>1,2</sup>, 杨卫君<sup>3</sup>, 郭青云<sup>1,2</sup>, 王单丽<sup>1,2</sup>, 赵红梅<sup>1,2\*</sup>

(1. 新疆农业大学资源与环境学院, 新疆 乌鲁木齐 830052; 2. 新疆土壤与植物生态过程重点实验室, 新疆 乌鲁木齐 830052; 3. 新疆农业大学农学院, 新疆 乌鲁木齐 830052)

**摘要:**为研究氮肥减量条件下添加腐植酸对北疆滴灌玉米田土壤真菌群落的影响,探究农田氮肥优化配施途径,采用随机区组试验设计,设置不施氮肥(CK, 0 kg·hm<sup>-2</sup>)、常规氮肥(T<sub>1</sub>, 300 kg·hm<sup>-2</sup>)、单施腐植酸(T<sub>2</sub>, 90 kg·hm<sup>-2</sup>)、常规氮肥配施腐植酸(T<sub>3</sub>)、氮肥减量15%配施腐植酸(T<sub>4</sub>)和氮肥减量30%配施腐植酸(T<sub>5</sub>)6个处理。利用Illumina MiSeq高通量测序技术,分析不同处理下土壤养分、土壤真菌多样性和群落结构及玉米产量的变化,探讨氮肥减量配施腐植酸对土壤真菌群落和玉米产量的影响。结果表明,与常规氮肥(T<sub>1</sub>)相比,氮肥减量15%配施腐植酸(T<sub>4</sub>)和氮肥减量30%配施腐植酸(T<sub>5</sub>)处理下土壤电导率(EC)显著降低了18.35%和24.85%,土壤碱解氮含量显著提高了32.00%和18.40%,而玉米产量在T<sub>4</sub>处理下最高,为18038.75 kg·hm<sup>-2</sup>,但未对土壤真菌群落Alpha和Beta多样性产生显著影响。与单施腐植酸(T<sub>2</sub>)相比,T<sub>4</sub>和T<sub>5</sub>处理下子囊菌门的相对丰度显著提高了21.85%和24.59%,却显著降低了球囊菌门和壶菌门的相对丰度。Pearson相关分析表明,土壤EC值与粪盘菌属极显著正相关,与葡萄球菌属显著负相关,土壤有机质含量与镰刀菌属显著负相关,土壤碱解氮含量与枝孢菌属显著正相关。冗余分析(RDA)显示,土壤速效磷是影响滴灌玉米田真菌门水平群落结构的主要因子,而EC值和碱解氮则显著影响了土壤真菌属水平群落结构。综上,氮肥减量配施腐植酸可通过引起土壤养分的变化,从而影响土壤真菌群落结构,促进有益菌群生长,抑制病原真菌繁殖,对改善土壤微生物环境、维持土壤微生物群落平衡和提高作物产量具有重要意义。

**关键词:**玉米;氮肥;腐植酸;真菌群落;土壤养分

## Effects of nitrogen fertilizer reduction combined with humic acid on soil fungal communities in drip irrigated maize fields in northern Xinjiang

LU Xiao-qian<sup>1,2</sup>, CHEN Jin-lu<sup>1,2</sup>, YANG Wei-jun<sup>3</sup>, GUO Qing-yun<sup>1,2</sup>, WANG Dan-li<sup>1,2</sup>, ZHAO Hong-mei<sup>1,2\*</sup>

1. College of Resources and Environment, Xinjiang Agricultural University, Urumqi 830052, China; 2. Xinjiang Key Laboratory of Soil and Plant Ecological Processes, Urumqi 830052, China; 3. College of Agronomy, Xinjiang Agricultural University, Urumqi 830052, China

**Abstract:** The objective of this study was to evaluate the effect of humic acid addition on soil fungal communities in drip irrigated maize (*Zea mays*) fields in northern Xinjiang under reduced nitrogen fertilizer supply, and to explore the

收稿日期: 2024-11-26; 改回日期: 2025-01-22

基金项目: 自治区“三农”骨干人才培养项目(2024SNGGGCC020), 新疆土壤与植物生态过程重点实验室资助项目(23XJTRZW10)和自治区天山英才—青年拔尖人才项目(2023TSYCCX0085)资助。

作者简介: 卢小倩(2001—), 女, 云南曲靖人, 在读硕士。E-mail: 1605861034@qq.com

\* 通信作者 Corresponding author. E-mail: zhaohongmeidu@163.com

optimal application of nitrogen fertilizer in farmland. In this study, a randomized block experiment was adopted, and six treatments were set up: No nitrogen fertilizer (CK, 0 kg·ha<sup>-1</sup>), conventional nitrogen fertilizer (T<sub>1</sub>, 300 kg·ha<sup>-1</sup>), humic acid application alone (T<sub>2</sub>, 90 kg·ha<sup>-1</sup>), conventional nitrogen fertilizer combined with humic acid (T<sub>3</sub>), nitrogen fertilizer reduction of 15% combined with humic acid (T<sub>4</sub>), and nitrogen fertilizer reduction of 30% with humic acid (T<sub>5</sub>). Illumina MiSeq high-throughput sequencing technology was used to analyze the changes in fungal diversity and community structure under the six different treatments, and to explore the effects of nitrogen fertilizer reduction combined with humic acid application on soil fungal community composition. Supporting data on soil nutrient levels and maize yield were also collected. It was found that the soil electrical conductivity (EC) of T<sub>4</sub> and T<sub>5</sub> was significantly reduced by 18.35% and 24.85%, respectively, compared with T<sub>1</sub>, and the soil alkaline hydrolyzable nitrogen content was significantly increased by 32.00% and 18.40%, respectively under the same treatments. The maize yield was highest (18038.75 kg·ha<sup>-1</sup>) in the T<sub>4</sub> treatment; however, the treatments had no significant effects on the soil fungal community Alpha and Beta diversity. With respect to soil fungi, the relative abundance of Ascomycota under T<sub>4</sub> and T<sub>5</sub> was significantly increased by 21.85% and 24.59%, respectively, compared with T<sub>2</sub>, but the relative abundance of Mortierellomycota and Chytridiomycota was significantly reduced. Pearson correlation analysis showed that soil conductivity was significantly positively correlated with *Ascobolus* and negatively correlated with *Botryotrichum*, while soil organic matter was negatively correlated with *Fusarium* presence, and soil alkaline hydrolyzable nitrogen was significantly positively correlated with *Cladosporium* presence. Further redundancy analysis showed that soil available phosphorus was the main environmental factor affecting the community structure of fungi in this drip irrigated maize field, while soil EC value and alkali hydrolyzable nitrogen were the main environmental factors affecting the horizontal community structure of soil fungi. In conclusion, nitrogen fertilizer reduction combined with humic acid changed the soil fungal community structure, promoted the growth of beneficial bacteria, and inhibited the reproduction of pathogenic fungi by causing changes in soil nutrient content. This information is of great significance for improving the soil microbial environment, maintaining the balance of the soil microbial community and increasing crop yield.

