

不同改良措施对设施芹菜根际土壤微生物群落结构的影响

付宽宽, 王小兵, 汪晓丽, 陈悦, 程通

(扬州大学环境科学与工程学院 江苏扬州 225127)

摘要: 通过灌水高温闷棚联合有机物或石灰氮等改良措施以期缓解芹菜连作障碍和改善土壤微生物群落结构。试验处理包括: 对照(CK)、灌水高温闷棚(CW)、灌水高温闷棚联合不同浓度有机物(O1W、O2W、O3W)、灌水高温闷棚联合不同浓度石灰氮(S1W、S2W、S3W)。结果表明, 灌水高温闷棚联合施用 $900 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 石灰氮处理后土壤全氮含量为 $0.80 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$, 较 CK 增加了 45.5%; 硝态氮含量和土壤容重为 $49.0 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 和 $1.05 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$, 分别较 CK 降低了 40.7% 和 19.8%; 芹菜产量为 $90.4 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$, 比 CK 增加了 30.2%。基于高通量测序分析, 灌水高温闷棚联合石灰氮处理措施使土壤中厚壁菌门和放线菌门等有益微生物的相对丰度增加, 灌水高温闷棚联合有机物处理措施则与之相反。冗余分析(Redundancy analysis, RDA)发现, 硝态氮含量是影响细菌群落的主要因子, 与放线菌门、厚壁菌门和拟杆菌门呈负相关。综上所述, 灌水高温闷棚联合施用 $900 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 石灰氮的处理对缓解芹菜连作障碍和改善土壤微生物群落结构效果最好。

关键词: 芹菜; 高通量测序; 微生物群落; 细菌

中图分类号: S636.3

文献标志码: A

文章编号: 1673-2871(2022)08-042-08

Different improvement measures affects microbial in rhizosphere soil of celery in protected field

FU Kuankuan, WANG Xiaobing, WANG Xiaoli, CHEN Yue, CHENG Tong

(College of Environmental Science and Engineering, Yangzhou University, Yangzhou 225127, Jiangsu, China)

Abstract: In this study, the combination of irrigation, high temperature and closed shed with organic matter or lime nitrogen were adopted to reduce the barrier caused by the mono cropping of celery and to improve microbial population in the soil. The experimental treatments involved control (CK), irrigation at high temperature under closed plastic house (CW), the irrigation high at temperature under closed plastic house combined with different concentrations of organic matter (O1W, O2W, O3W), and the irrigation at high temperature under closed plastic house combined with different concentrations of lime nitrogen (S1W, S2W, S3W). The results showed the total nitrogen content was $0.80 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ after irrigation and high temperature under closed plastic house combined with $900 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ lime nitrogen treatment, which was 45.5% higher than that of CK. The nitrate content and soil density reached $49.0 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ and $1.05 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$, which are 40.7% and 19.8% lower than CK, respectively. The yield of celery reached $90.4 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$, which is 30.2% higher than CK. According to high throughput sequencing analysis, the relative abundance of beneficial microorganisms such as Firmicutes and Actinomycetes in soil was effectively improved by the combination of irrigation and high-temperature under closed plastic house with lime nitrogen treatment, while the opposite effect was observed for the combination of irrigation and high-temperature with organic matter treatment. Redundancy analysis (RDA) analysis showed the concentration of nitrate nitrogen was a significant factor for the bacterial population, showing a negative correlation with Actinobacteriota, Firmicutes and Bacteroidetes. In conclusion, the treatment of combining irrigation, high temperature and closed plastic house with $900 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ lime nitrogen performed best in alleviating the barrier for mono cropping celery and improving microbial population in soil.

Key words: Celery; High throughput sequencing; Microbial population; Bacteria

收稿日期: 2021-12-02; 修回日期: 2022-07-05

基金项目: 国家自然科学基金面上项目(41471236); 江苏省农业科技自主创新资金项目[CX(20)3082、CX(17)3043]; 苏州科技计划项目(SNG2018088)

作者简介: 付宽宽, 男, 在读硕士研究生, 主要从事设施农业土壤连作障碍研究。E-mail: 3193732519@qq.com

通信作者: 王小兵, 男, 副教授, 主要从事设施土壤连作障碍防控等研究。E-mail: xbwang@yzu.edu.cn

随着我国社会经济的高速发展和农业产业结构的优化调整,我国设施农业也迎来了高速发展期。其中,设施蔬菜生产更是从粗放型逐渐向集约型转变^[1]。因为设施蔬菜种植环境的密闭性和模式的单一性,导致设施蔬菜连作现象严重,很容易出现土壤质量退化和土传病害发生严重等问题^[2-4]。

