

引用格式:

康世东, 黄艳岚, 张超凡, 张亚, 董芳, 董文, 项伟, 张道微, 刘红梅. 3种功能型肥料配施对甘薯地连作障碍的缓解作用[J]. 湖南农业大学学报(自然科学版), 2025, 51(5): 66–74.

KANG S D, HUANG Y L, ZHANG C F, ZHANG Y, DONG F, DONG W, XIANG W, ZHANG D W, LIU H M. Mitigation of continuous cropping obstacles in sweet potato fields with combined application of three functional fertilizers[J]. Journal of Hunan Agricultural University(Natural Sciences), 2025, 51(5): 66–74.

投稿网址: <http://xb.hunau.edu.cn>



3种功能型肥料配施对甘薯地连作障碍的缓解作用

康世东^{1,2}, 黄艳岚^{2,3}, 张超凡^{2,3}, 张亚^{2,3}, 董芳^{2,3}, 董文^{2,3}, 项伟^{2,3}, 张道微^{2,3}, 刘红梅^{1,3*}

(1. 湖南农业大学农学院, 湖南 长沙 410128; 2. 湖南省作物研究所, 湖南 长沙 410125; 3. 岳麓山实验室, 湖南 长沙 410128)

摘要: 为缓解湖南省甘薯主产区存在的连作障碍, 以湖南省典型的酸壤型连作障碍地为试验区, 以‘湘薯203’为试验品种, 设置甘薯专用复合肥、微生物菌肥、有机肥共3种肥料因素处理, 单个因素设置0.0倍、0.5倍、1.0倍、2.0倍推荐施肥量共4个施肥水平, 进行单一肥料及 $L_{16}(4^3)$ 正交肥料配施试验, 对比分析各试验小区鲜薯产量、干物质积累量、土壤养分、经济效益的差异。结果表明: 单一肥料试验中, 专用复合肥增产效果最好, 有机肥次之, 微生物菌肥效果最差, 其中施用 600 kg/hm^2 专用复合肥的实际鲜薯产量可达 28.17 t/hm^2 , 相同肥效施肥量的有机肥、微生物菌肥处理小区的产量与之接近; 正交试验的不同混施处理中, 以有机肥等肥效混施专用复合肥的增产效果最好, 在施用 600 kg/hm^2 专用复合肥的基础上增施 $1\ 500\text{ kg/hm}^2$ 有机肥的实际鲜薯产量最高, 达 36.25 t/hm^2 , 较施用 300 kg/hm^2 专用复合肥+ 750 kg/hm^2 有机肥的处理增产22.42%, 较单独施用专用复合肥和有机肥时分别增产28.68%、31.87%; 单一肥料试验中, 3种肥料均在推荐施肥用量下干物质积累量达到最大, 肥料混施试验在 600 kg/hm^2 专用复合肥+ 750 kg/hm^2 微生物菌肥+ $3\ 000\text{ kg/hm}^2$ 有机肥下干物质积累量达到最大; 施肥对土壤养分含量影响大, 主要表现为专用复合肥显著增加土壤速效养分, 有机肥显著提升土壤有机质含量, 但微生物菌肥对土壤养分影响不大; 600 kg/hm^2 专用复合肥+ $1\ 500\text{ kg/hm}^2$ 有机肥处理获得的经济效益最高, 为 $20\ 620\text{ 元/hm}^2$ 。综上, 600 kg/hm^2 专用复合肥+ $1\ 500\text{ kg/hm}^2$ 有机肥处理为缓解连作障碍的较优施肥方案。

关键词: 甘薯; 功能型肥料; 专用复合肥; 微生物菌肥; 有机肥; 连作障碍; 产量; 地力提升

中图分类号: S531.062

文献标志码: A

文章编号: 1007-1032(2025)05-0066-09

Mitigation of continuous cropping obstacles in sweet potato fields with combined application of three functional fertilizers

