



## 腐殖酸配施壳聚糖调控设施番茄土壤细菌群落

鲍莹, 严梦圆, 吴萌, 李桂龙, 刘凯, 李忠佩

引用本文:

鲍莹, 严梦圆, 吴萌, 李桂龙, 刘凯, 李忠佩. 腐殖酸配施壳聚糖调控设施番茄土壤细菌群落[J]. *农业环境科学学报*, 2022, 41(12): 2772–2778.

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.11654/jaes.2022-1063>

---

## 您可能感兴趣的其他文章

### Articles you may be interested in

#### 磺胺二甲嘧啶对稻田土壤微生物的中长期效应

徐佳迎, 周金蓉, 吴杰, 王珏, 程粟裕, 赵鸽, 蒋静艳

农业环境科学学报. 2020, 39(8): 1757–1766 <https://doi.org/10.11654/jaes.2020-0123>

#### 单壁碳纳米管对紫花苜蓿根际土壤中PAHs降解及微生物群落的影响

王慧敏, 陈莉荣, 任文杰, 郑春丽, 黄怡雯, 滕应, 张铁军

农业环境科学学报. 2021, 40(12): 2647–2659 <https://doi.org/10.11654/jaes.2021-0332>

#### 设施番茄连作障碍与土壤芽孢杆菌和假单胞菌及微生物群落的关系分析

葛晓颖, 孙志刚, 李涛, 欧阳竹

农业环境科学学报. 2016, 35(3): 514–523 <https://doi.org/10.11654/jaes.2016.03.015>

#### 秸秆类型对强还原土壤细菌群落及多样性的影响

赵雨鑫, 廖洪凯, 龙健, 李娟, 冉泰山, 杨国梅

农业环境科学学报. 2022, 41(12): 2629–2641 <https://doi.org/10.11654/jaes.2022-1079>

#### 土壤真菌对威百亩熏蒸的响应特征

赵晓东, 赵鹏宇, 李晓晶, 燕平梅, 任天志, 李永涛

农业环境科学学报. 2021, 40(3): 580–590 <https://doi.org/10.11654/jaes.2020-1333>



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

鲍莹, 严梦圆, 吴萌, 等. 腐殖酸配施壳聚糖调控设施番茄土壤细菌群落[J]. 农业环境科学学报, 2022, 41(12): 2772–2778.

BAO Y, YAN M Y, WU M, et al. Humic acid combined with chitosan regulates bacterial communities in tomato facility soil[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2022, 41(12): 2772–2778.



开放科学 OSID

## 腐殖酸配施壳聚糖调控设施番茄土壤细菌群落

鲍莹<sup>1,2</sup>, 严梦圆<sup>1,2</sup>, 吴萌<sup>1,2</sup>, 李桂龙<sup>1,2</sup>, 刘凯<sup>1,2</sup>, 李忠佩<sup>1,2\*</sup>

(1. 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; 2. 中国科学院大学, 北京 100049)

**摘要:**为探索针对设施番茄青枯病的高效绿色防治方法,从设施番茄菜地采集发病土壤,并添加生物改良剂腐殖酸和(或)壳聚糖,在26℃的恒温培养箱内进行为期10周的土壤培育试验。结果表明:腐殖酸与壳聚糖配施处理(HC)下,土壤细菌群落结构显著区别于空白对照和单施处理( $P<0.05$ );HC处理下青枯病病原菌劳尔氏菌(*Ralstonia* spp.)的相对丰度显著降低,有益微生物链霉菌属(*Streptomyces* spp.)、北里孢菌属(*Kitasatospora* spp.)、细链孢菌属(*Catenulispore* spp.)和<*Terracidiphilus* spp.的相对丰度显著增加( $P<0.05$ );共现网络结果表明 HC 处理下子网络的网络连接性、聚类系数和平均度显著提高( $P<0.05$ ),有益微生物与劳尔氏菌间存在直接和间接的抑制作用,且以间接抑制作用为主。研究表明,腐殖酸与壳聚糖配施增强了土壤细菌群落之间的相互作用,并且能通过富集有益微生物类群来抑制劳尔氏菌生长,在合理管理设施番茄菜地、防控土传病害中具有实际应用潜力。

**关键词:**腐殖酸;壳聚糖;设施番茄;青枯病;高通量测序

中图分类号:S154.3; S436.412 文献标志码:A 文章编号:1672-2043(2022)12-2772-07 doi:10.11654/jaes.2022-1063

### Humic acid combined with chitosan regulates bacterial communities in tomato facility soil

BAO Ying<sup>1,2</sup>, YAN Mengyuan<sup>1,2</sup>, WU Meng<sup>1,2</sup>, LI Guilong<sup>1,2</sup>, LIU Kai<sup>1,2</sup>, LI Zhongpei<sup>1,2\*</sup>

(1. State Key Laboratory of Soil and Sustainable Agriculture, Institute of Soil Science, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210008, China; 2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

**Abstract:** In order to explore more efficient green control methods for bacterial wilt in tomato facilities, we collected infected soil, added biological modifiers, humic acid and/or chitosan, and incubated it at 26 °C for 10 weeks. The results showed that the soil bacterial community structure was significantly different with the co-application of humic acid and chitosan (HC) compared with the control and single application treatments ( $P<0.05$ ). Under HC treatment, the relative abundance of the bacterial wilt pathogen *Ralstonia* spp. was significantly decreased, while the relative abundance of beneficial microorganisms, *Streptomyces* spp., *Kitasatospora* spp., *Catenulispore* spp., and *Terracidiphilus* spp., was significantly increased ( $P<0.05$ ). The co-occurrence network results showed that the network connectivity, clustering coefficient, and average degree of HC subnetworks were significantly improved ( $P<0.05$ ) and there were direct and indirect inhibitory effects between beneficial microorganisms and *Ralstonia* spp.; the indirect inhibitory effect was dominant. Our results indicated that the co-application of humic acid and chitosan enhanced the interaction between soil bacterial communities and inhibited the growth of *Ralstonia* spp. by promoting beneficial microbial groups. This has practical application potential in the reasonable management of tomato facility fields and the control of soil-borne diseases.

