

张建鹏. 化肥减量配施微生物菌肥及土壤调理剂对重茬马铃薯生长发育和土壤质量的影响[J]. 江苏农业科学, 2023, 51(7): 205–212.
doi:10.15889/j.issn.1002-1302.2023.07.028

化肥减量配施微生物菌肥及土壤调理剂对重茬马铃薯生长发育和土壤质量的影响

张建鹏

(濮阳职业技术学院, 河南濮阳 457000)

摘要:为探究微生物菌肥及土壤调理剂对重茬马铃薯生长发育及土壤质量的影响,于2018—2021年通过田间定位试验,设置对照不施肥(CK)、单施化肥(T1)、化肥减量50%+微生物菌肥(T2)、化肥减量30%+微生物菌肥(T3)、化肥减量50%+微生物菌肥+土壤调理剂(T4)、化肥减量30%+微生物菌肥+土壤调理剂(T5)6个处理,研究不同施肥处理对土壤养分含量、酶活性变化和马铃薯产量、品质及生理代谢的影响。结果表明,与不施肥处理相比,不同施肥年限下各施肥处理均能够提高土壤速效养分、有机质含量及土壤酶活性,且随着施肥时间的延长,各处理表现出不同的变化,连续施肥3年后,T5处理的土壤碱解氮、速效磷、速效钾、有机质含量及土壤脲酶、碱性磷酸酶、过氧化氢酶、蔗糖酶活性较其他施肥处理分别提高2.68%~14.44%、5.15%~13.08%、3.11%~13.40%、0.31%~15.68%和10.26%~48.28%、10.81%~43.86%、4.84%~38.30%、10.29%~44.23%;T5处理的SPAD值、光合速率、蒸腾速率较其他处理分别提高4.79%~15.44%、11.29%~52.01%、11.99%~61.36%;T5处理的超氧化物歧化酶、过氧化物酶、过氧化氢酶活性较其他处理分别提高4.66%~21.71%、3.49%~14.60%、5.63%~17.60%;T5处理的粗蛋白、淀粉含量较其他处理分别提高2.19%~7.79%、3.26%~24.18%,T4处理的维生素C、还原糖含量较其他处理分别提高2.54%~13.31%、0.19%~6.46%,但与T5处理无显著性差异;各处理产量总体表现为T5>T3>T4>T2>T1>CK;相关性分析结果表明,不同施肥措施条件下土壤养分含量及酶活性的变化对马铃薯生理代谢及产量的提高具有重要的影响。综上所述,化肥减量30%与微生物菌肥及土壤调理剂配施能够改善土壤质量,促进马铃薯生长发育,提高马铃薯的产量及品质。

关键词:生物菌肥;土壤调理剂;土壤肥力;酶活性;马铃薯;生理特性

中图分类号:S156;S532.06 **文献标志码:**A **文章编号:**1002-1302(2023)07-0205-08

化肥作为速效养分能够迅速补充土壤肥力,满

足植物生长对养分的需求,近几十年来,化肥在我国粮食产量快速增长的过程中起到至关重要的作用^[1-2]。然而近年来,化肥的不合理施用不仅造成肥料利用率降低,化肥增产报酬率下降,还导致土壤酸碱化加重,土壤结构改变,土壤质量退化,微生物群落失衡,农业污染源严重等^[3-7]问题,严重制约了我国农业健康可持续发展,且根据农业农村部提

收稿日期:2022-06-05

基金项目:河南省教育厅2022年度河南省高等学校重点项目(编号:22B210009);河南省科技攻关项目(编号:202102110199)。

作者简介:张建鹏(1980—),男,河南开封人,硕士,讲师,主要从事园艺技术专业教学与遗传育种工作。E-mail: z1122330414@163.com。

[33]王鹏,陈波,张华. 基于高通量测序的鄱阳湖典型湿地土壤细菌群落特征分析[J]. 生态学报, 2017, 37(5): 1650–1658.

[34]赵祥,刘红玲,杨盼,等. 滴灌对苜蓿根际土壤细菌多样性和群落结构的影响[J]. 微生物学通报, 2019, 46(10): 2579–2590.

[35]Kundim B A, Itou Y, Sakagami Y, et al. New haliangicin isomers, potent antifungal metabolites produced by a marine myxobacterium [J]. The Journal of Antibiotics, 2003, 56(7): 630–638.

[36]马晓霞,马晓彤,曹卫东,等. 紫云英根瘤菌的系统发育多样性

[J]. 应用与环境生物学报, 2010, 16(3): 380–384.

[37]Dean S L, Farrer E C, Taylor D L, et al. Nitrogen deposition alters plant–fungal relationships: linking belowground dynamics to aboveground vegetation change [J]. Molecular Ecology, 2014, 23(6): 1364–1378.

[38]Bell C W, Asao S, Calderon F, et al. Plant nitrogen uptake drives rhizosphere bacterial community assembly during plant growth [J]. Soil Biology and Biochemistry, 2015, 85: 170–182.

[39]胡杰,何晓红,李大平,等. 鞘氨醇单胞菌研究进展[J]. 应用与环境生物学报, 2007, 13(3): 431–437.

