

王 芳,王晓立,张 颖,等. 设施蔬菜复种连作对土壤理化性质和生物学特性的影响[J]. 江苏农业科学,2022,50(7):214-220.  
doi:10.15889/j.issn.1002-1302.2022.07.033

# 设施蔬菜复种连作对土壤理化性质和生物学特性的影响

王 芳,王晓立,张 颖,张 楠

(宿迁学院,江苏宿迁 223800)

**摘要:**为探明宿迁地区设施蔬菜复种连作障碍机理,以水芹-黄瓜复种连作(T1)和茄子-黄瓜复种连作(T2)土壤为研究对象,以紧邻露天未耕作土壤为对照(CK)处理,测定土壤 pH 值、盐离子含量、有效元素含量、酶活性和微生物生物量,并进行相关性分析。结果显示,T1 和 T2 处理的 pH 值显著低于 CK;盐离子总含量、 $\text{NO}_3^-$ 、 $\text{HCO}_3^-$ 、 $\text{SO}_4^{2-}$ 、 $\text{Cl}^-$ 、 $\text{Ca}^{2+}$ 、 $\text{Na}^+$ 、 $\text{K}^+$ 、有效铜、有效铁、有效锌含量显著高于 CK;微生物总量、细菌数量和放线菌数量显著低于 CK,真菌生物量显著高于 CK;蔗糖酶活性显著高于 CK,脲酶活性显著低于 CK。T1 处理组 pH 值显著高于 T2;T1 处理组各种盐离子含量和有效元素含量显著低于 T2;T1 处理组微生物总量、细菌数量和放线菌数量显著高于 T2,真菌数量显著低于 T2;T1 处理组蔗糖酶和脲酶活性显著高于 T2。T1 和 T2 处理 pH 值随着深度的增加而增加,其他指标多随着深度的增加而减少。相关性分析表明,pH 值、 $\text{NO}_3^-$ 、 $\text{Cl}^-$ 、 $\text{Na}^+$  含量与阳离子含量、有效元素含量关系密切;脲酶、蔗糖酶活性与阴离子含量关系密切;微生物生物量与酶活性、pH 值、阴离子含量关系密切。水芹-黄瓜复种连作和茄子-黄瓜复种连作均会引起连作障碍,但水旱复种连作可以适当缓解连作障碍的发生。

**关键词:**设施蔬菜;复种连作;土壤酶活性;土壤微生物;土壤理化性质

**中图分类号:** S344.3;S344.4 **文献标志码:** A **文章编号:** 1002-1302(2022)07-0214-07

设施蔬菜是指利用现代工业和机械技术,在局部范围内改善或创造出适宜蔬菜生长的光照、温度、湿度、水肥等环境因素,提高蔬菜生长质量,实现蔬菜的工业化生产和周年供应,促进现代农业的发展<sup>[1]</sup>。在我国,设施蔬菜自 20 世纪 90 年代进入高速发展阶段<sup>[2]</sup>。在江苏省宿迁市,设施蔬菜已成为主要支柱产业之一,是现代生态农业建设的重要内容<sup>[3]</sup>。随着宿迁设施蔬菜的专业化和规模化,设施土壤的连作障碍问题日渐突出,2020 年宿迁市现有设施蔬菜面积 36 698 hm<sup>2</sup>,发生连作障碍面积 2 403.2 hm<sup>2</sup>,占设施蔬菜总面积的 6.55%;涉及全市 43 个乡镇,江苏省沭阳县华冲镇由于连作造成设施蔬菜平均减产超过 1 000 kg/667 m<sup>2</sup><sup>[4]</sup>。连作造成土壤盐化、酸化、硬化、有机质含量下降、养分失衡、土传病害频发,导致蔬菜的产量和品质下降,严重阻碍了宿迁地区设施蔬菜产业的发展。目前

已有较多关于连作障碍的研究报道,周华兰等认为马铃薯连作土壤全磷、有效磷、碱解氮、全氮、速效钾、有机质含量增加,pH 值降低<sup>[5]</sup>。高桐梅等认为土壤速效氮、磷、钾,交换性钙、镁,有效铜、铁、锌、锰和硼含量随芝麻连作年限增加而下降<sup>[6]</sup>。蔡秋燕等认为连作 10 年内的植烟土壤蔗糖酶和磷酸酶活性随着连作年限的增加而显著降低,脲酶活性呈上升的趋势<sup>[7]</sup>。周华兰等认为马铃薯连作土壤蔗糖酶、过氧化氢酶和转化酶活性增加,磷酸酶和脲酶活性降低<sup>[5]</sup>。王长义等认为土壤微生物区系和多样性失调、有益微生物减少、病原微生物富集是引起连作障碍的根本原因<sup>[8-9]</sup>。Liu 等认为连作土壤会由细菌型向真菌型转变,有害真菌数量增加,有益微生物数量减少<sup>[10-11]</sup>。可见,土壤养分失衡、理化性状恶化、有害生物积累和微生物区系劣变等是引发连作障碍的主要原因。目前,关于复种连作的研究报道较少,主要集中于烟稻连作<sup>[12-16]</sup>。向鹏华等认为适度的烟稻复种连作( $\leq 7$  年),可调理土壤 pH 值,有利于土壤养分释放和作物更好的吸收利用<sup>[12]</sup>。靳志丽等认为烟稻复种连作模式下,14 年前烟叶质量逐步提高<sup>[17]</sup>。宿迁市关于设施蔬菜连作障碍的报道较少,主要集中在连作障碍的防控和盐离子含量研究<sup>[4,18-20]</sup>,少有关于设施蔬菜复种

收稿日期:2021-06-21

基金项目:江苏省宿迁市指导性科技计划(编号:Z2019100);江苏省宿迁市科技计划(重点研发计划——社会发展)(编号:S202003);江苏省宿迁市科技计划(创新能力建设)(编号:M202001);江苏省自然科学基金(编号:BK20201481)。