我国将通过碳源和淹水结合的方式创造厌氧环境杀死土传病害来改善土壤连作障碍的方法叫做强还原土壤灭菌法(Reductive Soil Disinfection, RSD)^[5]。RSD方法的特点是将易分解的碳源和灌溉结合,刺激好氧菌的快速生长,加快土壤中氧气的消耗,厌氧环境使土壤菌落结构从以好氧菌为主转变为厌氧菌或者兼性厌氧菌为主^[6]。在厌氧环境下,微生物发酵产生的代谢有毒物质可进一步对病原菌起到抑制作用^[7]。施用土壤改良剂(石灰氮等)是新兴起的一种快速恢复土壤退化的方法,相比传统方法具有方便快捷和经济高效的特点。石灰氮改良机制是水解后生成氰氨,对土壤病原菌有灭杀作用^[8],氰氨还可以水解形成可被植物直接吸收利用的尿素或氨^[9]。它的优势是水解过程无酸根残留,不会导致土壤酸化加重。土壤微生物群落失衡是导致土传病害发生的直接原因,土壤微生物群落的结构组成是衡量土壤健康情况的重要指标^[10-11]。有研究表明,土壤微生物群落结构与土壤理化性质、施肥方式、土壤质地等有关。目前,研究微生物的方法很多,高通量测序技术因具有检测信息丰富、准确率高和成本较低等优点被广泛应用^[12]。

芹菜作为我国深受欢迎的伞形科多叶植物,具有广泛的种植面积。但在设施栽培条件下,芹菜常因次生盐渍化^[13]、病虫害发生^[14]等问题导致减产严重。针对芹菜连作障碍,国内通常采取施用石灰氮等改良剂、芹菜合理间作等治理方式。莫娟等^[14]研究表明石灰氮能有效防治芹菜根腐病的发生。袁涛等^[15]通过菜豆、芹菜间作来提升芹菜的产量和品质。然而,基于Illumina Miseq高通量测序技术分析不同改良措施对连作芹菜土壤微生物群落结构影响的研究较少。笔者通过灌水高温闷棚联合施用有机物或石灰氮的处理措施来缓解芹菜土壤连作障碍,改善土壤微生物群落结构,以期缓解芹菜连作障碍和提高芹菜产量提供技术支撑。

1 材料与方 法

1.1 试验地概况

蔬菜大棚位于江苏省太仓市三市村。太仓市

处于地势平坦的平原地区,地势自东北向西南倾斜,属于北亚热带南部湿润气候区,光照充足,夏季炎热多雨,冬季寒冷少雨,7月平均气温为27.7℃,1月平均气温为2.8℃,年平均气温为15.3℃。太仓市年平均降水量为1017mm,年平均降雨日为130d,太仓市全年受到的日照时长可达4423.7h。试验前供试土壤的基本理化性质测定结果:pH值为5.94、全氮含量(w,后同)为0.53g·kg⁻¹、有效磷含量为72.7mg·kg⁻¹、有机质含量为22.1g·kg⁻¹、硝态氮含量为100mg·kg⁻¹、电导率为68mS·m⁻¹。

1.2 材料及试验设计

供试材料:芹菜(*Apium graveolens*)品种为美国西芹文图拉,由北京思贝奇种子有限公司提供。有机物料(麦糠)、石灰氮[w(总氮)≥21%,w(氰氨化钙)≥55%]由山东金耐特环保科技有限公司提供;前茬作物:大蒜;棚龄:5年。

在试验中共设计8个处理,(1)CK,裸地;(2)CW,灌水高温闷棚;(3)O1W,灌水高温闷棚+5000kg·hm⁻²麦糠;(4)O2W,灌水高温闷棚+10000kg·hm⁻²麦糠;(5)O3W,灌水高温闷棚+15000kg·hm⁻²麦糠;(6)S1W,灌水高温闷棚+300kg·hm⁻²的石灰氮;(7)S2W,灌水高温闷棚+600kg·hm⁻²的石灰氮;(8)S3W,灌水高温闷棚+900kg·hm⁻²的石灰氮。每个试验小区区长9m,宽3m,面积27m²,小区间隔25cm,随机区组设计,3次重复。将不同用量的麦糠或石灰氮均匀撒在对应的试验小区,用旋耕机将麦糠和石灰氮深翻入土,然后在小区四周做小拱,拱宽20cm、高30cm,在小拱上覆盖一层塑料薄膜,对小区进行灌水处理让土层处于淹水状态。在试验小区表面覆盖一层塑料薄膜,密封大棚25d后揭棚排水,通风5d晾干土层,翻耕土壤后即可进行芹菜播种。每个小区种植大约500株芹菜,株距大约为20cm。2019年8月5日施用基肥:尿素375kg·hm⁻²、有机复合肥1200kg·hm⁻²、磷肥225kg·hm⁻²、钾肥150kg·hm⁻²。为保持氮素平衡,灌水高温闷棚联合石灰氮处理措施不施用尿素。在植株生长旺盛期追肥,施用量为复合肥225kg·hm⁻²、尿素75kg·hm⁻²、钾肥30kg·hm⁻²。

1.3 土壤样品的采集

在芹菜收获期用五点取样法采集深度为20cm的根际混合土样。采样时间为2019年11月11日,将土样分为2份,1份保存于-70℃的超低温冰箱用于土壤根际微生物分析(混合样本,不设重复);1份风干后去除杂物,研磨、过筛后保存。