出的主要农作物化肥零增长目标,提升肥料利用率迫在眉睫^[8-9]。因此,如何合理施肥,减少化肥使用量,提高作物产量、品质及土壤肥力,是当前农业可持续发展的重要研究课题。目前,有关其他类型肥料替代部分或全部化肥用以提升肥料利用率、改善土壤质量以及提高作物生长发育的研究有很多。陶伟等的研究表明,85% 化肥配施复合微生物菌肥能够有效提高土壤蔗糖酶、脲酶和酸性蛋白酶活性^[10];张树衡等的研究表明,微生物菌肥与生物有机肥配施能够显著提高花椒功能叶片叶绿素含量、实际光化学效率,且能够有效促进花椒幼苗生长及增强其生长潜力^[11];许小伟等的研究表明,有机肥与无机肥配施能够明显提升花生品质,且在一定比例范围内,随着有机肥投入的增加,能够明显提高叶片叶绿素含量、光合速率、气孔导度以及超氧化物歧化酶、过氧化氢酶和过氧化物酶的活性^[12];谷端银等的研究表明,合理的施肥措施能够有效改善土壤养分质量,提高作物产量及品质,改善植株叶片生理特性,提高功能叶片光合作用能力^[13-16]。

微生物菌肥是通过微生物生命活动促使农作物得到特定肥效的一类微生物制剂,施入土壤中能够通过自身代谢和分泌的产物改善土壤及作物根系周围的生态环境,增加土壤透气性,促进有益微生物生长繁殖,提高土壤养分转化与供应能力,培肥地力,增强根系活力,促进作物生长,提高作物抗逆性^[17-18]。杨志刚等的研究表明,增施微生物菌肥能够显著提高辣椒产量,改善辣椒品质,增加可溶性糖含量^[19]。李琦等的研究表明,微生物菌肥替代部分化肥可以促进燕麦生长,提高燕麦产量及营养品质,减少化肥施用量,提高化肥利用率^[20]。土壤调理剂能够通过活性物质与土壤和水之间的媒介作用促进土壤团聚体形成,提高土壤透气性,增强土壤蓄水保肥能力。目前,化肥、微生物菌肥与土壤调理剂配施的应用主要集中在设施蔬菜方面^[21-23],且大多数的研究局限于单一化肥或微生物菌肥与土壤调理剂对土壤与作物的研究,而化肥减施与微生物菌肥及土壤调理剂配施在重茬马铃薯上的应用却鲜有报道,且不同区域土壤类型、气候条件下,肥效差异较大。因此,本研究通过多年田间定位试验,研究不同化肥用量与微生物菌肥及土壤调理剂配施对豫东地区重茬马铃薯生长发育和土壤质量的影响,找到适宜的施肥模式,以期为豫东地区重茬马铃薯的高效施肥提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 试验区概况

试验于 2018 年 3 月至 2021 年 6 月在河南省濮阳市清丰县大屯乡(地理位置:114°53'E,35°85'N)进行,该区域属暖温带半湿润季风气候区,年平均气温 13.4℃,年降水量 540 mm,年平均日照时长 2 454 h,无霜期为 215 d。供试土壤为黄潮土黏土质,基础土壤速效养分含量如下:碱解氮含量 56.32 mg/kg,速效磷含量 74.65 mg/kg,有机质含量 9.34 g/kg,速效钾含量 124.32 mg/kg,pH 值 8.12。

1.2 试验设计

试验设置 6 个处理,分别为对照不施肥(CK)、单施化肥(T1)、化肥减量 50% + 微生物菌肥(T2)、化肥减量 30% + 微生物菌肥(T3)、化肥减量 50% + 微生物菌肥 + 土壤调理剂(T4)、化肥减量 30% + 微生物菌肥 + 土壤调理剂(T5),3 次重复,共计 18 个小区。小区面积 40 m²,过道 0.6 m,保护行 3 m,马铃薯株行距 40 cm × 50 cm。供试品种为中薯 5 号,豫东地区一年两熟,春季生育期为 3 月 20 日至 6 月 10 日,秋季生育期为 8 月 20 日至 11 月 10 日。单施化肥用量:纯氮(N) 100 kg/hm²、P₂O₅ 225 kg/hm²、K₂O 425 kg/hm²;微生物菌肥(有效活菌数 ≥ 1.0 × 10⁸ CFU/g,含 N 12.26%、P₂O₅ 4.39%、K₂O 8.26%、有机质 25.32%)用量为 1 200 kg/hm²;土壤调理剂(含氨基酸粉、硫酸亚铁、十二烷基聚氧乙烯醚硫酸钠等) 75 kg/hm²。所有肥料均作为基肥一次性施入,其他田间管理按照当地常规生产模式进行。

1.3 样品采集与测定方法

分别于 2020 年 6 月 10 日和 2021 年 6 月 10 日采集表层(0~30 cm)土壤,通过带有冰袋的保温箱带回实验室,捡出根系、碎石等杂物,过 2 mm 筛后,一部分保存在 4℃ 冰箱,用于土壤生物学活性测定,一部分自然阴干,用于土壤养分的测定。土壤样品每年均测定 1 次。脲酶、过氧化氢酶、碱性磷酸酶、蔗糖酶活性的测定分别采用 C₆H₅ONa - NaClO 比色法、KMnO₄ 滴定法、磷酸苯二钠比色法、3,5-二硝基水杨酸比色法^[24];土壤碱解氮、速效磷、速效钾、有机质含量的测定分别采用碱解扩散法、NaHCO₃ 浸提钼锑钨比色法、NH₄OAC - 浸提火焰光度法、K₂Cr₂O₇ - 外加热法^[25]。

于 2021 年马铃薯块茎膨大期(5 月 27 日)测定

旗叶 SPAD 值、光合速率(P_n)、蒸腾速率(T_r)、气孔导度(G_s)、胞间 CO_2 浓度(C_i)。每个小区定位选取 10 株马铃薯,采用 SPAD-502 叶绿素仪测定顶端第 3 叶 SPAD 值,采用 LI-6400 便携式光合仪测定旗叶 P_n 、 T_r 、 G_s 、 C_i 。

