

DOI: 10.13758/j.cnki.tr.2024.01.015

夏群, 刘宇松, 李诚勇, 等. 两种改良剂对酸化苹果园土壤环境及果树生长的影响. 土壤, 2024, 56(1): 112–119.

两种改良剂对酸化苹果园土壤环境及果树生长的影响^①

夏群^{1,2}, 刘宇松¹, 李诚勇³, 尹承苗^{1*}

(1 山东农业大学园艺科学与工程学院, 山东泰安 271018; 2 新泰市科技发展服务中心, 山东泰安 271200; 3 济南市莱芜区大王庄镇人民政府, 济南 271119)

摘要: 本试验研制两种改良剂, 在田间设置不施用改良剂和施用改良剂两个处理, 测定苹果单果重、可溶性固形物、果形指数、苦痘病发病率以及土壤 pH、有机质、元素含量、病原镰孢菌的数量和真菌群落结构的变化。结果表明, 两种改良剂对缓解苹果园土壤酸化均具有良好的效果, 其中德州改良剂效果最为显著。与对照相比, 经德州改良剂处理后, 苹果单果重平均提高 39%, 果形指数达到 0.83 以上, 可溶性固形物达到 14% 以上, 苦痘病发病率降至 1% 以下, 土壤 pH 平均提高 1.70, 土壤有机质平均提高 9.00 g/kg, 且降低土壤有效 Cu、有效 Mn 以及植株体内全 Cu、全 Mn 含量, 提高土壤交换性 Ca 以及植株体内全 Ca 含量, 降低病原镰孢菌数量, 优化真菌群落结构。综上, 两种改良剂可有效缓解苹果园土壤酸化, 促进果树生长。

关键词: 苹果; 改良剂; 土壤酸化

中图分类号: S661.1 **文献标志码:** A

Effects of Two Amendments on Soil Environment and Apple Growth of Acidified Orchard

XIA Qun^{1,2}, LIU Yusong¹, LI Chengyong³, YIN Chengmiao^{1*}

(1 College of Horticultural Science and Engineering, Shandong Agricultural University, Taian, Shandong 271018, China; 2 Xintai Science and Technology Development Service Center, Taian, Shandong 271200, China; 3 People's Government of Dawangzhuang Town, Laiwu District, Jinan 271119, China)

Abstract: In order to study the effects of two amendments on soil environment and apple growth of acidified orchard, in this study, an field experiment was conducted with two amendments, and two treatments were set up: no amendment and with amendment. Single fruit weight, soluble solid, fruit shape index and incidence of bitter pit of apple, soil pH, organic matter, elemental content, number of pathogenic *Fusarium* and changes in fungal community structure were studied. The results showed that the two amendments had good effects on alleviating soil acidification, and Dezhou amendment had the most significant effect. Compared with the control, after treated with Dezhou amendment, single fruit weight of apple increased by 39% on average, fruit shape index reached more than 0.83, soluble solid reached more than 14%, the incidence of bitter pit decreased to less than 1%, soil pH increased by 1.70, soil organic matter increased by 9.00 g/kg on average. In addition, the contents of available copper, available manganese in soil and total copper and total manganese in plant were decreased, the contents of soil exchangeable calcium and total calcium in plant were increased, the number of pathogenic *Fusarium* was decreased, and the fungal community structure was optimized. In conclusion, the two amendments can effectively relieve soil acidification and promote the growth of apple orchard.

Key words: Apple; Amendment; Soil acidification

土壤酸化是土壤退化的重要形式, 表现为土壤 pH 下降^[1]。土壤酸化已成为当今国际社会最关注的生态环境问题之一^[2]。由于农业生产上不合理使用肥

料, 导致我国农业土壤出现大规模的酸化现象^[3]。据相关资料显示, 连续施用化学氮肥 10~20 a, 部分耕层土壤 pH 下降幅度可超过 1 个单位, 且随施氮量的

①基金项目: 现代农业产业技术体系建设专项资金项目(CARS-27)、山东省高等学校青创科技支持计划项目(2019KJF020)和山东省自然科学基金项目(ZR2020MC131)资助。

* 通讯作者(cmyin@sdau.edu.cn)

作者简介: 夏群(1971—), 女, 山东泰安人, 本科, 助理研究员, 主要从事果树科学技术推广工作。E-mail: xtkjcgk@163.com

增加而 pH 明显降低^[4]。近年来苹果园土壤酸化现象非常严重，尤其以环渤海湾产区最为突出^[5]。

土壤酸化打破了原有的土壤生态平衡，导致土壤理化性质改变，土壤微生物数量、活性、多样性及种群结构发生改变，有机质含量降低，不利于植物的正常生长^[6]。Lawrence 等^[7]研究发现酸沉降导致的土壤 Al 活化是北美森林土壤缺 Ca 的主要原因，因为土壤有效态 Ca 含量与土壤交换性 Al 呈显著的负相关关系。苹果园土壤酸化加速 Ca、Mg 盐基离子淋失导致果实苦痘病、痘斑病、水心病普遍发生^[8]。土壤 pH 下降也会影响土壤养分的有效性，使土壤中 Cu、Mn、Pb 等重金属元素浓度增加，活动性增强^[9]。果园重金属如 Cu 污染加剧，导致果树生长发育迟缓，植株矮小，主根生长不良，叶片叶绿素含量降低，光合速率下降，进而影响果树产量^[10]。由于酸化土壤很难通过自身作用恢复至正常的 pH，而其中含有的重金属也难以在自然条件下降解或稳定化，因此能否采用有效的方法减轻或克服土壤酸化成为苹果产业可持续发展的一项重要工作。王桂华等^[11]研究表明，在酸性土壤上施用生石灰能明显提高土壤 pH，显著促进苹果的生长。但也有研究发现生石灰施用过量会导致土壤板结，引发营养物质流失，从而导致作物减产^[12]。贾明等^[13]研究发现菌渣等农业废弃物还田可以提升土壤有机质和养分含量，增加团粒结构，降低土壤容重，改善土壤理化性质。Álvarez 等^[14]研究发现，酸性、风沙性、泥炭土等土壤中施用贝壳粉后均能够使土壤 pH 上升，且土壤有机质、有效磷含量和土壤阳离子交换量均有所提高。也有研究表明，贝壳粉可以显著降低土壤中 Cd 的有效性，降低土壤 Cd 的酸可溶态含量，提高残渣态含量，同时可有效减少水稻各组织对 Cd 的吸收^[15-16]。但目前关于生石灰、贝壳粉与菌渣等有机物配合使用对苹果园酸化土壤改良鲜有报道。因此本课题组研发以生石灰、贝壳粉、菌渣等有机物为主要有效成分的两种改良剂，探讨两种改良剂对酸化苹果园土壤 pH、重金属活性、病原镰孢菌数量、微生物群落结构、果实品质的影响，以期为酸化苹果园土壤改良提供技术支持。

