

化肥减量及配施生物有机肥对马铃薯产量、 矿质元素含量及土壤肥力的影响

杜宏辉¹, 贾学刚², 杨涛³

(1. 甘肃省渭源县园艺站 甘肃渭源 748200; 2. 甘肃田地农业科技有限责任公司 甘肃渭源 748200;
3. 甘肃省科学院生物研究所 兰州 730030)

摘要: 为研究适合马铃薯化肥减量及生物有机肥替代的最佳方案, 以马铃薯为供试材料, 探究不同化肥减量及配施不同生物有机肥用量对马铃薯产量、矿质元素含量及土壤肥力的影响。试验处理包括对照组 CK1(不施肥)、CK2(当地施肥用量)、T1(化肥减量 20%+生物有机肥 1500 kg·hm⁻²)、T2(化肥减量 30%+生物有机肥 1500 kg·hm⁻²)、T3(化肥减量 40%+生物有机肥 1500 kg·hm⁻²)、T4(化肥减量 20%+生物有机肥 2100 kg·hm⁻²)、T5(化肥减量 30%+生物有机肥 2100 kg·hm⁻²)、T6(化肥减量 40%+生物有机肥 2100 kg·hm⁻²)。结果表明, T5 处理下马铃薯株高、茎粗、土壤磷酸酶活性、过氧化氢酶活性、蔗糖酶活性、速效钾含量、速效磷含量和有机质含量在各生育期均达到最高, 且与 CK2 处理相比, 马铃薯总产量、商品薯产量、商品薯率、Ca 和 Mg 含量分别提高了 13.61%、22.46%、7.79%、18.81% 和 9.98%。综上所述, 该处理可以作为提高当地马铃薯产量、品质和改善土壤环境的最优化肥减量及配施生物有机肥组合。

关键词: 马铃薯; 生物有机肥; 产量; 矿质元素; 土壤肥力

中图分类号: S532 **文献标志码:** A **文章编号:** 1673-2871(2023)09-066-09

Effects of chemical fertilizer reduction and combined application of bio-organic fertilizer on potato yield, mineral elements and soil fertility

DU Honghui¹, JIA Xuegang², YANG Tao³

(1. Horticultural Station of Weiyuan County, Gansu Province, Weiyuan 748200, Gansu, China; 2. Gansu Field Agricultural Science and Technology Co., Ltd., Weiyuan 748200, Gansu, China; 3. Institute of Biology, Gansu Academy of Sciences, Lanzhou 730030, Gansu, China)

Abstract: In order to study the best scheme suitable for potato fertilizer reduction and bio-organic fertilizer replacement. Potato was used as test material, the effects of different reduction gradients of fertilizer and different dosages of biological organic fertilizer on potato yield, mineral element content and soil fertility were studied. The experimental treatments included control group CK1 (no fertilization), CK2 (local fertilization rate), T1 (fertilizer reduction 20%+ bio-organic fertilizer 1500 kg·hm⁻²), T2 (fertilizer reduction 30%+ bio-organic fertilizer 1500 kg·hm⁻²), and T3 (fertilizer reduction 40%+ bio-organic fertilizer 1500 kg·hm⁻²), T4 (fertilizer reduction by 20%+ bio-organic fertilizer 2100 kg·hm⁻²), T5 (fertilizer reduction by 30%+ bio-organic fertilizer 2100 kg·hm⁻²) and T6 (fertilizer reduction by 40%+ bio-organic fertilizer 2100 kg·hm⁻²). The experimental results showed that plant height, stem diameter, soil phosphatase activity, catalase activity, sucrase activity, available potassium content, available phosphorus content and organic matter content of potato under T5 treatment reached the maximum at each growth stage. Compared with CK2 treatment, total potato production, commercial potato yield, commercial potato rate, Ca and Mg contents, increased by 13.61%, 22.46%, 7.79%, 18.81% and 9.98%, respectively. Therefore, this treatment can be used as the optimal fertilizer reduction and combined application of bio-organic fertilizer to improve the yield and quality of local potato and soil environment.

Key words: Potato; Biological organic fertilizer; Yield; Mineral element; Soil fertility

收稿日期: 2022-12-14; 修回日期: 2023-05-09

基金项目: 定西市科技创新合作项目(DX2021BH05)

作者简介: 杜宏辉, 男, 高级农艺师, 主要研究方向为马铃薯生产及示范推广。E-mail: dhh245236@163.com

马铃薯是中国第四大粮食作物之一。农户为保证马铃薯产量,盲目增大化肥施用量,而化肥用量不断增加甚至过量施用会导致产品品质差、土壤养分失调、环境污染严重等问题。研究表明,过量施肥尤其是氮肥,会对作物生长造成不利影响,如根系发育受阻^[1]、群体冠层光合速率和作物生长速率显著下降^[2]、同化物运转受阻^[3]、籽粒品质下降^[4]、土壤脲酶和硝酸还原酶等功能性酶活性下降^[5]等。同时过量施氮对马铃薯出苗和植株生长均产生负面影响,并抑制块茎增大^[6],进而影响产量。研究表明,马铃薯块茎中不仅含有丰富的蛋白质、碳水化合物、维生素及少量的膳食纤维、脂肪,还含有多种矿质元素^[7]。因此,马铃薯是人体补充微量元素的最理想的原料之一^[8]。研究表明,马铃薯中矿质元素含量受肥料种类和施肥量的影响较为显著^[9],且氮和磷的配合可以促进植物对磷元素的吸收和利用^[10]。有研究发现,施用生物有机肥对土壤生物活性的维持与提升具有重要作用^[11]。与单施化肥相比,施用生物有机肥可以增加土壤中可培养微生物的数量,改善土壤微生物群系^[12];提高土壤脲酶、蔗糖酶和磷酸酶活性等^[13]。长期施用生物有机肥能够降低土壤容重、改善土壤总孔隙度、提高土壤储水

能力、增加土壤有机质含量等^[14]。研究表明,生物有机肥配施化肥既可以显著提高马铃薯产量,还可以活化土壤,降低肥料量过大造成的环境污染风险^[15]。生物有机肥替代化肥是实现作物高产、化肥资源高效利用和农田环境保护的有效途径^[16]。