KANG Shidong^{1,2}, HUANG Yanlan^{2,3}, ZHANG Chaofan^{2,3}, ZHANG Ya^{2,3}, DONG Fang^{2,3},
DONG Wen^{2,3}, XIANG Wei^{2,3}, ZHANG Daowei^{2,3}, LIU Hongmei^{1,3*}

(1. College of Agronomy, Hunan Agricultural University, Changsha, Hunan 410128, China; 2. Crop Research Institute of Hunan Province, Changsha, Hunan 410125, China; 3. Yuelushan Laboratory, Changsha, Hunan 410128, China)

Abstract: To alleviate the continuous cropping obstacle in the main sweet potato production areas of Hunan Province, the typical acid soil continuous cropping obstacle land in Hunan Province was selected as the test area and ‘Xiangshu 203’ was selected as the test variety. Three fertilizer factor treatments of special compound fertilizer for sweet potato, microbial fertilizer, and organic fertilizer were set up. For each individual factor, four fertilization levels of 0.0 times, 0.5 times, 1.0 times,

收稿日期: 2024-12-16

修回日期: 2025-03-12

基金项目: 长沙市自然科学基金项目(kq2208156); 湖南省农业科技创新资金项目(2024CX032); 湖南省重点研发项目(2023NK2028-02); 国家甘薯产业技术体系项目(CARS-10-SYZ22)

作者简介: 康世东(2001—), 男, 湖南娄底人, 硕士研究生, 主要从事甘薯高产栽培研究, ksd15173868431@163.com; *通信作者, 刘红梅, 博士, 副教授, 主要从事作物生理与分子生物学、作物品质研究, liuhongmei@hunau.edu.cn

and 2.0 times the recommended fertilization amount were set up, respectively. Single-fertilizer experiments and $L_{16}(4^3)$ orthogonal fertilizer combined application tests were carried out to compare and analyze the differences in fresh sweet potato yield, dry matter accumulation, soil nutrients, and economic benefits in each test area. The results showed that in the single fertilizer test, the special compound fertilizer produced the highest sweet potato yield, followed by organic fertilizer, while microbial fertilizer demonstrated the lowest yield increase. Applying 600 kg/hm^2 of special compound fertilizer yielded 28.17 t/hm^2 of the actual fresh sweet potato, and the yields of the plots treated with organic fertilizer and microbial fertilizer at the same nutrient-equivalent application rate were close to this level. In the mixed-fertilizer orthogonal tests, the combining organic and compound fertilizers at an equal fertilizer-efficiency ratio produced the greatest yield increase. The highest fresh sweet potato yield (36.25 t/hm^2) occurred with $1\ 500 \text{ kg/hm}^2$ of organic fertilizer plus 600 kg/hm^2 of special compound fertilizer, exceeding the 300 kg/hm^2 of special compound fertilizer + 750 kg/hm^2 of organic fertilizer treatment by 22.43%, and the individual applications of special compound fertilizer and organic fertilizer by 28.69% and 31.87%, respectively. In the single-fertilizer tests, the dry matter accumulations of the three fertilizers peaked under the recommended fertilization amounts. In the fertilizer mixed application tests, the dry matter accumulation peaked under the treatment of 600 kg/hm^2 of special compound fertilizer + 750 kg/hm^2 of microbial fertilizer + $3\ 000 \text{ kg/hm}^2$ of organic fertilizer. Fertilization had a great influence on soil nutrient contents, mainly manifested as special compound fertilizer significantly increased soil available nutrient contents, organic fertilizer significantly increased soil organic matter content, but microbial fertilizer had little influence on soil nutrient contents. The greatest economic return ($20\ 620 \text{ yuan/hm}^2$) was achieved with 600 kg/hm^2 of special compound fertilizer + $1\ 500 \text{ kg/hm}^2$ of organic fertilizer. In conclusion, the relatively optimal fertilization strategy to alleviate continuous cropping obstacles was 600 kg/hm^2 of special compound fertilizer + $1\ 500 \text{ kg/hm}^2$ of organic fertilizer.