1 材料与方法

1.1 试验材料与处理

试验于 2017 年在山东烟台栖霞郭家埠头村、栖霞官地村、栖霞任留村、招远大户陈家村、莱州小草沟村、莱州大沙岭村、牟平官庄村、栖霞十里堡村、文登后村进行。

供试改良剂由烟台绿源有机肥有限公司和德州创迪微生物资源有限责任公司生产。烟台改良剂配方：羊粪 400 g/kg、木薯渣 300 g/kg、菌渣 100 g/kg、糖渣 100 g/kg、生石灰 50 g/kg、贝壳粉(30 目)30 g/kg、骨粉 20 g/kg。德州改良剂配方：菌糠 700 g/kg、蛋白泥 120 g/kg、草木灰 100 g/kg、生石灰 50 g/kg、贝壳粉(30 目)30 g/kg。2017 年 3 月 10 日进行土壤处理，试验处理为不施用改良剂和施用改良剂。两种改良剂均采用定点施用方式，沿树行方向，中心干两侧，距中心干 80 cm 各开一沟(共两沟)，沟长 80 cm，深 30 cm，宽 20 cm，每沟施用改良剂 2.5 kg，土壤混匀后回填。对照处理不施用改良剂。每个处理苹果树 20 株。于 2017 年 10 月取样，进行各项试验指标的测定。

1.2 测定指标及方法

土壤有机质采用重铬酸钾容量法(稀释热法)测定；土壤 pH 采用酸度计测定(水土质量比 1:2.5)；土壤 Cu、Mn、Ca 含量采用 DTPA 浸提，原子吸收分光光度法(AA6300C，日本)测定。具体参照鲍士旦^[17]的方法。

果实品质测定：使用电子天平测定单果重，游标卡尺测定果形指数，采用糖度计(SW-592)检测可溶性固形物的含量。

植株 Cu、Mn、Ca 元素含量测定：称取 1 g 干燥枝条、叶片、果实，放入 150 mL 三角瓶中，加入浓 HNO₃ 25 mL，摇匀，放置过夜；于电热板上约 200 °C 加热 30 min，冷却，加 HNO₃-HClO₄ 混合酸 5 mL，继续加热至有白烟产生，说明消化已完全，内容物已全部溶解；继续加热蒸去大部分 HNO₃ 和 HClO₄，冷却后用热水洗入 50 mL 容量瓶中定容，过滤；采用原子吸收分光光度法(AA6300C，日本)测定。具体参照鲍士旦^[17]的方法。

土壤镰孢菌基因拷贝数测定：参照段亚楠等^[18]的方法，使用 E.Z.N.A. Soil DNA Kit 提取土壤 DNA，用 CFX96TM Thermal Cycler(Bio-Rad)测定。

土壤微生物群落结构测定：用真菌 ITS 区通用片段引物(ITS1-F 和 ITS4)进行扩增，用限制性内切酶 *Hha* I 对 PCR 产物酶切，将酶切产物送至生工生物工程(上海)股份公司进行测序，采用 SPSS 19.0 软件对测序结果进行真菌群落聚类分析和主成分分析^[19]。

1.3 数据处理

试验数据采用 Excel 2003 进行计算，通过 SPSS 19.0 软件进行方差分析，采用 t 检验检测结果的差异显著性。

2 结果

2.1 两种改良剂对苹果果实品质的影响

由表 1 可以看出, 经过两种改良剂处理后, 苹果单果重、果形指数、可溶性固形物均得到显著提升。经德州改良剂处理后, 单果重平均提高 39%, 各试验点果形指数达到 0.83 以上, 可溶性固形物也达到 14% 以上。经烟台改良剂处理后, 单果量也平均提高 36%, 果形指数达到 0.82 以上, 可溶性固形物也达到 13.5% 以上。

2.2 两种改良剂对苹果苦痘病发病率的影响

由表 2 可以看出, 经过两种改良剂处理后, 苦痘病发病率显著降低, 德州改良剂效果好于烟台改良剂。经德州改良剂处理后, 在栖霞十里堡和招远大户陈家未发生苦痘病, 在文登后村发病率仅为 0.97%; 经烟台改良剂处理后, 苦痘病发病率也显著降低。表

明两种改良剂可有效补充土壤中流失的 Ca^{2+} , 减轻苹果苦痘病的发生。

2.3 两种改良剂对土壤 pH 和有机质的影响

由表 3 可以看出, 经过两种改良剂处理后, 土壤 pH 明显提高, 平均提高 1.70。其中, 牟平官庄与栖霞郭家埠头提高最为显著, 与未施改良剂相比分别提高了 2.16、2.08; 栖霞十里堡 pH 变化量较小, 提高了 1.28。表明两种改良剂均能有效提高土壤 pH, 改良土壤酸化。

经过两种改良剂处理后, 各试验点土壤有机质含量均显著提升, 德州改良剂平均提高 9.00 g/kg, 烟台配方肥平均提高 7.50 g/kg。其中, 莱州小草沟有机质含量提高最为显著, 与未施改良剂相比提高了 11.54 g/kg; 栖霞官地有机质含量提高最低, 与未施改良剂相比提高了 5.70 g/kg。表明两种改良剂均可有效提高土壤有机质含量, 改善土壤结构。