**Key words:** corn; nitrogenous fertilizer; humic acid; fungal communities; soil nutrients

土壤微生物在农田生态系统能量流动和养分循环中发挥着重要作用,决定了土壤有机质转化、农田固碳、土壤健康及作物生产力<sup>[1]</sup>。真菌作为农田土壤微生物的重要组成部分,其群落多样性影响着农田生态系统的结构和功能,相较于细菌,具有更强的活化养分、分解植物残体、促进有机质转化的能力,是指示土壤肥力和监测土壤生态环境的关键指标<sup>[2-3]</sup>。腐植酸作为一种天然、高效、无公害的土壤调节剂,与氮肥配施可改善土壤结构,活化土壤养分,为真菌生存繁衍提供良好生境,进而对真菌群落结构和组成产生较大影响<sup>[4-5]</sup>。因此,研究土壤真菌群落对氮肥配施腐植酸的响应,有助于更好地理清腐植酸对土壤培肥、氮肥增益的影响机制,对于改善土壤质量、土壤微生态环境和提高作物产量具有重要意义。

新疆灌区是新疆灌溉绿洲农业的典型代表地,在长期高投入高产出情况下,造成区内土壤退化,耕层土壤有机质含量降低,肥力不足,甚至土壤 C:N 降低,土壤有机质矿化加速,加重土壤微环境恶化<sup>[6-8]</sup>,影响土壤真菌群落结构,从而抑制农作物增产。关于不同施肥模式下增施腐植酸对土壤真菌群落和产量的影响研究相继开展,有研究发现,施用腐植酸能提高农田土壤真菌多样性,增加厚壁菌门、子囊菌门、担子菌和桑孢菌等土壤真菌的丰度<sup>[9-11]</sup>,提升作物产量。也有研究表明,施用腐植酸显著减少了镰刀菌和枝孢菌等土壤真菌<sup>[12-13]</sup>的相对丰度,降低了担子菌门、壶菌门和根生壶菌属的相对丰度<sup>[14]</sup>,促进了营养物质的积累,提高了作物品质,但其对产量的影响不大<sup>[15]</sup>。可见,由于不同区域气候、土壤质量、作物类型等的干扰,腐植酸施用对土壤真菌群落和作物产量的影响

仍未得出一致结论,有待进一步研究。尽管在提升地力、增加产量、优化施肥等方面腐植酸已被广泛应用,但这些研究多集中在湿润、半湿润的雨养地区,尚不清楚腐植酸对西北旱区长期滴灌农田土壤微生物的作用,其对作物产量的提升效果及在灌溉农田系统的应用潜力也有待综合评价。鉴于此,本研究利用高通量 ITS 基因测序技术,以滴灌玉米(*Zea mays*)为研究对象,研究氮肥减量配施腐植酸对玉米田土壤养分、真菌群落结构及产量的影响,分析土壤真菌群落结构改变与土壤养分的关系,探讨氮肥减量后腐植酸施用对农田土壤生态环境的潜在影响,旨在为北疆灌区农田制定合理的氮肥管理措施,降低过量施肥带来的生态环境风险以及增加作物产量提供科学依据。

## 1 材料与方 法

### 1.1 试验地概况

田间试验在新疆农业大学陆港校区试验基地开展(87°21' E, 43°56' N),该试验区位于兵团十二师三坪农场,该区域为典型的温带大陆性干旱气候,年均气温 10 °C,年降水量 150~400 mm,年蒸发量 2221.0~2617.3 mm,年日照时数为 2900 h,无霜期 150~180 d。试验地土壤质地为砂壤土,其土壤本底值为:pH 8.23、电导率 153.87  $\mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$ 、有机质 8.30  $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 、速效磷 11.68  $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 、速效钾 124.37  $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 、碱解氮 9.84  $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 。

### 1.2 供试材料

供试玉米品种为‘郁青 763’,由九圣禾郁青种业有限公司提供。供试腐植酸为市面商品腐植酸肥料的原材料—黄腐酸,由新疆慧尔农业集团股份有限公司提供,腐植酸基本性质:有机质含量 $\geq 45\%$ ,全氮含量为 4.67%,全磷含量为 0.30%,全钾含量为 11.25%。供试氮肥为尿素( $\text{N}\geq 46\%$ ),磷肥为重过磷酸钙( $\text{P}_2\text{O}_5$ , 44%),钾肥为硫酸钾( $\text{K}_2\text{O}$ , 50%)。

### 1.3 试验设计

本试验采取随机区组试验设计,共设置 6 个处理,分别为:1)不施氮肥(CK,  $0\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ );2)常规氮肥( $\text{T}_1$ ,  $300\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ );3)单施腐植酸( $\text{T}_2$ ,  $90\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ );4)常规氮肥配施腐植酸( $\text{T}_3$ );5)氮肥减量 15% 配施腐植酸( $\text{T}_4$ );6)氮肥减量 30% 配施腐植酸( $\text{T}_5$ )。每个处理重复 3 次,共设置 18 个试验小区,每个小区面积  $30.8\text{ m}^2$ ( $4.4\text{ m}\times 7.0\text{ m}$ ),小区间保留 0.4 m 过道,试验地四周留 1 m 保护行,各试验小区示意图如图 1 所示。

玉米于 2023 年 5 月采用膜下滴灌种植,即 1 膜 1 管 2 行,行距为(75+30) cm,株距为 20 cm,宽窄行种植,播种密度为  $8.05\times 10^4$  株 $\cdot\text{hm}^{-2}$ 。施肥时,磷肥作为基肥,在播前一次性施入耕层 20 cm,氮、钾肥和腐植酸做追肥,分别在玉米拔节期(30%)、大喇叭口期(20%)、抽雄期(20%)、吐丝期(20%)、灌浆期(10%)分 5 次随水滴施,各处理的施肥量详见表 1,其他栽培管理措施与当地高产田一致。

### 1.4 土壤样品采集

2023 年 9 月,在玉米成熟期按 5 点法用土钻(直径=5 cm)采集根区耕层(0~20 cm)土样,去除根系及其他杂物后,将土样分为两部分,一部分于室内风干研磨过筛,测定土壤 pH、电导率(electric conductivity, EC)、有机质、碱解氮、速效磷和速效钾等指标;另一部分保存于  $-80\text{ }^\circ\text{C}$  条件下冷冻,用于土壤 DNA 提取,由北京百迈客生物科技有限公司进行高通量测序,测定各施肥处理土壤真菌群落多样性及结构。

### 1.5 测定指标与方法

**1.5.1 土壤化学性质测定** 参照鲍士旦<sup>[16]</sup>《土壤农化分析》测定土壤化学性质,其中采用电极电位法测定 pH;

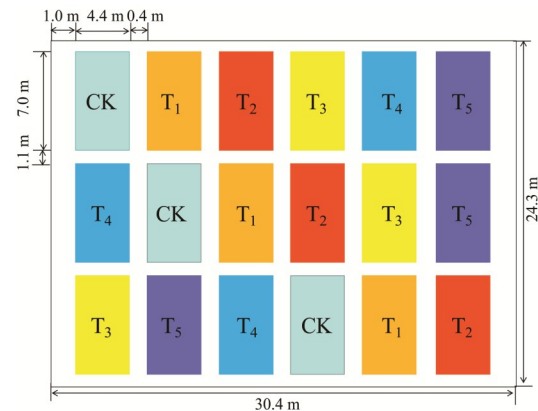


图 1 试验各小区示意图

Fig. 1 Schematic diagram of each plot of the test

采用电导仪(FE38-Standard,梅特勒托利多)测定电导率(EC);采用重铬酸钾容量—外加热法测定有机质;采用碱解扩散法测定碱解氮;采用碳酸氢钠浸提—钼锑抗比色法测定速效磷;采用乙酸铵浸提—火焰光度法测定速效钾。

**1.5.2 玉米产量的测定** 成熟期,待玉米含水量降至 14% 时,于每个小区选取长势一致的 1 m<sup>2</sup>(1 m × 1 m)样区收集果穗,自然风干后,测定单位面积内玉米有效穗数、穗粒数、百粒重等,以此估算各小区产量<sup>[17]</sup>。

**1.5.3 土壤微生物 DNA 提取和高通量测序** 由北京百迈客生物科技有限公司测定土壤微生物群落。使用 TGuide S96 磁珠法土壤基因组 DNA 提取试剂盒(天根生化科技有限公司)完成核酸的提取,采用酶标仪(Synergy HTX, 基因有限公司 GeneCompang Limited)对提取的核酸进行浓度检测,再根据全长引物序列合成带有 Barcode 的特异引物,进行 PCR 扩增,并对目标区域 PCR 产物进行纯化,扩增后 PCR 产物使用浓度 1.8% 的琼脂糖进行电泳检测,形成测序文库(SMRT Bell),建好的文库先通过 Qsep-400 方法进行文库质检,质检合格的文库使用 PacBio Sequel II 进行上机测序。