1.4 测定方法

1.4.1 土壤微生物群落、基本理化性质和产量的测定 土壤理化性质按照指定标准测定,土壤有机质含量采用重铬酸钾容量法(NY/T 1121.6—2006)测定^[16],硝态氮含量采用紫外分光光度法(GB/T 32737—2016)测定^[17],pH值采用电位法(HJ 962—2018)测定^[18],电导率采用电极法(HJ 802—2016)测定^[19],有效磷含量采用紫外分光光度法(NY/T 1121.7—2014)测定^[20],全氮含量采用半微量开氏法(NY/T 53—1987)测定^[21]。在芹菜收获期,采摘每个小区的芹菜分别计产,并计算各处理芹菜产量平均值。

1.4.2 土壤细菌 16S rDNA 基因序列的扩增 使用引物:515F(5'-GTGCCAGCMGCCGCGG-3')和907R(5'-CCGTCAATTCMTTTRAGTTT-3')对细菌 16S rDNA 基因序列 V4-V5 可变区进行扩增。PCR 反应体系(20 μL)如下:5 × 高保真缓冲液 4 μL,2.5 mmol·L⁻¹ dNTPs 2 μL,正反向引物(5 μmol·L⁻¹)各 0.8 μL,高保真 DNA 聚合酶 0.4 μL,DNA 模板 10 ng,补加 ddH₂O 至 20 μL。PCR 反应程序为:95 °C 2 min;95 °C 30 s,55 °C 30 s,72 °C 30 s,25 个循环;72 °C 5 min。从 2%琼脂糖凝胶中提取扩增产物送至凌恩生物科技有限公司(上海)完成测序。

1.5 数据分析

首先对原始数据进行质控过滤,然后将正反向 reads 配对,并剔除有问题序列以及嵌合体,构建物种分类单元(Operational Taxonomic Units, OTU)丰度表(97%相似度)。基于 OTU

聚类分析结果,对 OTU 进行多种多样性指数分析。利用 Mothur 做 rarefaction 分析,利用 R 语言工具制作曲线图。以 OTU 的物种分类结果为依据,在门的分类级别上对 8 组土壤样品中细菌的组成和结构以及相对丰度进行分析,并利用 R 语言工具作图。土壤理化性质等采用 Microsoft Office Excel 2016、SPSS statistics 21 进行数据统计分析,采用邓肯氏新复极差法进行差异显著性检验。

2 结果与分析

2.1 不同改良措施对根际土壤理化性质的影响

分析不同的改良措施对芹菜根际土壤理化性质的影响。由表 1 可知,经改良措施后土壤 pH 值显著提高,O3W 处理达到峰值 6.78,比 CK 增加了 14.1%;土壤全氮含量在灌水高温闷棚联合有机物或石灰氮措施中均显著提高,S3W 处理达到峰值 0.80 g·kg⁻¹,比 CK 增加了 45.5%;土壤有机质含量在灌水高温闷棚联合有机物措施中显著提高,O3W 处理达到峰值 34.4 g·kg⁻¹,比 CK 增加了 43.9%;土壤有效磷含量在灌水高温闷棚联合有机物和石灰氮措施中均显著提高,O3W 处理达到峰值为 87.3 mg·kg⁻¹,比 CK 增加了 20.1%;电导率值在灌水高温闷棚联合有机物措施中显著降低,O3W 处理最小,为 30 mS·m⁻¹,比 CK 降低了 49.2%;土壤硝态氮含量在灌水高温闷棚联合石灰氮措施中显著降低,S3W 处理最低,为 49.0 mg·kg⁻¹,比 CK 降低了 40.7%;土壤容重经改良措施后显著降低,S3W 处理最小,为 1.05 g·cm⁻³,比 CK 降低

表 1 不同处理对根际土壤理化性质的影响

处理	pH 值	w(全氮)/(g·kg ⁻¹)	w(有机质)/(g·kg ⁻¹)	w(有效磷)/(mg·kg ⁻¹)	电导率/(mS·m ⁻¹)	w(硝态氮)/(mg·kg ⁻¹)	容重/(g·cm ⁻³)
CK	5.94±0.02 f	0.55±0.01 d	23.9±0.21 e	72.7±0.10 d	59±1.00 a	82.6±0.42 a	1.31±0.01 a
CW	6.17±0.03 e	0.55±0.01 d	23.7±0.66 e	72.9±0.38 d	57±1.00 a	79.0±0.12 b	1.25±0.04 b
O1W	6.61±0.02 b	0.66±0.03 b	27.3±0.20 c	75.2±0.12 cd	36±2.00 b	74.0±0.12 d	1.19±0.02 c
O2W	6.76±0.01 a	0.68±0.02 b	28.9±0.20 b	80.0±0.15 b	31±1.00 c	74.5±0.40 c	1.16±0.04 c
O3W	6.78±0.03 a	0.79±0.01 a	34.4±0.45 a	87.3±6.53 a	30±1.53 c	65.9±0.15 e	1.20±0.02 c
S1W	6.24±0.03 d	0.61±0.02 c	24.0±0.42 e	76.7±0.21 bcd	59±1.00 a	61.0±0.15 f	1.26±0.02 b
S2W	6.38±0.04 c	0.79±0.01 a	24.8±0.10 d	79.3±0.20 bc	57±1.53 a	49.1±0.06 g	1.07±0.02 d
S3W	6.41±0.03 c	0.80±0.01 a	24.8±0.06 d	79.7±0.67 c	60±3.06 a	49.0±0.12 g	1.05±0.01 d