表 1 两种改良剂对苹果果实品质的影响
Table 1 Effects of two amendments on apple qualities

改良剂	试验点	单果重(g)		果形指数		可溶性固形物(%)	
		未施改良剂	施改良剂	未施改良剂	施改良剂	未施改良剂	施改良剂
德州改良剂	文登后村	256.18 ± 8.41	375.39 ± 8.12*	0.78 ± 0.01	0.86 ± 0.01*	12.86 ± 0.05	14.52 ± 0.09**
	栖霞十里堡	185.66 ± 7.80	250.70 ± 6.05*	0.80 ± 0.01	0.89 ± 0.02*	12.80 ± 0.08	14.13 ± 0.05**
	招远大户陈家	166.02 ± 6.22	225.54 ± 6.25*	0.75 ± 0.01	0.83 ± 0.01*	12.21 ± 0.08	14.07 ± 0.07**
烟台改良剂	栖霞郭家埠头	184.54 ± 4.12	231.27 ± 5.74*	0.76 ± 0.01	0.86 ± 0.01**	12.87 ± 0.04	13.77 ± 0.05**
	栖霞官地	286.12 ± 9.51	358.85 ± 10.47	0.79 ± 0.01	0.86 ± 0.01*	12.66 ± 0.12	13.44 ± 0.05*
	栖霞任留	170.49 ± 8.30	232.10 ± 9.00**	0.80 ± 0.01	0.89 ± 0.01*	12.34 ± 0.13	14.82 ± 0.09**
	招远大户陈家	166.02 ± 6.22	234.69 ± 8.02*	0.75 ± 0.01	0.82 ± 0.01*	12.21 ± 0.08	13.54 ± 0.05**
	莱州小草沟	229.03 ± 6.44	326.13 ± 5.25*	0.80 ± 0.01	0.87 ± 0.01*	12.89 ± 0.03	13.82 ± 0.08**
	莱州大沙岭	213.26 ± 6.79	318.75 ± 9.30**	0.80 ± 0.01	0.90 ± 0.01*	12.63 ± 0.08	13.64 ± 0.03**
	牟平官庄	232.38 ± 16.24	312.89 ± 5.13*	0.77 ± 0.01	0.87 ± 0.01*	12.69 ± 0.02	14.61 ± 0.04**

注: 表中同行数据*、**、***分别表示同一试验点同一指标施用改良剂与未施用改良剂处理间差异达 $P < 0.05$ 、 $P < 0.01$ 和 $P < 0.001$ 显著水平, 下同。

表 2 两种改良剂对苹果苦痘病发病率的影响
Table 2 Effects of two amendments on incidences of apple bitter pox

改良剂	试验点	未施改良剂			施改良剂		
		平均结果数	苦痘病果实数	发病率(%)	平均结果数	苦痘病果实数	发病率(%)
德州改良剂	文登后村	80	19	23.75	103	1	0.97
	栖霞十里堡	162	50	30.84	186	0	0
	招远大户陈家	36	10	27.78	54	0	0
烟台改良剂	栖霞郭家埠头	47	16	34.04	54	1	1.85
	栖霞官地	47	17	36.17	51	19	37.25
	栖霞任留	167	43	25.75	184	6	3.26
	招远大户陈家	36	10	27.78	48	1	2.08
	莱州小草沟	74	18	24.32	86	4	4.65
	莱州大沙岭	72	31	43.06	91	15	16.48
	牟平官庄	152	44	28.95	179	2	1.12

表 3 两种改良剂对土壤 pH 和有机质的影响
Table 3 Effects of two amendments on soil pH and organic matter content

改良剂	试验点	pH			有机质含量(g/kg)		
		未施改良剂	施改良剂	变化量	未施改良剂	施改良剂	变化量
德州改良剂	文登后村	5.21 ± 0.05	7.08 ± 0.08**	+1.87	7.00 ± 0.97	13.10 ± 0.11**	+6.92
	栖霞十里堡	5.78 ± 0.02	7.06 ± 0.04**	+1.28	4.64 ± 0.56	12.48 ± 0.78**	+9.39
	招远大户陈家	5.62 ± 0.01	7.52 ± 0.01**	+1.90	5.88 ± 0.31	13.88 ± 0.95**	+9.73
烟台改良剂	栖霞郭家埠头	4.97 ± 0.02	7.05 ± 0.03**	+2.08	8.29 ± 0.13	16.86 ± 0.09**	+8.58
	栖霞官地	5.59 ± 0.01	7.23 ± 0.01**	+1.65	4.54 ± 0.30	10.24 ± 0.18**	+5.70
	栖霞任留	5.21 ± 0.05	7.10 ± 0.11**	+1.89	6.38 ± 0.21	15.14 ± 0.29**	+8.76
	招远大户陈家	5.62 ± 0.01	7.25 ± 0.01**	+1.63	7.21 ± 0.26	13.95 ± 0.46**	+6.74
	莱州小草沟	5.49 ± 0.02	7.19 ± 0.01**	+1.70	8.26 ± 0.22	19.80 ± 0.61**	+11.54
	莱州大沙岭	5.25 ± 0.03	7.00 ± 0.03**	+1.75	7.66 ± 0.28	14.00 ± 0.28**	+6.34
	牟平官庄	5.61 ± 0.02	7.77 ± 0.01**	+2.16	5.45 ± 0.25	11.29 ± 0.21**	+5.84

2.4 两种改良剂对土壤及苹果植株 Ca 元素含量的影响

由表 4 可知, 经过两种改良剂处理后, 土壤交换性 Ca 含量均显著提高, 其中德州改良剂处理效果较好, 招远大户陈家土壤交换性 Ca 含量提高了 453.39%; 苹果植株 Ca 元素含量也显著提高, 其中莱州小草沟枝条 Ca 元素含量提高了 88.67%, 莱州大沙岭植株叶片 Ca 元素含量提高了 49.58%; 果实 Ca 元素含量也显著提高, 栖霞任留提高最高, 提高了

176.12%。表明两种改良剂均能显著提高土壤交换性 Ca 含量, 缓解植株 Ca 元素的缺失。

2.5 两种改良剂对土壤及苹果植株 Cu 元素含量的影响

由表 5 可知, 经过两种改良剂处理后, 土壤有效 Cu 含量均显著降低, 其中栖霞官地最为显著, 与未施改良剂相比降低了 82.82%; 苹果枝条中 Cu 元素含量也表现为显著降低, 平均降低 30%; 而叶片、果实中 Cu 元素含量略微降低, 但整体与对照未达到显著性差异。

表 4 两种改良剂对土壤及苹果植株 Ca 含量的影响
Table 4 Effects of two amendments on calcium contents in soil and apple tree