## 1.6 数据处理与分析

在北京百迈客生物科技有限公司的 BMKCloud 云平台上(international.biocloud.net),使用 QIIME2 2020.6 软件进行 Alpha 多样性指数(ACE 指数, Chao1 指数, Simpson 指数和 Shannon 指数)的计算。以 UNITE 为参考数据库使用朴素贝叶斯分类器结合比对的方法对特征序列进行分类学注释,得到每个特征对应的物种分类信息,进而在各水平(门,纲,目,科,属,种)统计各样品群落组成,利用 QIIME 软件生成不同分类水平上的物种丰度表,利用 R v 3.1.1(vegan v 2.3-0)绘制门、属分类学水平下的群落结构图。使用 QIIME 软件进行 Beta 多样性(Beta diversity)分析,比较不同样品在物种多样性方面存在的相似程度,采用 Bray-Curtis 算法计算样品间的距离从而获得样本间的  $\beta$  值,基于 Beta 多样性分析得到的 4 种距离矩阵,使用 R v 3.1.1(vegan v 2.3-0)绘制主坐标分析(principal coordinates analysis, PCoA)图。通过 R v 3.1.1(vegan v 2.3-0)软件进行真菌群落门组成与土壤养分的冗余分析(redundancy analysis, RDA)。

运用 R 4.2.1 软件进行单因素方差分析(one-way ANOVA);运用最小显著差数法(least significance difference, LSD)进行多重比较( $P < 0.05$ )。

## 2 结果与分析

### 2.1 氮肥减量配施腐植酸对土壤养分的影响

由图 2 可以看出,施肥处理并没有显著影响土壤 pH 和有机质含量( $P > 0.05$ ),而对土壤 EC 值、碱解氮、速效磷和速效钾含量有显著影响( $P < 0.05$ )。与 T<sub>1</sub> 处理相比, T<sub>4</sub> 和 T<sub>5</sub> 处理下土壤 EC 值分别显著降低了 18.35%、24.85% ( $P < 0.05$ ), T<sub>3</sub>、T<sub>4</sub> 和 T<sub>5</sub> 处理下土壤碱解氮含量分别显著提高了 28.80%、32.00% 和 18.40% ( $P < 0.05$ ),但 T<sub>3</sub>、T<sub>4</sub> 及 T<sub>5</sub> 处理均未显著提高或降低土壤速效磷、速效钾含量( $P > 0.05$ ),而 T<sub>2</sub> 处理下土壤速效磷含量显著降低了 35.80% ( $P < 0.05$ )。

### 2.2 氮肥减量配施腐植酸对真菌群落多样性的影响

**2.2.1 氮肥减量配施腐植酸对真菌 Alpha 多样性的影响** Alpha 多样性衡量指标包括: Chao1、ACE、Simpson、Shannon 指数,其中, Chao1 和 ACE 指数反映了土壤真菌群落物种丰富度, Simpson 指数反映的是群落物种组成均匀度, Shannon 指数则反映物种多样性。由表 2 可以看出,不同施肥处理 ACE 指数为 366.03~538.56,

表 1 试验各处理及肥料施用量

Table 1 Experiments were carried out on each treatment and fertilization rate

处理 Treatment	施肥量 Amount of fertilizer applied (kg·hm <sup>-2</sup> )			
	N	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	K <sub>2</sub> O	HA
CK	0	150	90	0
T <sub>1</sub>	300	150	90	0
T <sub>2</sub>	0	150	90	90
T <sub>3</sub>	300	150	90	90
T <sub>4</sub>	255	150	90	90
T <sub>5</sub>	210	150	90	90

CK: 不施氮肥 No nitrogen fertilizer; T<sub>1</sub>: 常规氮肥 Conventional nitrogen fertilizer; T<sub>2</sub>: 单施腐植酸 Humic acid alone; T<sub>3</sub>: 常规氮肥配施腐植酸 Conventional nitrogen fertilizer with humic acid; T<sub>4</sub>: 氮肥减量 15% 配施腐植酸 Nitrogen fertilizer reduced by 15% with humic acid; T<sub>5</sub>: 氮肥减量 30% 配施腐植酸 Nitrogen fertilizer reduced by 30% with humic acid; HA: 腐植酸 Humic acid. 下同 The same below.

Chao1 指数为 397.99~557.14, Simpson 指数为 0.92~0.95, Shannon 指数为 5.16~5.74。与 T<sub>1</sub> 处理相比, T<sub>2</sub> 处理显著提高了 ACE 和 Chao1 指数, CK 处理显著降低了 Simpson 指数, 而其他处理间差异不显著 ( $P>0.05$ )。与 T<sub>1</sub> 处理相比, T<sub>3</sub>、T<sub>4</sub> 及 T<sub>5</sub> 处理的土壤真菌 Simpson 和 Shannon 指数均未达差异显著性水平 ( $P>0.05$ )。

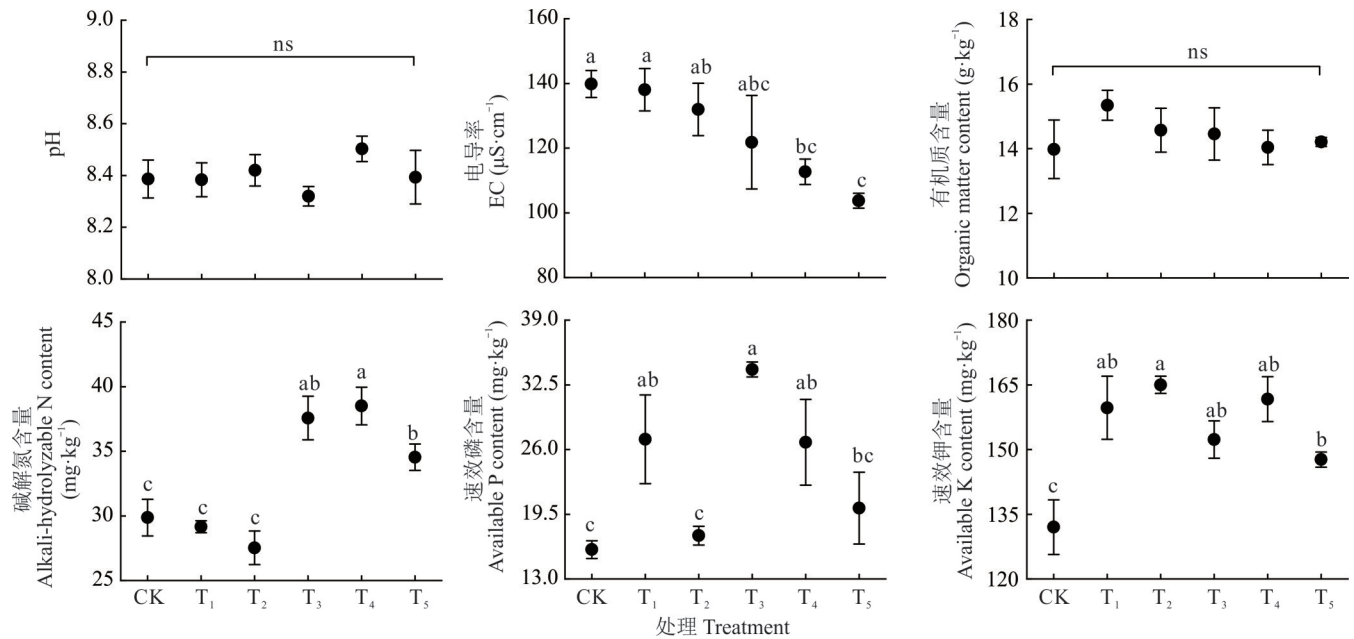


图2 不同施肥处理对土壤养分的影响

Fig. 2 Effects of different fertilization treatments on soil nutrients

不同小写字母表示不同处理间差异显著 ( $P<0.05$ ), ns 表示不同处理间差异不显著。CK: 不施氮肥; T<sub>1</sub>: 常规氮肥; T<sub>2</sub>: 单施腐植酸; T<sub>3</sub>: 常规氮肥配施腐植酸; T<sub>4</sub>: 氮肥减量 15% 配施腐植酸; T<sub>5</sub>: 氮肥减量 30% 配施腐植酸。下同。Different lowercase letters indicate significant differences among different treatments ( $P<0.05$ ), ns indicates non-significant differences among different treatments. CK: No nitrogen fertilizer; T<sub>1</sub>: Conventional nitrogen fertilizer; T<sub>2</sub>: Humic acid alone; T<sub>3</sub>: Conventional nitrogen fertilizer with humic acid; T<sub>4</sub>: Nitrogen fertilizer reduced by 15% with humic acid; T<sub>5</sub>: Nitrogen fertilizer reduced by 30% with humic acid. The same below.