于 2021 年马铃薯块茎形成期(5 月 1 日)采集植株叶片,带回实验室液氮处理 10 min 后, $-80\text{ }^{\circ}\text{C}$ 保存,用于测定超氧化物歧化酶(SOD)、过氧化物酶(POD)、过氧化氢酶(CAT)活性以及丙二醛(MDA)含量。其中 SOD、POD、CAT 活性以及 MDA 含量分采用氮蓝四唑光化还原法、愈创木酚氧化法、紫外吸收法和硫代巴比妥酸法测定^[24]。

于 2021 年马铃薯收获期(6 月 10 日)进行产量测定,重复间取平均值,折算成公顷产量。收获时,测定马铃薯商品薯率、干物质率。每个小区选取大小均匀的薯块 3 个,用于马铃薯品质的测定。其中薯块淀粉、维生素 C、还原糖、粗蛋白含量分别采用水浸提-碘色法、荧光法、蒽酮比色法、半微量凯氏定氮法测定^[26]。商品薯率的测定:质量在 100 g 以上,无虫眼,无病害的马铃薯为商品薯。

1.4 数据处理

采用 Excel 2003 进行数据计算与处理,采用 SPSS 17.0 进行处理间差异显著性比较与相关性分

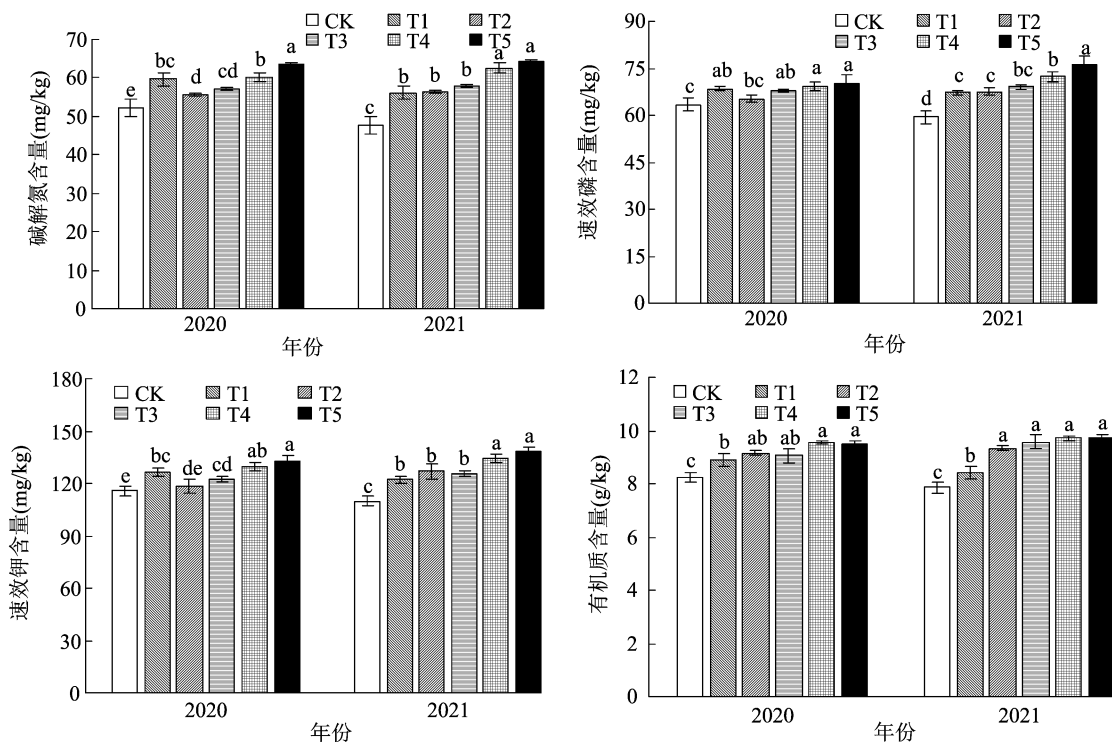
析。文中表格数据均为 3 次重复的均值 \pm 标准误。

2 结果与分析

2.1 对土壤速效养分及有机质含量的影响

由图 1 可知,不同施肥年限下各处理土壤速效养分及有机质含量差异较大。连续不同施肥 2 年后(2020 年),除 T2 处理土壤速效磷、速效钾含量与 CK 处理差异不显著外,其他施肥处理的土壤碱解氮、速效磷、速效钾及有机质含量均显著高于 CK 处理($P<0.05$),其中 T5 处理土壤碱解氮、速效磷、速效钾及有机质含量均最高,较 CK 处理分别显著提高 21.41%、10.40%、15.20%、14.91%。在所有施肥处理中,T2 处理土壤碱解氮、速效磷、速效钾含量最低,其中土壤碱解氮、速效钾含量显著低于 T1 处理,而速效磷含量与 T1 处理无显著差异。T1 处理土壤有机质含量最低,显著低于 T4、T5 处理,但与 T2、T3 处理差异不显著。

随着不同施肥时间的延长(2021 年),各处理土壤速效养分及有机质含量与 2020 年发生较大变化。与 CK 处理相比,不同施肥处理土壤速效养分及有机质含量均显著提高,而与 T1 处理相比,化肥减量配施微生物菌肥或土壤调理剂处理土壤速效养分及有机质含量均不同程度提高,其中 T5 处理的土



柱上不同小写字母表示处理间在 0.05 水平差异显著($P<0.05$)。下图同

图1 不同施肥年限对土壤速效养分及有机质含量变化的影响

壤碱解氮、速效磷、速效钾及有机质含量仍均最高,较其他施肥处理分别提高 2.68% ~ 14.44%、5.15% ~ 13.08%、3.11% ~ 13.40%、0.31% ~ 15.68%。配施土壤调理剂的 T4、T5 处理中的土壤碱解氮、速效磷、速效钾及有机质含量均不同程度地高于相对应不配施土壤调理剂的 T2、T3 处理,其中除土壤有机质含量无显著差异外,土壤碱解氮、速效磷、速效钾含量均显著提高。