改良剂	试验点	土壤 Ca 含量(mg/kg)		枝条 Ca 含量(mg/kg)	
		未施改良剂	施改良剂	未施改良剂	施改良剂
德州改良剂	文登后村	588.25 ± 75.45	3 134.00 ± 167.19**	5 078.08 ± 62.74	5 192.83 ± 48.81
	栖霞十里堡	954.33 ± 122.85	4 710.83 ± 157.58**	4 486.83 ± 15.49	8 479.58 ± 28.16**
	招远大户陈家	232.08 ± 15.32	1 284.33 ± 186.30*	4 654.33 ± 117.05	7 513.92 ± 58.41**
烟台改良剂	栖霞郭家埠头	1 323.50 ± 175.46	4 269.58 ± 435.74**	2 951.33 ± 52.03	4 983.83 ± 14.53**
	栖霞官地	1 057.25 ± 88.87	1 736.92 ± 71.27*	4 533.67 ± 19.10	5 039.50 ± 118.41*
	栖霞任留	740.17 ± 254.74	683.00 ± 134.03	4 905.25 ± 75.62	8 922.75 ± 73.71**
	招远大户陈家	232.08 ± 15.32	514.75 ± 13.94**	4 654.33 ± 117.05	6 569.58 ± 127.21**
	莱州小草沟	356.25 ± 60.06	1 687.92 ± 247.25*	4 820.00 ± 157.29	9 094.08 ± 180.64**
	莱州大沙岭	576.83 ± 29.35	970.58 ± 15.90**	7 427.00 ± 97.54	8 313.50 ± 64.33**
	牟平官庄	911.75 ± 193.68	2 047.42 ± 99.35*	4 582.00 ± 88.73	5 421.75 ± 13.46*
改良剂	试验点	叶片 Ca 含量(mg/kg)		果实 Ca 含量(mg/kg)	
		未施改良剂	施改良剂	未施改良剂	施改良剂
德州改良剂	文登后村	5 891.92 ± 52.59	8 017.33 ± 70.83**	153.50 ± 10.39	370.17 ± 8.68**
	栖霞十里堡	6 227.67 ± 261.38	6 046.08 ± 57.80	340.17 ± 1.92	611.58 ± 14.88**
	招远大户陈家	3 424.92 ± 55.54	5 533.58 ± 119.59**	435.83 ± 11.34	766.83 ± 7.15**
烟台改良剂	栖霞郭家埠头	3 968.25 ± 7.25	5 280.08 ± 172.39*	313.83 ± 14.15	448.17 ± 7.55*
	栖霞官地	4 465.83 ± 84.80	3 723.42 ± 42.17*	237.83 ± 8.65	238.42 ± 7.65
	栖霞任留	4 546.92 ± 65.81	5 287.42 ± 82.90*	257.83 ± 15.75	711.92 ± 14.81**
	招远大户陈家	3 424.92 ± 55.54	4 405.58 ± 128.17**	435.83 ± 11.34	671.58 ± 19.67*
	莱州小草沟	4 237.83 ± 59.21	6 024.67 ± 113.65**	372.58 ± 8.11	596.17 ± 23.63*
	莱州大沙岭	4 893.58 ± 127.87	7 320.00 ± 47.17**	263.42 ± 18.75	475.67 ± 23.87**
	牟平官庄	4 479.00 ± 85.90	5 855.50 ± 340.06*	125.33 ± 6.96	294.08 ± 16.89**

表 5 两种改良剂对土壤及苹果植株 Cu 元素含量的影响
Table 5 Effects of two amendments on copper contents in soil and apple tree

改良剂	试验点	土壤 Cu 含量(mg/kg)		枝条 Cu 含量(mg/kg)		叶片 Cu 含量(mg/kg)		果实 Cu 含量(mg/kg)	
		未施改良剂	施改良剂	未施改良剂	施改良剂	未施改良剂	施改良剂	未施改良剂	施改良剂
德州改良剂	文登后村	36.92 ± 0.83	27.42 ± 2.58*	67.00 ± 3.79	42.08 ± 0.65*	58.92 ± 1.34	34.67 ± 1.31**	4.81 ± 0.01	4.82 ± 0.02
	栖霞十里堡	65.00 ± 0.72	55.58 ± 0.47**	58.42 ± 2.17	46.58 ± 0.96*	60.75 ± 5.20	38.17 ± 2.71	4.92 ± 0.07	4.81 ± 0.01
	招远大户陈家	42.08 ± 2.28	43.75 ± 2.27	31.00 ± 0.87	58.50 ± 0.72**	40.58 ± 0.33	52.58 ± 0.74*	5.32 ± 0.15	5.19 ± 0.08
烟台改良剂	栖霞郭家埠头	25.67 ± 0.83	7.50 ± 0.36**	35.33 ± 0.51	24.67 ± 0.46**	37.25 ± 0.50	39.92 ± 5.05	5.11 ± 0.16	5.07 ± 0.02
	栖霞官地	65.00 ± 4.47	11.17 ± 0.83**	40.17 ± 0.51	29.92 ± 1.88*	44.17 ± 0.73	45.67 ± 0.73	5.20 ± 0.04	5.02 ± 0.04**
	栖霞任留	29.83 ± 1.34	24.75 ± 0.95**	58.92 ± 4.43	12.25 ± 2.01**	35.42 ± 3.84	31.08 ± 1.78	5.33 ± 0.15	4.96 ± 0.08
	招远大户陈家	42.08 ± 2.28	40.33 ± 2.96	31.00 ± 0.87	8.00 ± 0.90**	40.58 ± 0.33	30.17 ± 2.25*	5.32 ± 0.15	4.96 ± 0.06
	莱州小草沟	21.50 ± 0.14	18.92 ± 0.44*	85.83 ± 1.53***	30.17 ± 0.73	63.92 ± 4.66	62.58 ± 0.74	5.63 ± 0.44	5.30 ± 0.03
	莱州大沙岭	21.50 ± 1.28	9.17 ± 1.17*	41.75 ± 0.80	40.33 ± 0.65	49.33 ± 0.73	44.08 ± 0.74	5.53 ± 0.10	5.06 ± 0.01*
	牟平官庄	15.33 ± 0.08	13.58 ± 0.21**	23.92 ± 1.10	21.17 ± 1.01**	59.50 ± 4.42	60.17 ± 13.73	5.21 ± 0.08	5.06 ± 0.01