作者简介:王 芳(1982—),女,江苏宿迁人,硕士,讲师,主要从事园林植物保护和土壤微生物学研究。E-mail:835729199@qq.com。



连作土壤盐离子、酶活性和微生物的相关报道。本试验以紧邻研究对象的露天未耕作土壤作为对照,测定水芹-黄瓜复种连作和茄子-黄瓜复种连作大棚内土壤盐离子含量、有效元素含量、酶活性和微生物数量,分析其之间的相关性,以期为探明设施蔬菜复种连作障碍机理及制定调控措施提供理论指导。

## 1 材料与方法

### 1.1 土壤

试验于 2020 年 9—10 月进行,采样地位于江苏省宿迁市南蔡乡苏圩村(118°287'N、33°824'E),采集水芹-黄瓜复种连作 7~8 年的大棚(T1)和茄子-黄瓜复种连作 7~8 年大棚(T2)内土壤,以紧邻研究对象的露天未耕作土壤作为对照(CK)。取土时 T1 处理组种植水芹,土壤不积水,T2 处理组种植茄子。采用“Z”形 5 点取样法,去除土壤表层及周围杂草,分别采集 10、20、30 cm 左右深处的土壤。土样分为 4 份,第 1 份取 3 个深度同样质量的土壤混合均匀、过筛后自然风干,用于测定土壤酶活性和土壤养分等指标;第 2 份取 3 个深度同样质量的土壤混合均匀、过筛后置于-80℃超低温冰箱保存,用于测定土壤微生物数量;第 3 份取 3 个深度土壤不混合,分别过筛后自然风干,用于测定 3 个不同深度土壤酶活性和土壤养分等指标;第 4 份取 3 个深度土壤不混合,过筛后置于-80℃超低温冰箱保存,用于测定 3 个不同深度土壤微生物数量。

### 1.2 土壤养分、微生物数量和酶活性的测定

用 phs-3c 型酸度计测定 pH 值;采用双指示剂(酚酞指示剂和溴酚蓝指示剂)-中和滴定法测定  $\text{HCO}_3^-$  含量;采用双波长紫外分光光度法测定  $\text{NO}_3^-$  含量;采用 EDTA 间接络合滴定法测定  $\text{SO}_4^{2-}$  含量;采用硝酸银滴定法测定  $\text{Cl}^-$  含量;采用原子吸收分光光度计法测定土壤中钙、镁、钠、钾离子含量;采用 DTPA-TEA 浸提液的原子吸收光谱法测定土壤中有效铜、铁、锌含量;土壤盐分总量采用离子加和法计算<sup>[21]</sup>。

采用稀释涂布平板法测定土壤中真菌、细菌和放线菌生物量,细菌培养选择牛肉膏蛋白胨培养基;真菌培养选择马丁-孟加拉红培养基;放线菌培养选择改良高氏一号培养基。

采用苯酚-次氯酸钠比色法测定土壤脲酶活性,采用 3,5-二硝基水杨酸比色法测定土壤蔗糖

酶活性。

### 1.3 数据处理

采用 Excel 2010 软件进行数据整理和制表,利用 SPSS 21.0 软件进行显著性差异和相关性分析处理。

土壤盐分离子占全盐的比例 = 盐分离子含量/盐分总量  $\times 100\%$ <sup>[22]</sup>。

## 2 结果与分析

### 2.1 复种连作对土壤的理化性质的影响

由表 1 可知,T1 和 T2 处理组土壤 pH 值显著低于 CK( $P < 0.05$ ),T1 处理组土壤 pH 值显著高于 T2 处理组。T1 和 T2 处理组土壤盐分总量显著高于 CK,T2 处理组土壤盐分总量显著高于 T1。T1 和 T2 处理组土壤中  $\text{NO}_3^-$ 、 $\text{HCO}_3^-$ 、 $\text{SO}_4^{2-}$  和  $\text{Cl}^-$  含量均显著高于 CK,T2 处理组土壤中 4 种阴离子含量显著高于 T1 处理组;T1 和 T2 处理组土壤中  $\text{NO}_3^-$ 、 $\text{SO}_4^{2-}$  和  $\text{Cl}^-$  含量占全盐比例高于 CK, $\text{HCO}_3^-$  占全盐比例均低于 CK,T2 处理组  $\text{NO}_3^-$ 、 $\text{HCO}_3^-$ 、 $\text{SO}_4^{2-}$  占全盐比例高于 T1 处理组,但  $\text{Cl}^-$  占盐分总量比例低于 T1 处理组。T1 和 T2 处理组土壤  $\text{Ca}^{2+}$ 、 $\text{Na}^+$  和  $\text{K}^+$  含量显著增加, $\text{Mg}^{2+}$  含量基本保持不变, $\text{Ca}^{2+}$ 、 $\text{Mg}^{2+}$  和  $\text{K}^+$  占全盐比例低于 CK, $\text{Na}^+$  占盐分总量比例均高于 CK;与 CK 相比,T1 和 T2 处理组土壤有效铁、有效铜和有效锌含量显著增加,T2 处理组土壤中 3 种有效元素含量显著高于 T1 处理组。

由表 2 可知,T1 和 T2 处理组土壤 pH 值随着土壤深度的增加而增加,CK 处理组 3 个深度土壤 pH 值无显著差异。T1 和 T2 处理组土壤盐分总量、各阴离子和阳离子含量( $\text{NO}_3^-$ 、 $\text{HCO}_3^-$ 、 $\text{Cl}^-$ 、 $\text{K}^+$  除外)、有效铜、有效铁、有效锌含量均随着土壤深度的增加而降低,CK 随着土壤深度的增加上述指标大体上呈下降趋势,但大部分无显著差异。

### 2.2 复种连作土壤微生物数量的影响

由表 3 可知,T1 和 T2 处理组土壤中微生物总量显著低于 CK,T1 处理组微生物总量显著高于 T2 处理组;T1 和 T2 处理组细菌和放线菌数量显著低于 CK,真菌数量显著高于 CK;T1 处理组真菌数量显著低于 T2 处理组,T1 处理组细菌和放线菌数量显著高于 T2 处理组。由表 4 可知,T1、T2 和 CK 处理组土壤中真菌、细菌和放线菌数量均随着土壤深度的增加而减少。