目前,关于有机肥施用对马铃薯矿质营养元素影响的研究较少。因此,笔者在试验中设置化肥减施梯度与不同生物有机肥用量,研究其对马铃薯生长发育、产量、土壤肥力及马铃薯矿质营养元素等各方面的影响,系统阐述生物有机肥替代化肥的优势,同时探讨适宜的化肥减施配施生物有机肥组合,得到马铃薯减施化肥且增产的最佳施肥组合,以为定西市马铃薯产业的健康绿色可持续发展做出贡献。

1 材料与方法

1.1 试验地概况

试验于2021年4月28日至10月5日在甘肃省定西市渭源县会川镇杨庄村农户农田中进行。当地海拔2340 m,年平均降水量550 mm。供试土壤为黑麻土,肥力均匀。本试验所用生物有机肥及当地耕层(0~20 cm)土壤基本理化性质见表1。

表1 供试土壤及生物有机肥基础理化性质

Table 1 Basic physical and chemical properties of tested soil and bio-organic fertilizer

| 类别 | w(全氮)/ (g·kg ⁻¹) | w(碱解氮)/ (mg·kg ⁻¹) | w(全磷)/ (g·kg ⁻¹) | w(速效磷)/ (mg·kg ⁻¹) | w(全钾)/ (g·kg ⁻¹) | w(速效钾)/ (mg·kg ⁻¹) | pH | w(有机质)/ (g·kg ⁻¹) |
|-------|---------------------------------|-----------------------------------|---------------------------------|-----------------------------------|---------------------------------|-----------------------------------|-----|----------------------------------|
| 土壤 | 0.76 | 98.07 | 1.17 | 20.51 | 12.65 | 130.35 | 7.7 | 12.52 |
| 生物有机肥 | 20.34 | 123.32 | 18.69 | 80.28 | 13.61 | 382.56 | 7.5 | 451.88 |

1.2 材料

供试马铃薯品种为陇薯7号,由甘肃田地农业科技有限责任公司提供。供试生物有机肥(N+K₂O+P₂O₅)含量(w,后同)≥5%、有机质含量≥45%、有效活菌数≥0.2亿·g⁻¹,由甘肃大行农业科技开发有限公司生产;化肥分别用云南云天化股份有限公司生产的尿素(N含量≥46%)、山东芊芊化工科技有限公司生产的磷酸二铵(P₂O₅含量≥46%)和武汉吉业升化工有限公司生产的硫酸钾(K₂O含量≥50%)。

1.3 试验设计

以当地农户习惯施肥为对照,设3个减肥处理(减肥20%、减肥30%、减肥40%),2个生物有机肥添加量梯度:低梯度1500 kg·hm⁻²、高梯度2100 kg·hm⁻²。共设8个处理(表2),分别为:CK1(不施肥),CK2(当地施肥用量),T1(化肥减量

20%+生物有机肥1500 kg·hm⁻²),T2(化肥减量30%+生物有机肥1500 kg·hm⁻²),T3(化肥减量40%+生物有机肥1500 kg·hm⁻²),T4(化肥减量20%+生物有机肥2100 kg·hm⁻²),T5(化肥减量30%+生物有机肥2100 kg·hm⁻²),T6(化肥减量40%+生物有机肥2100 kg·hm⁻²)。试验采用黑膜单垄种植,试验处理采用随机区组设计,每个处理3次重复。将马铃薯种植在垄中间,播种深度15 cm,行距60 cm,株距30 cm,小区面积45 m²(6 m×7.5 m),播种密度60 000株·hm⁻²。2021年4月28日播种,10月5日收获。所有肥料作基肥一次性施入,具体施肥情况见表2。各处理全生育期与当地管理措施一致。

1.4 测定指标及方法

1.4.1 植株生长指标的测定 用直尺在马铃薯苗期(2021-06-07)、薯块膨大期(2021-08-05)、采收期

表2 不同处理施肥情况

Table 2 Fertilization under different treatments

| 处理 | (kg·hm ⁻²) | | | |
|-----|------------------------|-------------------------------|------------------|-------|
| | N | P ₂ O ₅ | K ₂ O | 生物有机肥 |
| CK1 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| CK2 | 200 | 150 | 150 | 0 |
| T1 | 160 | 120 | 120 | 1500 |
| T2 | 140 | 105 | 105 | 1500 |
| T3 | 120 | 90 | 90 | 1500 |
| T4 | 160 | 120 | 120 | 2100 |
| T5 | 140 | 105 | 105 | 2100 |
| T6 | 120 | 90 | 90 | 2100 |

(2021-10-03)测定株高,每小区测定30株;用游标卡尺于初花期、薯块膨大期、采收期贴近地面2 cm处测定茎粗,每小区测定30株。

1.4.2 产量的测定 在马铃薯采收期时,每小区内连续选择30株马铃薯测定总产量并折合产量。杂质率按1.5%计。换算成单株产量,再换算成1 hm²面积产量。计算方法如下^[17]:

单株产量/g=(商品薯产量+非商品薯产量)×(1-1.5%)/株数;

称量薯块划分商品薯和非商品薯,非商品薯指质量小于50 g的小薯以及病薯、烂薯、绿皮薯等薯块。

商品薯率/%=商品薯产量/总产量×100。

1.4.3 矿质元素含量的测定 各小区选取10株采收期的马铃薯,各取1/4块茎,经去皮、切碎、混合,在105℃条件下杀青15 min,转入60℃烘箱完全烘干至恒质量,磨粉,取样(每个处理取样进行3次重复)。前处理采用H₂SO₄-H₂O₂消煮法消解,采用原子吸收光谱仪^[18]测定Ca、Mg、Cu、Fe、Mn、Zn和K含量。矿物质含量为干质量状态下的含量。

1.4.4 土壤指标的测定 土壤取样:分别在初花

期、薯块膨大期和收获期采用“之”字形多点混合采样法,采集不同处理试验小区0~20 cm土壤样品,各小区选择10个采样点,混匀后利用四分法选取土样。土样自然风干后研磨、过筛,将通过0.25 mm筛的土样保存用于土壤中速效养分及有机质含量的测定,将通过1 mm筛的土样保存以测定土壤酶活性。

酶活性测定:采用3,5-二硝基水杨酸比色法测定蔗糖酶活性;采用高锰酸钾滴定法测定过氧化氢酶(catalase, CAT)活性;采用对硝基苯磷酸盐法测定磷酸酶活性;采用滴定法测定过氧化氢酶活性;采用次氯酸钠比色法测定脲酶活性^[19]。

