

崔佳萌,刘 蕾,李博文,等. 功能微生物菌剂防控设施菜田土壤磷素面源污染的效果[J]. 江苏农业科学,2021,49(23):232-238.

doi:10.15889/j.issn.1002-1302.2021.23.040

功能微生物菌剂防控设施菜田土壤 磷素面源污染的效果

崔佳萌^{1,2}, 刘 蕾^{1,4}, 李博文², 张国印^{1,4}, 赵欧亚^{1,4}, 郜 静^{1,4}, 李 玘^{1,4}, 刘 辉³, 马丽敏^{1,4}, 王 凌^{1,2,4}

(1. 河北省农林科学院农业资源环境研究所, 河北石家庄 050051; 2. 河北农业大学, 河北保定 071001;

3. 河北润沃生物技术有限公司, 河北廊坊 065000; 4. 河北省肥料技术创新中心, 河北石家庄 050051)

摘要:针对设施菜田累积磷含量过高易产生的农业面源污染问题,通过田间试验,探究在减量施肥的背景下,增施功能微生物制剂在降低磷素淋溶风险、提升磷肥利用效率、防控农业面源污染、增加作物产量等方面的潜能。试验设置常规施肥量(T1)、单纯减量 25% 施肥(T2)、减量 25% 施肥并施入功能微生物菌剂(T3)、不施磷(CK)4 个处理。结果表明,T3 土壤重单季磷素盈余量、耕层速效磷含量、耕层氯化钙磷含量较 T1 分别显著降低了 38.24%、15.59%、35.22%;并且处理 T3 提高了作物地上部总磷吸收量,较 T1、T2 处理分别增长了 8.81% 和 20.69%;在提高了肥料利用效率方面,与 T1、T2 处理相比,T3 的肥料偏生产力、农学效率和肥料贡献率分别显著提升了 40.13% 和 6.43%、98.41% 和 67.02%、41.83% 和 57.12%;此外,T3 还可提高番茄产量和增加单位面积土地产值,较处理 T1、T2 分别增产 5.22%、6.43%,产值分别增加 18 467.17、20 923.70 元/hm²。与常规施肥和单纯减量 25% 施肥相比,减量 25% 施磷并增施功能菌剂不仅可以有效降低土壤累积磷含量和淋溶风险,防控农业面源污染,节约肥料投入,显著提升磷肥利用率,而且能促进作物增产,增加农民收入,是推动农业绿色高质量、可持续发展的尚佳选择。

关键词:功能微生物菌剂;土壤累积磷;磷肥利用率;农业面源污染防控;设施菜田

中图分类号: S182;X592 **文献标志码:** A **文章编号:** 1002-1302(2021)23-0232-06

近年来,我国设施蔬菜产业高速发展,截至 2017 年我国设施蔬菜种植面积约为 350 万 hm²,并以每年 10% 的速度增长,设施蔬菜产值突破 7 000 亿元^[1-2];设施蔬菜产量为 2.52 亿 t,占蔬菜总产量的 30.5%。磷是蔬菜生长必需的大量元素之一,为保证经济效益,过量施肥特别是有机的现象普遍存在。张怀志等调查河北、天津 7 个典型县域的 156 个农户设施蔬菜的施肥情况,发现磷肥平均投入量超过了推荐量的 10.4 倍^[3]。李茹等对陕西省 6 个代表县主要设施蔬菜的施肥情况调查发现,磷素过量投入了 65.2%;投入的这些肥料只有小部分被当季作物吸收,当投入的肥料超过了作物

吸收利用限度时,就会以淋溶形式损失^[4]。严正娟分析汇总数据得出,我国 87% 的设施菜田超过了环境阈值(磷含量 80 mg/kg),51% 露地菜田 0~20 cm 土层处于淋溶风险之中^[5]。这些淋溶出的磷素一部分会通过地表径流进入地表水环境,加剧了水的富营养化,破坏水体生态系统^[6-8];另一部分随着种植年限增长逐年向地下迁移,威胁地下水质量^[9]。更重要的是,过量施肥对作物不仅没有显著增产作用^[10-11],还导致了土壤酸化、次生盐渍化、养分失衡、氮磷等元素过量积累等土壤快速退化现象的普遍产生,破坏土壤健康,影响作物品质,降低经济效益,威胁生态环境,制约着设施产业的可持续发展^[12]。此外,磷是不可再生资源,而作为肥料的磷肥开采自磷酸岩,若按目前开采速度持续下去,全球磷酸岩储量将在 50~100 年内耗尽^[13]。为了缓解、降低这些问题带来的不良影响,首先须要控制磷肥投入量,同时提高作物对磷素的利用效率,进而从根本上降低磷素在土壤中的累积水平,从源头上防控农业面源污染的产生,实现蔬菜产业的可持续发展,已成为当前绿色农业发展的重要课题。

当前农业面源污染加剧,而功能微生物菌剂可

收稿日期:2021-04-07

基金项目:国家重点研发计划(编号:2016YFD0801005);河北省重点研发计划(编号:18223613D);河北省自然科学基金(编号:C2020301007);河北省农林科学院创新工程(编号:2019-1-4-3)。