表 1 复种连作对土壤的理化性质的影响

处理	pH 值	盐分总量 (mg/kg)	NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>		HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup>		SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>		Cl <sup>-</sup>		Ca <sup>2+</sup>	
			含量 (mg/kg)	占全盐的 比例(%)	含量 (mg/kg)	占全盐的 比例(%)	含量 (mg/kg)	占全盐的 比例(%)	含量 (mg/kg)	占全盐的 比例(%)	含量 (mg/kg)	占全盐的 比例(%)
T1	6.89 ± 0.12b	1 191.05 ± 26.37b	263.82 ± 3.25b	22.15	174.56 ± 1.87b	14.66	313.68 ± 3.64b	26.34	194.36 ± 2.44b	16.32	66.58 ± 0.35b	5.59
T2	6.53 ± 0.07c	1 651.75 ± 24.58a	394.66 ± 2.86a	23.22	249.36 ± 2.14a	14.67	425.86 ± 3.17a	27.88	274.58 ± 2.65a	16.15	75.34 ± 0.31a	4.43
CK	7.34 ± 0.10a	782.66 ± 16.74c	156.78 ± 1.49c	20.03	132.61 ± 1.35c	16.94	198.77 ± 2.56c	25.40	118.69 ± 1.87c	15.16	52.39 ± 0.28c	6.69

处理	pH 值	盐分总量 (mg/kg)	Mg <sup>2+</sup>		Na <sup>+</sup>		K <sup>+</sup>		有效铁含量 (mg/kg)		有效铜含量 (mg/kg)		有效锌含量 (mg/kg)	
			含量 (mg/kg)	占全盐的 比例(%)	含量 (mg/kg)	占全盐的 比例(%)	含量 (mg/kg)	占全盐的 比例(%)	含量 (mg/kg)	占全盐的 比例(%)	含量 (mg/kg)	占全盐的 比例(%)	含量 (mg/kg)	占全盐的 比例(%)
T1	6.89 ± 0.12b	1 191.05 ± 26.37b	26.29 ± 0.21a	2.21	92.57 ± 1.51b	7.77	59.19 ± 0.56b	4.97	14.69 ± 0.12b	3.55 ± 0.08b	0.43 ± 0.06b			
T2	6.53 ± 0.07c	1 651.75 ± 24.58a	26.54 ± 0.18a	1.56	130.64 ± 1.34a	7.69	74.77 ± 0.74a	4.40	18.43 ± 0.24a	4.62 ± 0.07a	0.61 ± 0.10a			
CK	7.34 ± 0.10a	782.66 ± 16.74c	26.32 ± 0.13a	3.36	55.34 ± 1.08c	7.07	41.76 ± 0.43c	5.34	7.82 ± 0.13c	2.01 ± 0.05c	0.33 ± 0.06c			

注:同列数据后不同小写字母表示差异显著。表 3、表 4、表 5、表 6 同。

表 2 复种连作对不同深度土壤理化性质的影响

项目	T1			T2			CK		
	10 cm	20 cm	30 cm	10 cm	20 cm	30 cm	10 cm	20 cm	30 cm
pH 值	6.57 ± 0.08b	6.83 ± 0.07ab	7.28 ± 0.11a	6.32 ± 0.06b	6.47 ± 0.09ab	6.75 ± 0.13a	7.31 ± 0.10a	7.35 ± 0.07a	7.41 ± 0.14a
盐分总量(mg/kg)	1 296.39 ± 56.34a	1 272.38 ± 78.83b	1 006.53 ± 71.02c	1 768.57 ± 69.76b	1 666.03 ± 55.95a	1 510.85 ± 78.52a	818.86 ± 71.35a	777.51 ± 80.61a	739.57 ± 82.77a
NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> 含量(mg/kg)	273.37 ± 8.68a	264.68 ± 5.34a	238.21 ± 7.31b	402.37 ± 3.47a	406.46 ± 1.58a	369.59 ± 2.02b	158.66 ± 3.55a	155.27 ± 8.56a	153.54 ± 4.72a
HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup> 含量(mg/kg)	195.08 ± 2.36a	206.19 ± 3.73a	103.50 ± 1.35b	290.18 ± 1.89a	245.76 ± 2.33b	194.25 ± 1.27c	137.82 ± 1.47a	139.19 ± 2.52a	122.46 ± 0.45b
SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> 含量(mg/kg)	343.51 ± 3.58a	335.83 ± 3.69a	266.26 ± 3.64b	434.78 ± 3.12a	428.31 ± 3.66a	392.00 ± 2.81b	192.16 ± 2.51a	188.16 ± 2.84a	190.24 ± 2.69a
Cl <sup>-</sup> 含量/(mg/kg)	223.47 ± 2.58a	209.65 ± 2.14b	202.36 ± 3.02b	285.58 ± 2.51a	281.31 ± 2.68a	283.07 ± 2.43a	120.55 ± 1.69a	117.64 ± 1.43a	115.52 ± 1.28a
Ca <sup>2+</sup> 含量(mg/kg)	71.57 ± 0.34a	70.10 ± 0.87a	54.14 ± 0.66b	81.50 ± 0.52a	75.12 ± 0.47b	73.98 ± 0.63b	57.73 ± 0.54a	55.99 ± 0.58a	56.88 ± 0.75a
Mg <sup>2+</sup> 含量(mg/kg)	26.33 ± 0.35b	24.44 ± 0.24ab	22.91 ± 0.25a	27.82 ± 0.26a	23.06 ± 0.33b	22.20 ± 0.27b	24.90 ± 0.35a	24.05 ± 0.38a	23.52 ± 0.19a
Na <sup>+</sup> 含量(mg/kg)	100.80 ± 3.14a	95.05 ± 2.35a	75.61 ± 0.86b	168.52 ± 1.85a	123.93 ± 1.32b	117.51 ± 0.78c	65.50 ± 1.25a	61.22 ± 0.28a	44.95 ± 0.44b
K <sup>+</sup> 含量(mg/kg)	62.26 ± 0.65a	66.44 ± 0.54a	43.54 ± 0.56b	77.82 ± 0.45a	78.08 ± 0.74a	58.25 ± 0.48b	58.54 ± 0.56a	35.99 ± 0.32b	32.46 ± 0.37b
有效铁含量(mg/kg)	16.25 ± 0.25a	15.21 ± 0.21a	9.56 ± 0.18b	19.70 ± 0.23a	16.67 ± 0.31a	12.28 ± 0.22b	7.61 ± 0.17a	7.55 ± 0.32a	7.57 ± 0.22a
有效铜含量(mg/kg)	3.53 ± 0.12a	3.48 ± 0.10a	2.83 ± 0.09b	5.06 ± 0.18a	4.69 ± 0.11b	2.93 ± 0.05c	2.02 ± 0.10a	1.97 ± 0.09a	1.59 ± 0.07a
有效锌含量(mg/kg)	0.52 ± 0.08a	0.50 ± 0.05a	0.41 ± 0.03b	0.86 ± 0.04a	0.57 ± 0.07b	0.41 ± 0.02c	0.34 ± 0.06a	0.35 ± 0.01a	0.32 ± 0.01a