表2 不同施肥处理下土壤真菌 Alpha 多样性指数

Table 2 Alpha diversity of soil fungi under different fertilization treatments

处理 Treatment	ACE 指数 ACE index	Chao1 指数 Chao1 index	辛普森指数 Simpson index	香农指数 Shannon index
CK	472.92±107.04ab	494.36±108.12ab	0.92±0.01b	5.16±0.22b
T <sub>1</sub>	366.03±45.17b	397.99±27.61b	0.95±0.01a	5.64±0.34ab
T <sub>2</sub>	538.56±58.53a	557.14±69.16a	0.94±0.01ab	5.56±0.20ab
T <sub>3</sub>	477.72±145.05ab	471.36±108.15ab	0.94±0.02ab	5.61±0.32ab
T <sub>4</sub>	387.01±47.48ab	424.92±73.92ab	0.95±0.02a	5.74±0.54a
T <sub>5</sub>	458.45±119.85ab	445.75±83.95ab	0.93±0.01ab	5.38±0.15ab

注: 结果为均值±标准误 ( $n=3$ ), 同列不同小写字母表示处理间差异显著 ( $P<0.05$ )。下同。

Note: Data are means±standard error ( $n=3$ ). Different lowercase letters within the same column indicate significant differences among different treatments ( $P<0.05$ ). The same below.

**2.2.2 氮肥减量配施腐植酸对真菌 Beta 多样性的影响** 为衡量微生物群落结构的差异, 基于 Bray-Curtis 距离算法分析了真菌群落的 Beta 多样性得出, 第 1 主成分轴贡献率为 17.53%, 第 2 主成分轴贡献率为 13.20%, 共同解释了 30.73% 的变异 (图 3)。进一步通过 Anosim 检验方法进行了差异分析, 结果显示, 不同施肥处理间土壤真菌 Beta 多样性差异不显著 ( $P>0.05$ )。

### 2.3 氮肥减量配施腐植酸对真菌群落结构组成的影响

**2.3.1 真菌群落门水平分析** 根据各操作分类单元(operational taxonomic units, OTU)中代表序列的物种注释结果,选取各处理土壤样品在真菌门(phylum)分类水平上相对丰度排名前10的物种,实现对各施肥处理真菌群落丰度的分布展示。由图4可以看出,子囊菌门(Ascomycota, 56.29%~85.62%)在各施肥处理下占比最高,是该滴灌玉米田土壤的优势真菌门。其次为担子菌门(Basidiomycota, 4.64%~13.32%)、球囊菌门(Mortierellomycota, 2.82%~9.56%)、壶菌门(Chytridiomycota, 1.43%~16.34%)和球菌门(Glomeromycota, 3.37%~5.88%),其余真菌门相对丰度均较低(<5%)。在氮肥配施腐植酸的T<sub>3</sub>、T<sub>4</sub>、T<sub>5</sub>处理,子囊菌门的相对丰度分别为77.67%、78.14%、80.88%,与T<sub>2</sub>处理相比,其丰度分别显著提高了21.38%、21.85%、24.59%( $P < 0.05$ ),而与T<sub>1</sub>处理差异不显著( $P > 0.05$ )。与T<sub>2</sub>处理相比,T<sub>1</sub>、T<sub>3</sub>、T<sub>4</sub>、T<sub>5</sub>处理均显著降低了球囊菌门和壶菌门的相对丰度( $P < 0.05$ ),而担子菌门和球菌门在各施肥处理之间均无显著差异( $P > 0.05$ )。

**2.3.2 真菌群落属水平分析** 选择各处理土壤样品在真菌属水平上平均丰度前10位的物种绘制物种丰度图,实现各样本真菌群落属水平相对丰度分布展示。由图5可知,未知菌属(Unidentified)占比为20.42%~40.43%,其次为葡萄球菌属(*Botryotrichum*, 4.12%~14.92%)、镰刀菌属(*Fusarium*, 5.79%~7.62%)和柄孢壳菌属(*Podospora*, 3.27%~10.12%),其余真菌属相对丰度均较低(<10%)。与T<sub>1</sub>处理相比,各优势菌属在各施肥处理间均无显著差异( $P > 0.05$ )。

### 2.4 氮肥减量配施腐植酸对土壤真菌群落影响的因素分析

本研究对门、属水平Top10菌群相对丰度与土壤养分进行了Pearson相关分析发现,真菌群落门水平相对丰度与土壤养分间不存在显著的相关性( $P > 0.05$ ),而属水平相对丰度与土壤养分间存在相关性(图6),其中,土壤电导率与粪盘菌属极显著正相关,与葡萄球菌属显著负相关,土壤有机质与镰刀菌属显著负相关,土壤碱解氮与枝孢菌属显著正相关( $P < 0.05$ )。

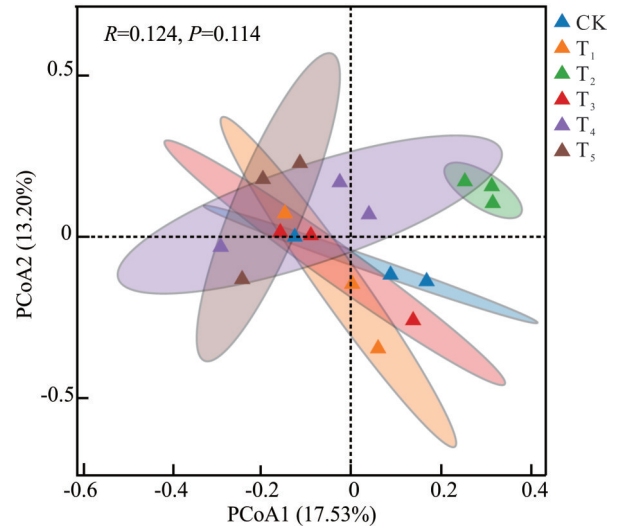


图3 基于Bray-Curtis距离的不同处理土壤真菌群落分布PCoA分析

Fig. 3 PCoA analysis of fungal community distribution in different treatments based on Bray-Curtis distance

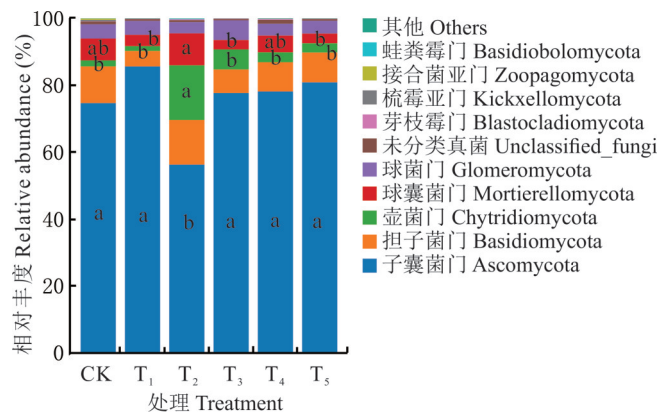


图4 不同施肥处理对土壤真菌门水平相对丰度的影响

Fig. 4 Effects of different fertilization treatments on relative abundance of soil fungal at phylum levels

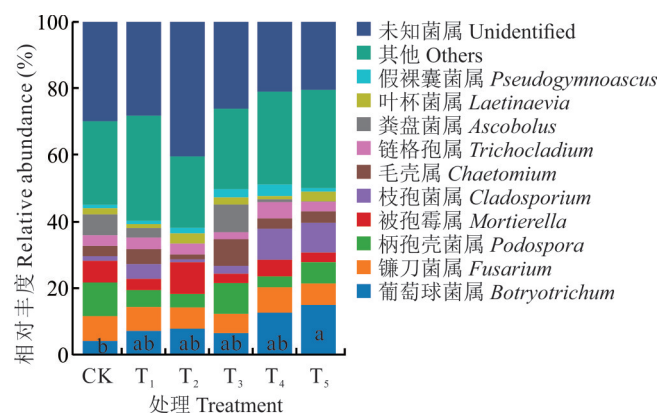


图5 不同施肥处理对土壤真菌属水平相对丰度的影响

Fig. 5 Effects of different fertilization treatments on relative abundance of soil fungi at genus level