2.2 对土壤酶活性的影响

由图 2 可知,与 CK 处理相比,不同施肥年限下各施肥处理土壤脲酶、碱性磷酸酶、过氧化氢酶、蔗糖酶活性均显著提高($P < 0.05$)。而在所有施肥处理对比中,配施微生物菌肥或土壤调理剂的 T2、T3、T4、T5 处理中的土壤脲酶、碱性磷酸酶、过氧化氢

酶、蔗糖酶活性均显著高于 T1 处理,其中 T5 处理的脲酶、碱性磷酸酶、过氧化氢酶、蔗糖酶活性在不同施肥年限下均最高,连续施肥 2 年后(2020 年),T5 处理的脲酶、碱性磷酸酶、过氧化氢酶、蔗糖酶活性较其他施肥处理分别提高 16.55% ~ 36.29%、10.13% ~ 35.94%、8.22% ~ 36.21%、5.81% ~ 19.74%,连续施肥 3 年后(2021 年),分别提高 10.26% ~ 48.28%、10.81% ~ 43.86%、4.84% ~ 38.30%、10.29% ~ 44.23%,其中除 2021 年与 T4 处理的过氧化氢酶无显著差异外,其他均显著提高。而配施土壤调理剂的 T4、T5 处理中的各种酶的活性均不同程度地高于相对应不配施土壤调理剂的 T2、T3 处理。

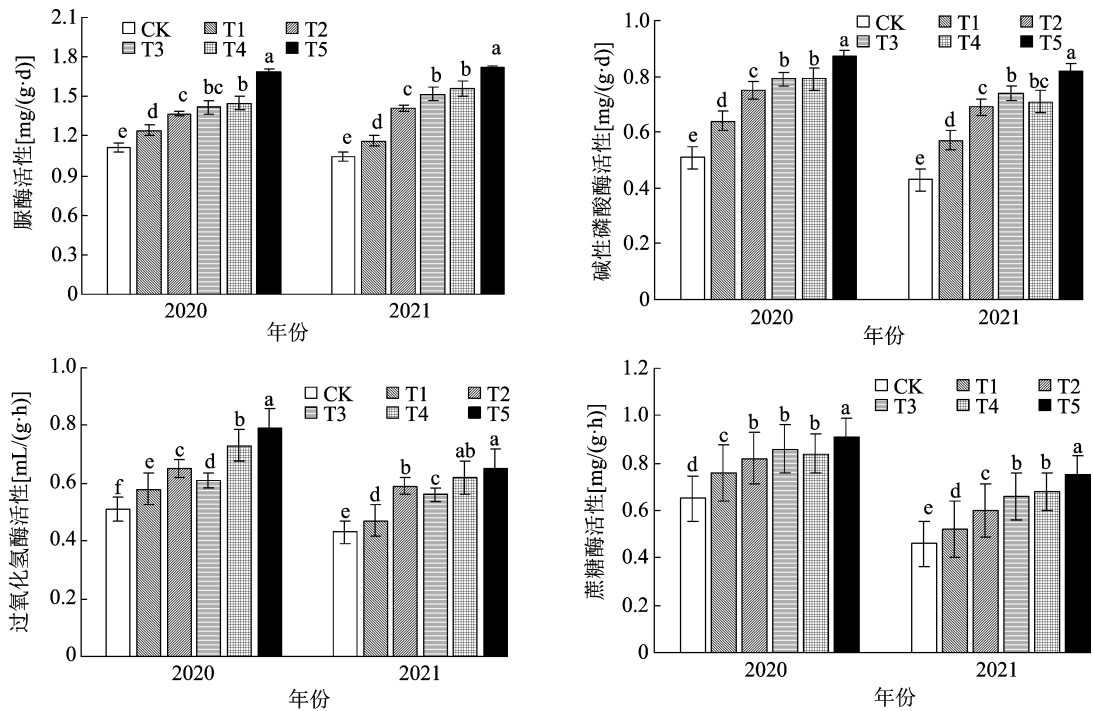


图2 不同施肥年限对土壤酶活性变化的影响

2.3 对马铃薯叶片 SPAD 值及光合参数变化的影响

由表 1 可知,经过 3 年不同施肥措施处理后,各处理叶片 SPAD 值及光合参数差异较大。与 CK 处理相比,不同施肥处理 SPAD 值、光合速率、蒸腾速率、气孔导度、胞间 CO₂ 浓度均有不同程度地升高,其中 T5 处理的 SPAD 值、光合速率、蒸腾速率最大,较其他处理分别提高 4.79% ~ 15.44%、11.29% ~ 52.01%、11.99% ~ 61.36%,SPAD 值显著高于除 T4 处理外的其他处理,光合速率、蒸腾速率显著最

高。T4 处理的气孔导度、胞间 CO₂ 浓度最大,较其他处理分别提高 3.17% ~ 23.98%、4.95% ~ 22.94%,均显著高于 CK、T1、T2 处理,但与 T5 处理均无显著性差异。CK 处理光合速率、蒸腾速率、气孔导度、胞间 CO₂ 浓度均为最小值,除胞间 CO₂ 浓度与 T1 处理无显著差异外,其余指标与施肥处理相比均显著降低。