注:相同处理同行数据后不同小写字母表示不同土壤深度间差异显著(P<0.05)。



表 3 复种连作对土壤微生物数量的影响 ×10<sup>5</sup> CFU/g

处理	细菌数量	真菌数量	放线菌数量	总量
T1	68.81 ± 21.68b	7.56 ± 7.34b	3.84 ± 5.75b	80.21 ± 22.55b
T2	54.04 ± 23.23c	8.12 ± 11.37a	3.56 ± 5.52c	65.72 ± 24.24c
CK	83.51 ± 29.74a	6.18 ± 4.33c	4.63 ± 5.75a	94.32 ± 28.58a

表 4 复种连作对不同深度土壤微生物数量的影响

处理	土层 (cm)	数量( ×10 <sup>5</sup> CFU/g)		
		细菌	真菌	放线菌
T1	10	68.73 ± 36.75a	7.95 ± 12.35a	4.29 ± 4.65a
	20	66.73 ± 35.62a	7.89 ± 12.37a	4.01 ± 8.37a
	30	58.93 ± 34.28b	6.26 ± 10.64b	3.13 ± 14.62b
T2	10	65.07 ± 28.69a	8.95 ± 8.67a	4.55 ± 5.72a
	20	55.47 ± 33.52b	8.92 ± 8.36a	3.37 ± 8.26b
	30	50.60 ± 24.68c	6.39 ± 9.52b	3.28 ± 7.59b
CK	10	85.60 ± 33.66a	6.52 ± 8.04a	4.70 ± 8.64a
	20	81.87 ± 35.23ab	6.11 ± 7.23b	4.59 ± 7.35a
	30	75.07 ± 34.94b	5.76 ± 7.66b	4.44 ± 6.98a

表 6 复种连作对不同深度土壤蔗糖酶和脲酶活性的影响

处理	土层 (cm)	蔗糖酶活性 [ mg/( g · d ) ]	脲酶活性 [ mg/( g · d ) ]
T1	10	34.64 ± 0.35a	0.79 ± 0.06a
	20	33.68 ± 0.56a	0.61 ± 0.04b
	30	23.33 ± 0.37b	0.56 ± 0.03b
T2	10	31.58 ± 0.28a	0.68 ± 0.04a
	20	27.32 ± 0.33ab	0.61 ± 0.05b
	30	21.66 ± 0.42b	0.49 ± 0.06c
CK	10	23.57 ± 0.27a	0.85 ± 0.05a
	20	21.76 ± 0.24ab	0.83 ± 0.10a
	30	20.38 ± 0.35b	0.74 ± 0.07b

2.3 复种连作土壤蔗糖酶和脲酶活性的影响

由表 5 可知,设施栽培连作条件下,T1 和 T2 处理组土壤蔗糖酶活性显著高于 CK,T1 处理组土壤蔗糖酶活性显著高于 T2 处理组;T1 和 T2 处理组土壤脲酶活性显著低于 CK,T1 处理组土壤脲酶活性显著高于 T2 处理组。由表 6 可知,T1、T2 和 CK 处理组土壤中蔗糖酶和脲酶活性均随着土壤深度的增加而减少。

表 5 复种连作对土壤蔗糖酶和脲酶活性的影响

处理	蔗糖酶活性 [ mg/( g · d ) ]	脲酶活性 [ mg/( g · d ) ]
T1	29.91 ± 0.52a	0.64 ± 0.07b
T2	26.52 ± 0.33b	0.56 ± 0.05c
CK	22.44 ± 0.27c	0.83 ± 0.11a

2.4 土壤性质相关性分析

从表 7 可知,真菌数量和 pH 值呈显著负相关,与 Na<sup>+</sup> 含量呈极显著正相关;细菌数量与脲酶活性、SO<sub>4</sub><sup>2-</sup> 含量均呈显著负相关;放线菌数量与蔗糖酶活性呈极显著负相关,与 NO<sub>3</sub><sup>-</sup> 含量呈显著负相关;蔗糖酶活性与 NO<sub>3</sub><sup>-</sup> 和 HCO<sub>3</sub><sup>-</sup> 含量呈显著正相关,与 Mg<sup>2+</sup> 含量呈极显著负相关;脲酶活性与 SO<sub>4</sub><sup>2-</sup> 呈显著正相关;pH 值与 Na<sup>+</sup>、有效铜、有效铁和有效锌含量呈显著或极显著负相关;NO<sub>3</sub><sup>-</sup> 含量与 Ca<sup>2+</sup>、Mg<sup>2+</sup> 和有效铜含量呈显著正相关;Cl<sup>-</sup> 含量与 Ca<sup>2+</sup>、Mg<sup>2+</sup>、