**Keywords:** humic acid; chitosan; tomato facility; bacterial wilt; high-throughput sequencing

收稿日期:2022-10-25 录用日期:2022-11-17

作者简介: 鲍莹(1998—),女,安徽滁州人,硕士研究生,主要从事土壤生物与生化研究。E-mail:baoying@issas.ac.cn

\*通信作者:李忠佩 E-mail:zhpli@issas.ac.cn

基金项目:国家自然科学基金面上项目(32071642);国家重点研发计划项目(2021YFC1808901)

**Project supported:** The National Natural Science Foundation of China (32071642); The National Key Research and Development Program of China (2021YFC1808901)

番茄(*Solanum lycopersicum* L.)属于茄科茄属草本植物,具有较高的营养价值,种植范围广泛。随着设施化栽培的发展<sup>[1]</sup>,单一作物连续种植成为农业生产中的常见现象,这也导致了严重的土传病害发生<sup>[2~4]</sup>。其中,茄科劳尔氏菌(*Ralstonia* spp.)所引发的青枯病是设施番茄土传病害中一种典型的、具有高破坏性的细菌性维管束病害<sup>[5]</sup>。劳尔氏菌能从土壤或灌溉水中侵入作物根部和茎基部的伤口,并通过维管束系统迅速扩散到地上部,导致作物叶片萎蔫,该病害一旦发生则难以控制,因此给番茄种植户造成了巨大的经济损失,严重制约了番茄产业的可持续发展<sup>[6~7]</sup>。

目前,化学防治仍然是抑制土传病害引起作物减产的主要措施。化学防治方法虽然能够有效杀灭土传病原菌,但是会对土壤环境产生巨大的负面影响,同时会对农业可持续发展和食品安全构成威胁<sup>[8~9]</sup>。通过利用生物改良剂进行合理的农业管理,有目的地“操纵”土壤微生物群落<sup>[10~11]</sup>,降低病原菌丰度,减少其所引起的不利生物胁迫,是应对这一农业集约化问题有效的可持续措施<sup>[12~15]</sup>。

壳聚糖作为一种较有潜力的生物改良剂,具有优异的生物学性能,对防治土传病原菌具有良好的效果<sup>[16]</sup>。研究表明壳聚糖能抑制黄单胞菌属(*Xanthomonas* spp.)和欧文氏菌属(*Erwinia* spp.)病原菌的生长<sup>[17]</sup>、显著降低冬枣的自然腐烂率和病变扩张速率<sup>[18~19]</sup>、降低土壤NH<sub>3</sub>挥发损失<sup>[20]</sup>及改善绿化带根际土壤微生物群落结构和组成<sup>[21]</sup>。然而,壳聚糖属于糖类化合物,作为化学防治剂使用会导致防控效果不够稳定<sup>[22]</sup>,但通过修饰改性或与其他材料复合可改善其性能<sup>[23]</sup>。

腐殖酸是自然界中广泛存在的大分子有机物质,对引发植物土传病害的一些病原真菌具有抑制作用<sup>[24]</sup>,对土壤微生物群落能够进行正向调控<sup>[25]</sup>。但腐殖酸单独施用抑菌效果较低,而作为辅助剂常具有更好的作用效果<sup>[26]</sup>。因此,将腐殖酸作为辅助剂与壳聚糖联合施用,理论上能取得更好的防治效果,但目前关于腐殖酸作为辅助剂促进壳聚糖防治效果的研究还尚未被报道。

本研究通过土壤培育试验,研究腐殖酸与壳聚糖配施对设施番茄青枯病病害土壤中细菌群落的调控机制,以期提高生物改良剂在实际农业生产中对土传病原菌的防治效果,促进现代农业的可持续发展。

## 1 材料与方法

### 1.1 试验材料与土壤样品

供试壳聚糖购于上海麦克林生化有限公司,分子

式为(C<sub>6</sub>H<sub>11</sub>NO<sub>4</sub>)<sub>n</sub>,黏度为100~200 mPa·s,密度为1.75 g·cm<sup>-3</sup>。供试腐殖酸提取于猪粪中:将风干后的猪粪筛分为粒径小于0.425 mm的粉末,用饱和KOH-CH<sub>3</sub>CH<sub>2</sub>OH溶液在固液萃取比(m/V)为1:20的条件下,对猪粪溶液进行振荡、离心(4 500 r·min<sup>-1</sup>, 10 min)、过滤、旋转蒸发和酸沉淀(用HCl溶液将pH降低为1~2),然后将提取液在KOH溶液中重新溶解,用氢氟酸和蒸馏水洗涤,最后经冻干(EYELA FDU-1200,日本)获得用于土壤培育试验的腐殖酸粉样。

供试土壤采集于江苏省南京市华成蔬菜专业合作社,该合作社位于南京市溧水区乌飞塘村(119°00'15"E, 31°30'26"N),属亚热带季风气候区,年平均气温16.4 °C,年平均相对湿度76%,年平均降水量1 204 mm,年平均雨日123 d,年平均日照1 980 h,每年6月中下旬到7月上旬为梅雨季节。土壤基本理化性状为:pH 6.47,全氮1.88 g·kg<sup>-1</sup>,全磷1.90 g·kg<sup>-1</sup>,全钾11.40 g·kg<sup>-1</sup>,碱解氮124.12 mg·kg<sup>-1</sup>,有效磷479.05 mg·kg<sup>-1</sup>,速效钾371.10 mg·kg<sup>-1</sup>,交换性酸0.19 cmol·kg<sup>-1</sup>,可溶性盐6.09 g·kg<sup>-1</sup>。采集田块种植了3 a以上的番茄,前茬发青枯病。采集样品时在选择的每株发病番茄植株周围采集3个样点,移除表面的植物碎屑和岩石块,收集0~20 cm的表层土壤,土样混合均匀带回实验室,自然风干后过2 mm筛备用。