作者简介:崔佳萌(1998—),女,河北邢台人,硕士研究生,主要从事农业环境相关研究。E-mail:1947676240@qq.com。

通信作者:马丽敏,高级经济师,主要从事农业经济研究,E-mail:497681823@qq.com;王凌,博士,副研究员,主要从事农业环境和土壤微生物生态学相关研究,E-mail:nkywangling@163.com。

守护农业健康,给绿色农业的高质量发展带来了希望,是产出优质、高效、安全、绿色农产品的必然选择。在提升磷素有效性方面,土壤溶磷微生物由于能够利用其代谢产物或通过与其他生物的协同作用,将土壤中难以利用的难溶性磷转化为植物生长可直接利用的形态,进而提高养分有效性,降低土壤累积磷含量而备受关注^[14]。1958 年,俄罗斯首次将具有解磷能力的芽孢杆菌应用于农业生产,使得大田产量增产了 10%~70%,自在农业中的试验获得成功后,研究进一步深入,科学工作者发现溶磷微生物除了能将土壤中难溶性的矿化态磷转化成可溶性的磷酸根离子,改善土壤结构,促进植物对磷的吸收利用外,还可以分泌生长素等植物激素促进作物生长,某些溶磷菌还具有固氮、分泌抗生素等功能,研制环境友好的功能微生物菌肥提升土壤磷素利用效率,减少肥料总投入量,必将对减少土壤磷素累积、防控农业面源污染、提升土壤质量等方面具有积极意义,具有一定的应用价值和前景^[15-18]。近年来关于微生物制剂对设施蔬菜产量及设施土壤质量的影响

研究较多^[19-21],但鲜见关于减少土壤磷素累积和淋溶及防控农业面源污染影响的研究报道。因此,为了综合评估微生物制剂的应用价值,本研究以北方设施番茄菜田为例,探讨在不同施肥控制条件下,功能微生物制剂配合磷肥减量投入对菜田土壤磷素面源污染防控、番茄吸磷量、磷肥利用效率和产量产值的影响,对比分析功能微生物菌剂对设施番茄产生的环境和社会经济效益影响,以期对设施农业的绿色高质量、可持续发展提供科技支撑。

1 材料与方法

1.1 试验区概况

试验地在河北省衡水市饶阳县国家农业科技园区(设施蔬菜种植面积 22 667 hm²)的大尹村镇南北岩村。该基地属冀中平原黑龙港流域,土壤类型为石灰性沙质潮土,年均温度 12.2℃,年降水量 552.6 mm。种植时间 2018 年 9 月至 2019 年 1 月,种植类型为番茄单季,日光温室大棚棚龄 25 年。土壤基本理化性质见表 1。

表 1 供试温室 0~1 m 土层土壤基本理化性质

土壤层次 (cm)	容重 (g/cm ³)	有机质含量 (g/kg)	速效磷含量 (mg/kg)	氯化钙磷含量 (mg/kg)	全磷含量 (g/kg)	速效钾含量 (mg/kg)	硝态氮含量 (mg/kg)	pH 值
0~20	1.30	19.84	225.92	9.39	2.50	278.00	41.63	7.54
20~40	1.29	7.94	66.16	3.57	0.90	139.20	10.03	8.32
40~60	1.34	8.86	42.92	1.60	0.70	126.80	13.42	8.40
60~80	1.38	8.44	32.52	0.54	0.70	93.00	14.57	8.43
80~100	1.25	10.28	20.64	0.23	0.70	109.80	18.85	8.35

1.2 试验材料与设置

试验所用底肥有机肥为牛粪,干基 N、P₂O₅、K₂O 含量分别为 2.22%、1.64%、0.83%,底肥一次性施入;化肥为尿素(N 含量 46%)、过磷酸钙(P₂O₅ 含量 12%)、硫酸钾(K₂SO₄ 含量 50%),分底肥和追肥分别施入;功能微生物菌剂为笔者所在项目组与河北润沃生物技术有限公司共同研发的自有胶质芽孢杆菌 T7,并对该菌株进行了全基因组测序(de novo sequencing),采用 Illumina 测序平台,结果显示:基因组大小为 8.66 bp,含质粒,鸟嘌呤和胞嘧啶含量(G+C,%)为 58.51%,该基因总长度 7.43 bp,并且已找到其全基因组水平上启动子(TTAGAACAAT TTTTTTAAAAAATAGTGTATAAATTGTTAATTGATATT GTATAATTATTCATGTGAGAAATCATTACATTAGTCA ATAGAAGGTTGTAAGACCTTAATCTAGGCTCTTGT)。

试验共设置常规施肥量(T1)、减量 25% 施肥(T2)、减量 25% 施肥并增施功能微生物菌剂(T3)、

不施磷(CK)4 个处理(表 2)。功能微生物菌剂在花期、坐果期和盛果期分别施入,每次施入量 75 L/hm²。每个处理重复 3 次,采用完全随机排列,小区面积为 21.25 m²。采用的番茄品种为燕赵明珠。田间管理同常规,灌水方式采用畦灌,用土壤时域反射仪(time domain reflectometry,简称 TDR)进行土壤水分的监测,保持田间持水量 70%,全生育期总灌溉量为 3 375 m³/hm²。作物生长周期为 160 d。