2.4 对马铃薯叶片丙二醛含量及抗氧化系统酶活性的影响

由表 2 可知,经过 3 年不同施肥措施处理后,各

表 1 不同施肥处理对马铃薯叶片 SPAD 值及光合参数变化的影响

处理	SPAD 值	光合速率 [$\mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$]	蒸腾速率 [$\text{mmol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$]	气孔导度 [$\text{mmol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$]	胞间 CO_2 浓度 ($\mu\text{mol}/\text{mol}$)
CK	51.93 \pm 2.69d	14.65 \pm 1.26e	7.35 \pm 0.52e	168.31 \pm 8.16c	121.40 \pm 7.34c
T1	54.28 \pm 2.85cd	16.06 \pm 1.52d	8.06 \pm 0.37d	182.24 \pm 11.02b	126.87 \pm 9.46c
T2	55.26 \pm 2.06bc	18.64 \pm 0.93c	9.93 \pm 0.26c	189.97 \pm 4.33b	138.29 \pm 10.17b
T3	56.83 \pm 3.10bc	19.28 \pm 1.27bc	10.18 \pm 0.58bc	199.85 \pm 9.01a	137.19 \pm 8.45b
T4	57.21 \pm 2.91ab	20.01 \pm 1.66b	10.59 \pm 0.61b	208.68 \pm 15.12a	149.25 \pm 8.29a
T5	59.95 \pm 1.85a	22.27 \pm 1.02a	11.86 \pm 0.44a	202.26 \pm 14.68a	142.21 \pm 9.80ab

注:同列数据后不同小写字母表示处理间在 0.05 水平差异显著($P < 0.05$)。表 2、表 3 同。

处理叶片丙二醛含量及抗氧化系统酶活性差异较大。与 CK 处理相比,不同施肥处理的丙二醛含量均有不同程度地下降,过氧化氢酶、超氧化物歧化酶活性均有不同程度地升高,过氧化物酶表现出不同的变化趋势。其中 T5 处理的丙二醛含量最低,较 CK 处理显著降低 11.60%,且显著低于 T1、T2、T3 处理;T5 处理的超氧化物歧化酶、过氧化物酶、

过氧化氢酶的活性均最高,较其他处理分别提高 4.66% ~ 21.71%、3.49% ~ 14.60%、5.63% ~ 17.60%,其中过氧化氢酶的活性显著最高,超氧化物歧化酶、过氧化物酶的活性显著高于 CK、T1、T2、T3 处理,而与 T4 处理均无显著性差异。T1 处理的超氧化物歧化酶、过氧化物酶、过氧化氢酶活性在所有施肥处理中均最低,而丙二醛含量最高。

表 2 不同施肥处理对叶片丙二醛含量及抗氧化系统酶活性变化的影响

处理	丙二醛含量 (nmol/g)	超氧化物歧化酶活性 [$\text{U}/(\text{min} \cdot \text{g})$]	过氧化物酶活性 [$\text{U}/(\text{min} \cdot \text{g})$]	过氧化氢酶活性 [$\text{U}/(\text{min} \cdot \text{g})$]
CK	8.10 \pm 0.62a	186.29 \pm 11.37c	239.17 \pm 12.22bc	149.39 \pm 8.68d
T1	7.96 \pm 0.86a	193.70 \pm 12.85c	234.20 \pm 16.54c	157.70 \pm 12.21c
T2	7.82 \pm 0.59ab	209.24 \pm 8.62b	246.54 \pm 9.92b	162.26 \pm 10.69bc
T3	7.73 \pm 0.81ab	208.86 \pm 16.62b	249.62 \pm 19.31b	165.26 \pm 7.59b
T4	7.46 \pm 0.72bc	216.65 \pm 9.48ab	259.36 \pm 20.22ab	166.32 \pm 9.91b
T5	7.16 \pm 0.48c	226.74 \pm 14.52a	268.40 \pm 18.38a	175.68 \pm 8.32a

2.5 对马铃薯产量及商品薯率的影响

由图 3 可知,不同施肥年限下各处理马铃薯产量及商品薯率有较大的差异。连续 2 年不同施肥处理后(2020 年),与 CK 处理相比,不同施肥处理的鲜薯产量显著提高 7.13% ~ 21.08% ($P < 0.05$),其中 T5 处理的产量显著高于其他施肥处理,T1 处理产量在所有施肥处理中最低,但与 T2 处理无显著差异。连续施肥 3 年后(2021 年),T5 处理的产量仍最高,较其他处理分别显著提高 5.91% ~ 39.38%,T1 处理的产量在所有施肥处理中显著最低,连续施肥 3 年后马铃薯的产量总体表现为 T5 > T3 > T4 > T2 > T1 > CK。

连续施肥 2 年后,不同施肥处理的商品薯率均显著高于 CK 处理,其中 T5 处理的商品薯率最高,较其他处理分别提高 3.16% ~ 22.89%,而配施微生物菌肥或土壤调理剂的 T3、T4、T5 处理均显著高

于 T1 处理。连续施肥 3 年后,T1 处理的商品薯率较 2020 年有所下降,与 CK 处理相比无显著差异,而配施微生物菌肥或土壤调理剂的 T2、T3、T4、T5 处理均显著高于 T1、CK 处理,其中 T5 处理的商品薯率最高,较 T2、T3 处理分别显著提高 9.86%、5.34%,但与 T4 处理无显著差异,连续施肥 3 年后马铃薯的商品薯率总体表现为 T5 > T4 > T3 > T2 > T1 > CK。

2.6 对薯块品质的影响

由表 3 可知,经过 3 年不同施肥措施处理后,各处理薯块品质差异较大。与 CK 处理相比,不同施肥处理的粗蛋白、维生素 C、淀粉及还原糖含量均有不同程度地升高。其中 T5 处理的粗蛋白、淀粉含量最高,较其他处理分别提高 2.19% ~ 7.79%、3.26% ~ 24.18%,粗蛋白含量显著高于 CK、T1 处理,淀粉含量显著高于除 T4 处理外的其他处理。