### 1.2 试验设计

土壤培育试验在26 °C的恒温培养箱中进行,采用随机完全区组设计,共设置空白对照(CK)、单独添加腐殖酸(HA)、单独添加壳聚糖(CHI)和腐殖酸与壳聚糖配施(HC)4个处理,每个处理设置5个重复。于100 mL塑料瓶中培育100 g风干土,腐殖酸和壳聚糖单施及配施的添加量均为0.05 g·kg<sup>-1</sup>和0.2 g·kg<sup>-1</sup>。调节土壤含水量为饱和含水量的40%,每周补水两次,培育10周后取样。

### 1.3 DNA提取与16S rRNA高通量测序

称取0.5 g土壤样品,严格按照FastDNA® Spin Kit(Bio 101, Carlsbad, CA, 美国)试剂盒附带操作步骤提取土壤DNA,提取的DNA样品用分光光度计(Nano-drop ND-2000,美国)进行定量,并按特异性引物341F (CCTACGGGNGGCWGCAG) 和 806R (CCTAC-GGGNGGCWGCAG) 进行细菌16S rRNA V3~V4区的扩增。扩增子测序数据在QIIME 2平台中进行过滤、质控、除去嵌合体、合并双端序列、去噪为扩增序列变体 Amplicon sequence variant (ASV),并参比 sliva rRNA数据库(SILVA ribosomal RNA database, <http://www.ncbi.nlm.nih.gov>)。

[www.arb-silva.de/](http://www.arb-silva.de/))进行物种注释。

#### 1.4 数据处理

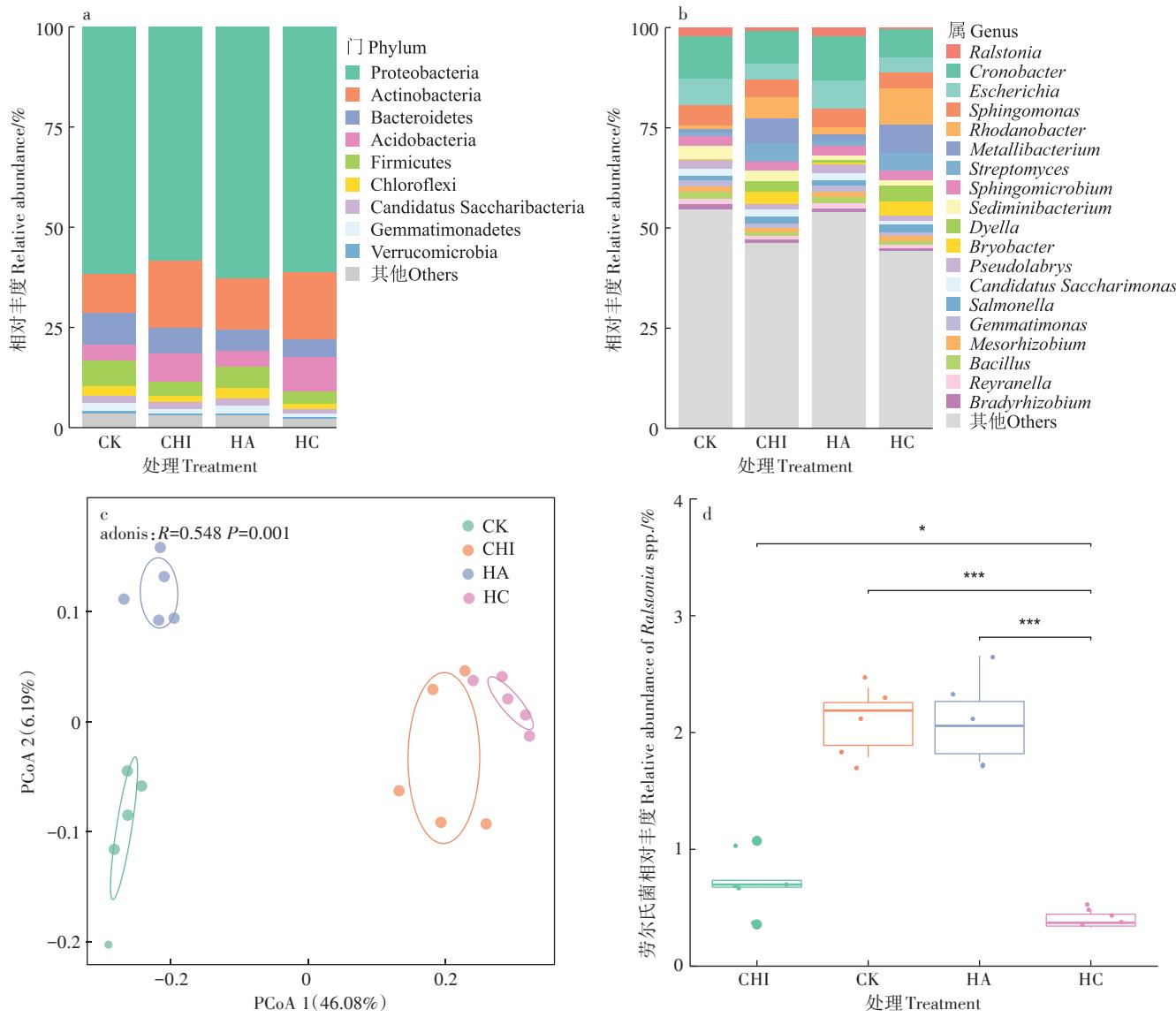
利用 R 4.1.3 软件对 ASV 特征表进行主坐标分析 (Principle coordination analysis, PCoA), 并分别计算在门和属水平上的相对丰度, 分析不同处理样品间的菌群相似性和分类学差异性; 利用 R 软件中的 edgeR 广义线性模型(GLM)计算不同处理下细菌群落的差异性 ASV; 筛选相对丰度大于 0.01% 的 ASV 计算 Spearman 相关性, 只保留极显著 ( $P < 0.001$ ) 的相互关系, 用 R 软件中 igraph 包构建细菌群落整体共存网络、子网