表 2 各处理施肥用量

处理	底肥(含有有机肥和化肥)(kg/hm ²)			追肥(仅化肥)(kg/hm ²)			菌剂施用量 [L/(hm ² ·次)]
	P ₂ O ₅	N	K ₂ O	P ₂ O ₅	N	K ₂ O	
T1	300.0	363.0	211.5	91.5	70.5	190.5	
T2	225.0	273.0	159.0	69.0	54.0	142.5	
T3	225.0	273.0	159.0	69.0	54.0	142.5	75
CK	0	261.0	385.5	0	54.0	142.5	

1.3 测定指标与方法

1.3.1 土壤样品采集与测定 分别于试验前及番茄采收后采集土样,用作土壤化学性质的测定。每小区采用“S”形采样法,用土钻(内径为 5 cm)采集土壤深度为 0 ~ 20、20 ~ 40、40 ~ 60、60 ~ 80、80 ~ 100 cm 的土壤样品,每个土层选取有代表性的样点 5 个,均匀混合为 1 个样品,留出部分鲜样用作测定硝态氮含量,余下土壤在室内条件下风干,剔除石块和树枝等杂物后磨碎,过 2 mm 筛,室内风干,装瓶保存,放于 15 ℃ 冰箱待测。土壤速效磷(Olsen - P)是判断土体磷素残留量的重要指标,用 0.5 mol/L NaHCO_3 (pH 值 8.5)溶液浸提(水土比 20 mL : 1 g)钼锑抗比色法(Olsen 法)测定^[22];土壤氯化钙磷($\text{CaCl}_2 - \text{P}$)是判断磷素向下垂直移动的重要指标,用 0.01 mol/L CaCl_2 溶液浸提(水土比 5 mL : 1 g)钼锑抗比色法测定^[23]。土壤容重采用环刀法测定,有机质含量采用重铬酸钾 - 外加热氧化、硫酸亚铁溶液滴定法测定,土壤全磷含量用 $\text{H}_2\text{SO}_4 - \text{HClO}_4$ 消煮钼锑抗比色法测定,速效钾含量用 1 mol/L 乙酸铵提取 - 火焰光度法测定,硝态氮含量用 KCl 浸提(水土比 1 mL : 10 g)连续流动分析仪测定,pH 值(水土比 1 mL : 5 g)采用玻璃电极法测定^[24]。

1.3.2 植物样品采集与测定 在番茄收获期,每小区采集 5 株代表性植株,将植株的叶、茎、根、果实分开,然后用去离子水冲洗,将植株鲜样放在烘箱中 105 ℃ 杀青 30 min,80 ℃ 烘干 72 h,称质量,记录干质量。干样粉碎过筛后,采取 $\text{H}_2\text{SO}_4 - \text{H}_2\text{O}_2$ 消煮后用流动注射分析仪测定植物全磷含量^[24]。番茄产量用电子秤记录各小区整个生长周期的果实产量,核算单位面积产量。

1.4 计算方法

磷素表观盈亏量(kg/hm^2) = 施磷量 - 番茄磷素吸收量^[25]。

肥料利用效率各参数来源于 Cassman 等的方法^[26-28],相关指标及计算公式如下:

磷肥偏生产力(简称 PFPP, kg/kg)指投入的磷肥所能生产的单位作物产量,反映当地土壤基础养分水平和磷肥施用量的综合效应,对施肥的宏观决策有一定指导意义。计算公式为 $\text{PFPP} = Y/F$ 。式中, Y 为施磷后所获得的作物产量; F 代表施磷肥量。

磷肥农学效率(简称 AEP, kg/kg)指单位施磷量所增加的作物产量,是评价氮肥增产效应较为准确的指标,也是农业生产中最关心的经济指标之一。

公式为 $\text{AEP} = (Y - Y_0)/F$ 。式中, Y 为施磷后所获得的作物产量; Y_0 为不施磷条件下作物的产量。

磷肥表观利用率(简称 REP, %)是单位投入的肥料磷所获得的作物磷积累量的增加量,能很好地反映作物对化肥养分的吸收状况。公式为 $\text{REP} = (U - U_0)/F \times 100\%$ 。式中, U 为施磷后作物收获时地上部的吸磷总量; U_0 为未施磷时作物收获期地上部的吸磷总量。

磷肥生理利用率(简称 PEP, kg/kg)作物地上部每吸收单位肥料中的磷所获得的作物产量的增加量,反应了植物体内磷素的利用效率。公式为 $\text{PEP} = (Y - Y_0)/(U - U_0)$ 。

磷肥贡献率(简称 FCR),公式为 $\text{FCR} = (\text{施肥区产量} - \text{不施肥区产量})/\text{施肥区产量} \times 100\%$ 。