速效养分含量测定:分别用碱解扩散法、碳酸氢钠-钼锑抗比色法、乙酸铵-火焰光度计法测定碱解氮、速效磷和速效钾含量。采用重铬酸钾容量法测定土壤有机质含量^[20]。

1.5 数据处理分析

利用Excel 2010处理数据和作图,采用SPSS 19.0对数据进行单因素方差分析,并运用Duncan's检验法进行多重比较分析。

2 结果与分析

2.1 不同处理对马铃薯农艺性状的影响

由表3可知,在整个生育期内所有施肥处理下,马铃薯株高、茎粗均显著高于CK1,在T5处理下株高、茎粗在各时期内均达到最大,其中株高较CK2处理分别提高25.76%、14.08%和12.32%,茎粗较CK2处理分别提高8.75%、16.67%和15.70%。各时期内,在同等生物有机肥施用量处理下,随着化肥用量的减少,各处理株高、茎粗均表现为先升后降的趋势,均在减肥30%处理(T2、T5)下达到最大;在施用相同化肥量

表3 不同处理对马铃薯农艺性状的影响

Table 3 Effects of different treatments on potato agronomic traits

| 处理 | 株高/cm | | | 茎粗/cm | | |
|-----|-------------|---------------|---------------|-------------|--------------|-------------|
| | 苗期 | 薯块膨大期 | 采收期 | 初花期 | 薯块膨大期 | 采收期 |
| CK1 | 4.20±0.15 b | 39.20±2.36 c | 56.20±2.65 c | 0.71±0.01 b | 0.86±0.03 c | 1.01±0.04 b |
| CK2 | 6.60±0.16 a | 47.60±2.56 ab | 70.60±3.65 ab | 0.80±0.02 a | 0.96±0.02 ab | 1.21±0.06 a |
| T1 | 6.90±0.10 a | 49.10±3.14 ab | 71.10±3.62 ab | 0.81±0.01 a | 1.02±0.04 ab | 1.28±0.07 a |
| T2 | 7.10±0.10 a | 49.60±2.54 ab | 73.40±2.87 ab | 0.83±0.01 a | 1.06±0.08 ab | 1.31±0.06 a |
| T3 | 6.00±0.18 a | 44.90±3.45 ab | 61.00±3.87 b | 0.76±0.02 a | 0.90±0.06 ab | 1.12±0.05 a |
| T4 | 7.90±0.17 a | 52.90±2.98 ab | 76.90±3.21 a | 0.86±0.01 a | 1.10±0.04 ab | 1.36±0.06 a |
| T5 | 8.30±0.12 a | 54.30±2.57 a | 79.30±3.09 a | 0.87±0.01 a | 1.12±0.05 a | 1.40±0.05 a |
| T6 | 6.20±0.16 a | 45.70±3.64 ab | 64.70±2.98 b | 0.79±0.01 a | 0.93±0.04 ab | 1.16±0.04 a |

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。

的条件下,马铃薯株高、茎粗均表现为高梯度生物有机肥用量处理高于低梯度处理。说明适当减施化肥、增施生物有机肥可以促进马铃薯株高、茎粗的增长。

2.2 不同处理对马铃薯产量的影响

由表 4 可知,各处理下,马铃薯单株产量、总产量、商品薯产量高低均表现为 T5>T4>T2>T1>CK2>T6>T3>CK1。各处理间,商品薯率高低表现为 T5>T4>T2>T1>T6>T3>CK2>CK1。T5 处理下马铃薯单株产量、总产量、商品薯产量和商品薯率

均达到最高,较 CK2 分别提高 13.61%、13.61%、22.46%和 7.79%。在施用相同生物有机肥量处理下,随着化肥用量的减少,马铃薯单株产量、总产量、商品薯产量和商品薯率均表现为先升后降的趋势,均在减肥 30%处理(T2、T5)下表现最优。在相同化肥施用量处理下,马铃薯单株产量、总产量、商品薯产量和商品薯率均表现为高梯度生物有机肥用量处理高于低梯度处理。表明适当减施化肥、增施生物有机肥可以提高马铃薯产量及商品薯率。

表 4 不同处理对马铃薯产量的影响

Table 4 Effects of different treatments on potato yield

| 处理 | 单株产量/g | 总产量/(kg·hm ²) | 商品薯产量/(kg·hm ²) | 商品薯率/% |
|-----|----------------|---------------------------|-----------------------------|--------|
| CK1 | 412.00±7.35 c | 24 720±441.09 c | 11 371.20±313.65 c | 46.00 |
| CK2 | 626.80±6.97 ab | 37 608±418.41 ab | 28 958.16±378.94 ab | 77.00 |
| T1 | 645.00±7.56 ab | 38 700±453.48 ab | 30 495.60±365.62 ab | 78.80 |
| T2 | 670.50±9.15 ab | 40 230±549.17 ab | 32 023.08±338.35 ab | 79.60 |
| T3 | 543.90±7.42 4b | 32 634±445.15 b | 25 389.25±355.91 b | 77.80 |
| T4 | 685.50±8.55 ab | 41 130±513.00 ab | 33 191.91±382.30 a | 80.70 |
| T5 | 712.10±5.87 a | 42 726±352.23 a | 35 462.58±406.98 a | 83.00 |
| T6 | 584.20±5.21 b | 35 052±312.31 b | 27 340.56±400.31 b | 78.00 |

2.3 不同处理对马铃薯矿质元素含量的影响

由表 5 可知,各处理下马铃薯矿质元素含量均高于 CK1 处理。T5 处理下 Ca、Mg 含量最高,分别较 CK2 处理提高 18.81%、9.98%。在施用相同生物有机肥量处理下,随着化肥用量的减少,马铃薯 Ca、Mg 含量均呈先升后降趋势;施用生物有机肥处理下 Ca、Mg 含量均高于 CK2。在施用相同生物有机

肥量处理下,随着化肥用量的减少,马铃薯块茎 Cu、Fe、K、Mn、Zn 含量均表现为降低趋势。T4 处理下 Cu、Fe、K、Mn、Zn 含量均达到最大,分别较 CK2 提升 16.50%、10.64%、10.52%、5.71%、12.51%。在相同化肥施用量处理下,马铃薯矿质元素含量均表现为高梯度生物有机肥用量处理高于低梯度处理,表明增施生物有机肥可以提高马铃薯块茎矿质元素含量。