络和病原菌-有益菌关系网络, 分别统计子网络的拓扑学特性变化, 并用 Gephi 软件进行共现网络图的可视化。

## 2 结果与分析

### 2.1 土壤细菌群落组成结构差异

主坐标分析结果(图 1c)显示第一轴和第二轴分别解释了 46.08% 和 6.19% 的土壤细菌群落变异, 其中, 不同处理下的样品在第一轴上显著分开 ( $P < 0.05$ ), 且 HC 处理与 CK 处理的差异最大, 表明腐殖酸



a. 门水平下的土壤细菌相对丰度;b. 属水平下的土壤细菌相对丰度;c. PCoA 分析展示不同处理下土壤细菌群落聚类差异;d. 各处理间劳尔氏菌的相对丰度;\* $P < 0.05$ , \*\*\* $P < 0.001$

a. Relative abundance of species at phylum level;b. Relative abundance of species at genus level;c. PCoA analysis showing the difference of soil bacterial community clustering under different treatments;d. Relative abundance of the *Ralstonia* spp. among treatments;\* $P < 0.05$ , \*\*\* $P < 0.001$

图 1 不同处理下土壤细菌群落的组成差异

Figure 1 Differences in the composition of soil bacterial communities under different treatments

和壳聚糖配施对设施番茄青枯病病害土壤细菌群落产生的影响最为显著。

在门和属水平上,分别统计了各处理样品的物种相对丰度,结果如图1a和图1b所示。从门的分类水平上看,4个处理中的细菌群落组成相似,主要包括变形菌门(Proteobacteria)、放线菌门(Actinobacteria)、拟杆菌门(Bacteroidetes)、酸杆菌门(Acidobacteria)、厚壁菌门(Firmicutes)、绿弯菌门(Chloroflexi)、*Candidatus Saccharibacteria*、芽单胞菌门(Gemmatimonadetes)和疣微菌门(Verrucomicrobia),共约占全部细菌丰度的95%以上。其中,放线菌门和酸杆菌门在HC处理中的相对丰度显著增加,拟杆菌门和厚壁菌门在HC处理中的相对丰度显著降低( $P<0.05$ )。

从属的分类水平上看,相对丰度排在前20位的属中,劳尔氏菌(*Ralstonia* spp.)的相对丰度在HC处理中显著降低( $P<0.05$ ),表明与单施处理相比,腐殖酸和壳聚糖配施能够更有效地降低设施番茄青枯病病害土壤中劳尔氏菌的相对丰度(图1d)。

## 2.2 腐殖酸与壳聚糖配施对土壤细菌群落的调控作用

为探明腐殖酸与壳聚糖配施对土壤细菌群落组成的影响,从CK处理和HC处理中筛选了平均相对丰度大于0.01%的ASV共1112个进行差异分析,结果表明CK处理中显著富集了261个ASV,HC处理中显著富集了168个ASV( $P<0.05$ ,FDR检验)。如图2所示,CK处理中显著富集了9个被注释为劳尔氏菌的ASV,而HC处理中只富集了1个被注释为劳尔氏菌的ASV,表明劳尔氏菌的丰度在HC处理中显著降低,与2.1中的结果一致。另外,HC处理中富集程度最高的5个ASV分别被注释为北里孢菌属(*Kitasatospora* spp.)、链霉菌属(*Streptomyces* spp.)、细链孢菌属(*Catenulispora* spp.)和*Terracidiphilus* spp.。

## 2.3 土壤细菌群落间的相互作用关系网络

比较设施番茄菜地土壤细菌群落的共现网络中子网络的拓扑学特性(表1)发现,与CK相比,HC处理下的细菌共现网络的节点数和平均路径长度降低,平均度、连接性和聚类系数显著增加( $P<0.05$ ),这表明腐殖酸与壳聚糖配施精简了土壤细菌群落,同时加强了细菌之间的相互作用与连接,对设施番茄土壤细菌群落产生了一定的改良效果。

基于2.2中的结果,为了探究有益细菌富集与劳尔氏菌丰度降低之间的联系,从共现网络中划分出劳尔氏菌、有益细菌和相关中间辅助细菌(即同时与劳尔氏菌和有益细菌存在相关性关系的细菌)的子网