Na<sup>+</sup>、有效铜、有效铁和有效锌含量均呈显著或极显著正相关;Na<sup>+</sup> 与 Ca<sup>2+</sup>、K<sup>+</sup>、有效铁和有效锌含量呈显著正相关。

3 讨论与结论

3.1 复种连作对土壤理化性质的影响

大量研究表明,设施蔬菜随着连作时间的增加可导致土壤酸化。姜维研究表明,沈阳东陵区保护地土壤 pH 值较露天土壤下降了 1.05<sup>[23]</sup>。张福建等发现江西省 6 个县(市)连作 2 年以上的设施辣椒土壤 pH 值开始降低<sup>[24]</sup>。徐彬等认为江苏省镇江、盐城、南通和扬州等地设施蔬菜连作后 pH 值降低<sup>[25]</sup>。本试验研究表明,水芹-黄瓜复种连作和茄子-黄瓜复种连作的土壤 pH 值均显著低于对照土壤,这可能与设施栽培肥料使用有关,本试验研究土壤长期大量施用硫酸铵、氯化铵、硝酸铵、碳酸氢铵、硫酸钾和未充分腐熟的有机肥,植物吸收 1 个 K<sup>+</sup> 或 NH<sub>4</sub><sup>+</sup> 同时将置换出 1 个 H<sup>+</sup>,土壤中游离的 H<sup>+</sup> 与 NO<sub>3</sub><sup>-</sup>、SO<sub>4</sub><sup>2-</sup> 与 Cl<sup>-</sup> 结合形成酸,导致土壤 pH 值下降;未充分腐熟的有机肥在分解过程中产生大量的有机酸和 SO<sub>2</sub>,SO<sub>2</sub> 在设施栽培或遇水条件下会转化为亚硫酸和硫酸,增大土壤酸度<sup>[26-27]</sup>。本研究土壤 pH 值随着深度的增加而增加,这可能是因为浅层土壤中积累的各种肥料较多、土壤酸度较大。

黄绍文等在研究我国主要设施菜地耕层土壤



表 7 T1 处理土壤性质相关性分析

项目	相关系数												
	真菌数量	细菌数量	放线菌数量	蔗糖酶活性	脲酶活性	pH 值	NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> 含量	HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup> 含量	SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> 含量	Cl <sup>-</sup> 含量	Ca <sup>2+</sup> 含量	Mg <sup>2+</sup> 含量	Na <sup>+</sup> 含量
真菌数量	1.000	0.573	0.640	-0.552	-0.753	-0.938*	-0.267	-0.165	-0.826	0.828	0.782	0.562	0.988**
细菌数量		1.000	-0.263	0.367	-0.971*	-0.253	0.636	0.713	-0.935*	0.016	-0.062	-0.356	0.442
放线菌数量			1.000	-0.994**	0.023	-0.867	-0.911*	-0.863	-0.096	0.361	0.479	0.495	0.750
蔗糖酶活性				1.000	-0.133	0.807	0.951*	0.914*	-0.014	-0.524	-0.551	-0.996**	-0.672
脲酶活性					1.000	0.478	-0.433	-0.524	0.943*	-0.256	-0.179	0.121	-0.644
pH 值						1.000	0.585	0.498	0.579	-0.472	-0.550	-0.814	-0.980*
NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> 含量							1.000	0.795	-0.322	-0.761	0.910*	0.947*	0.411
HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup> 含量								1.000	-0.419	-0.689	-0.744	-0.709	-0.313
SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> 含量									1.000	-0.369	-0.295	0.002	-0.731
Cl <sup>-</sup> 含量										1.000	0.997**	0.929*	0.904*
Ca <sup>2+</sup> 含量											1.000	0.655	0.968*
Mg <sup>2+</sup> 含量												1.000	0.681
Na <sup>+</sup> 含量													1.000
K <sup>+</sup> 含量													
有效铁含量													
有效铜含量													
有效锌含量													