1.5 数据处理

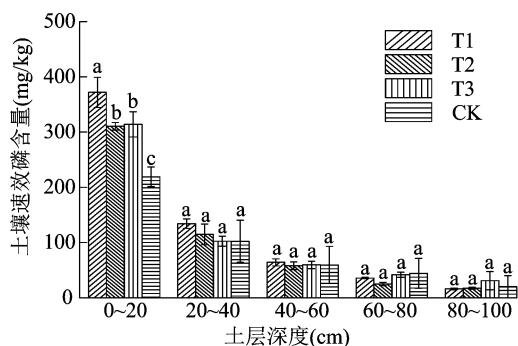
采用 SPSS 26.0 软件进行数据统计分析,LSD 法比较处理间的差异显著性,Origin 9.0 软件作图。

2 结果与分析

2.1 减量施肥和功能微生物菌剂对土壤有效磷含量的影响

2.1.1 减量施肥和功能微生物菌剂对土壤速效磷含量的影响 由图 1 可知,减量施肥处理(T2、T3) 0 ~ 60 cm 土壤中 Olsen - P 含量低于常规施肥(T1)处理。在 0 ~ 20 cm 土层,各处理的速效磷含量由大到小依次为 T1(371.83 mg/kg) > T3(313.87 mg/kg) > T2(310.42 mg/kg) > CK(219.10 mg/kg);其中,处理 T2、T3 较 T1 分别减少 16.52%、15.59%,且差异显著;在 20 ~ 100 cm 土层,处理间速效磷含量差异不显著。各处理速效磷累积总量依次为 T1(621.83 mg/kg) > T3(548.43 mg/kg) > T2(525.22 mg/kg) > CK(445.03 mg/kg),与处理 T1 相比,处理 T2、T3 在 0 ~ 100 cm 土层速效磷累积总量降幅分别达 15.54% 和 11.80%。

2.1.2 减量施肥和功能微生物菌剂对土壤氯化钙磷含量的影响 由图 2 可知,总体上随着肥料减量的增加,土壤 $\text{CaCl}_2 - \text{P}$ 含量呈现下降趋势,特别是在耕层(0 ~ 20 cm)土壤中。在 0 ~ 20 cm 土层,各处理氯化钙磷含量由大到小依次为 T1(19.65 mg/kg) > T2(15.04 mg/kg) > T3(12.73 mg/kg) > CK(8.29 mg/kg),除不施肥的 CK 处理以外,在减量 25% 施肥的基础上增施功能微生物菌剂(T3)较常规施肥(T1)下降最为明显, $\text{CaCl}_2 - \text{P}$ 含量下降



柱上不同小写字母表示同一深度不同处理间差异显著($P<0.05$)

图1 不同处理下 0~100 cm 土层土壤速效磷含量差异

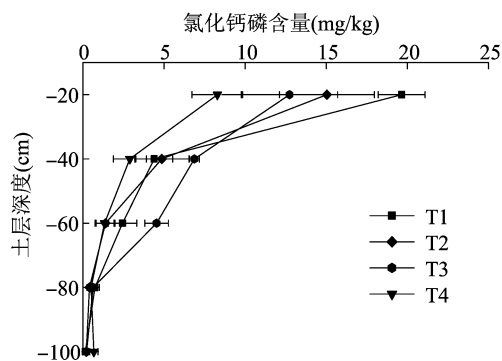


图2 土壤氯化钙磷含量差异

35.22%。在 60 cm 以下土层,处理间氯化钙磷含量没有明显差异。在 0~100 cm 土层中,各处理氯化钙磷累积总量由大到小依次为 T1 (27.38 mg/kg) > T3 (24.99 mg/kg) > T2 (21.91 mg/kg) > CK (13.69 mg/kg), T2、T3 处理的氯化钙磷总量分别比 T1 减少 19.98%、8.73%。

2.2 功能微生物菌剂对设施番茄磷素吸收量的影响

如表 3 所示,与 CK 相比, T3 番茄果实和叶片部位对磷素的吸收显著增加,并且各处理组与 CK 间地上部吸收总量均有显著差异。在减量 25% 施肥的基础上增施功能微生物菌剂(处理 T3)的磷素地上部吸收总量高于常规施肥(处理 T1)和单纯减量 25% 施肥(处理 T2),涨幅分别为 8.81% 和 20.69%。在番茄叶片中,磷素吸收量最高的为 T3 (17.35 kg/hm²),较处理 T1 与 T2 分别增加了 11.43% 和 13.03%;在番茄果实中,磷素吸收量最高的同样是 T3 (13.54 kg/hm²),分别较处理 T1、T2 增加了 21.65% 和 38.30%。在各处理间,番茄茎和根部中的磷素吸收量差异不显著。

2.3 功能微生物菌剂对磷素盈亏量的影响

由表 4 可以看出,除 CK 土壤磷素表观平衡量处于亏缺状态外, T1、T2、T3 处理均呈现盈余状态,

表 3 不同施肥处理下番茄各部位及地上部对磷素的吸收量

处理	磷素吸收量 (kg/hm ²)				
	叶片	茎	根	果实	地上部总量
T1	15.57ab	3.69a	0.70a	11.13ab	31.09ab
T2	15.35ab	2.36a	0.53a	9.79ab	28.03b
T3	17.35a	2.42a	0.52a	13.54a	33.83a
CK	9.90b	2.61a	0.72a	6.86b	20.09c