表 5 不同处理对马铃薯矿质元素含量的影响

Table 5 Effects of different treatments on mineral element content of potato

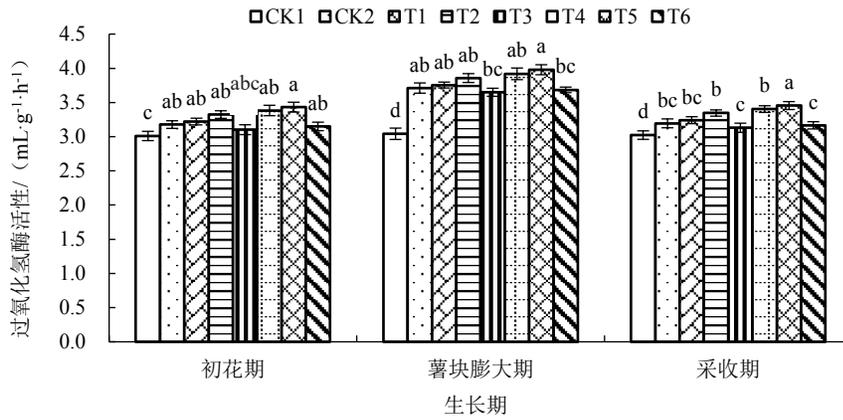
(mg·kg⁻¹)

| 处理 | w(Ca) | w(Cu) | w(Fe) | w(K) | w(Mg) | w(Mn) | w(Zn) |
|-----|-----------------|--------------|---------------|-------------------|-----------------|--------------|--------------|
| CK1 | 112.20±8.66 b | 2.56±0.36 b | 11.60±0.73 c | 1 852.32±83.03 b | 321.05±2.25 abc | 3.56±0.13 c | 18.02±1.25 b |
| CK2 | 120.89±6.48 ab | 3.09±0.19 ab | 16.83±0.86 ab | 2 352.32±77.56 a | 333.20±2.514 ab | 4.38±0.17 ab | 22.55±0.98 a |
| T1 | 125.07±9.35 ab | 3.25±0.32 ab | 18.09±1.01 a | 2 499.47±90.62 a | 356.53±3.81 ab | 4.24±0.15 ab | 23.97±0.99 a |
| T2 | 126.90±10.03 ab | 3.02±0.22 ab | 16.69±0.26 ab | 2 465.66±88.72 a | 358.88±2.53 ab | 4.18±0.11 ab | 22.74±1.03 a |
| T3 | 123.65±6.78 b | 2.86±0.43 b | 14.44±0.75 b | 2 303.47±65.39 a | 335.02±4.05 ab | 3.90±0.08 b | 21.33±1.22 a |
| T4 | 133.07±6.68 ab | 3.60±0.25 a | 18.62±0.69 a | 2 599.68±103.31 a | 366.08±3.65 a | 4.63±0.14 a | 25.37±2.03 a |
| T5 | 143.63±5.95 a | 3.55±0.18 a | 17.03±0.65 ab | 2 505.27±120.13 a | 366.44±4.53 a | 4.46±0.10 ab | 23.65±1.34 a |
| T6 | 130.30±10.15 ab | 3.02±0.13 ab | 15.36±0.78 b | 2 436.84±82.36 a | 355.32±5.03 ab | 4.02±0.09 b | 22.08±1.58 a |

2.4 不同处理对马铃薯土壤酶活性的影响

2.4.1 不同处理对马铃薯土壤过氧化氢酶活性的影响 由图 1 可知,从初花期到采收期各处理土壤过氧化氢酶活性均呈先升后降趋势。各时期内土

壤过氧化氢酶活性均表现为 T5>T4>T2>T1>CK2>T6>T3>CK1,除初花期 T3 处理与 CK1 无显著差异外,其他各配施生物有机肥处理土壤过氧化氢酶活性均显著高于 CK1;T5 处理较 CK2 在初花期和薯



注:同一生育期不同小写字母表示在 0.05 水平差异显著。下同。

图 1 不同处理对马铃薯土壤过氧化氢酶活性的影响

Fig. 1 Effects of different treatments on catalase activity in potato soil

块膨大期分别提高 7.86%、7.28%;在采收期显著提高 8.13%。各时期内,在相同生物有机肥施用量处理下,随着化肥用量的减少,土壤过氧化氢酶活性呈先升后降的趋势,均在减肥 30%处理(T2、T5)下最优;在相同化肥施用量处理下,土壤过氧化氢酶活性表现为高梯度生物有机肥用量处理高于低梯度处理。

2.4.2 不同处理对马铃薯土壤磷酸酶活性的影响 由图 2 可知,从初花期到采收期各处理土壤磷酸酶活性均呈现先升后降趋势。各时期

内,所有施肥处理土壤磷酸酶活性均显著高于 CK1。其中,T5 处理在初花期、薯块膨大期和采收期土壤磷酸酶活性均达到最高,较 CK2 在初花期提高 6.32%,在薯块膨大期和采收期分别显著提高 9.50%和 6.21%。在相同生物有机肥施用量条件下,随着化肥用量的减少,土壤磷酸酶活性呈先升后降的趋势,均在减肥 30%处理(T2、T5)下最优;在相同化肥施用量处理下,土壤磷酸酶活性表现为高梯度生物有机肥用量处理高于