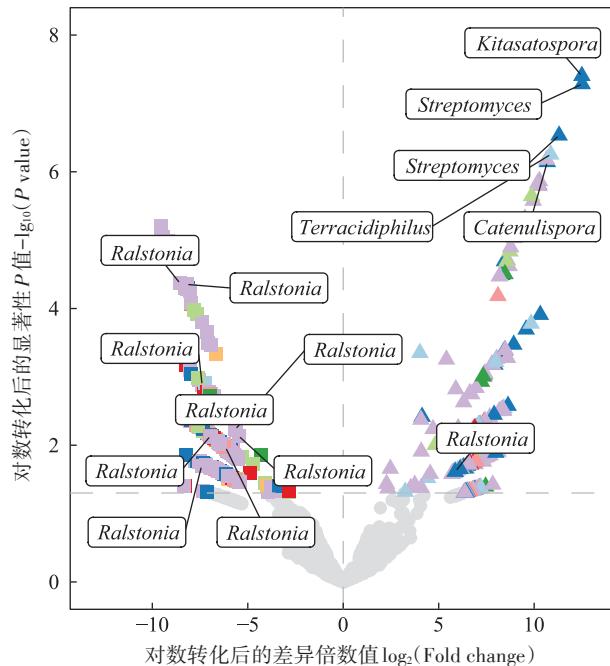


图2 HC与CK处理中细菌群落的差异性ASV

Figure 2 Different ASV in bacterial communities between HC and CK treatments

表1 不同处理下的土壤细菌共现网络拓扑学特性参数

Table 1 Topological characteristics of soil bacterial co-occurrence network under different treatments

处理 Treatment	节点数 Node	平均度 Average degree	平均路径长度 Average path length	连接性 Connectivity	聚类系数 Clustering coefficient
CK	231	3.80±0.15d	3.00±0.05a	0.03±<0.01b	0.33±0.01b
CHI	190	8.02±0.16a	2.27±0.02b	0.07±<0.01a	0.42±<0.01a
HA	248	4.30±0.13c	2.95±0.03a	0.03±<0.01b	0.35±0.01b
HC	159	7.46±0.11b	2.32±0.02b	0.07±<0.01a	0.42±<0.01a

注:同列不同小写字母表示处理间差异显著( $P<0.05$ )。

Note: Different lowercase letters in the same column indicate significant differences among treatments at  $P<0.05$ .

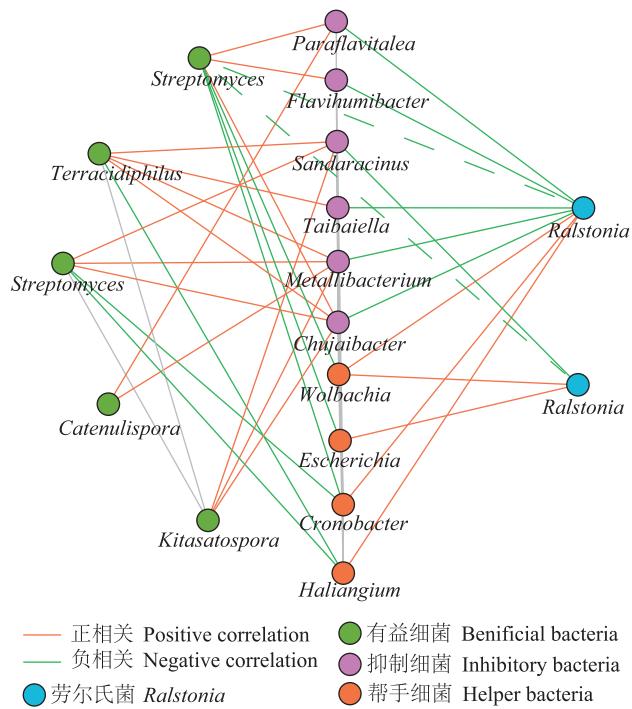
络。其中,中间辅助细菌包括*Paraflavifitalea* spp.、*Flavihumibacter* spp.、*Sandaracinus* spp.、*Taibaiella* spp.、*Metallibacterim* spp.、*Chujaibacter* spp.、*Wolbacia* spp.、*Escherichia* spp.、*Cronobacter* spp.和*Haliangium* spp.。将促进劳尔氏菌生长的中间辅助细菌称为帮手细菌,抑制劳尔氏菌生长的中间辅助细菌称为抑制细菌。结果如图3所示,只有链霉菌属中的两个ASV与劳尔

氏菌间存在直接的负作用,其余有益细菌都是通过帮手细菌或抑制细菌间接地作用于劳尔氏菌。结果表明腐殖酸与壳聚糖配施抑制劳尔氏菌生长是通过富集有益细菌及产生直接和间接抑制作用来实现的,且以间接抑制作用为主。

### 3 讨论

本研究中 HC 处理下土壤中放线菌门和酸杆菌门细菌的相对丰度显著增加,劳尔氏菌的相对丰度显著降低。放线菌作为广泛存在于土壤中的一种细菌,能加速土壤中动植物残骸的分解,促进土壤物质转化和氮素循环,产生抗生素物质,与植物病害防治有密切的联系<sup>[27]</sup>。屈忠义等<sup>[28]</sup>发现放线菌数量与土壤理化性质和作物产量呈正相关关系,并将土壤中放线菌数量作为评价土壤健康状况的重要生物指标。VOORT 等<sup>[29]</sup>发现放线菌门和酸杆菌门中生长缓慢、耐热的细菌在植物疾病保护方面具有潜在作用。另外,据报道,土传病原菌是否能引起植物发病与其在土壤中的丰度密切相关<sup>[30~31]</sup>,通过降低病原菌的相对丰度可以对土传病害进行有效防治。这表明腐殖酸与壳聚糖配施对设施番茄菜地青枯病病害土壤细菌群落产生了良好的正向调控作用,改善了土壤健康状况,对设施番茄青枯病具有良好的防治效果。