注:同列不同小写字母表示处理间差异显著 ($P<0.05$)。表 4、表 5 同。

然而,随着肥料施用量的减少,磷素盈余量随之降低;并且由于增施功能微生物菌剂(处理 T3)增加了作物地上部对磷素的吸收,因而,处理 T3 的土壤中单季磷素盈余量最小,与常规施肥处理 T1 相比,盈余量显著减少了 100.24 mg/kg;比处理 T2 磷素盈余量减少了 8.80 mg/kg。

表 4 不同施肥处理下磷素平衡差异

处理	投入量 (kg/hm ²)	地上部吸磷总量 (kg/hm ²)	磷素盈余量 (kg/hm ²)
T1	391.5	31.90ab	360.41a
T2	294.0	26.03b	268.97b
T3	294.0	33.83a	260.17b
CK	0	20.09c	-20.09c

2.4 功能微生物菌剂对设施番茄磷肥利用效率的影响

由表 5 可知,在减量 25% 施肥的基础上增施功能微生物菌剂(T3)可显著提升设施番茄磷肥利用效率,各项表征指标均高于常规施肥(T1)和单纯减量 25% 施肥(T2),且差异显著(表观利用率除外)。磷肥偏生产力最高的是处理 T3 (415.2 kg/kg),与处理 T1、T2 相比分别提高了 40.13% 和 6.43%;农学效率最高的是处理 T3 (62.3 kg/kg),比处理 T1、T2 分别提高了 98.41% 和 67.02%;表观利用率最高的是处理 T3 (16.62%),较 T1、T2 分别提高了 232.40% 和 134.75%;生理利用率最高的是处理 T3 (7.39%),比处理 T1、T2 分别提高了 135.35% 和 98.12%;磷肥贡献率最高的是处理 T3 (15.02%),比处理 T1、T2 分别提高了 41.83% 和 57.12%。

表 5 不同施肥处理下磷肥利用效率各指标差异

处理	偏生产力 (kg/kg)	农学效率 (kg/kg)	表观利用率 (%)	生理利用率 (%)	磷肥贡献率 (%)
T1	296.3c	31.4b	5.00b	3.14b	10.59b
T2	390.1b	37.3b	7.08ab	3.73b	9.56b
T3	415.2a	62.3a	16.62a	7.39a	15.02a

2.5 功能微生物菌剂对设施番茄产量及产值的影响

由图 3 可知,在减量 25% 施肥的基础上增施功能微生物菌剂(处理 T3)的番茄产量与常规施肥(处理 T1)和单纯减量 25% 施肥(处理 T2)相比,分别增产 5.22% 和 6.43%,差异不显著。各处理之间产量由高到低顺序依次为 T3 (122.06 t/hm^2) > T1 (116.01 t/hm^2) > T2 (114.69 t/hm^2) > CK (103.72 t/hm^2)。虽然处理组间产量差异不显著,但按照番茄 3 000 元/t,并且节约的肥料成本 1 500 元/ hm^2 ,微生物制剂 1 200 元/ hm^2 来计算,处理 T3 较处理 T1、T2 的单位土地面积产值分别增加了 18 467.17 元/ hm^2 和 20 923.70 元/ hm^2 。

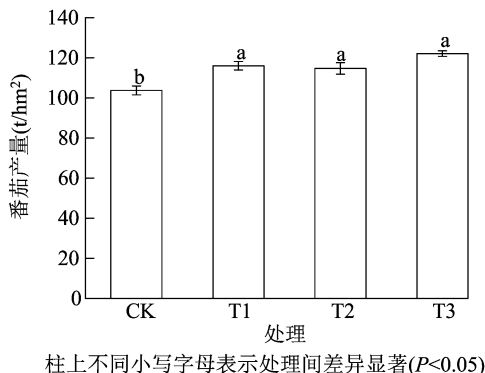


图3 不同施肥处理下番茄产量差异

3 结论与讨论

3.1 结论

减量施肥并增施功能微生物菌剂的管理措施有效防控农业面源污染,产生了积极的环境效益:减量 25% 施肥并增施功能微生物菌剂(处理 T3)有效降低了土壤耕层 Olsen-P 含量,处理 T3 较常规施肥(处理 T1)降低了 15.59%;明显降低了耕层氯化钙磷含量,与常规施肥(处理 T1)和单纯减量 25% 施肥(处理 T2)相比,分别降低了 35.22% 和 18.22%;并且较常规施肥(处理 T1)土壤中单季磷素盈余量显著降低;说明在减量施肥的基础上增施功能微生物菌剂,可有效缓解磷素向深层的迁移,降低淋溶风险;并同时提高了番茄磷素总的吸收量,处理 T3 较处理 T1 和处理 T2 分别增长了 8.81% 和 20.69%,提升了磷素的吸收利用率。

减量施肥并增施功能微生物菌剂的管理措施可显著提高磷肥利用效率,节约肥料资源和用肥成本:处理 T3 与处理 T1、T2 相比,磷肥偏生产力提升了 40.13% 和 6.43%,农学效率提高了 98.41% 和 67.02%,表观利用率提高了 232.4% 和 134.75%,