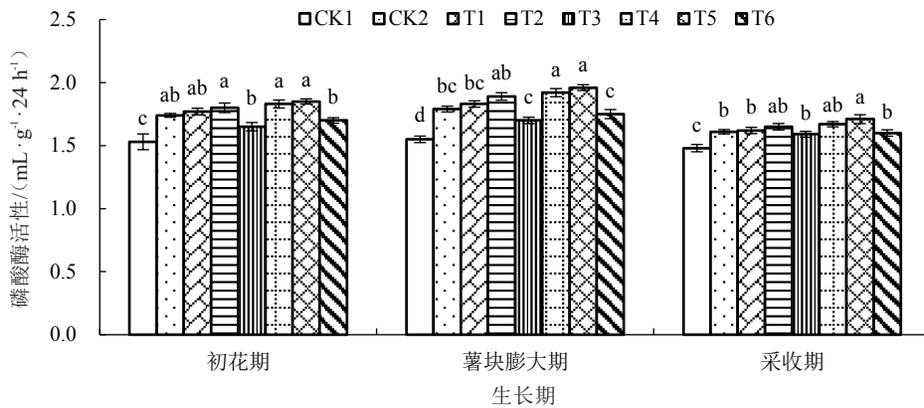


图 2 不同处理对马铃薯土壤磷酸酶活性的影响

Fig. 2 Effects of different treatments on soil phosphatase activity of potato

低梯度处理。

2.4.3 不同处理对马铃薯土壤脲酶活性的影响 由图 3 可知,土壤脲酶活性从初花期到采收期各处理均呈现先升后降趋势,且各时期内土壤脲酶活性均表现为 T4>T5>T1>CK2>T2>T6>T3>CK1。各时期内,所有配施生物有机肥处理下土壤脲酶活性均显著高于 CK1。在相同生物有机肥施用量处理下,随着化肥用量减少,土壤脲酶活性呈降低趋势;在相同化肥施用量处理下,土壤脲酶活性表现为高梯

度生物有机肥用量处理高于低梯度处理。

2.4.4 不同处理对马铃薯土壤蔗糖酶活性的影响 由图 4 可知,在整个生育期内各处理土壤蔗糖酶活性均呈先升后降趋势,且各配施生物有机肥处理土壤磷酸酶活性均显著高于 CK1。在初花期、薯块膨大期和采收期 T5 处理土壤蔗糖酶活性均达到最高,较 CK1 分别显著提高 25.98%、36.47%、26.28%,较 CK2 分别显著提高 7.40%、11.87%、5.05%。在相同生物有机肥施用量处理下,随着化

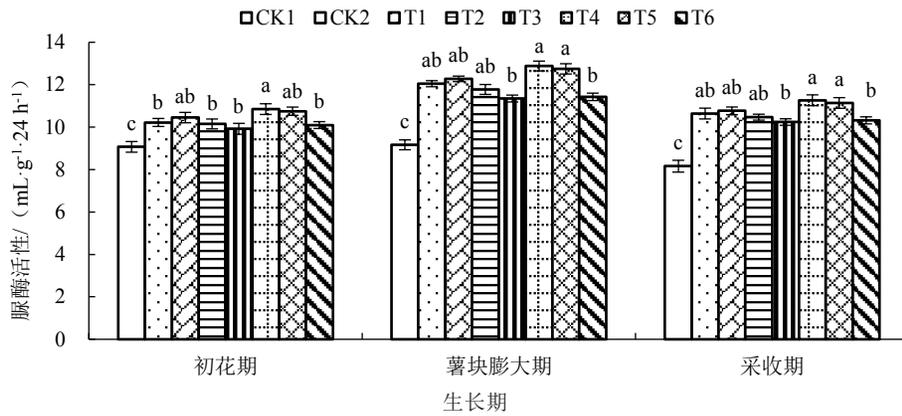


图3 不同处理对马铃薯土壤脲酶活性的影响

Fig. 3 Effects of different treatments on urease activity in potato soil

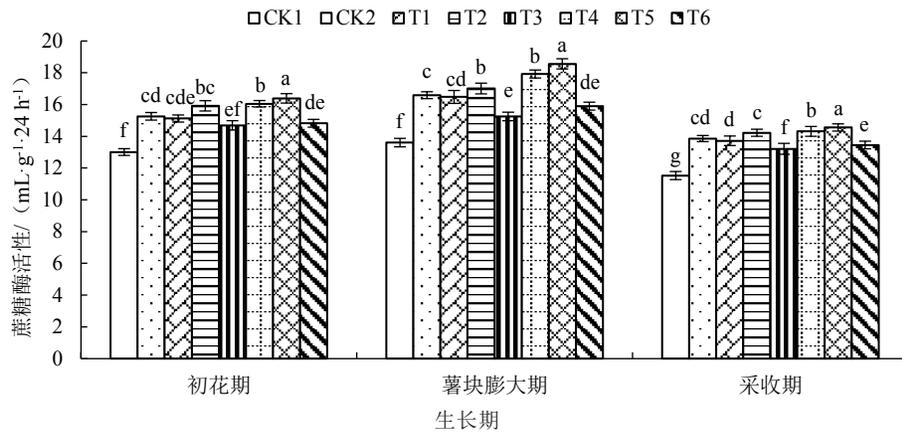


图4 不同处理对马铃薯土壤蔗糖酶活性的影响

Fig. 4 Effects of different treatments on soil sucrase activity of potato

肥用量的减少,土壤蔗糖酶活性呈先升后降趋势,均在减肥30%处理(T2、T5)下最高;在相同化肥施用量处理下,土壤蔗糖酶活性表现为高梯度生物有机肥用量处理高于低梯度处理。

2.5 不同处理对马铃薯土壤有机质含量的影响

由图5可知,从初花期到采收期,各处理土壤

有机质含量均呈先升后降趋势,即薯块膨大期土壤有机质含量达到最高。各时期内土壤有机质含量均表现为 T5>T4>T2>T1>T6>T3>CK2>CK1,且各配施生物有机肥处理的土壤有机质含量均显著高于CK1。T5处理下土壤有机质含量在各生育期较CK2分别显著提高28.92%、33.06%和26.35%。在

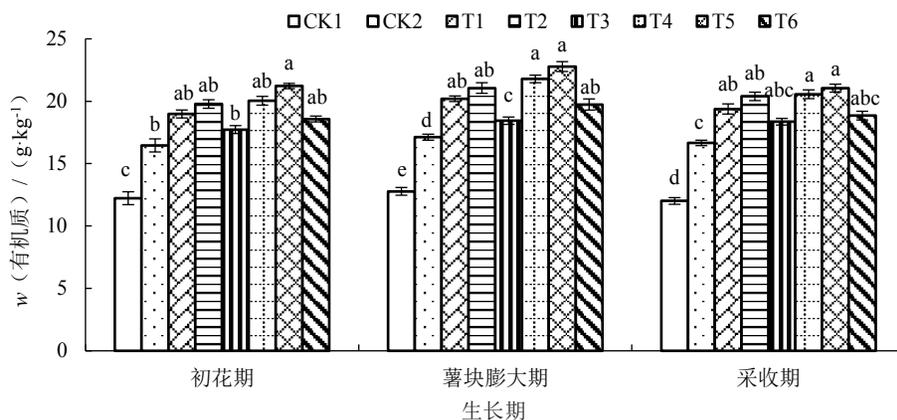


图5 不同处理对马铃薯土壤有机质含量的影响

Fig. 5 Effects of different treatments on soil organic matter content of potato

相同化肥施用量处理下,土壤有机质含量表现为高梯度生物有机肥用量处理高于低梯度处理;在相同生物有机肥施用量处理下,随着化肥用量的减少,土壤有机质含量表现先升后降的趋势,均在减肥30%处理(T2、T5)下最高。