注：\*、\*\*、\* 分别表示在 0.01、0.05 水平上极显著、显著相关。

盐分总量及离子组成时发现,耕层土壤盐渍化普遍,主要盐分离子为 NO<sub>3</sub><sup>-</sup>、SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>、Ca<sup>2+</sup> [21]。徐彬等认为江苏省实施蔬菜长期连作后土壤盐分累积明显 [25]。朱坤等认为江苏省宿迁市宿城区和宿豫区设施保护地土壤均存在次生盐渍化现象 [19-20]。本研究表明,水芹-黄瓜复种连作和茄子-黄瓜复种连作后土壤盐分总量、NO<sub>3</sub><sup>-</sup>、HCO<sub>3</sub><sup>-</sup>、SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>、Cl<sup>-</sup>、Ca<sup>2+</sup>、Na<sup>+</sup>、K<sup>+</sup> 含量均显著增加,阴离子占盐分总量比重较大,其中 SO<sub>4</sub><sup>2-</sup> 和 NO<sub>3</sub><sup>-</sup> 占比最大,T1、T2 分别为 26.34%、27.88% 和 22.15%、23.22%,所占比例均高于对照,这和朱坤等研究结果 [19] 一致。宿迁市位于江苏苏北地区,因其沿海、沿江的地域特征,自然情况下土壤盐分含量普遍偏高,设施栽培土壤的次生盐渍化更易发生 [27]。土壤中 SO<sub>4</sub><sup>2-</sup> 和 NO<sub>3</sub><sup>-</sup> 的积累主要是由于硫酸铵、硝酸铵和有机肥的大量施用,SO<sub>4</sub><sup>2-</sup> 和 NO<sub>3</sub><sup>-</sup> 未被作物完全吸收利用而大量残留在土壤中造成。黄绍文等认为 NO<sub>3</sub><sup>-</sup> 的大量积累会影响植物对 Ca<sup>2+</sup> 和 Mg<sup>2+</sup> 的吸收,使其在土壤积累 [21]。霍龙认为,土壤中 Na<sup>+</sup> 的大量积累会影响植物对 Ca<sup>2+</sup>、Mg<sup>2+</sup>、K<sup>+</sup> 的吸收,使其在土壤积累 [28]。本研究显示,NO<sub>3</sub><sup>-</sup> 含量和 Ca<sup>2+</sup>、Mg<sup>2+</sup> 含量呈显著正相关;Cl<sup>-</sup> 含量和 Ca<sup>2+</sup>、Mg<sup>2+</sup>、Na<sup>+</sup> 含量呈显著正相关;Na<sup>+</sup> 含量和 Ca<sup>2+</sup>、K<sup>+</sup> 例子含量呈显著正相关,与黄绍文等研究结果 [21,28] 相近。所以,复种连作后随着肥料的大量施用,土壤中 NO<sub>3</sub><sup>-</sup> 和 Cl<sup>-</sup> 积累,会引起土壤中 Ca<sup>2+</sup>、Mg<sup>2+</sup>、Na<sup>+</sup> 的积累,Na<sup>+</sup> 的积累又会进一步加重 Ca<sup>2+</sup>、K<sup>+</sup> 的增多,导致土壤盐渍化程度加重。但本研究中 Mg<sup>2+</sup> 含量基本保持不变,可能与蔗糖酶含量上升有关,因为本研究发现蔗糖酶活性和 Mg<sup>2+</sup> 含量呈极显著负相关,在蔗糖酶、NO<sub>3</sub><sup>-</sup> 和 Cl<sup>-</sup> 共同作用下使得 Mg<sup>2+</sup> 含量趋于稳定。土壤中各种阳离子和阴离子的含量大体上均随着深度的增加而减少,是因为土壤长期大量施用的硫酸铵、氯化铵、硝酸铵、碳酸氢铵、硫酸钾和未充分腐熟的有机肥,这些物质在浅层土壤中积累较多,NO<sub>3</sub><sup>-</sup> 等阴离子在浅层土壤的积累也较多,而 NO<sub>3</sub><sup>-</sup> 和 Cl<sup>-</sup> 积累会引起阳离子含量的增加,所以浅层土壤中各种盐离子含量均较多。

本试验显示,水芹-黄瓜和茄子-黄瓜复种连作后土壤中有效铜、有效铁和有效锌含量增加。郭德杰等认为有机肥尤其是猪粪中含有大量的 Cu、Zn,大量使用会造成重金属在土壤中的积累 [29-30]。本试验发现,土壤 pH 值与有效铁、有效锌、有效铜



呈极显著或显著负相关,  $\text{NO}_3^-$  含量与有效铜呈显著正相关,  $\text{Cl}^-$  与有效铜、有效铁、有效锌呈显著或极显著正相关,  $\text{Na}^+$  与有效铁、有效锌呈显著正相关。所以, 有机肥的施用、土壤 pH 值的降低和土壤中  $\text{NO}_3^-$ 、 $\text{Cl}^-$ 、 $\text{Na}^+$  的积累导致土壤有效铜、有效铁、有效锌含量增加。土壤有效铜、有效铁和有效锌的含量随着土壤深度的增加而减少, 可能因为表层土壤中积累的有机肥施较多, 也与植株地上部分的枯枝烂叶落到表层土中被表层土中微生物和土壤酶分解有关。

水芹-黄瓜和茄子-黄瓜复种连作后土壤中微生物总量、细菌数量和放线菌数量减少, 真菌数量增加, 与周华兰等研究结果<sup>[5]</sup>一致。在设施栽培土壤中, 真菌数量对土壤肥力有着较大的影响, 随着土壤连作年限增加, 土壤类型逐渐由细菌型向真菌型转变<sup>[31-32]</sup>, 并伴有有害真菌的大量繁殖, 土壤肥力变差<sup>[33-35]</sup>。本研究也显示, 真菌数量与土壤 pH 值呈显著负相关, 与  $\text{Na}^+$  含量呈极显著正相关; 细菌数量和  $\text{SO}_4^{2-}$  呈显著负相关; 放线菌数量和  $\text{NO}_3^-$  呈显著负相关, 表明随着土壤中真菌数量的增加, 细菌数量和放线菌数量的减少, 土壤明显开始酸化和盐渍化。

本研究结果显示, 复种连作后蔗糖酶活性增加、脲酶活性降低, 细菌数量和脲酶活性呈显著负相关, 放线菌数量和蔗糖酶活性呈极显著负相关。由于土壤中微生物活动分泌是土壤酶主要来源之一, 微生物数量与酶活性有着显著的相关性, 但不同学者研究结果<sup>[25,36]</sup>不一致, 这可能与土壤类型、种植植物种类、养护管理和土壤微生物群落等因素有关。本试验发现, 蔗糖酶活性与  $\text{NO}_3^-$ 、 $\text{HCO}_3^-$  含量呈显著正相关, 与  $\text{Mg}^{2+}$  含量呈极显著负相关; 脲酶活性与  $\text{SO}_4^{2-}$  含量呈显著正相关。本试验中随着蔗糖酶活性的增加,  $\text{NO}_3^-$ 、 $\text{HCO}_3^-$  含量增加, 加剧了土壤盐渍化; 但随着脲酶活性降低,  $\text{SO}_4^{2-}$  含量并未减少, 这可能与其它影响因素如细菌的生物量和类群有关, 因为细菌数量和  $\text{SO}_4^{2-}$  含量呈显著负相关。从垂直分布来看, 真菌、细菌、放线菌数量和土壤脲酶、蔗糖酶活性均随着深度的增加而减少, 这与王瑛等的研究结果<sup>[37-38]</sup>一致, 这主要是由于浅层土壤适宜的温湿度条件、充足的氧气和养分更有利于微生物繁殖和代谢<sup>[39]</sup>。