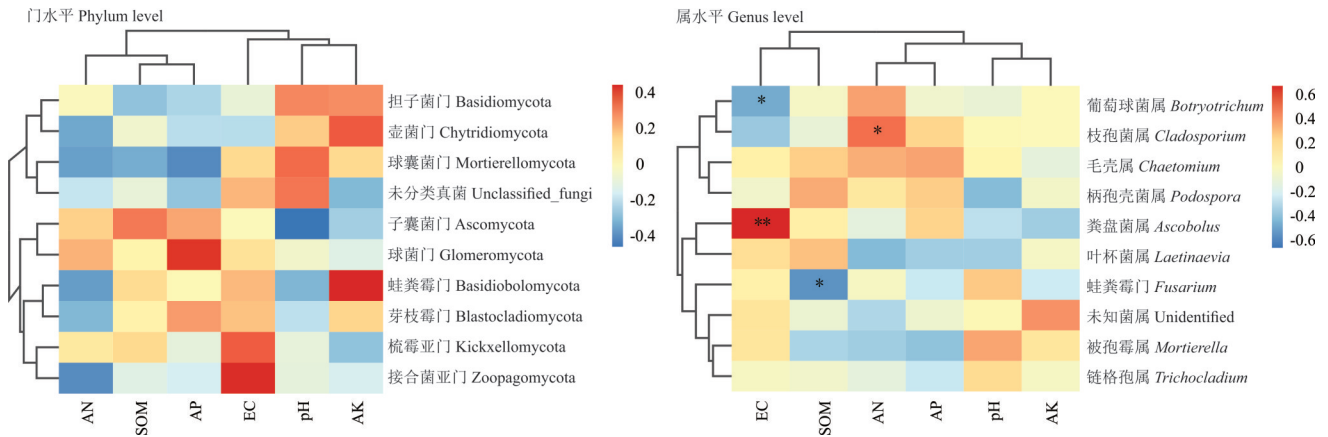


图6 土壤养分与真菌群落门、属水平的相关性分析

Fig. 6 Correlation analysis between soil nutrients and fungal communities at phylum and genus level

EC: 电导率 Electrical conductivity; SOM: 有机质 Organic matter; AN: 碱解氮 Available nitrogen; AP: 速效磷 Available phosphorus; AK: 速效钾 Available potassium; 下同 The same below. \*:  $P < 0.05$ ; \*\*:  $P < 0.01$ .

通过对土壤微生物真菌多样性、群落和环境因子进行冗余分析(redundancy analysis, RDA)可知(图7),在门水平,第一、第二主成分轴对真菌群落结构变化的解释率分别为39.34%、7.70%,总解释率为47.04%,土壤速效磷是影响滴灌玉米田真菌群落结构的主要驱动因子;在属水平,第一、第二主成分轴对真菌群落结构变化的解释率分别为24.47%、17.04%,总解释率为41.51%,土壤EC值、碱解氮是影响滴灌玉米田土壤真菌群落结构的主要驱动因子。

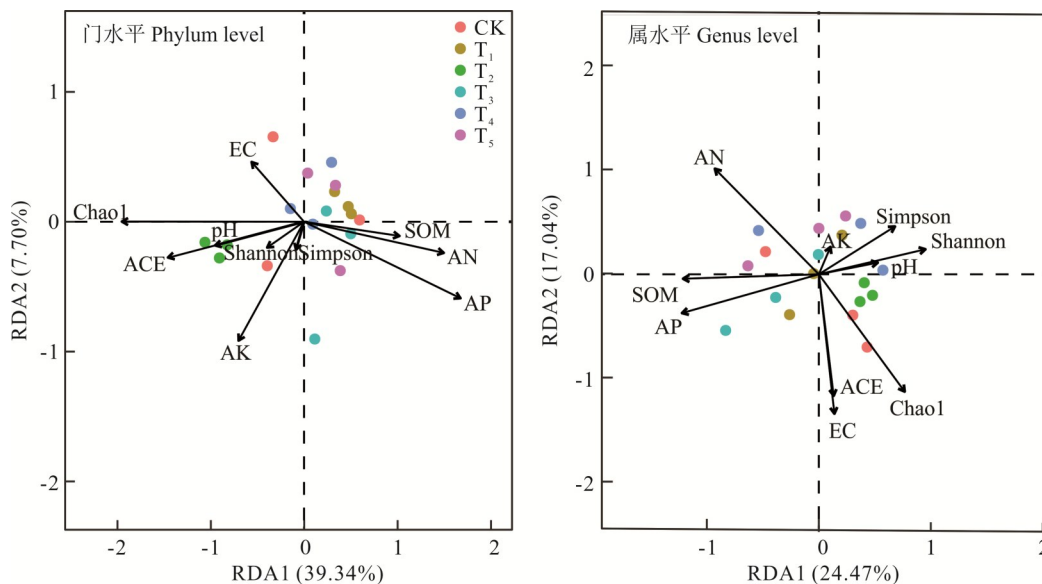


图7 土壤养分与真菌群落门、属水平的冗余分析

Fig. 7 Redundancy analysis between soil nutrients and fungal communities at phylum and genus level

### 2.5 氮肥减量配施腐植酸对玉米产量及产量构成因素的影响

由表3可以看出,各施肥处理间玉米产量及产量构成因素有显著差异( $P < 0.05$ )。与 $T_1$ 处理相比,单施腐植酸处理( $T_2$ )均显著降低了玉米穗粒数、百粒重和产量,而氮肥减量15%配施腐植酸处理( $T_4$ )显著提高了玉米百粒重和产量,其中, $T_4$ 处理的穗粒数、百粒重和产量均最高,分别为660.42粒、40.10 g、18038.75 kg·hm<sup>-2</sup>。

### 3 讨论

#### 3.1 氮肥减量配施腐植酸对真菌多样性及群落组成的影响

土壤真菌对维护土壤生态系统的稳定性和复杂性发挥着不可或缺的作用,它们参与土壤有机质的形成与分解、营养元素的循环利用、土壤肥力的维持与增强,以及生态环境的改进和恢复等<sup>[18]</sup>。有研究发现,施用腐植酸可通过改变微生物种群活性,进而影响微生物群落的丰富度与多样性<sup>[19-20]</sup>,且腐植酸与化肥配施还能有效改善土壤肥力,促使土壤真菌数量显著提高,增加微生物群落多样性<sup>[21]</sup>。本研究中,与常规氮肥相比,仅单施腐植酸显著提高了ACE和Chao1指数,暗示了单施腐植酸可能更有利于提高土壤真菌物种丰富度,这与前人研究结果相似<sup>[22]</sup>。分析认为,单施腐植酸可能在一定程度上增加了土壤孔隙度,降低了土壤容重,改善了土壤物理结构,为土壤微生物生长与繁殖提供更适宜的栖息环境,进而提升了微生物群落多样性<sup>[23-24]</sup>。但与常规氮肥相比,氮肥减量配施腐植酸处理均未显著影响土壤真菌群落多样性,推测其原因,可能是由于土壤真菌多样性与土壤有机质含量密切相关,而各施肥处理间的土壤有机质含量并无显著差异,因此导致氮肥减量配施腐植酸各处理间土壤真菌多样性差异不明显<sup>[25]</sup>。