2.6 两种改良剂对土壤及苹果植株 Mn 元素含量的影响

由表 6 可以看出, 经过两种改良剂处理后, 土壤中有效 Mn 和苹果植株 Mn 元素含量均不同程度地下降, 其中文登后村经德州改良剂处理后效果最为显著, 土壤有效 Mn 含量下降 47.34%, 苹果植株叶片 Mn 元素含量下降 7.30%, 枝条 Mn 元素含量下降 14.83%, 果实 Mn 元素含量下降 26.23%。表明两种改良剂均能改良土壤酸化, 降低土壤中重金属离子活性, 减轻重金属胁迫。

2.7 两种改良剂对土壤镰孢菌基因拷贝数的影响

由表 7 可以看出, 经两种改良剂处理后, 各试验点土壤串珠镰孢菌和腐皮镰孢菌基因拷贝数均显著降低。德州改良剂效果较好, 串珠镰孢菌、腐皮镰孢菌拷贝数平均降低 80%。经烟台改良剂处理后招远大

户陈家土壤串珠镰孢菌和腐皮镰孢菌基因拷贝数分别下降了 16.90%、28.08%。

2.8 两种改良剂对土壤微生物群落结构的影响

根据 T-RFLP 图谱中 OTU 的数量、种类及丰度, 分别计算两种改良剂处理下土壤真菌多样性指数(表 8)。经过两种改良剂处理后, 土壤真菌各项指数均发生改变, 其中烟台改良剂处理后土壤真菌各项指数变化量小于德州改良剂处理。与未施改良剂相比, 真菌丰富度指数、多样性指数、均匀度指数均有所提高, 而优势度指数表现为降低趋势。

根据主成分的提取原则, 选取 2 个主成分进行分析(图 1)。结果显示, 各试验点施改良剂处理与未施改良剂处理均成为相对独立的微生物群, 表明两种改良剂可以显著改变土壤真菌群落结构。

表 6 两种改良剂对土壤及苹果植株 Mn 元素含量的影响
Table 6 Effects of two amendments on manganese contents in soil and apple tree

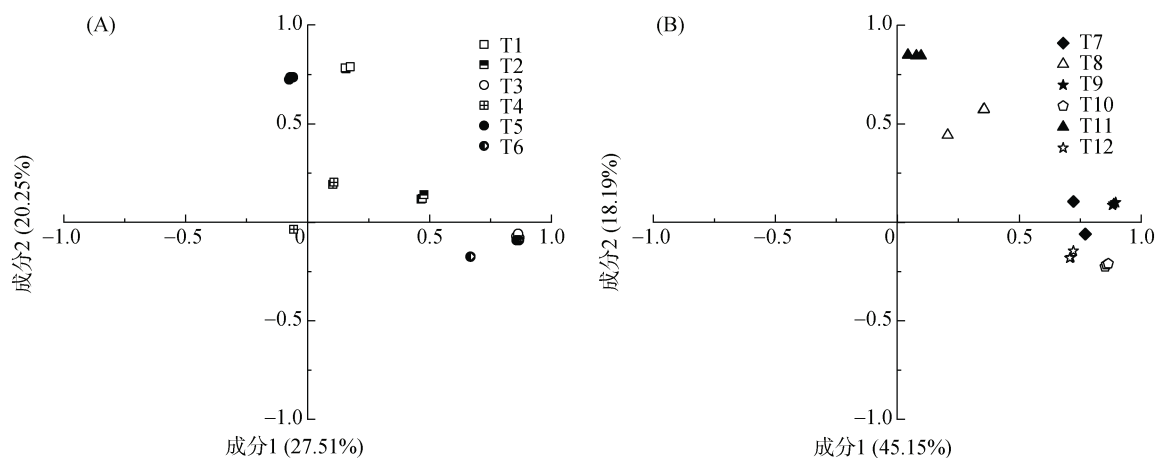
改良剂	试验点	土壤 Mn 含量(mg/kg)		枝条 Mn 含量(mg/kg)		叶片 Mn 含量(mg/kg)		果实 Mn 含量(mg/kg)	
		未施改良剂	施改良剂	未施改良剂	施改良剂	未施改良剂	施改良剂	未施改良剂	施改良剂
德州改良剂	文登后村	83.90 ± 2.30	44.20 ± 0.90**	193.25 ± 1.30	164.58 ± 1.16**	310.25 ± 2.67	287.58 ± 2.11*	6.90 ± 0.09	5.09 ± 0.07**
	栖霞十里堡	59.83 ± 0.38	35.73 ± 0.73**	264.00 ± 8.43	210.50 ± 1.56*	565.58 ± 3.54	532.00 ± 3.13**	7.05 ± 0.13	4.70 ± 0.27*
	招远大户陈家	50.60 ± 1.27	37.63 ± 0.16**	193.67 ± 0.82	162.92 ± 2.76*	353.58 ± 5.21	202.50 ± 2.61**	7.13 ± 0.17	4.53 ± 0.11**
烟台改良剂	栖霞郭家埠头	52.70 ± 0.60	46.43 ± 0.38*	219.50 ± 0.76	191.17 ± 1.31**	540.67 ± 2.73	452.92 ± 2.05**	8.33 ± 0.15	6.16 ± 0.29*
	栖霞官地	55.70 ± 0.96	42.53 ± 0.68**	295.83 ± 6.82	163.08 ± 8.61*	535.75 ± 7.38	215.42 ± 2.38**	6.72 ± 0.02	6.05 ± 0.06*
	栖霞任留	45.53 ± 0.38	42.57 ± 0.38*	195.08 ± 2.62	172.08 ± 6.27*	374.50 ± 3.84	333.17 ± 3.47**	7.83 ± 0.10	6.46 ± 0.22*
	招远大户陈家	50.60 ± 1.27	45.83 ± 0.87	193.67 ± 0.82	183.17 ± 1.61*	353.58 ± 5.21	254.17 ± 3.95**	7.13 ± 0.17	5.23 ± 0.06*
	莱州小草沟	47.93 ± 0.78	41.37 ± 0.99**	185.83 ± 1.66	184.42 ± 2.46	280.67 ± 1.26	259.42 ± 2.73*	6.93 ± 0.18	6.03 ± 0.07*
	莱州大沙岭	32.17 ± 1.47	31.83 ± 1.01	233.75 ± 9.21	173.50 ± 1.01*	442.42 ± 2.73	265.58 ± 4.15**	6.19 ± 0.11	4.60 ± 0.16**
	牟平官庄	47.47 ± 1.14	49.70 ± 1.11	202.17 ± 1.08	171.33 ± 2.57*	417.17 ± 17.00	256.92 ± 1.17*	6.86 ± 0.26	5.64 ± 0.15*