2.6 不同处理对马铃薯土壤速效养分含量的影响

由表6可知,从初花期到采收期各处理土壤碱解氮、速效磷和速效钾含量均呈现先升后降的趋势,所有施肥处理均显著高于CK1。T5处理下土壤速效磷、速效钾含量在各时期均达到最

高,其中速效磷含量较CK2分别提高9.66%、9.76%和5.47%;速效钾含量较CK2分别提高12.75%、18.91%、21.77%;T4处理下碱解氮含量在各时期均达到最高,分别较CK2显著提高13.64%、15.63%、12.08%,各时期T5处理土壤碱解氮含量与T4处理无显著差异。在相同生物有机肥施用量处理下,随着化肥用量的减少,土壤速效磷、速效钾含量均呈先升后降趋势,均在减肥30%处理(T2、T5)下最优,而土壤碱解氮含量表现为降低趋势;在相同化肥施用量处理下,土壤碱解氮、速效磷、速效钾含量均表现为

表6 不同处理对马铃薯土壤速效养分含量的影响

Table 6 Effects of different treatments on the content of available nutrients in potato soil

(mg·kg⁻¹)

| 处理 | w(碱解氮) | | | w(速效磷) | | | w(速效钾) | | |
|-----|--------------|---------------|---------------|---------------|----------------|---------------|---------------|----------------|----------------|
| | 初花期 | 薯块膨大期 | 采收期 | 初花期 | 薯块膨大期 | 采收期 | 初花期 | 薯块膨大期 | 采收期 |
| CK1 | 66.28±1.73 c | 66.62±2.08 d | 64.62±1.88 d | 52.42±1.78 d | 56.58±1.47 d | 49.03±1.37 c | 113.33±2.97 f | 121.03±2.45 e | 108.23±3.07 c |
| CK2 | 86.74±2.58 b | 111.87±2.88 b | 75.80±2.04 b | 64.58±1.66 bc | 71.61±2.03 abc | 67.81±1.87 a | 167.33±3.34 d | 213.33±3.24 b | 149.01±2.90 ab |
| T1 | 89.02±2.78 b | 116.00±3.23 b | 78.86±2.11 b | 63.20±1.87 bc | 70.07±1.97 bc | 67.60±1.68 ab | 159.00±3.36 d | 209.67±4.65 c | 147.00±2.99 ab |
| T2 | 85.42±1.93 b | 105.00±2.98 b | 75.32±2.57 bc | 66.82±1.65 b | 74.12±1.67 ab | 69.61±1.97 a | 173.00±4.64 c | 224.33±3.88 b | 162.00±3.27 ab |
| T3 | 79.91±2.06 b | 96.11±2.57 c | 70.57±2.08 c | 59.29±1.22 c | 65.68±1.63 c | 62.52±1.65 b | 147.33±3.07 e | 194.37±2.42 d | 139.67±3.54 ab |
| T4 | 98.57±2.68 a | 129.35±2.99 a | 84.96±2.45 a | 68.39±2.01 ab | 75.88±1.90 a | 70.35±1.77 a | 179.00±4.56 b | 249.33±3.35 ab | 178.00±2.78 a |
| T5 | 98.32±2.54 a | 127.74±3.13 a | 83.95±2.68 a | 70.82±1.09 a | 78.60±2.18 a | 71.52±1.86 a | 188.67±5.78 a | 253.67±3.28 a | 181.45±3.67 a |
| T6 | 82.48±2.35 b | 102.53±3.04 c | 73.64±2.75 bc | 62.99±1.55 bc | 69.83±1.50 bc | 66.01±1.58 ab | 153.67±3.33 e | 199.65±4.75 c | 144.33±2.77 ab |

高梯度生物有机肥用量处理高于低梯度处理。

3 讨论与结论

有机无机肥料适当的配施,既适宜作物生长,能增加番茄产量,又能增加土壤养分含量,维持土壤生产力^[21],更能减少化肥施用量。柏琼芝等^[22]研究表明,常规施肥条件下减施10%化肥且配施生物有机肥可以显著提高马铃薯单株质量、大中薯质量和商品薯率。高怡安等^[23]也认为,适量增施生物有机肥可提高马铃薯的株高、分枝数和茎粗,但生物有机肥比例过高或过低均不利于马铃薯的生长发育。笔者的试验同样得出,各配施生物有机肥处理的马铃薯商品薯率均高于CK2(当地施肥)。在相同化肥用量处理下,马铃薯株高、茎粗、产量、商品薯率均表现为高梯度生物有机肥用量处理高于低梯度处理。在相同生物有机肥用量处理下,马铃薯株高、茎粗、产量、商品薯率均表现为减肥30%处理最大(高)。同时得出,T5(化肥减量30%+生物有机肥2100 kg·hm⁻²)处理下马铃薯单株产量、总产量、商品薯产量和商品薯率均达到最高,较CK2分别提升13.61%、13.61%、22.46%和7.79%。其原因可能是化肥配施生物有机肥显著增加了土壤中放

线菌、假单胞菌、伯克氏菌和芽孢杆菌等的含量,提高植物获取营养物质的效率^[24],同时改善了土壤生物学性状,养分释放更能满足马铃薯生长对养分的需求^[15],从而促进马铃薯生长,提高了产量。