通过比较 HC 处理和 CK 处理的差异 ASV,本研究还发现腐殖酸与壳聚糖配施所富集的有益细菌中:北里孢菌是一种高效生防菌,具有固碳、产生抗生素的能力,其代谢物对松材线虫具有高效的毒杀作用,并且所产生的烯酰辅酶 A 羧化酶/还原酶(ECRs)可使植物光合作用中的碳固定反应加速百倍<sup>[32~33]</sup>;链霉菌可产生拮抗水稻白叶枯病菌(*Xanthomonas oryzae* sp. *Oryzae*)的活性代谢产物——杀粉蝶菌素 A1(Piericidin A1),喷施可减轻白叶枯菌对水稻叶片的侵染,并促进水稻种子萌发和幼苗的生长,对浙麦冬黑斑病病原菌链格孢菌(*Alternaria alternata*)和黄瓜猝倒病病原菌瓜果腐霉菌(*Pythium aphanidermatum*)等病原菌也能产生明显的抑制效果<sup>[34~37]</sup>;生防菌细链孢菌可以通过释放抗生素和多酚来抑制病原体,其在入侵植物薇甘菊(*Mikania micrantha*)根际的富集增强了其对各种环境的适应能力和入侵能力<sup>[38~40]</sup>; *Terracidiphilus* 能产生与植物源性生物聚合物降解有关的胞外酶,可对森林土壤有机质转化、碳循环产生重要贡献<sup>[41]</sup>。董春娟等<sup>[42]</sup>发现壳聚糖对番茄根际细菌具有定向调控作用,即富集具有植物促生潜力的有益细菌,改善根际



图中灰色线条表示同类菌群间的作用关系;虚线表示有益细菌对劳尔氏菌的直接抑制关系  
The gray lines in the figure indicate the relationships within each microbiota; the dashed lines show the direct inhibitory relationship between beneficial bacteria and *Ralstonia* spp.

图 3 有益细菌与劳尔氏菌间的直接和间接抑制作用关系网络  
Figure 3 Network of direct and indirect inhibitory effects between beneficial bacteria and *Ralstonia* spp.

细菌群落,与本研究结果一致。

土壤微生物为植物提供了获取营养、耐受生物胁迫等一系列生态系统服务。土壤微生物群落的结构和功能特征对土壤健康状况、植物生长情况具有重要的调控作用,是抵御土壤传播病原体的第一道防线。此外,土壤中关键有益微生物类群的存在能够抑制多种病原菌的生长,有效控制土传病害发生<sup>[29]</sup>。这从一定程度上表明,本研究中劳尔氏菌相对丰度的降低与富集的有益细菌密切相关。结合共现网络分析结果可知,有益菌主要通过抑制细菌和帮手细菌对劳尔氏菌产生间接抑制作用。LI 等<sup>[43]</sup>发现番茄根际分离菌株与中间辅助菌株之间的相互作用是抑制番茄劳尔氏菌的主要决定因素,且抑制辅助菌株是比直接抑制病原菌本身更有效的减少青枯劳尔氏菌(*Ralstonia solanacearum*)的途径。这与本研究结果相符,表明腐殖酸与壳聚糖配施富集了设施番茄青枯病病害土壤中的有益细菌,加强了对劳尔氏菌的抑制作用,且抑制作用主要通过间接作用于中间辅助细菌实现。本研究的发现有助于了解土壤细菌与病原菌之间的相