Keywords: sweet potato; functional fertilizer; special compound fertilizer; microbial fertilizer; organic fertilizer; continuous cropping obstacles; yield; soil fertility improvement

甘薯是我国重要的粮食作物与经济作物,随着人们消费水平的提高,市场对专用型甘薯的需求量稳步增长,种植大户已逐步成为甘薯种植业的经营主体^[1]。受土地资源的限制,种植大户对耕地的反复使用导致甘薯连作障碍问题日益凸显,主要表现为病虫害频发及产量明显下降等^[2]。湖南省作为我国甘薯的重要产区之一,受生产要素等客观条件的制约,种植业趋于集约化和机械化,连作环境明显增多,导致了不同程度的连作障碍问题^[3]。这严重妨碍了甘薯产业的可持续发展,有效消减连作障碍变得重要且迫切。

研究表明,连作障碍产生的原因包括土壤理化性质恶化^[4](土壤酸化、养分失衡)、微生物群落结构劣化^[5]、化感物质累积^[6]等。目前,在栽培中主要通过土壤消毒^[7]、改变种植制度^[8-10]、施用外源肥料等措施缓解连作障碍。甘薯作为主要的块根作物,养分需求和田间管理与种子类粮食作物的不同,因而连作障碍的发生原因和消减防控措施也有区别。许仙菊等^[11]研究表明,甘薯连作一般不会造成土壤肥力的降低,土壤酸化和氮磷钾养分失衡才是造成甘薯连作障碍的主要原因^[12]。腐殖酸与有机肥、生物菌剂施用等在一定程度上能有效缓解连作障碍,改

善连作地块下甘薯生长状况,这种连作障碍的缓解机制与土壤微生物群落的变化相关^[13-14]。生物菌剂含有大量有益菌和多种天然活性物质,可以改善土壤和植物根际微生物生态,已逐渐成为缓解连作障碍的重要材料^[15]。有机肥有着与微生物菌肥相似的优点,在改善土壤养分的同时优化土壤群落结构,有效提高土壤肥力、提升作物的产量和品质^[16-18]。笔者^[19]前期开展了7种连作障碍缓解肥料的筛选试验,发现生物有机无机复混肥、腐殖酸复合肥等施用对连作障碍的缓解效果较为明显。

在生产过程中,有机肥与微生物菌肥由于速效养分供应效率低,短期内对连作障碍的缓解效果仍较为有限,而有机肥部分替代化肥、微生物菌肥与有机肥混施等措施可获得更好的效果。李敏等^[20]、刘亚军等^[21]研究表明,化肥与有机肥等量配施对连作土壤结构的改良效果和甘薯的增产效果优于单独施用的。不同肥料及配施比例的缓解效果差异大,通常化肥减量+有机肥+微生物菌肥+土壤调理剂效果最好,但成本也最高。不同功能型肥混合施用可获得更优的连作障碍缓解方案^[22-24]。本研究中,拟采用甘薯专用复合肥、有机肥及微生物菌肥等3种具有典型代表性的肥料产品,通过对单一肥

料试验和3种肥料不同比例混施正交试验下鲜薯产量和土壤养分含量的差异进行分析,探索缓解连作障碍的最佳施肥方案,以期为连作地块的肥料配施提供依据。

1 材料与方法

1.1 试验环境

试验地位于长沙市芙蓉区湖南省农业科学院作物研究所试验基地(28.20°N, 113.10°E),属亚热带季风气候,年均气温为17.2 °C,全年无霜期约为275 d,年均降水量约为1 361.6 mm。试验地块为中等肥力的黏壤,已连作甘薯10年,常规化肥施用增产效果不理想。

1.2 试验材料

供试甘薯品种为‘湘薯203’。供试肥料包括专用复合肥A(N、P、K质量比为16:9:20),微生物菌肥B(有效活菌数 ≥ 5 亿/g),有机肥C(有机质质量分数 $\geq 55\%$ 、氨基酸质量分数 $\geq 20\%$ 、腐殖酸质量分数 $\geq 10\%$ 、有效活菌(解淀粉芽孢杆菌)数 ≥ 0.2 亿/g),均由国家甘薯产业技术体系栽培与土肥功能研究室提供。