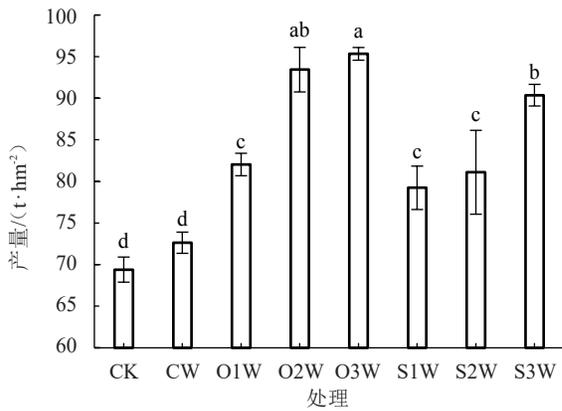
注:同列数字后不同小写字母表示在 0.05 水平差异显著。下同。

了 19.8%。

2.2 不同改良措施对芹菜产量的影响

由图 1 可以看出,灌水高温闷棚联合有机物或石灰氮对芹菜产量有不同的影响。芹菜产量在 O2W、O3W 和 S3W 处理中提升最显著。O2W、O3W 和

S3W 处理芹菜产量分别为 93.4、95.3、90.4 t·hm⁻²,与 CK 相比分别提高了 34.6%、37.3%和 30.2%。O1W、S1W 和 S2W 处理芹菜的产量显著高于 CK。CW 处理芹菜的产量高于 CK,但差异不显著。灌水高温闷棚联合有机物处理措施中,O3W 处理效果最好;灌水高



注:不同小写字母表示不同处理间在 0.05 水平差异显著。

图 1 不同处理下芹菜的产量

温闷棚联合石灰氮处理措施中,S3W 处理效果最好。

2.3 不同改良措施下芹菜根际土壤的测序结果分析

利用 Illumina Miseq 测序分析平台对土壤微生物,细菌 16S rDNA 基因序列 V3~V4 区进行测序,共得到有效序列 355 836 条,序列碱基数 147 858 249 bp,平均长度为 415.44 bp(表 2)。稀释性曲线可以用来比较不同样本中物种的丰富度,也可以来说明样本的测序数据量是否合

表 2 不同处理根际土壤的有效序列数

样本名称	序列条数	序列碱基数/bp	序列平均长度/bp
CK	543 35	225 865 32	415.69
CW	446 37	185 704 95	416.03
O1W	305 89	126 670 89	414.11
O2W	595 09	247 499 06	415.90
O3W	545 75	226 860 32	415.69
S1W	383 16	159 524 91	416.34
S2W	342 67	142 413 56	415.60
S3W	396 08	164 043 48	414.17

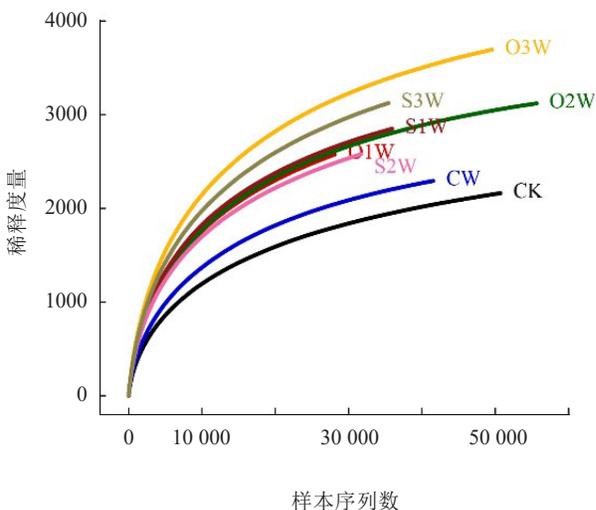


图 2 不同样本的稀释性曲线图(相似度 97%)

理。由图 2 可知,在相似度 97%条件下,所有土壤样品稀释性曲线均趋于平缓,表明样本测序数据量有较高的可信度,能够比较真实地反映不同处理间土壤样本的微生物群落状况。

2.4 不同改良措施对根际土壤微生物群落的影响

2.4.1 不同处理下根际土壤微生物的物种分类单元(OTU)数 基于 OTU 丰度的样本聚类图(图 3)。观察各处理共有的 OTU 数为 443 个,OTU 总数和特有的 OTU 数分别是 CK(1821, 155)、CW(2045, 153)、O1W(2575, 167)、O2W(2609, 203)、O3W(3148, 361)、S1W(2656, 167)、S2W(2483, 181)、S3W(2900, 334)。可以看出,O3W 处理的 OTU 总数和特有的 OTU 数都是最多的,分别为 3148 和 361,说明该区域不仅含有更多的微生物种类,也含有较多的特有微生物种类。