土壤真菌群落组成中门水平常见菌类为子囊菌门、接合菌门和担子菌门<sup>[26]</sup>,其中,子囊菌门和担子菌门真菌是土壤的重要分解者<sup>[27]</sup>。本研究发现,各施肥处理下优势真菌门、属分别为子囊菌门、担子菌门、球囊菌门以及未知菌属、葡萄球菌属、镰刀菌属、柄孢壳菌属。其中,子囊菌门和担子菌门真菌通过分解有机质和促进养分循环,显著影响土壤速效养分和有机质含量<sup>[28]</sup>。球囊菌门真菌则能促进植物吸收土壤中的无机盐,特别是磷的吸收,在改善根系功能的同时还可提高宿主植物抗逆性<sup>[29]</sup>。葡萄球菌属和柄孢壳菌属真菌能够将土壤中的动植物残体、落叶、枯枝等有机物质分解为小分子物质,使这些有机养分更容易被植物吸收利用,从而促进土壤养分循环,改善土壤结构,维持土壤健康<sup>[30]</sup>。而镰刀菌属真菌可侵染多种农作物及经济作物,在土壤和植物体内普遍存在,能引起多种植物病害<sup>[31]</sup>。孙世君等<sup>[23]</sup>研究表明,腐植酸的施用显著增加了连作4年土壤中子囊菌门的相对丰度,而降低了连作11年土壤中该真菌的相对丰度。本研究中,与T<sub>2</sub>处理相比,不同施氮量配施腐植酸(T<sub>3</sub>, T<sub>4</sub>和T<sub>5</sub>)均显著提高了子囊菌门的相对丰度,降低了球囊菌门和壶菌门的相对丰度,部分支持了前人研究。分析其原因,子囊菌门属于土壤腐生真菌,通过降解土壤微环境中的木质素等有机物质促进土壤养分循环,氮肥配施腐植酸后可能为子囊菌门的生长发育提供了更有利的生存条件,进而加速了子囊菌门的快速生长繁殖<sup>[32]</sup>。相反,也有研究发现,与单施无机肥相比,连续3年无机肥配施腐植酸显著降低了子囊菌门的相对丰度,却提高了球囊菌门的相对丰度<sup>[9]</sup>,这可能与真菌的生存能力相对较低、稳定性较差,易受外界环境的干扰有关。然而,担子菌门和各优势菌属在不同施肥处理间无显著差异,造成这种现象的原因可能是担子菌门相对丰度与土壤速效养分和有机质含量的改变有关<sup>[33]</sup>。本研究中,氮肥减量配施腐植酸并未显著影响土壤有机质含量,因此可能导致土壤中担子菌门的相对丰度无显著变化。此外,腐植酸含有大量不易被微生物分解利用的芳香烃类物质,自身结构相对稳定<sup>[34]</sup>,因而相较于真菌门水平,施肥处理对真菌属水平的影响相对较小。

#### 3.2 土壤养分的变化及其影响土壤真菌群落的驱动因素

土壤养分与土壤真菌群落息息相关,多数研究表明,土壤养分是影响土壤真菌群落的重要因素<sup>[35-36]</sup>。本研究中,与常规氮肥相比,氮肥减量15%和30%配施腐植酸均显著降低了土壤EC值,提高了土壤碱解氮含量,而对土壤速效磷和速效钾的影响不显著,部分支持了前人研究<sup>[37]</sup>。腐植酸属于有机酸性物料,施用后可以降低土壤pH,改善土壤结构,促进盐分的淋洗,从而使土壤EC值降低<sup>[38]</sup>。此外,腐植酸中也含有羧基、酚基等多种官能团,

表3 氮肥减量配施腐植酸对玉米产量及产量构成因素的影响

Table 3 Effects of nitrogen fertilizer reduction with humic acid application on maize yield and yield components

处理 Treat- ment	穗粒数 Kernels per ear (No.)	百粒重 Hundred-grain weight (g)	产量 Yield (kg·hm <sup>-2</sup> )
CK	617.75±1.55b	27.48±0.79d	11376.08±300.88e
T <sub>1</sub>	656.47±2.27a	37.37±0.60b	16716.18±281.76bc
T <sub>2</sub>	621.76±24.00b	33.63±0.12c	14241.93±528.13d
T <sub>3</sub>	656.30±3.81a	38.37±0.57ab	17153.17±227.19ab
T <sub>4</sub>	660.42±5.25a	40.10±0.76a	18038.75±298.94a
T <sub>5</sub>	638.55±11.11ab	38.70±0.48ab	16006.59±259.03c

与氮肥配施后,可能与肥料中的离子或分子形成了具有良好稳定性和可溶性的络合物,不仅能有效减少养分离子的淋失,也能抑制土壤矿物对氮养分的吸附和固定,因而显著提高了土壤中碱解氮的含量,而对速效磷和速效钾无影响<sup>[39-41]</sup>。相关分析结果显示,土壤EC值与粪盘菌属极显著正相关,与葡萄球菌属显著负相关,土壤碱解氮含量与枝孢菌属显著正相关,意味着土壤EC值和碱解氮的改变显著影响了部分土壤真菌群落。粪盘菌作为一种土壤益生菌,能够分解土壤中的有机物质,将有机物质转化为二氧化碳、水、铵盐等小分子无机物,为土壤提供了重要的养分来源,从而促进土壤肥力提升和植物对养分的直接吸收利用。葡萄球菌属真菌具有强大的降解能力,能够分解植物残体和其他有机物质,释放出速效养分,有助于改善土壤结构,增加土壤的通气性和保水性<sup>[30]</sup>;而枝孢菌属可以帮助宿主植物提高吸收土壤中氮、磷的能力,提高植物的抗病性以促进植物的生长<sup>[42]</sup>。由此可见,腐植酸和氮肥的施用可在一定程度上引起土壤养分的变化,尤其是土壤碱解氮的增加很可能提高了土壤中枝孢菌属的活性,促进植物对氮、磷养分的吸收,而EC值的降低可能提高了土壤中葡萄球菌属的活性,促进土壤养分循环,改善土壤结构,但由于各真菌属对环境的适应能力和敏感性不同,因而导致各真菌群落对土壤养分的响应也存在差异<sup>[43]</sup>。利用RDA分析直观显示了土壤养分和真菌多样性指数对真菌群落结构的影响,表明土壤速效磷是真菌群落门水平的主要影响因子,而土壤EC值和碱解氮则是影响属水平的主控因子,暗示了真菌群落门和属水平的影响因子存在差异,这与前人研究结果相似<sup>[44-45]</sup>。但鉴于本研究仅开展了1年,在该研究条件下,土壤养分对土壤真菌群落结构变化的解释率相对较低(分别仅为47.04%和41.51%),这也说明尚需纳入更多的土壤环境因子,并开展长期定位试验,才能更加客观地评估腐植酸施用对农田生态系统真菌群落的综合效应。此外,从产量水平来看,氮肥减量15%配施腐植酸处理下玉米产量最高,为18038.75 kg·hm<sup>-2</sup>,而单施腐植酸则导致玉米减产。可见,适量氮肥配施腐植酸可以提高土壤养分,促进土壤矿质营养的释放和作物对养分的吸收,提高玉米产量,其增产机制很可能与土壤有益菌相对丰度的增加和土壤真菌群落结构的改善有关<sup>[46]</sup>。

#### 4 结论

本研究结果显示,氮肥减量配施腐植酸显著降低了土壤EC值,提高了土壤碱解氮含量和玉米产量,综合表现以氮肥减量15%配施腐植酸处理效果最优。与常规氮肥相比,氮肥与腐植酸配施对土壤真菌多样性未产生显著影响,但氮肥减量15%配施腐植酸能最大程度提高子囊菌门的相对丰度,降低球囊菌门和壶菌门的相对丰度,而对属水平菌群的影响相对较小。相比之下,子囊菌门、担子菌门、球囊菌门以及未知菌属、葡萄球菌属、镰刀菌属、柄壳孢菌属是氮肥配施腐植酸处理下土壤真菌的优势门属,冗余分析发现,土壤速效磷是驱动土壤真菌门水平群落的主要环境因子,而土壤EC值和碱解氮则影响了土壤真菌属水平群落。综上所述,氮肥减量配施腐植酸可有效改善玉米田土壤营养环境,优化土壤真菌菌群结构,是促进滴灌玉米田土壤真菌群落改善、提升土壤生态功能、提高玉米产量的较好选择。

#### 参考文献 References:

- [1] Zheng T, Zhou Q X, Ouyang S H. Enhancing function of plant-microbial symbiosis for pollution mitigation and carbon sequestration. *Chinese Science Bulletin*, 2023, 68(24): 3155-3171.  
郑彤, 周启星, 欧阳少虎. 植物-微生物共生系统功能强化及其在降污固碳中的作用. *科学通报*, 2023, 68(24): 3155-3171.
- [2] Schloter M, Dilly O, Munch J. Indicators for evaluating soil quality. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 2003, 98(1): 255-262.
- [3] Hamonts K, Bissett A, Macdonald C B, *et al.* Effects of ecological restoration on soil microbial diversity in a temperate grassy woodland. *Applied Soil Ecology*, 2017, 117/118(9): 117-128.
- [4] Gu X, Ren C M, Li N, *et al.* Application of humic acid in the protection of black land resources. *Humic Acid*, 2023, 45(2): 8-11, 42.  
顾鑫, 任翠梅, 李娜, 等. 腐植酸在黑土地资源保护上的应用. *腐植酸*, 2023, 45(2): 8-11, 42.
- [5] Daur I, Bakhshwain A A. Effect of humic acid on growth and quality of maize fodder production. *Pakistan Journal of Botany*, 2013, 45(S1): 21-25.