1.3 试验设计

1.3.1 试验方法

单一肥料试验(2022年完成)。设置不施肥处理小区为0.0倍施肥量组(A1、B1、C1),按不同肥料同样倍数施肥量对应肥效相同的原则,参照2021年的推荐施肥量^[19],设置其余单一肥料小区施肥水平:0.5倍、1.0倍、2.0倍专用复合肥A推荐施肥量分别为300、600、1 200 kg/hm²,分别记为A2、A3、A4处理;0.5倍、1.0倍、2.0倍微生物菌肥B推荐施肥量分别为750、1 500、3 000 kg/hm²,分别记为B2、B3、B4处理;0.5倍、1.0倍、2.0倍有机肥C推荐施肥量分别为750、1 500、3 000 kg/hm²分别记为C2、C3、C4处理。肥料在移栽前一次性施入,各施肥处理小区随机区组排列,小区面积为10 m² (2 m×5 m),每个处理重复3次。

肥料配施试验(2023年完成)。设置施肥因素与施肥水平的正交试验,施肥因素包括专用复合肥、微生物菌肥、有机肥3个因素;各肥料因素设置4个施肥水平,参照2021年的推荐施肥量^[19],分别设置

0.0倍、0.5倍、1.0倍、2.0倍推荐施肥量,正交试验设计及对应施肥量见表1。肥料在移栽前一次性施入,各施肥处理小区随机排列,小区面积为10 m² (2 m×5 m),每个处理重复3次。

表1 3种肥料L₁₆(4³)正交试验设计表

处理	专用复合肥用量(A)	微生物菌肥用量(B)	有机肥用量(C)
T1	0	0	0
T2	0	750	750
T3	0	1 500	1 500
T4	0	3 000	3 000
T5	300	0	750
T6	300	750	0
T7	300	1 500	3 000
T8	300	3 000	1 500
T9	600	0	1 500
T10	600	750	3 000
T11	600	1 500	0
T12	600	3 000	750
T13	1 200	0	3 000
T14	1 200	750	1 500
T15	1 200	1 500	750
T16	1 200	3 000	0

1.3.2 大田管理

单一肥料试验中,甘薯于2022年5月16日移栽,7月20日封垄,10月28日采收,移栽后全生长期为165 d。肥料配施试验中,甘薯于2023年5月23日移栽,7月23日封垄,11月1日采收,移栽后全生长期为162 d。甘薯种植密度均为48 000株/hm²,每个区组重复之间设置1 m间距的保护行。试验地灌溉设施良好,7—9月持续干旱天气对试验地薯苗无明显影响。田间管理细节严格参照DB43/T 451—2009《甘薯栽培技术规程》执行。

1.3.3 样品采集及指标测定

收获前1周内,于每个小区选取连续5个单株,测定蔓长、茎粗、分支数、单株地上部鲜质量、单株薯质量,并根据种植密度计算地上部鲜质量、理论鲜薯产量及总生物量。采收时称取每个小区所有鲜薯质量为小区实际鲜薯产量,并参照文献[19]的方法,通过干率计算地上部、薯块及总干物质积累量。

在甘薯栽插前与收获后,按照五点法采集小区0~20 cm耕层土壤样品,混合均匀后,用四分法弃

去多余部分，保留约1 kg样品，经自然风干、去除杂质后磨细，过孔径为2 mm的网筛后装袋备用，用于土壤指标的测定。其中，以甘薯栽插前土壤样品为CK。将地上部茎叶、块根分别杀青烘干，粉碎后消煮，测定其总氮、总磷、总钾含量。参照NY/T 1121.2—2006，使用雷磁pH计测定土壤样品的pH；参照NY/T 1121.6—2006，采用重铬酸钾容量法测定有机质含量；参照NY/T 1121.24—2012，采用全自动凯氏定氮仪测定总氮含量；参照LY/T 1228—2015，采用碱解扩散法测定碱解氮含量；参照HJ 326—2011，采用碱熔—钼锑抗分光光度法测定总磷含量；参照NY/T 1121.7—2014，采用碳酸氢钠浸提—钼锑抗分光光度法测定有效磷含量；参照NY/T 87—1988，采用火焰原子吸收光谱仪测定总钾含量；参照NY/T 889—2004，采用火焰光度计测定速效钾、缓效钾含量。