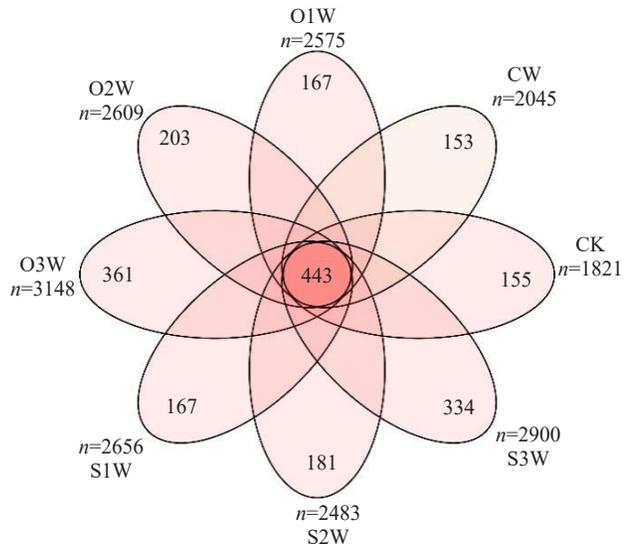


图 3 基于 OTU 丰度的不同样本的聚类图

2.4.2 不同处理下土壤微生物门水平群落结构 由图 4 可知,在门水平分类上,不同处理间微生物的主要菌门分别为:变形菌门(Proteobacteria)、拟杆菌门(Bacteroidetes)、放线菌门(Actinobacteriota)、厚壁菌门(Firmicutes)、绿弯菌门(Chloroflexi)、酸杆菌门(Acidobacteria)、疣微菌门(Verrucomicrobia)、髌骨细菌门(Patescibacteria)、芽单胞菌门(Gemmatimonadetes)、蓝藻门(Cyanobacteria)、棒状杆菌门(Rokubacteria)、浮霉菌门(Planctomycetes)。灌水高温闷棚处理措施对土壤微生物相对丰度的影响较小;灌水高温闷棚联合有机物处理措施使变形菌门和拟杆菌门的相对丰度提高,而放线菌门、厚壁菌门和酸杆菌门的相对丰度降低;灌水高温闷棚联合石灰氮处理措施提高了厚壁菌门和放线菌门的相对丰

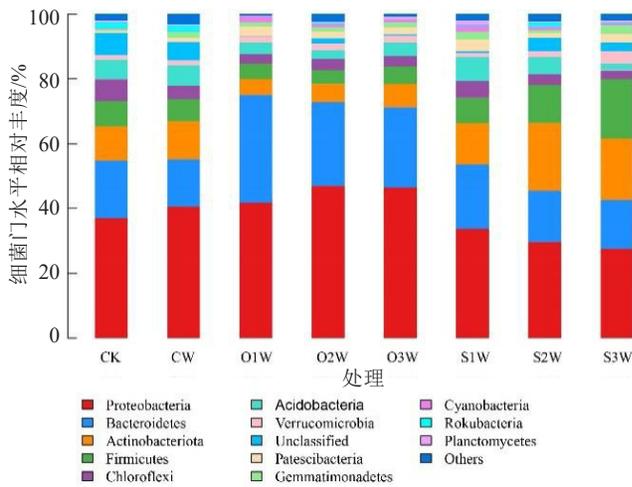


图4 细菌群落在门水平上的相对丰度结构

度,降低了变形菌门的相对丰度。

2.5 不同改良措施下根际土壤微生物的多样性分析

2.5.1 样本多样性分析 (Alpha-diversity, Alpha) 从 Alpha 多样性分析可知(表 3),经过改良措施后,芹菜根系土壤微生物的丰富度指数(Chao1 指数)和多样性指数(Shannon 指数)都有显著提高。以 O3W 处理的 Chao1 指数和 Shannon 指数最高,分别为 4 281.7、6.903 7,这说明 O3W 处理的微生物数量和种类都相对较多。Simpson 值代表的是微生物的优势度指数,CW 处理 Simpson 值最高为 0.018 4,说明其微生物群落中菌种的分布不均匀、多样性较差、优势种比重大。Coverage 指数越高说明土壤样

表 3 不同处理根际微生物多样性的变化

处理	Chao1 指数	Shannon 指数	Simpson 指数	Coverage 指数
CK	2 703.6±112.662 e	5.521 7±0.018 g	0.014 9±0.000 3 b	0.988 1
CW	2 757.5±95.290 e	5.673 6±0.021 f	0.018 4±0.000 5 a	0.985 3
O1W	3 388.9±147.439 cd	6.455 9±0.021 d	0.007 3±0.000 4 d	0.971 2
O2W	3 561.2±87.687 c	6.377 9±0.016 e	0.009 0±0.000 3 c	0.988 2
O3W	4 281.7±102.629 a	6.903 7±0.015 a	0.003 2±0.000 1 g	0.982 8
S1W	3 481.7±115.566 cd	6.588 5±0.017 c	0.003 9±0.000 1 f	0.978 5
S2W	3 302.4±133.699 d	6.404 5±0.020 e	0.006 2±0.000 2 e	0.975 7
S3W	3 880.8±128.793 b	6.629 2±0.019 b	0.005 7±0.000 2 e	0.974 6