- [6] Yang W J, Yang M, Guo S, *et al.* Effects of reducing nitrogen fertilizer combined with biochar on the yield and quality of wheat and carbon sequestration and emission reduction in Northern Xinjiang of China. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2024, 40(4): 104–111.  
杨卫君, 杨梅, 郭颂, 等. 减氮配施生物炭对北疆小麦产量品质及固碳减排的影响. *农业工程学报*, 2024, 40(4): 104–111.
- [7] Lei B K, Liu H B, Chen A Q, *et al.* Scenario analysis on effects of long-term fertilization on soil carbon and nitrogen codependency. *Ecology and Environmental Sciences*, 2014, 23(10): 1567–1573.  
雷宝坤, 刘宏斌, 陈安强, 等. 长期定位施肥对土壤的碳氮共济效应情景分析. *生态环境学报*, 2014, 23(10): 1567–1573.
- [8] Yu Y J, Xu Q S, Zhang J H, *et al.* The influence and mechanism of soil fertilization technology on soil health. *Soil and Fertilizer Sciences in China*, 2024, 61(2): 1–13.  
虞轶俊, 徐青山, 张均华, 等. 土壤培肥技术对土壤健康的影响途径与作用机制. *中国土壤与肥料*, 2024, 61(2): 1–13.
- [9] Li Y, Fang F, Wei J L, *et al.* Humic acid fertilizer improved soil properties and soil microbial diversity of continuous cropping peanut: A three-year experiment. *Scientific Reports*, 2019, 9(1): 12014.
- [10] Zhang W W, Xu J, Dong F S, *et al.* Responses of microbial community functional diversity to bensulfuron-methyl in paddy soil. *Journal of Agro-Environment Science*, 2014, 33(9): 1749–1754.  
张雯雯, 徐军, 董丰收, 等. 苯嘧磺隆对水稻田土壤微生物群落功能多样性的影响. *农业环境科学学报*, 2014, 33(9): 1749–1754.
- [11] Kong D Y, Xing L W, Wei N, *et al.* Effects of fertilizer reduction combined with humic acid bio-fertilizer on physicochemical properties and microbial diversity of chernozem. *Chinese Journal of Soil Science*, 2024, 55(3): 746–757.  
孔德庸, 邢力文, 韦娜, 等. 化肥减量配施腐植酸生物肥对黑钙土理化性质及微生物多样性的影响. *土壤通报*, 2024, 55(3): 746–757.
- [12] Chen X G, Kou M, Tang Z H, *et al.* Responses of root physiological characteristics and yield of sweet potato to humic acid urea fertilizer. *PLoS One*, 2017, 12(12): e0189715.
- [13] Jiang T T, Ren Z X, Liu L, *et al.* Effects of engineered soil improvement combined with biofertilizer on rhizosphere soil microbial community in replanted apple (*Malus domestica*). *Journal of Agricultural Biotechnology*, 2023, 31(6): 1262–1274.  
姜婷婷, 任忠秀, 刘亮, 等. 工程化土壤改良结合生物肥对再植苹果根际土壤微生物群落的影响. *农业生物技术学报*, 2023, 31(6): 1262–1274.
- [14] Sun S J, Ma B, Wang Y X, *et al.* Effects of humic acid on soil nutrients and microbial community structure of greenhouse cucumber rhizosphere under salt stress. *Northern Horticulture*, 2022, 46(5): 83–90.  
孙世君, 马博, 王逸轩, 等. 腐殖酸对盐胁迫下温室黄瓜根际土壤养分及微生物群落结构的影响. *北方园艺*, 2022, 46(5): 83–90.
- [15] Ma M Q, Fan H D, Li H N, *et al.* Effects of humic acid-containing water-soluble fertilizers on the growth of water spinach and soil nutrient properties. *Journal of Environmental Engineering Technology*, 2024, 14(5): 1444–1450.  
马梦谦, 樊海丹, 李红娜, 等. 含腐植酸水溶肥对空心菜生长及土壤养分性状的影响. *环境工程技术学报*, 2024, 14(5): 1444–1450.
- [16] Bao S D. *Analysis of soil agrochemistry*. Beijing: China Agriculture Press, 2005.  
鲍士旦. *土壤农化分析*. 北京: 中国农业出版社, 2005.
- [17] Wu J B, Qin Z Y, Zheng H X, *et al.* Effects of fulvic acid application on maize yield under irrigation in sandy loam soil. *Journal of Drainage and Irrigation Machinery Engineering*, 2024, 42(12): 1272–1279.  
邬佳宾, 秦子元, 郑和祥, 等. 黄腐酸施用对砂壤土灌溉玉米产量的影响. *排灌机械工程学报*, 2024, 42(12): 1272–1279.
- [18] Nan Z W, Liu Z, Meng W W, *et al.* Structure and function of soil fungal community in rotation fallow farmland in alluvial plain of lower Yellow River. *Environmental Science*, 2023, 44(1): 482–493.  
南镇武, 刘柱, 孟维伟, 等. 黄河下游冲积平原轮作休耕农田土壤真菌群落结构与功能. *环境科学*, 2023, 44(1): 482–493.
- [19] Wang L B, Wang Y X. Effects of humic acid fertilizer on soil nutrients and microbial activity. *Humic Acid*, 2011, 33(4): 6–9.  
王利宾, 王曰鑫. 腐植酸肥对土壤养分与微生物活性的影响. *腐植酸*, 2011, 33(4): 6–9.
- [20] Carpenter-Boggs L, Kennedy A C, Reganold J P. Organic and biodynamic management effects on soil biology. *Research Gate*, 2000, 64(5): 1651–1659.
- [21] Sellamuthu K M, Govindaswamy M. Effect of fertiliser and humic acid on rhizosphere microorganisms and soil enzymes at an early stage of sugarcane growth. *Sugar Tech*, 2003, 5(4): 273–277.