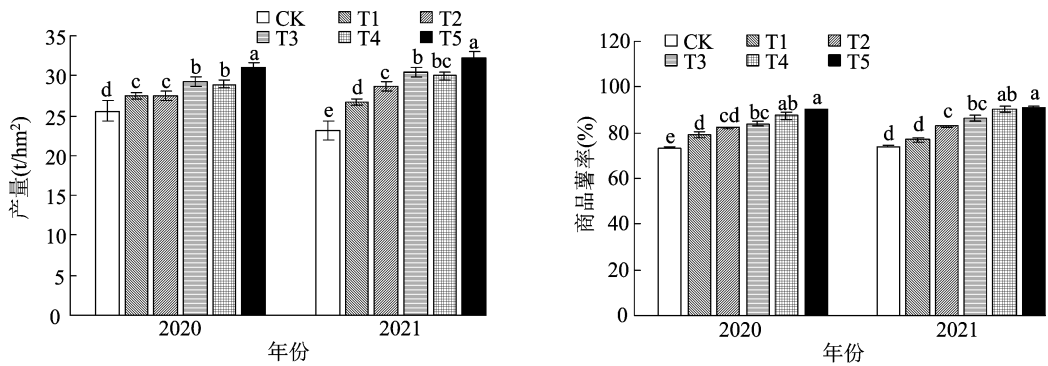


图3 不同施肥年限对马铃薯产量及商品薯率的影响

表3 不同施肥处理对薯块品质指标含量变化的影响

处理	粗蛋白含量 (g/kg)	维生素 C 含量 (mg/kg)	淀粉含量 (g/kg)	还原糖含量 (g/kg)
CK	17.32 ± 0.53c	264.26 ± 10.59c	111.27 ± 9.26d	4.95 ± 0.37b
T1	17.68 ± 0.24bc	275.69 ± 16.32bc	119.50 ± 8.96c	5.10 ± 0.18ab
T2	18.13 ± 0.33abc	286.18 ± 12.05ab	126.34 ± 5.44b	5.26 ± 0.34a
T3	18.01 ± 0.56abc	280.19 ± 9.22abc	125.39 ± 11.29b	5.19 ± 0.47a
T4	18.27 ± 0.59ab	299.44 ± 15.23a	133.82 ± 8.20a	5.27 ± 0.13a
T5	18.67 ± 0.50a	292.02 ± 11.21a	138.18 ± 9.00a	5.23 ± 0.42a

T4 处理的维生素 C、还原糖含量最高,较其他处理分别提高 2.54% ~ 13.31%、0.19% ~ 6.46%,维生素 C 含量显著高于 CK、T1 处理,还原糖含量显著高于 CK 处理,其他指标之间均无显著性差异。

2.7 土壤指标与马铃薯产量及生理指标的相关性分析

相关性分析结果(表 4)表明,鲜薯产量与土壤碱解氮、速效磷、速效钾、有机质含量呈极显著正相关关系,与土壤脲酶、蔗糖酶活性呈显著正相关关系;叶片 SPAD 值与土壤有机质含量呈极显著正相关关系,与土壤速效钾含量及蔗糖酶活性呈显著正相关关系;叶片光合速率与土壤碱解氮、有机质含量呈极显著正相关关系,与土壤速效磷、速效钾含量及脲酶、蔗糖酶活性呈显著正相关关系;叶片超氧化物歧化酶活性与土壤碱解氮含量及脲酶活性呈显著正相关关系;叶片过氧化物酶活性与土壤脲酶、蔗糖酶活性呈显著正相关关系;叶片过氧化氢酶活性与土壤碱解氮含量及脲酶、碱性磷酸酶、蔗糖酶活性呈显著正相关关系;叶片丙二醛含量与土壤过氧化氢酶活性呈显著负相关关系;其他指标之间均无显著性相关关系。由此可知,不同施肥措施条件下土壤养分含量及酶活性的变化对马铃薯生理代谢及产量的提高具有重要的影响。

3 讨论与结论

研究表明,与不施肥处理相比,不同施肥年限下各施肥处理均能够提高土壤速效养分、有机质含量及土壤酶活性,且随着施肥时间的延长,各处理表现出不同的变化趋势,其中连续施肥 3 年时,化肥减量 30% + 微生物菌肥 + 土壤调理剂处理的土壤碱解氮、速效磷、速效钾、有机质含量及土壤脲酶、碱性磷酸酶、过氧化氢酶、蔗糖酶活性均最高,较其他施肥处理分别提高 2.68% ~ 14.44%、5.15% ~ 13.08%、3.11% ~ 13.40%、0.31% ~ 15.68% 和 10.26% ~ 48.28%、10.81% ~ 43.86%、4.84% ~ 38.30%、10.29% ~ 44.23%,而与单施化肥相比,化肥减量配施微生物菌肥或土壤调理剂处理的土壤速效养分、有机质含量及土壤酶活性整体均有不同程度提高,且配施土壤调理剂处理明显高于不配施土壤调理剂处理。研究表明,与不施肥或单施化肥相比,复合微生物菌肥对土壤磷酸酶、过氧化氢酶、蔗糖酶均有明显的促进作用^[27]。分析认为,与单施化肥或不施肥相比,微生物菌肥能够为土壤微生物代谢活动提供丰富的碳源,使其代谢能力强于其他处理,进而增强土壤养分的转化与利用,提高土壤酶活性;而土壤调理剂由于其特殊的

表 4 土壤养分、酶活性与马铃薯产量及生理指标的相关性分析结果

项目	相关系数							
	碱解氮含量	速效磷含量	速效钾含量	有机质含量	脲酶活性	碱性磷酸酶活性	过氧化氢酶活性	蔗糖酶活性
产量	0.92 **	0.91 **	0.93 **	0.97 **	0.88 *	0.73	0.76	0.84 *
SPAD 值	0.55	0.74	0.85 *	0.90 **	0.62	0.78	0.71	0.82 *
光合速率	0.92 **	0.84 *	0.77 *	0.95 **	0.89 *	0.62	0.57	0.84 *
丙二醛含量	-0.62	-0.44	-0.64	-0.47	-0.73	-0.77	-0.81 *	-0.75
超氧化物歧化酶活性	0.84 *	0.72	0.78	0.49	0.88 *	0.79	0.64	0.48
过氧化物酶活性	0.62	0.63	0.75	0.62	0.82 *	0.72	0.6	0.82 *
过氧化氢酶活性	0.85 *	0.67	0.56	0.67	0.87 *	0.87 *	0.73	0.88 *