参照张军等^[25]描述的方法计算经济效益。其

中，鲜薯价格为1元/kg，复合肥、微生物菌肥和有机肥价格分别为2.3、4.0、2.0元/kg，各处理除肥料以外的生产成本均为11 250元/hm²。

1.4 数据统计分析

运用SPSS 26.0软件进行方差和极差分析，选用Duncan’s极差法进行多重比较。

2 结果与分析

2.1 鲜薯产量与干物质积累量分析

2.1.1 单一肥料处理下鲜薯产量与干物质积累量分析

由表2可知，施用不同量的3种肥料后，试验区实际鲜薯产量均随肥料施用量的增加呈现先增后减的趋势，其中各肥料推荐施用量处理的产量最高。其中，A3的实际鲜薯产量为28.17 t/hm²，较A1的增产23.88%；B3的实际鲜薯产量为27.03 t/hm²，

表2 不同单一肥料处理下‘湘薯203’的产量及干物质积累量

Table 2 Yield and dry matter of ‘Xiangshu 203’ under different individual fertilizer treatments					
处理	蔓长/cm	分支数/个	茎粗/cm	实际鲜薯产量/(t·hm ⁻²)	地上部鲜质量/(t·hm ⁻²)
A1	(172.77±0.14)ef	(8.73±0.42)b	(0.81±0.01)a	(22.74±0.01)f	(34.88±0.55)e
A2	(165.88±0.93)fg	(9.13±0.31)ab	(0.80±0.01)abcd	(24.42±0.01)e	(36.48±0.48)cde
A3	(195.52±0.73)ab	(9.13±0.58)ab	(0.81±0.01)a	(28.17±0.01)a	(41.28±2.09)abc
A4	(164.50±1.10)fg	(8.93±0.46)ab	(0.80±0.01)abc	(19.46±0.02)h	(34.08±2.88)e
B1	(177.93±0.52)de	(9.53±0.50)a	(0.79±0.01)cd	(21.76±0.01)g	(35.04±1.73)e
B2	(170.68±1.37)ef	(9.13±0.23)ab	(0.80±0.01)abcd	(24.88±0.03)de	(38.24±3.63)abcde
B3	(187.51±1.56)bc	(9.07±0.42)ab	(0.79±0.00)bcd	(27.03±0.02)b	(41.76±1.73)ab
B4	(199.89±14.81)a	(8.87±0.31)ab	(0.80±0.00)abcd	(25.43±0.03)cd	(36.80±3.67)bcde
C1	(158.82±0.99)g	(9.20±0.00)ab	(0.80±0.01)abcd	(24.12±0.01)e	(36.00±2.92)de
C2	(185.91±1.24)cd	(8.73±0.31)b	(0.81±0.01)ab	(24.82±0.02)de	(40.32±2.49)abcd
C3	(198.33±10.55)a	(9.13±0.23)ab	(0.80±0.01)abc	(27.49±1.61)ab	(43.36±2.27)a
C4	(200.78±1.07)a	(9.07±0.50)ab	(0.79±0.01)d	(26.06±0.81)c	(41.44±4.81)abc
处理	总生物量/(t·hm ⁻²)	地上部干物积累量/(t·hm ⁻²)	薯块干物质积累量/(t·hm ⁻²)	总干物质积累量/(t·hm ⁻²)	
A1	(68.26±0.92)de	(4.65±0.74)b	(11.56±0.72)bc	(16.21±0.48)b	
A2	(70.40±1.55)cde	(5.48±0.44)ab	(11.64±0.12)bc	(17.11±0.38)b	
A3	(82.46±5.05)a	(5.77±0.19)ab	(14.54±0.95)a	(20.31±0.78)a	
A4	(68.10±3.05)de	(4.95±0.46)b	(12.25±0.62)b	(17.20±0.94)b	
B1	(64.38±2.07)e	(5.50±0.63)ab	(10.28±1.26)c	(15.78±1.89)b	
B2	(73.31±3.38)bcd	(5.98±1.04)ab	(12.03±0.58)b	(18.01±1.37)b	
B3	(82.37±1.70)a	(6.95±0.09)a	(13.96±1.61)a	(20.91±1.53)a	
B4	(69.12±4.67)cde	(5.61±0.18)ab	(11.42±0.58)bc	(17.03±0.76)b	
C1	(68.77±2.79)de	(5.44±1.30)ab	(11.36±0.71)bc	(16.80±1.30)b	
C2	(74.88±2.65)bc	(5.27±1.08)ab	(11.88±1.33)bc	(17.15±1.66)b	
C3	(85.15±3.61)a	(6.08±0.74)ab	(14.34±0.30)a	(20.42±1.00)a	
C4	(76.38±4.47)b	(6.04±1.92)ab	(11.53±0.28)bc	(17.57±2.15)b	