生理利用率提高了 135.35% 和 98.12%,磷肥贡献率提高了 41.83% 和 57.12%。

此外,减量施肥并增施功能微生物菌剂(处理 T3)可提高番茄产量和单位土地面积产值,较 T1、T2 增产 5.22% 和 6.43%,产值增加 18 467.17 元/ hm^2 、20 923.70 元/ hm^2 ,增加了农民收入,推动农业产业提质增效,促进农业绿色高质量、可持续发展。

3.2 讨论

磷素是造成水体富营养化的限制性因子,因水体对磷素输入的敏感性强,农田磷素向水体的淋出迁移引起的水污染问题日益突出^[29]。本试验研究结果显示,在基础土壤速效磷含量较高(0~20 cm 土层为 225 mg/kg)的背景下,减量施肥基础上增施微生物制剂的管理措施可显著降低土壤表层磷素累积,进而降低淋溶风险。由于微生物提高了土壤养分库中磷素的生物有效性,然而与单纯的减量施肥相比,土壤速效磷含量并未产生显著变化,该结果与吴旭等的研究结果^[30]一致,推测可能是由于土壤本底养分本身已偏高,且 0~20 cm 土层 pH 值已较深层土壤降低,微生物菌剂活性收到抑制所致,有待进一步研究。此外,据刘蕾等的研究结果,华北地区石灰性土壤的速效磷磷肥投入的控制阈值为 260 mg/kg,当土壤中速效磷含量超过这个临界点时,氯化钙磷含量就开始迅速增加,氯化钙磷含量是土壤磷素淋溶的重要指标之一,即土壤磷素的淋溶风险将大大增加^[31]。本试验中,尽管与常规施肥(处理 T1)相比显著降低了表层速效磷含量,但减量 25% 施肥后的处理 T2、T3 的表层土壤中速效磷含量仍高于 260 mg/kg 的临界值,因此有待观察长棚龄、高养分设施菜田随着持续年份减量施肥措施的进行,土壤中累积磷素的变化。

土壤磷素表观平衡反映了当季种植后土壤磷素的盈余或亏缺状态,因磷肥施入土壤后挥发和损失基本可忽略不计,非沙质土壤或灌水量有限的土体中淋失量也相对较少,所以土壤磷素在长时间里的盈余或亏缺就决定了土壤磷素的消长趋势^[32]。若土壤中的磷素长期处于盈余状态,就会增加土壤磷素向水体迁移的风险,进而威胁环境^[33]。河北省 11 年菜地的试验结果表明,每 100 kg/ hm^2 的磷素盈余将导致土壤有效磷含量上升 1.13 mg/kg^[34]。本试验结果表明,减量施肥基础上增施微生物制剂(处理 T3)较常规施肥(处理 T1)总磷素盈余量显著下降,可有效降低土壤磷素盈余量,本试验提出的防控

设施菜田农业面源污染的农田管理措施行之有效。

解决当前菜田磷素盈余问题的关键是降低农田磷素输入对环境的影响的同时,提高土壤磷库有效利用率^[29-30,35-36]。本试验结果表明,减量施肥并增施功能微生物菌剂的管理措施可显著提高磷肥利用效率,提高作物的产量和农民收入。减量施肥并增施微生物制剂,不同程度地提高了番茄的产量和果实品质,增产范围 4 755 ~ 12 949.5 kg/hm²,提高经济效益 4 569 ~ 13 879.5 元/hm² 等^[37-39]。本试验研究结果与此前报道趋势相同,而经济效益更为显著。

此外,随着土壤质地、土体构型以及土壤肥力水平和土壤健康程度的不同,番茄的最佳施磷量和微生物制剂的最佳用量并不统一,本试验推荐在该类型土壤肥力水平下,采用比常规施磷量减施 25% 并增施功能微生物菌剂的管理方式,与不同土壤质地和土体构型的磷素减量供应推荐减施 30% 和 60% 不同^[39-40],要想实现生态效益、社会效益和经济效益各方面的最大化还需综合考虑各种因素,需要进一步分类详细探究。

综上所述,减量施肥并增施功能微生物菌剂的管理措施不仅可以有效降低华北地区石灰性菜田土壤中磷素的累积,减少磷素淋失风险,有效防控农业面源污染的发生,提高肥料利用效率,还可以促进农民增收,具有良好的生态环境效益和社会效益,对保护农田生态环境安全,推动设施蔬菜产业绿色安全、高质量发展具有重要且积极的意义。

参考文献:

- [1] 中华人民共和国农业农村部主管,中国农业年鉴编辑委员会. 中国农业年鉴 2019[M]. 北京:中国农业出版社,2019:221-246.
- [2] 张真和,马兆红. 我国设施蔬菜产业概况与“十三五”发展重点——中国蔬菜协会副会长张真和访谈录[J]. 中国蔬菜,2017(5):1-5.
- [3] 张怀志,唐继伟,袁硕,等. 津冀设施蔬菜施肥调查分析[J]. 中国土壤与肥料,2018(2):54-60.
- [4] 李茹,胡凡,李水利,等. 陕西省设施蔬菜施肥现状评价[J]. 现代农业科技,2018(16):53-55,59.
- [5] 严正娟. 施用粪肥对设施菜田土壤磷素形态与移动性的影响[D]. 北京:中国农业大学,2015.
- [6] 颜芳,王胜涛,刘彬等. 设施菜田土壤磷素累积特征与风险调控方法[J]. 中国农学通报,2019,35(33):111-115.
- [7] 徐强,胡克林,李季,等. 华北平原不同生产模式设施蔬菜生命周期环境影响评价[J]. 环境科学,2018,39(5):2480-2488.
- [8] 费超,张士荣,梁斌,等. 不同种植年限设施菜地土壤微生物量磷变化特征及相关性分析[J]. 华北农学报,2018,33(1):195-202.
- [9] 石宁,李彦,井永革,等. 长期施肥对设施菜田土壤氮、磷时空变化及流失风险的影响[J]. 农业环境科学学报,2018,37(11):2434-2442.
- [10] 祝海燕,李婷婷. 过量施肥对设施番茄影响的调查分析[J]. 中国瓜菜,2020,33(1):55-58.
- [11] 赵伟,刘梦龙,杨圆圆,等. 减施磷肥对番茄植株生长、产量、品质及土壤养分状况的影响[J]. 中国农学通报,2017,33(1):47-51.
- [12] 蔡祖聪. 我国设施栽培养分管理中待解的科学和技术问题[J]. 土壤学报,2019,56(1):36-43.
- [13] Sattari S Z, Bouwman A F, Giller K E, et al. Residual soil phosphorus as the missing piece in the global phosphorus crisis puzzle[J]. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America,2012,109(16):6348-6353.
- [14] 滕泽栋,李敏,朱静,等. 解磷微生物对土壤磷资源利用影响的研究进展[J]. 土壤通报,2017,48(1):229-235.
- [15] 林英,司春灿,韩文华,等. 解磷微生物研究进展[J]. 江西农业学报,2017,29(2):99-103.
- [16] Sarker A, Talukder N M, Islam M T. Phosphate solubilizing bacteria promote growth and enhance nutrient uptake by wheat[J]. Plant Science Today,2014,1(2):86-93.
- [17] Singh R P, Jha P N. Plant growth promoting potential of ACC deaminase rhizospheric bacteria isolated from *Aerva javanica*: a plant adapted to saline environments[J]. International Journal of Current Microbiology and Applied Sciences,2015,4(7):142-152.
- [18] 秦利均,杨永柱,杨星勇. 土壤溶磷微生物溶磷、解磷机制研究进展[J]. 生命科学研究,2019,23(1):59-64,86.
- [19] 张志鹏,蔡燕飞,段继贤,等. 复合微生物菌剂在设施黄瓜上的应用效果研究[J]. 安徽农业科学,2020,48(2):168-170.
- [20] 田洪平,李付军,孙杰,等. 不同菌剂对设施黄瓜产量和霜霉病的影响研究[J]. 安徽农学通报,2019,25(23):22-23.
- [21] 刘聪,谯江兰,仝少杰,等. 微生物菌剂对设施甜瓜产量和品质的影响[J]. 江苏农业科学,2019,47(19):168-171.
- [22] 全国农业技术推广服务中心. 土壤分析技术规范[M]. 2版. 北京:中国农业出版社,2014:54-56.
- [23] Hesketh N, Brookes P C. Development of an indicator for risk of phosphorus leaching[J]. Journal of Environmental Quality,2000,29(1):105-110.
- [24] 鲍士旦. 土壤农化分析[M]. 3版. 北京:中国农业出版社,2000:74-75.
- [25] 吴启华,刘晓斌,张淑香,等. 施用常规磷水平的 80% 可实现玉米高产、磷素高效利用和土壤磷平衡[J]. 植物营养与肥料学报,2016,22(6):1468-1476.
- [26] Cassman K G, Peng S, Olk D C, et al. Opportunities for Increased Nitrogen-Use Efficiency from Improved Resource Management in Irrigated Rice Systems[J]. Field Crops Research,1998,56(1/2):7-39.
- [27] Fageria N K, Baligar V C. Methodology for evaluation of lowland rice genotypes for nitrogen use efficiency[J]. Journal of Plant Nutrition,2003,26(6):1315-1333.
- [28] 彭少兵,黄见良,钟旭华,等. 提高中国稻田氮肥利用率的研究策略[J]. 中国农业科学,2002,35(9):1095-1103.
- [29] 马进川. 我国农田磷素平衡的时空变化与高效利用途径[D]. 北京:中国农业科学院,2018:1-12.