表 7 两种改良剂对土壤病原镰孢菌基因拷贝数的影响
Table 7 Effects of two amendments on copy numbers of soil pathogen *Fusarium*

改良剂	试验点	串珠镰孢菌基因拷贝数(10^6 copies/g)		腐皮镰孢菌基因拷贝数(10^9 copies/g)	
		未施改良剂	施改良剂	未施改良剂	施改良剂
德州改良剂	文登后村	35.52 ± 5.32	7.01 ± 1.79*	32.22 ± 1.99	5.23 ± 0.38**
	栖霞十里堡	31.34 ± 4.68	5.13 ± 0.43*	20.10 ± 1.62	3.16 ± 0.27**
	招远大户陈家	29.11 ± 3.45	4.63 ± 0.87*	22.83 ± 1.41	3.51 ± 0.20**
烟台改良剂	栖霞郭家埠头	66.76 ± 1.27	35.16 ± 2.72**	70.78 ± 2.63	30.54 ± 2.33*
	栖霞官地	58.51 ± 1.63	33.30 ± 2.74**	67.37 ± 1.90	43.61 ± 2.94*
	栖霞任留	29.44 ± 1.28	13.39 ± 2.15**	18.31 ± 1.24	10.04 ± 0.38*
	招远大户陈家	29.11 ± 3.45	24.19 ± 6.34	22.83 ± 1.41	16.42 ± 0.80
	莱州小草沟	12.30 ± 2.40	1.25 ± 0.48*	20.27 ± 0.87	4.31 ± 0.36**
	莱州大沙岭	5.57 ± 1.96	2.38 ± 0.59	5.01 ± 0.46	2.89 ± 0.35
	牟平官庄	24.38 ± 1.02	15.53 ± 1.01*	12.27 ± 1.01	4.77 ± 0.32*

表 8 两种改良剂处理下土壤真菌的 T-RFLP 分析
Table 8 T-RFLP analysis of soil fungi under two amendments

改良剂	试验点	丰富度指数		多样性指数		均匀度指数		优势度指数	
		未施改良剂	施改良剂	未施改良剂	施改良剂	未施改良剂	施改良剂	未施改良剂	施改良剂
德州改良剂	文登后村	5.04 ± 0.01	5.36 ± 0.06*	2.84 ± 0.00	2.92 ± 0.01*	0.90 ± 0.00	0.92 ± 0.00**	0.064 ± 0.001	0.057 ± 0.001*
	栖霞十里堡	2.89 ± 0.07	3.34 ± 0.19	1.69 ± 0.04	2.19 ± 0.05**	0.64 ± 0.02	0.80 ± 0.01**	0.336 ± 0.015	0.146 ± 0.007**
	招远大户陈家	3.73 ± 0.15	4.73 ± 0.12	2.20 ± 0.03	2.82 ± 0.02*	0.77 ± 0.01	0.91 ± 0.01**	0.164 ± 0.005	0.065 ± 0.001**
烟台改良剂	招远大户陈家	3.73 ± 0.15	4.47 ± 0.08*	2.20 ± 0.03	2.77 ± 0.02**	0.77 ± 0.01	0.93 ± 0.00**	0.167 ± 0.006	0.062 ± 0.002**
	莱州小草沟	3.35 ± 0.06	3.83 ± 0.20	2.34 ± 0.01	2.34 ± 0.05	0.86 ± 0.00	0.82 ± 0.00*	0.134 ± 0.005	0.124 ± 0.001
	栖霞郭家埠头	3.20 ± 0.01	4.34 ± 0.23*	2.49 ± 0.01	2.68 ± 0.05	0.91 ± 0.00	0.90 ± 0.01	0.083 ± 0.001	0.077 ± 0.003



(A. 德州改良剂处理; B. 烟台改良剂处理。T1 和 T2 分别为文登后村施改良剂和未施改良剂处理; T3 和 T4 分别为栖霞十里堡施改良剂和未施改良剂处理; T5 和 T6 分别为招远大户陈家施改良剂和未施改良剂处理; T7 和 T8 分别为招远大户陈家施改良剂和未施改良剂处理; T9 和 T10 分别为莱州小草沟施改良剂和未施改良剂处理; T11 和 T12 分别为栖霞郭家埠头施改良剂和未施改良剂处理)

图 1 两种改良剂处理不同土壤 T-RFLP 图谱的主成分分析

Fig. 1 Principal component analysis of T-RFLP maps of different soils under two amendments

3 讨论

土壤是植物生长的基础,良好的土壤环境可以促进植物生长。前人研究发现由于过量施用化肥以及有机肥和微量元素用量不足引起盐基离子淋失、土壤交

换性 H^+ 增多,同时酸雨和大量酸性气体的排放等原因导致土壤 pH 逐渐减小,土壤酸化现象越来越明显^[20]。大量研究表明,配施有机肥可以培肥土壤,调节土壤 pH^[21-22]。Xiao 等^[23]研究发现酸性土壤施用量生石灰后可显著提高土壤 pH,改善土壤养分,促

进植物生长。本研究发现改良剂的施用提高了土壤 pH, 这与前人的研究一致, 可能是改良剂中的生石灰、贝壳粉含有碳酸盐、硅酸盐以及 Ca 的氧化物等多种物质, 能有效中和土壤酸度。同时有研究表明, 土壤施用生石灰会导致土壤肥力的下降^[24], 然而本研究发现施用改良剂后土壤有机质含量明显提高, 一方面可能是改良剂的用量以及改良剂中的生石灰含量均较少, 未对土壤产生副作用; 另一方面可能是改良剂中含有大量有机物, 弥补了生石灰对土壤有机质的降低^[25]。