### 3.2 水芹-黄瓜复种连作和茄子-黄瓜复种连作比较

胡坤等认为淹水后土壤 pH 值会上升并能够维

持一段时间<sup>[40]</sup>。赵海涛等认为大棚草莓连作土壤种植水生蔬菜后土壤 pH 值增加<sup>[41]</sup>。本研究显示, 水芹-黄瓜复种连作土壤 pH 值显著高于茄子-黄瓜复种连作的土壤, 这可能与水芹等水生蔬菜对硝态氮等酸根离子大量选择性吸收有关<sup>[41]</sup>。水芹-黄瓜复种连作土壤阴离子含量、阳离子含量 ( $\text{Mg}^{2+}$  除外) 和有效铜、铁、锌含量均显著低于茄子-黄瓜复种连作的土壤。黄绍文等认为  $\text{NO}_3^-$  的大量积累会影响植物对  $\text{Ca}^{2+}$  和  $\text{Mg}^{2+}$  的吸收<sup>[21]</sup>, 由于水芹选择吸收了部分硝态氮等酸根离子<sup>[41]</sup>,  $\text{NO}_3^-$  含量降低, 会增加植物对  $\text{Ca}^{2+}$  的吸收, 所以水芹-黄瓜复种连作土壤  $\text{Ca}^{2+}$  含量较低。种植水芹后, 由于土壤长期浸泡在水中, 能够起到大水洗盐的作用, 从而降低土壤中的  $\text{Na}^+$  含量<sup>[42]</sup>, 而土壤中  $\text{Na}^+$  的积累会影响植物对  $\text{Ca}^{2+}$ 、 $\text{K}^+$  的吸收, 所以种植水芹后可以促进植物对  $\text{Ca}^{2+}$ 、 $\text{K}^+$  等离子的吸收, 减轻其在土壤中的积累, 但  $\text{Mg}^{2+}$  含量基本保持不变, 其原因有待于进一步研究。本试验发现,  $\text{NO}_3^-$  含量与有效铜呈显著正相关,  $\text{Cl}^-$  与有效铜、有效铁、有效锌含量呈显著或极显著正相关,  $\text{Na}^+$  与有效铁、有效锌含量呈显著正相关。吴丹丹等认为土壤中盐分积累会影响植物对部分有效元素的吸收, 造成其在土壤中含量的增多, 并引起植物缺素症<sup>[43]</sup>。水芹-黄瓜复种连作土壤中盐离子含量少于茄子-黄瓜复种连作的土壤, 所以有效元素含量也少于茄子-黄瓜复种连作的土壤。水芹-黄瓜复种连作土壤微生物总量、细菌数量、放线菌数量和蔗糖酶、脲酶活性显著高于显著高于茄子-黄瓜复种连作的土壤, 真菌数量显著低于茄子-黄瓜复种连作的土壤, 这可能是由于水芹-黄瓜复种连作后土壤 pH 值、盐离子含量均优于茄子-黄瓜复种连作土壤, 更利于土壤微生物的繁殖和代谢。

本试验结果表明, 水芹-黄瓜复种连作和茄子-黄瓜复种连作与 CK 相比土壤具有明显的连作障碍, 且水芹-黄瓜复种连作土壤理化性质显著好于茄子-黄瓜复种连作土壤, 水旱复种连作可以适当地缓解连作障碍有利于植物生长。

### 参考文献:

- [1] 常青, 洪波, 陈志杰, 等. 设施蔬菜病虫害绿色防控技术现状与问题思考[J]. 北方园艺, 2020(17): 131-137.
- [2] 宋卫堂. 设施蔬菜产业发展对机械化的需求[J]. 中国农机化学报, 2017, 38(11): 112-115.
- [3] 朱方林, 余翔, 乔俊卿, 等. 江苏省宿迁市蔬菜产业现状及发展