矿质元素对植物的生长发育影响极大。铁、锌、锰、铜等微量元素是植物生长所必需的营养元素,他们直接参与光合、呼吸等重要代谢过程,极大地影响作物生长发育、产量和品质的形成^[25]。施用有机肥可以提高土壤酶活性,土壤酶参与土壤有机物和营养元素的转化、腐殖质的合成和分解,促进难溶养分的释放,从而增强矿质养分的有效性^[26]。李水祥等^[27]研究得出,有机肥替代20%化肥有利于促进果实钾、钙、锌、硼元素含量的提高。茹朝等^[28]研究化肥减量配施生物有机肥对露地大白菜品质的影响,发现有机肥施用处理较常规施肥处理铜、锰、铁、锌元素含量有显著提升。笔者的试验同样得出,T5处理下马铃薯钙、铜、铁、钾、镁、锰、锌元素含量高于CK2,且在相同化肥施用量的条件下,增加生物有机肥用量,可以促进马铃薯对矿质元素的吸收。

土壤酶活性可以广泛地应用于评价土壤肥力及各种农业措施和施肥的效果。有研究表明,生物

有机肥配施可显著增强土壤蔗糖酶、碱性磷酸酶和脲酶的活性^[29-30]。李建欣等^[31]研究表明,随着菌渣有机肥施用量的增加,过氧化氢酶活性、蔗糖酶活性和脲酶活性逐渐增强。生物有机肥替代部分无机肥可显著提高马铃薯根际土壤微生物群落功能多样性^[32]。生物有机肥对提高土壤有机质含量有显著作用,且表现为随着施用量增加而增加的趋势^[33]。本研究同样得出,除初花期土壤过氧化氢酶活性 T3 处理与 CK1 无显著差异外,其他施肥处理在 3 个时期土壤磷酸酶、脲酶、过氧化氢酶和蔗糖酶活性以及有机质含量均显著高于 CK1,且随着马铃薯生育期的延长呈先升高后降低趋势,在薯块膨大期达到最高。在相同化肥施用量条件下,高梯度生物有机肥用量处理下土壤磷酸酶、脲酶、过氧化氢酶和蔗糖酶活性以及有机质含量均高于低梯度生物有机肥用量处理。各时期内,T5 处理下土壤磷酸酶活性、过氧化氢酶活性、蔗糖酶活性和有机质含量均高于 CK2 且在各处理中均为最高。其原因:一是增施生物有机肥改变了土壤理化性状,使土壤疏松多孔,有利于土壤中水分和养分的转运,同时也改善了土壤生物性状,增加了土壤微生物和酶活性^[34];二是生物有机肥所包含的微生物能够分泌一定数量的酶从而增加土壤酶的数量,同时生物有机肥中大量有机质和微量元素为微生物生命活动提供养分和能量,极大限度增加了土壤中微生物种群和数量^[35],而土壤酶活性与土壤微生物数量呈正相关关系^[36],因此土壤磷酸酶活性、过氧化氢酶活性、蔗糖酶活性增强,以及有机质含量提高。本试验结果得出,T1、T2 处理和 T4、T5 处理有机质含量分别高于 T3 处理和 T6 处理,一是因为化肥和生物有机肥配合施用产生了一定的互作效应,使得土壤养分之间相互协调^[37],T1、T2 处理和 T4、T5 处理分别较 T3 处理和 T6 处理互作效应更好;二是因为化肥减量与生物有机肥配施时,无机肥能够较快地释放养分,及时补充土壤养分,增加土壤有机质含量^[38],T1、T2 处理和 T4、T5 处理无机肥用量分别高于 T3 处理和 T6 处理,可以更快地补充土壤养分及增加土壤有机质含量。

土壤过氧化氢酶、脲酶、磷酸酶和蔗糖酶活性与土壤养分含量间存在显著相关关系,即土壤酶活性与土壤养分含量间有密不可分的联系^[39]。本研究结果表明,在各时期内,T5 处理土壤速效钾含量、速效磷含量、碱解氮含量均高于 CK2,且显著高于 CK1(不施肥),其土壤速效磷、速效钾含量在各处理

中最高。在各生育期内,施肥处理下土壤碱解氮含量、速效磷含量、速效钾含量均显著高于 CK1;随马铃薯生育期的延长均表现为先升后降的趋势,均在薯块膨大期达到最高,与相关土壤酶活性变化趋势一致。各时期内,在相同生物有机肥施用量处理下,化肥减量 30% 处理下土壤速效钾含量、速效磷含量最高。适宜的化肥减量配施生物有机肥,可以增加土壤中的速效养分含量。原因可能是,生物有机肥中含有大量有机物质及多种活菌,微生物在生命活动中又不断地促进土壤缓效状态的氮、磷、钾释放出来,进而改善土壤微生态环境,提高土壤速效养分含量^[40],与郭龙等^[41]研究结果一致。

综上,T5(化肥减量 30%+生物有机肥 2100 kg·hm⁻²)处理为当地种植马铃薯化肥减量及配施生物有机肥的最优配比。可以减施化肥、提升产量,促进马铃薯生长及对矿质元素的吸收,提高土壤酶活性,增加土壤速效养分和有机质含量。

参考文献

- [1] 谢志良,田长彦,卞卫国,等.施氮对棉花苗期根系分布和养分吸收的影响[J].干旱区研究,2010,27(3):374-379.
- [2] 赵风华,马军花,欧阳竹.过量施氮对冬小麦生产力的影响[J].植物生态学报,2012,36(10):1075-1081.
- [3] 宁运旺,马洪波,张辉,等.甘薯源库关系建立、发展和平衡对氮肥用量的响应[J].作物学报,2015,41(3):432-439.
- [4] 刘海龙,何萍,金继运,等.施氮对高淀粉玉米和普通玉米子粒可溶性糖和淀粉积累的影响[J].植物营养与肥料学报,2009,15(3):493-500.
- [5] 隽英华,孙文涛,韩晓日,等.春玉米土壤矿质氮累积及酶活性对施氮的响应[J].植物营养与肥料学报,2014,20(6):1368-1377.
- [6] 张小静,陈富,袁安明,等.氮磷钾施肥水平对西北干旱区马铃薯生长及产量的影响[J].中国马铃薯,2013,27(4):222-225.
- [7] 吕巨智,染和,姜建初.马铃薯的营养成分及保健价值[J].中国食物与营养,2009(3):51-52.
- [8] WHITE P J, BROADLEY M R. Biofortification of crops with seven mineral elements often lacking in human diets: iron, zinc, copper, calcium, magnesium, selenium and iodine[J]. New Phytologist, 2009, 182(1): 49-84.
- [9] 杨丽辉,蒙美莲,陈有君,等.肥料配施对马铃薯产量和品质的影响[J].中国农学通报,2013,29(12):136-140.
- [10] 张西露,刘明月,伍壮生,等.马铃薯对氮、磷、钾的吸收及分配规律研究进展[J].中国马铃薯,2010,24(4):237-241.
- [11] PAN G X, ZHOU P P, LI Z, et al. Combined inorganic/organic fertilization enhances N efficiency and increases rice productivity through organic carbon accumulation in a rice paddy from the Tai Lake region, China[J]. Agriculture Ecosystems & Environment, 2009, 131(3/4):274-280.
- [12] 李双喜,沈其荣,郑宪清,等.施用微生物有机肥对连作条件下西瓜的生物效应及土壤生物性状的影响[J].中国生态农业学