本序列被测出的概率越高,在试验中各土壤样本指数都在 0.9 以上,代表可以反映样本中微生物群落的真实情况。

2.5.2 样本间比较分析(Bate-diversity, Bate) 由图 5 可知,采用主坐标分析(principal co-ordinates analysis,PCOA),以两坐标轴的零基准线为参考系,CK 和 CW 处理距离 PC2 较近,说明 PC2 主成分对其影响较大,占菌落总影响的 16.74%。O1W、O2W 和 O3W 处理距离 PC1 和 PC2 都比较近,说明其菌落结构受 PC1 主成分和 PC2 主成分影响都比较大,分别占总影响的 49.91%和 16.74%。S1W、S2W 和 S3W 处理距离两坐标轴比较远,说明其受两主成分的影响不大。CK、灌水高温闷棚、灌水高温闷棚联合有机物、灌水高温闷棚联合石灰氮 4 种不同处理措施在主坐标分析图上大致分布在 4 个方位,说明不同处理措施间有明显差异。

2.6 土壤的主要理化性质与微生物群落的关系

对土壤样本进行冗余分析(RDA)可知(图 6),第一坐标轴可以解释 74.27%的信息值,第二坐标轴可解释 16.90%的信息值,两坐标轴的总解释达到 91.17%的信息值,可准确反映样本的实际情况。各

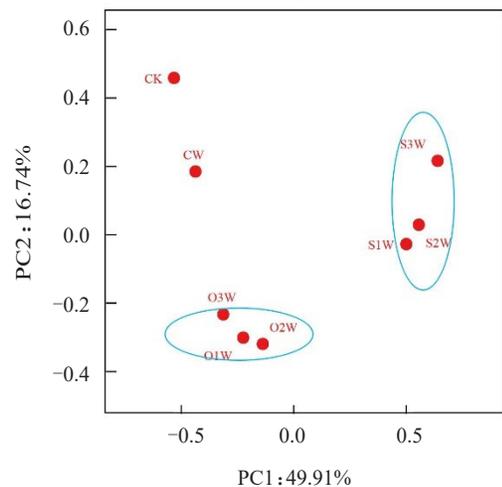
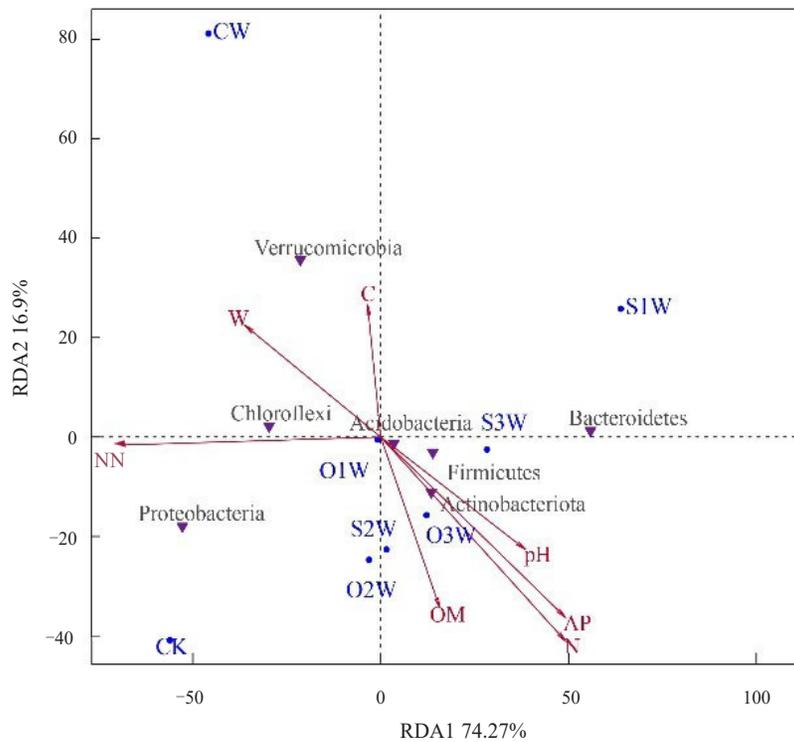


图 5 Bate 多样性的主坐标分析

处理点位分散于不同的象限空间内,说明不同处理间微生物群落的差异明显。可以看到,硝态氮是影响土壤细菌群落的主要理化性质之一。硝态氮与 CK 和 CW 处理呈正相关,与灌水高温闷棚联合有机物处理措施的相关性不明显,但与灌水高温闷棚联合石灰氮处理措施以及放线菌门、厚壁菌门和拟杆菌门呈负相关。pH、有机质、有效磷等与 CW 处



注:W. 容重;OM. 有机质;AP. 有效磷;C. 电导率;NN. 硝态氮;N. 全氮。

图6 土壤理化性质与细菌群落的关系

理和绿弯菌门、疣微菌门呈负相关,与灌水高温闷棚联合有机物或石灰氮处理措施以及放线菌门、厚壁菌门和拟杆菌门呈正相关。

3 讨论

已有研究表明,单纯对连作土壤进行淹水处理并不能有效灭杀土壤病原菌,而淹水联合有机物料的处理措施却能取得显著效果^[22]。在连作土壤中单纯施用石灰氮取得的灭菌效果可能会受温度的影响,而灌水高温闷棚联合石灰氮的处理措施却能有效发挥石灰氮的灭菌效果。笔者以灌水高温闷棚联合有机物或石灰氮等改良措施来改善芹菜连作障碍,优化土壤微生物的群落结构。经灌水高温闷棚联合石灰氮处理后,土壤的pH值显著提高、硝态氮含量显著降低,这与张蕾等^[23]和OH等^[24]的研究结果相同。在灌水高温闷棚联合石灰氮处理措施中,硝态氮的降低可能是因为石灰氮水解生成的双氰胺,对微生物的硝化反应产生了抑制作用^[25]。施用石灰氮后土壤全氮含量显著提升,这与Xiao等^[26]的观点一致。灌水高温闷棚联合有机物处理措施提高了土壤的有机质、全氮和速效磷含量,可能是有机质矿化释放了作物生长所需的养分,提高了土