- [22] Gao H, Fan Z Q, Guo X S, *et al.* Effects of humic acid on microorganism quantity and diversity in capsicum rhizosphere soil. *Shandong Agricultural Sciences*, 2021, 53(1): 64–68.  
高涵, 范仲卿, 郭新送, 等. 腐植酸对辣椒根际土壤微生物数量和多样性的影响. *山东农业科学*, 2021, 53(1): 64–68.
- [23] Sun S J, Liu Q, Ye Y J, *et al.* Effects of humic acid on soil nutrients and microbial community structure of cucumber with different continuous cropping years in greenhouse. *Journal of Henan Agricultural Sciences*, 2022, 51(2): 65–74.  
孙世君, 刘琦, 叶英杰, 等. 腐植酸对不同连作年限温室黄瓜土壤养分和微生物群落结构的影响. *河南农业科学*, 2022, 51(2): 65–74.
- [24] Chen X X, Liu X S, Wang S R. Effects of humic acid on soil physicochemical properties, microenvironment and growth of bitter melon under salt stress. *Jiangsu Agricultural Sciences*, 2023, 51(17): 138–144.  
陈星星, 刘新社, 王盛荣. 腐植酸对盐胁迫下土壤理化性质、微环境及苦瓜生长的影响. *江苏农业科学*, 2023, 51(17): 138–144.
- [25] Li Y, Ao J, Sun Y L, *et al.* Analysis of fungal community structure and function changes in soil of cucumber continuous cropping in greenhouse. *Soil and Fertilizer Sciences in China*, 2022, 59(2): 34–41.  
李杨, 敖静, 孙玉禄, 等. 温室黄瓜连作土壤真菌多样性变化分析. *中国土壤与肥料*, 2022, 59(2): 34–41.
- [26] Yang L, Zhang Y, Zhong J J, *et al.* Effects of different acid modulators on the microbial communities in maize planting red soil. *Journal of Agro-Environment Science*, 2024, 43(3): 609–616.  
杨玲, 张艺, 钟俊杰, 等. 不同调酸剂对种植玉米红壤微生物群落的影响. *农业环境科学学报*, 2024, 43(3): 609–616.
- [27] Bastian F, Bouziri L, Nicolardot B, *et al.* Impact of wheat straw decomposition on successional patterns of soil microbial community structure. *Soil Biology and Biochemistry*, 2009, 41(2): 262–275.
- [28] Feng Y Y, Tuo Y F, He X H, *et al.* The impact of soil physicochemical characteristics of different vegetation types on soil microbial community diversity in Liziping Natural Reserve. *Journal of Northeast Forestry University*, 2024, 52(10): 95–103.  
冯永钰, 脱云飞, 何霞红, 等. 栗子坪自然保护区不同植被类型土壤理化特性对土壤微生物群落多样性的影响. *东北林业大学学报*, 2024, 52(10): 95–103.
- [29] Liu Y C, Wang P, Liu R J, *et al.* Effects of arbuscular mycorrhizal fungi and biochar on the fertility of continuous watermelon cropping soil. *Microbiology China*, 2020, 47(11): 3811–3821.  
刘耀臣, 王萍, 刘润进, 等. 丛枝菌根真菌和生物炭对连作西瓜土壤肥力的影响. *微生物学通报*, 2020, 47(11): 3811–3821.
- [30] Shi M F, Guo A X, Kang Y C, *et al.* Effects of plastic film mulching and legume rotation on soil nutrients and microbial communities in the Loess Plateau of China. *Chemical and Biological Technologies in Agriculture*, 2023, 10(1): 38–54.
- [31] Xu J Y, He X L, Shao M C, *et al.* Effects of different planting patterns on microbial community diversity in rhizosphere soil of *Trichosanthes kirilowii* Maxim. *Journal of Southern Agriculture*, 2024, 55(4): 920–931.  
徐筋燕, 何晓兰, 邵明灿, 等. 不同种植模式对栝楼根际土壤微生物群落多样性的影响. *南方农业学报*, 2024, 55(4): 920–931.
- [32] Beimforde C, Feldberg K, Nylander S, *et al.* Estimating the phanerozoic history of the *Ascomycota* lineages: Combining fossil and molecular data. *Molecular Phylogenetics and Evolution*, 2014, 78(9): 386–398.
- [33] Ge Z, Li S Y, Bol R, *et al.* Differential long-term fertilization alters residue-derived labile organic carbon fractions and microbial community during straw residue decomposition. *Soil and Tillage Research*, 2021, 213: 105120.
- [34] Zhou L P, Yuan L, Zhao B Q, *et al.* Advances in humic acid structures and their regulatory role in maize roots. *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. *植物营养与肥料学报*, 2022, 28(2): 334–343.
- [35] Bai X L, Zhang E, Wu J M, *et al.* Effects of different modified materials on soil fungal community structure in saline-alkali soil. *Environmental Science*, 2023, 5(26): 1–16.  
白小龙, 张恩, 武晋民, 等. 不同改良物料对盐碱土壤真菌群落结构的影响. *环境科学*, 2023, 5(26): 1–16.
- [36] Constancias F, Terrat S, Saby N P, *et al.* Mapping and determinism of soil microbial community distribution across an agricultural landscape. *Microbiology Open*, 2015, 4(3): 505–517.
- [37] Lin F, Li Y M, Sun X M, *et al.* Combined application of humic acid and nitrogen fertilizer affects soil physical and chemical properties. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2018, 34(23): 80–85.  
林枫, 李艳梅, 孙笑梅, 等. 腐植酸与氮肥配施对土壤理化性质的影响. *中国农学通报*, 2018, 34(23): 80–85.

- [38] Zhang J S, Yu B T, Zhang J F, *et al.* Effects of different amendments on soil physical and chemical properties and wheat growth in a coastal saline soil. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizers*, 2017, 23(3): 704–711.  
张济世, 于波涛, 张金凤, 等. 不同改良剂对滨海盐渍土土壤理化性质和小麦生长的影响. *植物营养与肥料学报*, 2017, 23(3): 704–711.
- [39] Gao T G, Yuan H L, Hou H Y, *et al.* The role of humic acids in nitrogen cycle: A review. *Humic Acid*, 2020, 42(3): 11–18.  
高同国, 袁红莉, 侯慧云, 等. 腐植酸类物质在氮循环中作用的研究进展. *腐植酸*, 2020, 42(3): 11–18.
- [40] Guo J K, Ren Q, Zhao J, *et al.* Effects of biochar and humic acid on growth and cadmium accumulation in rape. *Ecology and Environmental Sciences*, 2019, 28(12): 2425–2432.  
郭军康, 任倩, 赵瑾, 等. 生物炭与腐殖酸复配对油菜(*Brassica campestris* L.)生长与镉累积的影响. *生态环境学报*, 2019, 28(12): 2425–2432.
- [41] Hu H Y, Guo W, Wei N, *et al.* Effects of chemical fertilizer reduction and humic acid application on soil properties, nutrient content and dry matter accumulation of maize plants. *Jiangsu Agricultural Sciences*, 2024, 52(1): 232–240.  
胡慧影, 郭伟, 韦娜, 等. 化肥减量配施腐殖酸对土壤特性、玉米植株养分含量及其干物质积累的影响. *江苏农业科学*, 2024, 52(1): 232–240.
- [42] Zhang H S, Wu X, Li G, *et al.* Interactions between arbuscular mycorrhizal fungi and phosphate-solubilizing fungus (*Mortierella* sp.) and their effects on *Kosteletzkya virginica* growth and enzyme activities of rhizosphere and bulk soils at different salinities. *Biology and Fertility of Soils*, 2011, 47(5): 543–554.
- [43] Zhang X, Chen T, Niu Y H, *et al.* Research on diversity of fungi community in rhizosphere soil of six halophytes in Ebinur Lake Wetland. *Acta Microbiologica Sinica*, 2021, 61(12): 3965–3976.  
张雪, 陈婷, 牛艳慧, 等. Illumina高通量测序揭示艾比湖湿地6种盐生植物根际土壤真菌群落组成及多样性. *微生物学报*, 2021, 61(12): 3965–3976.
- [44] Ji L F, Ni K, Ma L F, *et al.* Effect of different fertilizer regimes on the fungal community of acidic tea-garden soil. *Acta Ecologica Sinica*, 2018, 38(22): 8158–8166.  
季凌飞, 倪康, 马立锋, 等. 不同施肥方式对酸性茶园土壤真菌群落的影响. *生态学报*, 2018, 38(22): 8158–8166.
- [45] Yang K, Du Y Q, Zhang X X, *et al.* Effects of different organic materials combined with chemical fertilizers on soil fungal community structure and ecological function. *Soils*, 2024, 56(1): 222–228.  
杨凯, 杜延全, 张西兴, 等. 不同有机物料与化肥配施对土壤真菌群落结构和生态功能的影响. *土壤*, 2024, 56(1): 222–228.
- [46] Chen W B, Yu L Y, Sun F R, *et al.* Brief description of the effects of humic acid and soil fertility on the yield and quality of flue-cured tobacco. *Humic Acid*, 2024, 46(6): 53–59.  
陈文博, 于林焱, 孙福仁, 等. 简述腐植酸与土壤肥力对烤烟产质量的影响. *腐植酸*, 2024, 46(6): 53–59.