- 报,2012,20(2):169-174.
- [13] 李锐,陶瑞,王丹,等.减氮配施有机肥对滴灌棉田土壤生物学性状与团聚体特性的影响[J].应用生态学报,2017,28(10):3297-3304.
- [14] 曲成闯,陈效民,张志龙,等.生物有机肥提高设施土壤生产力减缓黄瓜连作障碍的机制[J].植物营养与肥料学报,2019,25(5):814-823.
- [15] 史书强,赵颖,何志刚,等.生物有机肥配施化肥对马铃薯土壤养分运移及产量的影响[J].江苏农业科学,2016,44(6):156-157.
- [16] 朱兆良,金继运.保障我国粮食安全的肥料问题[J].植物营养与肥料学报,2013,19(2):259-273.
- [17] 韩亚楠,高中强,杨元军,等.减量配施腐植酸肥对连作马铃薯及土壤的影响[J].中国马铃薯,2021,35(1):30-37.
- [18] 蔡艳荣,刘媛,李玲玲,等.原子吸收光谱法测定水果中10种元素含量及分布[J].卫生研究,2011,40(3):361-364.
- [19] 关松荫.土壤酶及其研究法[M].北京:农业出版社,1986:22-46.
- [20] 鲍士旦.土壤农化分析[M].北京:中国农业出版社,2001:26-105.
- [21] 宋雅欣,赵同科,安志装,等.有机无机肥料配施对设施番茄产量及土壤养分含量的影响[J].华北农学报,2021,36(S1):306-311.
- [22] 柏琼芝,肖石江,王晓瑞,等.化肥减量配施生物有机肥对秋马铃薯产量的影响[J].土壤与作物,2019,8(2):158-165.
- [23] 高怡安,程万莉,张文明,等.有机肥替代部分化肥对甘肃省中部沿黄灌区马铃薯产量、土壤矿质氮水平及氮肥效率的影响[J].甘肃农业大学学报,2016,51(2):54-60.
- [24] 张涛,刘勇鹏,朱广权,等.定位化肥牛粪配施对设施蔬菜产量和土壤肥力的影响[J].中国土壤与肥料,2021(1):161-168.
- [25] 许亚芳,王云,任帅帅,等.微量元素喷施对冬小麦籽粒产量和品质的影响[J].中国农学通报,2021,37(12):10-17.
- [26] 关松荫.土壤酶与土壤肥力[J].土壤通报,1980(6):41-44.
- [27] 李水祥,余文琴,吴世涛,等.有机肥替代部分化肥改善‘三红蜜柚’树体营养及果实品质[J].热带作物学报,2020,41(4):649-654.
- [28] 茹朝,郁继华,武玥,等.化肥减量配施生物有机肥对露地大白菜产量及品质的影响[J].浙江农业学报,2022,34(8):1626-1637.
- [29] 朱利霞,曹萌萌,桑成琛,等.生物有机肥替代化肥对玉米土壤肥力及酶活性的影响[J].四川农业大学学报,2022,40(1):67-72.
- [30] ZHANG L L, CHEN L J, WU ZH J, et al. Oxidoreductases activity and kinetic parameters of brown earth affected by long-term different fertilization systems[J]. Chinese Journal of Soil Science, 2008, 39(4): 845-848.
- [31] 李建欣,葛桂民,申爱民.菌渣有机肥对设施土壤微生物、酶活性及黄瓜品质和产量的影响[J].中国瓜菜,2022,35(8):57-61.
- [32] 程万莉,刘星,高怡安,等.有机肥替代部分化肥对马铃薯根际土壤微生物群落功能多样性的影响[J].土壤通报,2015,46(6):1459-1465.
- [33] 龚雪蛟,秦琳,刘飞,等.有机类肥料对土壤养分含量的影响[J].应用生态学报,2020,31(4):1403-1416.
- [34] 何万春,李鹏程,张娟宁,等.有机肥氮替代化肥氮对马铃薯干物质积累与分配的影响[J].中国农业文摘(农业工程),2021,33(4):41-45.
- [35] 胡可,李华兴,卢维盛,等.生物有机肥对土壤微生物活性的影响[J].中国生态农业学报,2010,18(2):303-306.
- [36] 周玲玲,孟亚利,王友华,等.盐胁迫对棉田土壤微生物数量与酶活性的影响[J].水土保持学报,2010,24(2):241-246.
- [37] 李艳平,刘国顺,丁松爽,等.混合有机肥用量对烤烟根系活力及根际土壤生物特性的影响[J].中国烟草科学,2016,37(1):32-36.
- [38] 刘亚军,王文静,李敏,等.无机肥与有机肥配施对甘薯土壤养分变化及微生物碳代谢功能的影响[J].河南农业科学,2022,51(7):75-84.
- [39] HU W G, JIAO Z F, WU F S, et al. Long-term effects of fertilizer on soil enzymatic activity of wheat field soil in Loess Plateau, China[J]. Ecotoxicology, 2014, 23(10): 2069-2080.
- [40] 李星星,张胜,蒙美莲,等.F01复合微生物菌剂对马铃薯生长、产量和品质的影响[J].北方农业学报,2019,47(5):48-53.
- [41] 郭龙,李陈,刘佩诗,等.牛粪有机肥替代化肥对茶叶产量、品质及茶园土壤肥力的影响[J].水土保持学报,2021,35(6):264-269.