注：*、** 分别表示显著相关($P<0.05$)、极显著相关($P<0.01$)。

结构,能够改良土壤结构,提高土壤通透性,进而促进土壤微生物活动。化肥减量 50% + 微生物菌肥 + 土壤调理剂处理的土壤速效养分、有机质含量及土壤酶活性明显低于化肥减量 30% + 微生物菌肥 + 土壤调理剂处理,可能是化肥减量过多,各养分不能及时供给土壤和根系的吸收与利用,进而影响土壤微生物的代谢活动及土壤酶活性,表现弱于减量 30% 处理。

叶绿素是植株叶片进行光合作用的主要色素,其中叶绿素含量与叶片光合能力及植株生长发育具有相关性,可以监测指示植物的生长发育及营养状况^[28]。有研究表明,微生物菌肥对马铃薯叶片 SPAD 值及光合速率均有显著促进作用^[29]。但也有研究表明,微生物菌剂对马铃薯幼苗期、块茎膨大期、成熟期的叶片 SPAD 值均没有显著影响^[30]。本研究表明,连续施肥 3 年时,化肥减量 30% + 微生物菌肥 + 土壤调理剂处理能够明显提高马铃薯叶片 SPAD 值、光合速率及蒸腾速率,其中叶片 SPAD 值显著高于 CK、T1、T2、T3 处理,光合速率、蒸腾速率显著高于其他处理。这与李卫东等的研究结果^[30]不一致,可能是因为试验用的微生物菌肥不同,也可能是土壤类型、降水量等自然条件的不同产生的结果差异。而配施土壤调理剂的 T5 处理明显高于 T4 处理,分析认为,土壤调理剂具有很大的比表面积,较易吸附土壤、水分形成团聚体,改善土壤透气性,增加土壤蓄水保肥能力,促进植株根系对养分、水分的吸收利用,使 SPAD 值、光合速率、蒸腾速率表现出优于其他处理,进而能够促进植株生长发育,提高马铃薯产量及商品薯率,改善薯块品质。

活性氧伤害是引起植株叶片老化的重要原因之一,植物逆境时活性氧过多能够导致细胞膜的损伤及氧化,从而引起膜脂过氧化^[31-32]。超氧化物歧化酶(SOD)是逆境时植物体内自身生物系统防御活性氧伤害的重要屏障^[33]。过氧化物酶(POD)、过氧化氢酶(CAT)可以清除过量的 H₂O₂,减轻叶片由膜脂过氧化产生的伤害^[34]。丙二醛(MDA)是细胞膜脂氧化的主要产物,含量的高低可以表示叶片细胞膜受害的程度^[35]。丙二醛含量与细胞内抵御活性氧毒害保护系统的 POD、CAT 和 SOD 活性呈负相关性^[36]。本研究结果表明,与其他处理相比,化肥减量 30% + 微生物菌肥 + 土壤调理剂处理能够提高 POD、CAT 和 SOD 活性,降低 MDA 含量,其中 CAT 活性与 T4 处理相比差异显著,POD、SOD 活性和 MDA 含量均与 T4 处理无显著性差异,但均与 CK、T1、T2、T3 处理差异显著。分析认为,马铃薯植株在干旱、高温胁迫逆境时,土壤调理剂能够改善土壤透气性,增强蓄水保肥能力,而微生物菌肥能够改善根系的微生态环境,增强根系的氧化作用,提高 POD、CAT 和 SOD 活性,清除过量的 H₂O₂,减轻膜脂过氧化作用。而 T2 处理与单施化肥处理的 CAT 活性和 MDA 含量均无显著差异,可能是监测指标时植株受到逆境胁迫较轻,没有表现出显著差异,具体原因有待进一步探讨。

结合土壤养分、酶活性与马铃薯产量及生理指标的相关性分析结果可知,不同施肥措施条件下土壤养分含量及酶活性的变化对马铃薯生理代谢及产量的提高具有重要的影响,光合速率及抗氧化系统的提高能够明显促进植株生长发育,进而提高马铃薯产量及品质。综上所述,化肥减量 30% + 微生

物菌肥 + 土壤调理剂处理在土壤养分含量、酶活性变化和马铃薯产量、品质及生理特性各方面表现均最优。

参考文献:

- [1] 付浩然, 李婷玉, 曹寒冰, 等. 我国化肥减量增效的驱动因素探究[J]. 植物营养与肥料学报, 2020, 26(3): 561–580.
- [2] 栾江, 仇焕广, 井月, 等. 我国化肥施用量持续增长的原因分解及趋势预测[J]. 自然资源学报, 2013, 28(11): 1869–1878.
- [3] 胡春胜, 张玉铭, 秦树平, 等. 华北平原农田生态系统氮素过程及其环境效应研究[J]. 中国生态农业学报, 2018, 26(10): 1501–1514.
- [4] 闫湘, 金继运, 梁鸣早. 我国主要粮食作物化肥增产效应与肥料利用效率[J]. 土壤, 2017, 49(6): 1067–1077.
- [5] 刘哲, 孙增慧, 吕贻忠. 长期不同施肥方式对华北地区温室和农田土壤团聚体形成特征的影响[J]. 中国生态农业学报, 2017, 25(8): 1119–1128.
- [6] 郭振, 王小利, 段建军, 等. 长期施肥对黄壤性水稻土有机碳矿化的影响[J]. 土壤学报, 2018, 55(1): 225–235.
- [7] 王火焰, 周健民. 根区施肥——提高肥料养分利用率和减少面源污染的关键和必需措施[J]. 土壤, 2013, 45(5): 785–790.
- [8] 崔元培, 魏子鲲, 王建忠, 等. “双减”背景下化肥、农药施用现状与发展路径[J]. 北方园艺, 2021(9): 164–173.
- [9] 刘莉, 刘静. 基于种植结构调整视角的化肥减施对策研究[J]. 中国农业资源与区划, 2019, 40(1): 17–25.
- [10] 陶伟, 叶长东, 苏天明, 等. 复合微生物菌肥配施化肥对芥菜生长及土壤环境的影响[J]. 西南农业学报, 2020, 33(5): 1042–1047.
- [11] 张树衡, 丁德东, 何静, 等. 两种生物肥料配施对再植花椒生长及光合特性的影响[J]. 西北农业学报, 2021, 30(9): 1355–1364.
- [12] 许小伟, 樊剑波, 陈晏, 等. 有机无机肥配施对红壤旱地花生生理特性、产量及品质的影响[J]. 土壤学报, 2015, 52(1): 174–182.
- [13] 谷端银, 焦娟, 刘中良, 等. 减施化肥配施有机肥对大拱棚早春西瓜生长及品质的影响[J]. 北方园艺, 2019(23): 48–56.
- [14] 王金强, 李欢, 刘庆, 等. 干旱胁迫下喷施外源植物激素对甘薯生理特性和产量的影响[J]. 应用生态学报, 2020, 31(1): 189–198.
- [15] 刘赵帆. 微生物菌肥替代部分化肥对设施黄瓜生长、品质及产量的影响[J]. 北方园艺, 2022(2): 47–53.
- [16] 张立峰, 丁伟. 复合微生物菌肥对水稻苗床土壤养分及 pH 值的影响[J]. 江苏农业科学, 2017, 45(11): 67–69.
- [17] 李可可, 陈腊, 米国华, 等. 微生物肥料在玉米上的应用研究进展[J]. 玉米科学, 2021, 29(3): 111–122.
- [18] 张瑞福, 颜春荣, 张楠, 等. 微生物肥料研究及其在耕地质量提升中的应用前景[J]. 中国农业科技导报, 2013, 15(5): 8–16.
- [19] 杨志刚, 叶英杰, 常海文, 等. 微生物菌肥及土壤修复剂对干制辣椒生长、品质及产量的影响[J]. 北方园艺, 2020(19): 1–7.
- [20] 李琦, 姚拓, 杨晓玫, 等. 半干旱地区不同剂型微生物菌肥替代部分化肥对燕麦生长和品质的影响[J]. 干旱区资源与环境, 2020, 34(3): 159–165.
- [21] 武杞蔓, 田诗涵, 李昀烨, 等. 微生物菌肥对设施黄瓜生长、产量及品质的影响[J]. 生物技术通报, 2022, 38(1): 125–131.
- [22] 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.
- [23] 张蕾, 李萍, 王维瑞, 等. 轻度盐胁迫下土壤调理剂对设施黄瓜土壤肥力及生长发育的影响[J]. 北方园艺, 2021(9): 50–60.
- [24] 关松荫. 土壤酶及其研究法[M]. 北京: 农业出版社, 1986.
- [25] 鲍士旦. 土壤农化分析[M]. 3 版. 北京: 中国农业出版社, 2000.
- [26] 李合生. 植物生理生化实验原理和技术[M]. 北京: 高等教育出版社, 2000.
- [27] 符菁, 赵远, 赵利华, 等. 基于光合菌剂的复合微生物菌肥对水稻产量及土壤酶活性的影响[J]. 西南农业学报, 2019, 32(10): 2330–2336.
- [28] 宋旭东, 章慧敏, 张振良, 等. 外源水杨酸和氯化钙对糯玉米花期高温胁迫下光合特性及产量的调控效应[J]. 江苏农业科学, 2022, 50(7): 87–94.
- [29] 李星星. 复合微生物菌剂对土壤特性及马铃薯生长与产量的影响[D]. 呼和浩特: 内蒙古农业大学, 2020.
- [30] 李卫东, 陈永波, 黄光昱, 等. 生物有机肥和微生物菌剂对马铃薯产量和品质的影响[J]. 湖北农业科学, 2013, 52(19): 4597–4600.
- [31] 杜秀敏, 殷文璇, 赵彦修, 等. 植物中活性氧的产生及清除机制[J]. 生物工程学报, 2001, 17(2): 121–125.
- [32] 李妍, 张同新, 刘冉, 等. 灌水对不同糯性小麦旗叶抗氧化酶活性的影响[J]. 江苏农业科学, 2022, 50(9): 76–82.
- [33] 梁太波, 王振林, 刘娟, 等. 灌溉和旱作条件下腐殖酸复合肥对小麦生理特性及产量的影响[J]. 中国生态农业学报, 2009, 17(5): 900–904.
- [34] 张立新, 李生秀. 氮、钾、甜菜碱对水分胁迫下夏玉米叶片膜脂过氧化和保护酶活性的影响[J]. 作物学报, 2007, 33(3): 482–490.
- [35] 刘文革, 王鸣, 阎志红, 等. 冷锻炼对不同倍性西瓜幼苗 SOD、POD 活性及 MDA 含量的影响[J]. 西北植物学报, 2004, 24(4): 578–582.
- [36] 张磊, 徐胜涛, 米俊珍, 等. 植物生长营养液对不同水分条件下马铃薯生理特性及产量的影响[J]. 西南农业学报, 2016, 29(1): 59–64.