壤中氮、磷和钾的含量^[27-29]。

从Alpha多样性分析可知,灌水高温闷棚联合有机物处理措施显著提高了根际土壤细菌的丰富度指数和多样性指数,这与刘亮亮等^[30]的研究结果一致。PCOA分析显示各处理措施根际土壤微生物区系结构与对照明显不同,说明各处理措施均能提高土壤中微生物的多样性和丰富度。高温闷棚联合石灰氮处理措施中,施用石灰氮后土壤微生物丰富度并没有大幅度减少,可能是因为施用石灰氮后虽灭杀了大量的土壤微生物,但同时也为土壤微生物提供了生态位和氮源,为土壤微生物群落的恢复创造了条件,这与刘高峰等^[31-32]的研究结果一致。对细菌门水平的相对丰度分析显示,灌水高温闷棚联合石灰氮处理措施提高了土壤中厚壁菌门的相对丰度,这与前人报道相似^[33]。厚壁菌门大多是厌氧菌,也是产生有机酸的主要菌门,其产生的有机酸等代谢有毒物质可以对病原菌起到抑制和灭杀作用^[34]。聂园军等^[35]的研究表明,放线菌门和厚壁菌门有利于促进连作西瓜的生长。灌水高温闷棚联合有机物处理措施能提高变形菌门和拟杆菌门的相对丰度,但会降低放线菌门和厚壁菌门等有益菌门的相对丰度。此外,还会使酸杆菌门的相对丰

度降低,这与陈静等^[36]的研究结果相同。通过冗余分析可知,硝态氮作为影响细菌群落的主要因素之一,与灌水高温闷棚联合石灰氮处理措施以及放线菌门、厚壁菌门和拟杆菌门呈负相关,说明降低土壤中硝态氮含量能改善土壤中放线菌门、厚壁菌门和拟杆菌门的生长环境。

4 结 论

(1)灌水高温闷棚结合有机物或石灰氮处理措施对芹菜连作土壤有改善作用,其中,灌水高温闷棚联合施用 15 000 kg·hm⁻² 麦糠和灌水高温闷棚联合施用 900 kg·hm⁻² 石灰氮的处理措施在缓解土壤酸化、提升土壤养分和作物产量方面效果最显著。