土壤平衡的养分供应也是保证植物生长的必要条件。由于不合理的农艺管理会造成土壤养分失衡, 使原来有利于作物生长的“肥沃土”变成不利于作物生长的“毒土”^[18], 如土壤中 Mn、Cu 等元素的有效性增加, 而 Ca、Mg 等元素严重不足^[7-9]。前人研究发现, pH 是影响土壤元素形态最为关键的环境因子之一, 土壤 pH 的变化会引起重金属吸附解吸、溶解沉淀平衡的变化, 因此调节 pH 在土壤重金属原位钝化修复过程中具有至关重要的作用^[26]。本研究发现改良剂的施用提高了土壤交换性 Ca 的含量, 降低了有效 Mn、有效 Cu 的含量, 这与李明等^[27]的研究一致。这可能是改良剂中的生石灰、贝壳粉中和土壤的 H^+ , 进而释放出大量的 Ca^{2+} , 同时随着土壤 pH 的提高, 土壤 Mn^{2+} 、 Cu^{2+} 与 OH^- 结合变成沉淀, 进而降低了土壤有效 Mn、有效 Cu 的含量; 也可能是改良剂施用提高了土壤有机物含量, 有机物表面的羧基、羟基等官能团可以与重金属结合, 从而降低土壤有效 Mn、有效 Cu 的含量^[28]。

土壤微生物的多样性和组成在调控土壤健康方面起到关键作用, 微生物多样性的提高有助于土壤生态系统的稳定^[29]。已有研究表明, 微生物的变化与土壤 pH 大小存在着一定联系, 即 pH 与土壤的部分细菌数量呈正相关, 与真菌数量呈负相关^[30]。同时当土壤中存在较高浓度的重金属时会对土壤微生物产生显著的效应, 改变微生物群落结构^[31]。Wang 等^[32]通过对环渤海湾地区老龄苹果园土壤分析发现镰孢属真菌是主要的致病菌。乔铤元等^[33]研究发现土壤酸化导致土壤中病原镰孢菌的数量增加。本研究发现, 施用改良剂后可显著降低土壤病原镰孢菌的数量, 增加真菌丰富度、多样性指数, 降低真菌优势度指数, 改变土壤真菌群落结构。这可能是因为改良剂中含有大量的生石灰, 生石灰一方面可以调节土壤 pH, 增加土壤中某些有益微生物的数量^[34]; 另一方面生石灰可以直接杀灭病原镰孢菌^[35], 进而改变微

生物群落结构。也可能是因为配方有机肥中的贝壳粉可以调节微生物群落结构。赵晓红等^[36]研究发现土壤施用贝壳粉, 显著提高了细菌的丰富度和多样性, 增加了细菌总 OTU 数量。

果实品质一直是人们比较关注的问题, 果农单方面追求高产大果, 导致化肥施用量远远超过苹果树的需要, 使土壤退化加剧, 植株缺素症发生, 如土壤中 Ca 元素流失造成苹果苦痘病发生, 同时土壤重金属超标, 对植株造成胁迫, 果实品质严重下滑^[37]。如何提高果实品质成为产业中亟待解决的问题。柴有忠等^[38]研究发现施用土壤改良剂可以缓解葡萄园土壤酸化, 提高果实品质。本研究发现, 施用土壤改良剂能有效降低苹果树体内 Mn 和 Cu 元素含量, 提高 Ca 元素含量。一方面可能是改良剂通过提高酸性土壤 pH 来降低土壤 Mn 和 Cu 的有效态含量, 同时生石灰、贝壳粉可以为土壤提供大量的 Ca, 进而导致苹果树体内 Mn 和 Cu 元素含量降低, Ca 元素含量增加^[27]; 另一方面可能是改良剂改善了土壤的整体环境, 促进了苹果树生长, 植株生长的稀释效应降低了苹果树体内 Mn 和 Cu 元素含量。同时本研究还发现, 改良剂的施用提高了苹果单果重、果形指数和可溶性固形物, 这可能与植株体内 Mn 和 Cu 元素含量降低, Ca 元素含量增加有关。郭爱华等^[39]研究发现, 重金属进入植物体后对细胞分裂会产生毒害作用。目前研究发现影响单果重和果形指数的主要原因是果实内的细胞个数^[40]。刘庆^[41]研究发现, 植物的糖含量及糖代谢酶活性在低浓度 Cu 胁迫下升高, 在高浓度 Cu 胁迫下降低。

4 结论

施用两种改良剂后可显著改善苹果果实品质, 降低苦痘病的发病率, 提高土壤 pH、有机质含量, 有效补充土壤中流失的 Ca 元素, 降低 Cu、Mn 的有效态含量, 降低病原镰孢菌的数量, 优化真菌群落结构, 有效缓解苹果园土壤酸化。

参考文献:

- [1] Duan L, Huang Y M, Hao J M, et al. Vegetation uptake of nitrogen and base cations in China and its role in soil acidification[J]. *Science of the Total Environment*, 2004, 330(1/2/3): 187-198.
- [2] Cytryn E, Levkovitch I, Negreanu Y, et al. Impact of short-term acidification on nitrification and nitrifying bacterial community dynamics in soilless cultivation media[J]. *Applied and Environmental Microbiology*, 2012, 78(18): 6576-6582.