互作用,为设施番茄菜地青枯病的绿色防控提供了潜在的间接策略,为施行合理的农业管理措施提供了新思路。

## 4 结论

(1)腐殖酸与壳聚糖配施能富集土壤中的有益微生物类群,并主要通过增强细菌之间的交流与连接等间接作用来抑制劳尔氏菌生长。

(2)腐殖酸与壳聚糖配施改善了设施番茄菜地土壤的健康状况,在设施番茄菜地土传病害的绿色防控中具有指导意义。

## 参考文献:

- [1] 田永强,高丽红.设施番茄高品质栽培理论与技术[J].中国蔬菜,2021(2):30~40. TIAN Y Q, GAO L H. Theory and technology for facility cultivation of high-quality tomato[J]. *China Vegetables*, 2021(2): 30~40.
- [2] CONWAY G. The doubly green revolution: Food for all in the twenty-first century[J]. *Quarterly Review of Biology*, 1998, 24:394~395.
- [3] 高子勤,张淑香.连作障碍与根际微生态研究 I. 根系分泌物及其生态效应[J].应用生态学报,1998,9(5):549~554. GAO Z Q, ZHANG S X. Continuous cropping obstacle and rhizospheric microecology I. Root exudates and their ecological effects[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 1998, 9(5):549~554.
- [4] 李孝刚,张桃林,王兴祥.花生连作土壤障碍机制研究进展[J].土壤,2015,47(2):266~271. LI X G, ZHANG T L, WANG X X. Advances in mechanism of peanut continuous cropping obstacle[J]. *Soils*, 2015, 47(2):266~271.
- [5] 张鹏,韦中,朱震,等.生物有机肥对连作番茄和辣椒根际土壤微生物区系及茄科雷尔氏菌的影响[J].南京农业大学学报,2013,36(4):77~82. ZHANG P, WEI Z, ZHU Z, et al. Effect of a bio-organic fertilizer on microbial flora and *Ralstonia solanacearum* population in rhizosphere soils of continuous cropping tomato and pepper[J]. *Journal of Nanjing Agricultural University*, 2013, 36(4):77~82.
- [6] 李秀龄,张瑞芳,代晋,等.辣椒主要土传病害的发生及防治[J].现代农业科技,2022(19):125~128,137. LI X L, ZHANG R F, DAI J, et al. Occurrence and control of main soil-borne diseases of pepper[J]. *Modern Agricultural Science and Technology*, 2022(19):125~128, 137.
- [7] 余小漫,何自福.作物青枯病研究进展[J].广东农业科学,2020,47(12):82~89. SHE X M, HE Z F. Advances in studies on crop bacterial wilt caused by *Ralstonia solanacearum*[J]. *Guangdong Agricultural Sciences*, 2020, 47(12):82~89.
- [8] 蔡祖聪,黄新琦.土壤学不应忽视对作物土传病原微生物的研究[J].土壤学报,2016,53(2):305~310. CAI Z C, HUANG X Q. Soil-borne pathogens should not be ignored by soil science[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2016, 53(2):305~310.
- [9] 杨珍,戴传超,王兴祥,等.作物土传真菌病害发生的根际微生物机制研究进展[J].土壤学报,2019,56(1):12~22. YANG Z, DAI C C, WANG X X, et al. Advance in research on rhizosphere microbial mechanisms of crop soil-borne fungal diseases[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2019, 56(1):12~22.
- [10] RAAIJMAKERS J M, MAZZOLA M. Soil immune responses[J]. *Science*, 2016, 352(6292):1392~1393.
- [11] MENDES L W, RAAIJMAKERS J M, DE H M, et al. Influence of resistance breeding in common bean on rhizosphere microbiome composition and function[J]. *The ISME Journal*, 2018, 12(1):212~224.
- [12] OSHIMA H, GOTO D, GOTO I. Effect of organic matter removal treatments and addition of aluminum-containing substances on incidence of *Fusarium* wilt of lettuce[J]. *Soil Science and Plant Nutrition*, 2015, 61(4):613~619.
- [13] LOFFREDO E, BERLOCO M, SENESI N. The role of humic fractions from soil and compost in controlling the growth *in vitro* of phytopathogenic and antagonistic soil-borne fungi[J]. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 2008, 69(3):350~357.
- [14] WEI S P, LI G L, LI P F, et al. Molecular level changes during suppression of *Rhizoctonia solani* growth by humic substances and relationships with chemical structure[J]. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 2021, 209:111749.
- [15] DUKE E R, DOEHLERT D C. Effect of heat stress on enzyme activities and transcript levels in developing maize kernels grown in culture [J]. *Environmental and Experimental Botany*, 1996, 36(2):199~208.
- [16] MOHAMED E I B, ENTSAR I R. Characterization and antimicrobial activity of water-soluble N-(4-carboxybutyroyl) chitosans against some plant pathogenic bacteria and fungi[J]. *Carbohydrate Polymers*, 2011, 87(1):250~256.
- [17] DA SILVA A P S, OLIVARES F L, SUDRÉ C P, et al. Attenuations of bacterial spot disease *Xanthomonas euvesicatoria* on tomato plants treated with biostimulants[J]. *Chemical and Biological Technologies in Agriculture*, 2022, 8(1):1~9.
- [18] OH J, CHUN S C, CHANDRASEKARAN M. Preparation and *in vitro* characterization of chitosan nanoparticles and their broad-spectrum antifungal action compared to antibacterial activities against phytopathogens of tomato[J]. *Agronomy*, 2019, 9(1):21.
- [19] ZHANG J R, CHENG X W, CHANG L L, et al. Combined treatments of chitosan and sodium silicate to inhibit *Alternaria alternate* pathogens of postharvest winter jujube[J]. *Food Science and Biotechnology*, 2021, 30(4):589~597.
- [20] 许纪元,郝雅琼,孙海军,等.施用生物刺激剂对空心菜种植增效减排效应研究[J].农业环境科学学报,2022,41(9):2073~2081. XU J Y, HAO Y Q, SUN H J, et al. Effects of biostimulants on efficiency increase and emission reduction in water spinach cultivation [J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2022, 41(9):2073~2081.
- [21] 张萌,孙明,王岩,等.壳聚糖对绿化带根际土壤及植物生长的影响[J].北方园艺,2020(22):86~95. ZHANG M, SUN M, WANG Y, et al. Effects of chitosan on rhizosphere soil and plant growth in green belt[J]. *Northern Horticulture*, 2020(22):86~95.
- [22] 王雷,孟玲.壳聚糖对多种植物病原菌的抑菌效果概述[J].农药,2009,48(11):781~783. WANG L, MENG L. Summarize on anti-fungal effect of chitosans on different kinds of pathogens[J]. *Agrochemicals*, 2009, 48(11):781~783.
- [23] 田佳苑,周新华,周红军.羧甲基壳聚糖在植物病虫害防治上的应