(2)灌水高温闷棚联合石灰氮处理措施能优化土壤原有的代谢关系,使土壤微生物区系变成了以放线菌门和厚壁菌门等厌氧菌为主的群落结构。

(3)由此可见,灌水高温闷棚联合施用 900 kg·hm⁻² 石灰氮的处理措施不仅能有效缓解芹菜根际土壤的连作障碍问题,还能改善土壤微生物群落结构。

参考文献

- [1] 王牧野,李建平,李俊杰.成本收益视角下中国设施蔬菜生产效率研究:以黄瓜、番茄栽培为例[J].中国农业资源与区划,2021,42(12):170-183.
- [2] WU F Z, YU H Y, YU G B, et al. Improved bacterial community diversity and cucumber yields in a rotation with kidney bean-celery-cucumber[J]. Acta Agriculturae Scandinavica Section B-Soil and Plant Science, 2011, 61(2): 122-128.
- [3] KREYE C, BOUMAN B A M, FARONILLO J E, et al. Causes for soil sickness affecting early plant growth in aerobic rice[J]. Field Crops Research, 2009, 114(2): 182-187.
- [4] GENTRY L F, RUFFO M L, BELOW F E. Identifying factors controlling the continuous corn yield penalty[J]. Agronomy Journal, 2013, 105(2): 295-303.
- [5] 蔡祖聪,张金波,黄新琦,等.强还原土壤灭菌防控作物土传病的应用研究[J].土壤学报,2015,52(3):469-476.
- [6] BUTLER D M, KOKALIS-BURELLE N, MURAMOTO J, et al. Impact of anaerobic soil disinfestation combined with soil solarization on plant-parasitic nematodes and introduced inoculum of soilborne plant pathogens in raised-bed vegetable production[J]. Crop Protection, 2012, 39: 33-40.
- [7] MOMMA N. Biological soil disinfestation (BSD) of soilborne pathogens and its possible mechanisms[J]. Japan Agricultural Research Quarterly, 2008, 42(1): 7-12.
- [8] SHI K, WANG L, ZHOU Y H, et al. Effects of calcium cyanamide on soil microbial communities and *Fusarium oxysporum* f. sp. *cucurbitinum*[J]. Chemosphere, 2009, 75(7): 872-877.
- [9] WU Y P, WU J X, MA Y J, et al. Dynamic changes in soil chemical properties and microbial community structure in response to different nitrogen fertilizers in an acidified celery soil[J]. Soil Ecology Letters, 2019, 1(3/4): 105-113.
- [10] SCHUTTER M E, SANDENO J M, DICK R P. Seasonal, soil type, and alternative management influences on microbial communities of vegetable cropping systems[J]. Biology and Fertility of Soils, 2001, 34(6): 397-410.
- [11] IBEKWE A M, PAPIERNIK S K, GAN J, et al. Impact of fumigants on soil microbial communities[J]. Applied Environmental Microbiology, 2001, 67(7): 3245-3257.
- [12] FIERER N, JACKSON J A, VILGALYS R, et al. Assessment of soil microbial community structure by use of taxon-specific quantitative PCR assays[J]. Applied and Environmental Microbiology, 2005, 71(7): 4117-4120.
- [13] 吕海龙,王姣敏,郭子军,等.氮肥减量配施不同生物有机肥对芹菜生长和产量品质的影响[J].土壤与作物,2021,10(3): 273-281.
- [14] 莫娟,刘小娟,王文慧,等.3种土壤消毒剂对芹菜根腐病的田间防效[J].中国蔬菜,2018(9):51-53.
- [15] 袁涛,李贤,龚小雅,等.早春大棚菜豆/芹菜间作对其产量和品质的影响[J].北方园艺,2021(18):42-47.
- [16] 中华人民共和国农业部.土壤检测第6部分 土壤有机质的测定:NY/T 1121.6—2006[S].北京:中国农业出版社,2006.
- [17] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局,中国国家标准化管理委员会.土壤硝态氮的测定 紫外分光光度法:GB/T 32737—2016[S].北京:中国标准出版社,2016.
- [18] 生态环境部.土壤pH值的测定 电位法:HJ 962—2018[S].北京:中国环境出版社,2019.
- [19] 环境保护部.土壤电导率的测定 电极法:HJ 802—2016[S].北京:中国环境出版社,2016.
- [20] 中华人民共和国农业部.土壤检测第7部分 土壤有效磷的测定:NY/T 1121.7—2014[S].北京:中国农业出版社,2015.
- [21] 中华人民共和国农业部.土壤全氮测定法(半微量开氏法):NY/T 53—1987[S].北京:中国标准出版社,1987.
- [22] 黄新琦,温腾,孟磊,等.土壤快速强烈还原对于尖孢镰刀菌的抑制作用[J].生态学报,2014,34(16):4526-4534.
- [23] 张蕾,吴文强,王维瑞,等.土壤调理剂及其配施微生物菌肥对设施菜田次生盐渍化土壤改良效果研究[J].中国土壤与肥料,2021(3):264-271.
- [24] OH K, KATO T, LI Z P, et al. Environmental problems from tea cultivation in Japan and a control measure using calcium cyanamide[J]. Pedosphere, 2006, 16(6): 770-777.
- [25] YAMAMOTO A, AKIYAMA H, NAOKAWA T, et al. Lime-nitrogen application affects nitrification, denitrification, and N₂O emission in an acidic tea soil[J]. Biology and Fertility of Soils, 2014, 50: 53-62.
- [26] XIAO W L, WANG Z X, WU F Z, et al. Effects of soil improvement technology on soil quality in solar greenhouse[J]. Environmental Science and Pollution Research, 2018, 25(24): 24093-24100.
- [27] BAI Y L, WANG L, LU Y L, et al. Effects of long-term full straw return on yield and potassium response in wheat-maize

- rotation[J]. *Journal of Integrative Agriculture*, 2015, 14(12): 2467-2476.
- [28] AHMED W, QASWAR M, JING H, et al. Tillage practices improve rice yield and soil phosphorus fractions in two typical paddy soils[J]. *Journal of Soils and Sediments*, 2020, 20(2): 850-861.
- [29] MA E D, ZHANG G, MA J, et al. Effects of rice straw returning methods on N₂O emission during wheat-growing season[J]. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, 2010, 88(3): 463-469.
- [30] 刘亮亮, 黄新琦, 朱睿, 等. 强还原土壤对尖孢镰刀菌的抑制及微生物区系的影响[J]. *土壤*, 2016, 48(1): 88-94.
- [31] 刘高峰, 张明宇, 黄光辉, 等. 石灰氮与生物菌剂配施对烟草根际微生物群落及防控青枯病的影响[J]. *河南农业大学学报*, 2020, 54(5): 748-754.
- [32] 刘中良, 郑建利, 孙哲, 等. 土壤改良剂对设施番茄土壤微生物群落、品质及产量的影响[J]. *华北农学报*, 2016, 31(S1): 394-398.
- [33] 古力, 李烜楨, 李明杰, 等. 强还原和淹水处理对地黄连作障碍的消减效应[J]. *中国生态农业学报(中英文)*, 2021, 29(8): 1305-1314.
- [34] MOMMA N, YAMAMOTO K, SIMANDI P, et al. Role of organic acids in the mechanisms of biological soil disinfestation (BSD)[J]. *Journal of General Plant Pathology*, 2006, 72(4): 247-252.
- [35] 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(1): 6-11.
- [36] 陈静, 胡云, 崔文芳. 秸秆还田对温室黄瓜根际土壤代谢和菌群的影响[J]. *中国瓜菜*, 2020, 33(7): 14-18.