- 对策[J]. 江苏农业科学, 2014, 42(10): 472-474.
- [4] 何井瑞, 何冰, 徐国平, 等. 宿迁市设施蔬菜连作障碍发生现状 & 改善措施[J]. 上海蔬菜, 2020(5): 1-3, 38.
- [5] 周华兰, 彭亚丽, 李婷, 等. 马铃薯连作对土壤理化性质和生物学特性的影响[J]. 湖南农业大学学报(自然科学版), 2019, 45(6): 611-616.
- [6] 高桐梅, 吴寅, 李春明, 等. 芝麻连作对农艺性状及土壤生化特性的影响[J]. 土壤通报, 2016, 47(4): 897-902.
- [7] 蔡秋燕, 阳显斌, 孟祥, 等. 不同连作年限对植烟土壤性状的影响[J]. 江西农业学报, 2020, 32(10): 93-98.
- [8] 王长义, 郝振萍, 陈丹艳, 等. 设施土壤连作障碍产生原因及防治方法综述[J]. 江苏农业科学, 2020, 48(8): 1-6.
- [9] 李冰圳. 连作及轮作对蒙古黄芪根际微生物多样性及其品质的影响[D]. 呼和浩特: 内蒙古大学, 2019: 47.
- [10] Liu H J, Yang X Y, Miao Z Q, et al. Characteristics of soil microflora of *Panax notoginseng* in different continuous cropping years[J]. Allelopathy Journal, 2018, 44(2): 145-158.
- [11] Ying Y X, Ding W L, Zhou Y Q, et al. Influence of *Panax ginseng* continuous cropping on metabolic function of soil microbial communities[J]. Chinese Herbal Medicines, 2012, 4(4): 329-334.
- [12] 向鹏华, 单雪华, 黄银章, 等. 烟-稻复种连作年限对土壤理化性状及烟叶产量与品质的影响[J]. 中国土壤与肥料, 2016(5): 105-109.
- [13] 尤垂淮, 曾文龙, 陈冬梅, 等. 不同养地方式对连作烤烟根际土壤微生物功能多样性的影响[J]. 中国烟草学报, 2015, 21(2): 68-74.
- [14] 梁文旭, 靳志丽, 莫凯明, 等. 烟稻复种连作对中、微量元素含量的影响效应研究[J]. 中国土壤与肥料, 2014(2): 40-44.
- [15] 梁文旭, 靳志丽, 杨勇辉, 等. 烟稻复种连作对土壤理化性状影响效应研究[J]. 广东农业科学, 2013, 40(17): 48-51.
- [16] 朱英华, 屠乃美, 肖汉乾, 等. 烟-稻复种连作年限对土壤钙镁硫含量的影响[J]. 华北农学报, 2012, 27(1): 218-222.
- [17] 靳志丽, 梁文旭, 李玉辉, 等. 烟稻复种连作对烤烟经济性状和品质的影响[J]. 中国烟草科学, 2014, 35(4): 22-27.
- [18] 姜若勇, 余翔, 吴绍军, 等. 宿迁地区设施蔬菜连作障碍综合防控的做法和效果[J]. 中国蔬菜, 2019(1): 89-91.
- [19] 朱坤, 李小艳, 袁奇. 宿迁市宿城区设施土壤次生盐渍化状况调查研究. 现代农业科技, 2020(22): 146-149.
- [20] 李跃飞, 李彬, 陶加乐, 等. 宿豫保护地土壤硝酸盐污染与土壤酸化、盐渍化状况调查与分析[J]. 江苏农业科学, 2020, 48(23): 241-245.
- [21] 黄绍文, 高伟, 唐继伟, 等. 我国主要菜区耕层土壤盐分总量及离子组成[J]. 植物营养与肥料学报, 2016, 22(4): 965-977.
- [22] 鲍士旦. 土壤农化分析[M]. 3 版. 北京: 中国农业出版社, 2000: 188.
- [23] 姜维. 东陵区设施土壤有机质、pH 值的剖面特征研究[J]. 农业科技与装备, 2011(6): 19-20, 23.
- [24] 张福建, 陈昱, 吴才君, 等. 江西省设施辣椒连作障碍现状调查与分析[J]. 北方园艺, 2018(17): 75-81.
- [25] 徐彬, 徐健, 祁建杭, 等. 江苏省设施蔬菜连作障碍土壤理化及生物特征[J]. 江苏农业学报, 2019, 35(5): 1124-1129.
- [26] 谷端银, 高俊杰, 焦娟, 等. 设施土壤酸化研究现状、产生机理及防治措施[J]. 化工管理, 2016(34): 84-86.
- [27] 王治林, 乔俊卿, 刘邳洲. 苏北地区设施栽培茄果类蔬菜连作障碍成因分析及防治措施[J]. 江苏农业科学, 2012, 40(2): 127-129.
- [28] 霍龙. 玉米田覆膜连作对土壤可溶性盐中阳离子含量的影响[J]. 赤峰学院学报(自然科学版), 2020, 36(7): 49-52.
- [29] 郭德杰, 刘新红, 徐丽萍, 等. 连续多季施用猪粪有机肥对设施大棚中土壤及作物中 Cu、Zn 含量的影响[J]. 江苏农业科学, 2020, 48(18): 283-286.
- [30] 沈月, 陆若辉, 娄烽. 浙江省商品有机肥及其原料中的铜、锌含量调查[J]. 浙江农业科学, 2020, 61(10): 2169-2170, 2175.
- [31] 王功师, 马子清, 潘凤兵, 等. 连作对土壤微生物及平邑甜茶幼苗氮吸收、分配和利用的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2019, 25(3): 481-488.
- [32] Liu H J, Yang X Y, Miao Z Q, et al. Characteristics of soil microflora of *Panax notoginseng* in different continuous cropping years[J]. Allelopathy Journal, 2018, 44(2): 145-158.
- [33] 杨风军, 安子靖, 杨薇薇. 番茄连作对日光温室土壤微生物及土壤理化性状的影响[J]. 中国土壤与肥料, 2016(1): 42-46.
- [34] 李兰君, 刘玳含, 刘建斌, 等. 连作对设施番茄土壤微生物及酶活性的影响[J]. 江苏农业科学, 2018, 46(18): 130-134.
- [35] Castrillo G, Teixeira P J P L, Paredes S H, et al. Root microbiota drive direct integration of phosphate stress and immunity[J]. Nature, 2017, 543(7646): 513-518.
- [36] 韦小了, 何季, 何腾兵, 等. 种植年限对刺梨园土壤微生物数量和酶活性的影响[J]. 江苏农业科学, 2019, 47(13): 280-284.
- [37] 王瑛, 艾训儒. 连作对土壤养分、微生物特性及葡萄产质量的影响[J]. 河南农业科学, 2016, 45(7): 49-55.
- [38] 刘汉成, 孔照霞, 隆雪萍, 等. 唐古特大黄根部土壤理化性质和微生物群落组成研究[J]. 河南农业科学, 2021, 50(4): 56-65.
- [39] 李艳丽, 赵化兵, 谢凯, 等. 不同土壤管理方式对梨园土壤微生物及养分含量的影响[J]. 土壤, 2012, 44(5): 788-793.
- [40] 胡坤, 喻华, 冯文强, 等. 淹水条件下不同中微量元素及有益元素对土壤 pH 和 Cd 有效性的影响[J]. 西南农业学报, 2010, 23(4): 1188-1193.
- [41] 赵海涛, 李良俊, 殷朝珍, 等. 水生蔬菜轮作对大棚草莓连作土壤性质的影响[J]. 江苏农业学报, 2014, 30(2): 289-295.
- [42] 刘永亮, 高艳明, 李建设. 水旱轮作对宁夏设施番茄连作土壤特性的影响[J]. 贵州农业科学, 2015, 43(8): 131-137.
- [43] 吴丹丹, 刘星, 邱慧珍, 等. 马铃薯连作对土壤盐分积累及离子组成的影响[J]. 甘肃农业大学学报, 2015, 50(2): 40-45.