- [25] 魏世平, 吴萌, 李朋友, 等. 腐殖酸对花生连作地土壤真菌群落结构的影响[J/OL]. 土壤学报: 1-12 [2022-10-23]. <https://chn.oversea.cnki.net/kcms/detail/detail.aspx?FileName=TRXB20220509000&DbName=CAPJ2022>. WEI S P, WU M, LI G L, et al. Effects of humic acid on fungal community structure in a peanut-continuous cropping soil[J/OL]. *Acta Pedologica Sinica*: 1-12 [2022-10-23]. <https://chn.oversea.cnki.net/kcms/detail/detail.aspx?FileName=TRXB20220509000&DbName=CAPJ2022>.
- [26] 魏世平, 吴萌, 李桂龙, 等. 腐殖酸对低浓度百菌清的缓释增效作用[J]. 中国农业科学, 2019, 52(1): 65-72. WEI S P, WU M, LI G L, et al. Slow-release synergistic effect of humic acid on low concentration chlorothalonil[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2019, 52(1): 65-72.
- [27] 林先贵. 土壤微生物研究原理与方法[M]. 北京: 高等教育出版社, 2010. LIN X G. Principles and methods of soil microbial research [M]. Beijing: Higher Education Press, 2010.
- [28] 屈忠义, 孙慧慧, 杨博, 等. 不同改良剂对盐碱地土壤微生物与加工番茄产量的影响[J]. 农业机械学报, 2021, 52(4): 311-318, 350. QU Z Y, SUN H H, YANG B, et al. Effects of different amendments on soil microorganisms and yield of processing tomato in saline alkali soil[J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2021, 52(4): 311-318, 350.
- [29] VOORT M, KEMPENAAR M, DRIEL M, et al. Impact of soil heat on reassembly of bacterial communities in the rhizosphere microbiome and plant disease suppression[J]. *Ecology Letters*, 2016, 19(4): 375-382.
- [30] 李朋友, 杨龙, 李桂龙, 等. 基于FUNGuild的镰刀菌根腐病发病烟株根际真菌群落研究[J]. 中国烟草学报, 2019, 25(2): 63-68. LI P F, YANG L, LI G L, et al. Research of rhizosphere fungi communities of *Fusarium* root rot diseased tobacco based on FUNGuild[J]. *Acta Tabacaria Sinica*, 2019, 25(2): 63-68.
- [31] 聂园军, 李瑞珍, 赵佳, 等. 西瓜连作对根际微生物群落的影响[J]. 中国瓜菜, 2019, 32(2): 6-11. NIE Y J, LI R Z, ZHAO J, et al. Relationship between watermelon's rhizosphere microbial communities and continuous cropping obstacle[J]. *China Cucurbits and Vegetables*, 2019, 32(2): 6-11.
- [32] 王云, 郑豪盈, 樊永欣, 等. 一株北里孢菌株的分离鉴定及其对松材线虫的致病性[J]. 微生物学通报, 2014, 41(10): 2035-2042. WANG Y, ZHENG H Y, FAN Y X, et al. Screening, identification and the virulence factor of an actinomycete strain *Kitasatospora* sp. C620 to *bursaphelenchus xylophilus*[J]. *Microbiology China*, 2014, 41(10): 2035-2042.
- [33] DEMIRCI H, RAO Y, STOFFEL G M, et al. Intersubunit coupling en- ables fast CO<sub>2</sub>-fixation by reductive carboxylases[J]. *ACS Central Science*, 2022, 8(8): 1091-1101.
- [34] 何亚文, MAZHARI A S, 崔莹, 等. 高产杀粉蝶菌素的链霉菌鉴定及其拮抗水稻白叶枯菌活性研究[J/OL]. 微生物学报: 1-15 [2022-10-21]. <https://chn.oversea.cnki.net/kcms/detail/detail.aspx?FileName=WSXB20220927003&DbName=DKFX2022>. HE Y W, MAZHARI A S, CUI Y, et al. Apiericidin-producing *Streptomyces* strain: identification and antagonistic activity on *Xanthomonas oryzae*[J/OL]. *Acta Microbiologica Sinica*: 1-15 [2022-10-21]. <https://chn.oversea.cnki.net/kcms/detail/detail.aspx?FileName=WSXB20220927003&DbName=DKFX2022>.
- [35] 徐亦雯, 张诺, 曹瑱艳, 等. 浙麦冬黑斑病病原菌的分离鉴定及淀粉酶产色链霉菌对其生物防治效果[J]. 中国生物防治学报, 2022, 38(5): 1280-1287. XU Y W, ZHANG N, CAO Z Y, et al. Isolation and identification the pathogen of *ophiopogon japonicus* black spot and control effect of *Streptomyces diastatochramogenes*[J]. *Chinese Journal of Biological Control*, 2022, 38(5): 1280-1287.
- [36] 黄大野, 姚经武, 郑娇莉, 等. 淡紫褐链霉菌 NBF715 防控黄瓜猝倒病及其机制的初步研究[J]. 植物保护, 2022, 48(4): 175-179. HUANG D Y, YAO J W, ZHENG J L, et al. Control effect of *Streptomyces enissocaeslis* NBF715 on damping-off of cucumber and its preliminary antifungal mechanism[J]. *Plant Protection*, 2022, 48(4): 175-179.
- [37] 马静静, 潘妍妍, 杨孙玉悦, 等. 硫藤黄链霉菌 St-79 对水稻白叶枯病的防效和促生作用[J]. 中国水稻科学, 2022, 36(6): 623-638. MA J J, PAN Y Y, YANG S Y Y, et al. Effect of *Streptomyces thioluteus* on controlling and promoting rice bacterial blight[J]. *Chinese Journal of Rice Science*, 2022, 36(6): 623-638.
- [38] YIN L J, LIU B, WANG H C, et al. The rhizosphere microbiome of *Mikania micrantha* provides insight into adaptation and invasion[J]. *Frontiers Microbiology*, 2020, 11: 1462.
- [39] MORI T M, CAHN J K B, WILSON M C, et al. Single-bacterial genomics validates rich and varied specialized metabolism of uncultivated *Entotheonella* sponge symbionts[J]. *Biological Sciences*, 2018, 115(8): 1718-1723.
- [40] KURNIA N M, URIA A R, KUSNADI Y, et al. Metagenomic survey of potential symbiotic bacteria and polyketide synthase genes in an Indonesian marine sponge[J]. *HAYATI Journal of Biosciences*, 2017, 24(1): 6-15.
- [41] GARCIA-FRAILE P, BENADA O, CAJTHAML T, et al. *Terracidiphilus gabretensis* gen. nov., sp. nov., an abundant and active forest soil acidobacterium important in organic matter transformation[J]. *Applied and Environmental Microbiology*, 2016, 82(2): 560-569.
- [42] 董春娟, 李亮, 王玲玲, 等. 壳聚糖对番茄穴盘苗根际细菌群落结构的改良作用[J]. 园艺学报, 2017, 44(8): 1505-1516. DONG C J, LI L, WANG L L, et al. Improvement effects of chitosan on rhizosphere bacterial community structure of tomato plug seedlings[J]. *Acta Horticulturae Sinica*, 2017, 44(8): 1505-1516.
- [43] LI M, POMMIER T, YIN Y, et al. Indirect reduction of *Ralstonia solanacearum* via pathogenhelper inhibition[J]. *The ISME Journal*, 2021, 16: 869-875.

(责任编辑:朱晓昱)