李 祥,柯希恒,孙喜军,等. 苹果枝条不同还田模式对果园土壤性状及苹果质量的影响[J]. 江苏农业科学,2021,49(23):238-242.
doi:10.15889/j.issn.1002-1302.2021.23.041

苹果枝条不同还田模式对果园土壤性状及苹果质量的影响

李 祥^{1,2}, 柯希恒¹, 孙喜军³, 储春年⁴, 郭学军⁵, 王永平¹, 曾 桥^{1,2}

(1. 陕西科技大学化学与化工学院/中国轻工业轻化工助剂重点实验室, 陕西西安 710021;

2. 陕西农产品加工技术研究院, 陕西西安 710021; 3. 陕西省西安市农业技术推广中心, 陕西西安 710061;

4. 陕西省西安市农机监理与推广总站, 陕西西安 710061; 5. 陕西省白水农业局, 陕西白水 715600)

摘要:为了降低枝条肥料化的成本,解决果农用得起有机肥的难题,采用枝条还田技术,研究还田模式对土壤性质、苹果质量的影响,研究表明,枝条还田具有缓冲土壤温度、提高土壤水分含量的作用。每年的3—6月处理1~处理5土壤温度低于对照,故推迟了苹果的花期,避免了“倒春寒”对苹果的影响。调节C/N(猪粪、尿素)、增施微生物菌剂(提高土壤微生物数量)及土壤调理剂能显著提高土壤微生物数量,增加木质素降解酶的活性,加速枝条降解。枝条还田比枝条堆肥枝条腐解率高10%以上,枝条腐解率最高达80%,建议集中2~3行枝条于作业行,每隔2~3年还田1次。枝条粉碎、旋耕、灌溉有助于枝条肥料化。处理2是枝条还田的最佳模式。

关键词:枝条还田模式;土壤温度;水分含量;土壤性质;苹果质量

中图分类号: X712 **文献标志码:** A **文章编号:** 1002-1302(2021)23-0238-05

随着农业产业结构的调整,果品生产已成为农民增收、乡村振兴、产业发展的重要组成部分。2019

收稿日期:2021-03-25

基金项目:陕西省创新能力支撑计划(编号:2019XY-03);陕西省重点研发计划(编号:2019ZDLNY01-05-02);广西壮族自治区重点研发计划(编号:桂科 AB19259016);陕西省林业科学院项目(编号: SXLK2020-0218);西安市科技计划(编号:20193051YF039NS039、20NYYF0026)。

作者简介:李 祥(1963—),男,陕西宝鸡人,博士,教授,主要从事农业废弃物肥料化技术与推广工作。E-mail:453538831@qq.com。

年陕西省耕地面积为 $3.01 \times 10^6 \text{ hm}^2$,果园面积为 $1.13 \times 10^6 \text{ hm}^2$,果园面积占耕地面积的 37.5%;2019 年陕西省粮食产量为 $1.23 \times 10^7 \text{ t}$,水果产量为 $2.01 \times 10^7 \text{ t}$,水果产量为粮食产量的 1.63 倍^[1]。果树在向人们提供美味的同时也产生了大量的枝条。相关研究表明,果实负载量与修剪枝条(鲜质量)的比例为 1:0.6~0.8^[2]。据此测算,2019 年陕西省果树鲜枝条产量为 $1.21 \times 10^7 \text{ t} \sim 1.61 \times 10^7 \text{ t}$,除去 20% 左右的枝条作为食用菌栽培基质外,其他 80% 被丢弃在田间地头,不仅占用农田,还堵塞河道,传

[30] 吴 旭,王姝淇,张 薇. 不同施肥处理下生物菌剂对番茄生长的影响[J]. 乡村科技,2020(9):111-112.

[31] 刘 蕾,王 凌,徐万强,等. 设施土壤磷素淋失环境阈值及防控措施[J]. 华北农学报,2019,34(增刊1):197-203.

[32] 鲁如坤. 土壤磷素水平和水体环境保护[J]. 磷肥与复肥,2003,18(1):4-8.

[33] 裴瑞娜,杨生茂,徐明岗,等. 长期施肥条件下黑垆土有效磷对磷盈亏的响应[J]. 中国农业科学,2010,43(19):4008-4015.

[34] 廖文华,刘建玲,黄欣欣,等. 潮褐土上蔬菜产量和土壤各形态磷变化对长期过量施磷的响应[J]. 植物营养与肥料学报,2017,23(4):894-903.

[35] MacDonald G K, Bennett E M, Potter P A, et al. Agronomic phosphorus imbalances across the world's croplands [J]. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United

States of America,2011,108(7):3086-3091.

[36] Manschadi A M, Kaul H P, Vollmann J, et al. Reprint of “Developing phosphorus-efficient crop varieties—An interdisciplinary research framework”[J]. Field Crops Research, 2014,165:49-60.

[37] 赵贵云,刘才宇,王朋成,等. 减施化肥增施微生物菌剂对设施番茄产量和品质的影响[J]. 安徽农学通报,2017,23(24):46-48.

[38] 范秀勤,黄文祥. 微生物菌剂对番茄生长的影响[J]. 上海蔬菜,2017(2):70-71.

[39] 辛 闯. 微生物菌剂在设施番茄上减肥增效的应用效果[J]. 中国农技推广,2018,34(6):53-55.

[40] 李若楠,武雪萍,张彦才,等. 减量施磷对温室菜地土壤磷素积累、迁移与利用的影响[J]. 中国农业科学,2017,50(20):3944-3952.