- [3] Guo J H, Liu X J, Zhang Y, et al. Significant acidification in major Chinese croplands[J]. *Science*, 2010, 327(5968): 1008–1010.
- [4] Schroder J L, Zhang H L, Girma K, et al. Soil acidification from long-term use of nitrogen fertilizers on winter wheat[J]. *Soil Science Society of America Journal*, 2011, 75(3): 957–964.
- [5] 王见月, 刘庆花, 李俊良, 等. 胶东果园土壤酸度特征及酸化原因分析[J]. *中国农学通报*, 2010, 26(16): 164–169.
- [6] 李智卫, 王超, 陈伟, 等. 不同树龄苹果园土壤微生物生态特征研究[J]. *土壤通报*, 2011, 42(2): 302–306.
- [7] Lawrence G B, David M B, Shortle W C. A new mechanism for calcium loss in forest-floor soils[J]. *Nature*, 1995, 378(6553): 162–165.
- [8] Tom R. Soil pH and bitter pit in apples[J]. *Good Fruit Grower*, 1999, 5(1): 15–16.
- [9] 吕莹, 李佳, 叶恒朋, 等. 无机改良剂对酸性重金属污染土壤的修复效果[J]. *环境科学与技术*, 2018, 41(10): 1–12.
- [10] Ambrosini V G, Rosa D J, Corredor Prado J P, et al. Reduction of copper phytotoxicity by Liming: A study of the root anatomy of young vines (*Vitis labrusca* L.)[J]. *Plant Physiology and Biochemistry*, 2015, 96: 270–280.
- [11] 王桂华, 于树增, 陈浪波, 等. 施用生石灰改良苹果园酸化土壤试验[J]. *中国果树*, 2005(4): 11–12.
- [12] Xun W B, Zhao J, Xue C, et al. Significant alteration of soil bacterial communities and organic carbon decomposition by different long-term fertilization management conditions of extremely low-productivity arable soil in South China[J]. *Environmental Microbiology*, 2016, 18(6): 1907–1917.
- [13] 贾明, 陆建忠, 尹君. 菌渣直接还田对设施大棚内土壤理化性状影响初探[J]. *食用菌*, 2012, 34(3): 67, 71.
- [14] Álvarez E, Fernández-Sanjurjo M J, Seco N, et al. Use of mussel shells as a soil amendment: Effects on bulk and rhizosphere soil and pasture production[J]. *Pedosphere*, 2012, 22(2): 152–164.
- [15] 张盼, 杜立宇, 吴岩, 等. 天然和热活化蛭子壳粉对污染土壤中 Cd 赋存形态的影响[J]. *环境科学研究*, 2018, 31(5): 935–941.
- [16] 潘丽萍, 谭骏, 刘斌, 等. 不同粒径贝壳粉对水稻吸收镉与硒的影响[J]. *农业环境科学学报*, 2021, 40(10): 2134–2140.
- [17] 鲍士旦. 土壤农化分析[M]. 3 版. 北京: 中国农业出版社, 2000.
- [18] 段亚楠, 刘恩太, 陈学森, 等. 冻融对老龄苹果园土壤微生物数量及酶活性的影响[J]. *土壤*, 2021, 53(1): 125–132.
- [19] 王晓芳, 徐少卓, 王玫, 等. 万寿菊生物熏蒸对连作苹果幼苗和土壤微生物的影响[J]. *土壤学报*, 2018, 55(1): 213–224.
- [20] 刘来, 孙锦, 郭世荣, 等. 大棚辣椒连作土壤养分和离子变化与酸化的关系[J]. *中国农学通报*, 2013, 29(16): 100–105.
- [21] 张云伟, 徐智, 汤利, 等. 不同有机肥对烤烟根际土壤微生物的影响[J]. *应用生态学报*, 2013, 24(9): 2551–2556.
- [22] 温延臣. 不同施肥制度潮土养分库容特征及环境效应[D]. 北京: 中国农业科学院, 2016.
- [23] Xiao H, Wang B, Lu S B, et al. Soil acidification reduces the effects of short-term nutrient enrichment on plant and soil biota and their interactions in grasslands[J]. *Global Change Biology*, 2020, 26(8): 4626–4637.
- [24] 张昊青, 赵学强, 张玲玉, 等. 石灰和双氰胺对红壤酸化和硝化作用的影响及其机制[J]. *土壤学报*, 2021, 58(1): 169–179.
- [25] 李玉辉, 李源环, 邓小华, 等. 石灰和绿肥对不同种植制度植烟酸性土壤改良效果[J]. *水土保持学报*, 2018, 32(6): 365–370.
- [26] 常春英, 曹浩轩, 陶亮, 等. 固化/稳定化修复后土壤重金属稳定性及再活化研究进展[J]. *土壤*, 2021, 53(4): 682–691.
- [27] 李明, 陈宏坪, 王子莹, 等. 石灰钝化法原位修复酸性镉污染菜地土壤[J]. *环境工程学报*, 2018, 12(10): 2864–2873.
- [28] Li F, Li Z A, Mao P, et al. Heavy metal availability, bioaccessibility, and leachability in contaminated soil: Effects of pig manure and earthworms[J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2019, 26(20): 20030–20039.
- [29] van der Heijden M G A, Wagg C. Soil microbial diversity and agro-ecosystem functioning[J]. *Plant and Soil*, 2013, 363(1): 1–5.
- [30] 王海斌, 叶江华, 陈晓婷, 等. 连作茶树根际土壤酸度对土壤微生物的影响[J]. *应用与环境生物学报*, 2016, 22(3): 480–485.
- [31] 俸文玲, 林芷响, 李雅莹, 等. 细菌-矿物互作及其复合体在重金属修复中的应用[J]. *土壤学报*, 2021, 58(4): 851–861.
- [32] Wang G S, Yin C M, Pan F B, et al. Analysis of the fungal community in apple replanted soil around Bohai Gulf[J]. *Horticultural Plant Journal*, 2018, 4(5): 175–181.
- [33] 乔鈇元, 盛月凡, 王海燕, 等. 生石灰与过磷酸钙混施对连作土壤的改良效果及平邑甜茶幼苗生长的影响[J]. *中国果树*, 2020(3): 16–22.
- [34] 张义杰, 徐杰, 陆仁窗, 等. 生石灰对林下酸化土壤的调控作用及三七生长的影响[J]. *应用生态学报*, 2022, 33(4): 972–980.
- [35] 邱婷, 张屹, 肖姬玲, 等. 土壤施加氧化钙对西瓜枯萎病的影响及其机理初探[J]. *植物保护*, 2017, 43(6): 11–16, 67.
- [36] 赵晓红, 柴姗姗, 张曼曼, 等. 施用贝壳粉对酸化土壤微生物多样性及平邑甜茶幼苗生长的影响[J]. *林业科学*, 2020, 56(9): 153–163.
- [37] Wang F, Xu X X, Jia Z H, et al. Nitrification inhibitor 3, 4-dimethylpyrazole phosphate application during the later stage of apple fruit expansion regulates soil mineral nitrogen and tree carbon-nitrogen nutrition, and improves fruit quality[J]. *Frontiers in Plant Science*, 2020, 11: 764.
- [38] 柴有忠, 张圆圆, 马军伟, 等. 不同酸性改良剂对葡萄园土壤及葡萄品质的影响[J]. *中国土壤与肥料*, 2021(2): 102–107.
- [39] 郭爱华, 辛高伟, 任静宇. 重金属铅、镍对苦苣根尖细胞分裂的影响[J]. *天津农业科学*, 2015, 21(12): 21–23, 28.
- [40] 李秀菊, 曹庆芹, 束怀瑞. 果形剂处理对苹果幼果生长及细胞分裂素含量影响[J]. *北方园艺*, 1999(3): 25–27.
- [41] 刘庆. 3 种潮间带大型海藻对重金属铜胁迫的生理生化响应[D]. 烟台: 烟台大学, 2019.