注：同列不同字母表示处理间的差异有统计学意义(P<0.05)。

较A3的减产4.05%; C3的实际鲜薯产量为27.49 t/hm², 较A3的减产2.41%。与推荐施用量处理相比, 在2.0倍推荐施用量下, 3种肥料处理的实际鲜薯产量均显著下降, 这说明各肥料在2.0倍用量时均已过量施用。总生物量和总干物质积累量的变化趋势与实际鲜薯产量的变化趋势一致, A3、B3、C3的总生物量和总干物质积累量均显著高于其他处理的, 且三者间的差异均无统计学意义。同时, 除A3、B3、C3外, 其余处理的总干物质积累量间的差异均无统计学意义。

2.1.2 不同肥料配施处理下鲜薯产量与干物质积累量分析

从表3可知, 肥料配施各处理中地上部鲜质量大于实际鲜薯产量, 总生物量的变化更易受地上部鲜质量的影响。其中, T9的实际鲜薯产量最大, 为36.25 t/hm², 较T5增产22.42%, 较单独施用专用复

合肥A3和有机肥C3分别增产28.68%、31.87%; 施肥处理中, T16的实际鲜薯产量最小, 为19.13 t/hm², 较T5减产35.39%。T10的总生物量最大, 为85.09 t/hm², 较T5增产2.90%; 施肥处理中, T13的总生物量最小, 为62.21 t/hm², 较T5减产24.77%。T5的地上部鲜质量最大, 为52.64 t/hm²; T13的地上部鲜质量最小, 为39.84 t/hm², 较T5减产24.32%。

从表3还可知, 与薯块干物质积累量相比, 地上部干物质积累量在总干物质积累量中的占比更小(T1、T14、T15、T16除外)。其中T10的总干物质积累量和薯块干物质积累量最大, 分别为21.23、12.82 t/hm²; T12的地上部干物质积累量最大, 为8.57 t/hm²。综上所述, 从不同类型肥料配施的干物质积累量来看, A肥料速效性的优势被放大, 而B肥料的增产效果减弱。

从表4可知, A与C对各指标的影响极显著, 而B

表3 不同肥料配施处理下‘湘薯203’的产量及干物质积累量

Table 3 Yield and dry matter of ‘Xiangshu 203’ under different fertilizer combination treatments								t/hm ²
处理	实际鲜薯产量	理论鲜薯产量	地上部鲜质量	总生物量	地上部干物质积累量	薯块干物质积累量	总干物质积累量	
T1	(18.09±0.64)j	(18.30±0.63)k	(40.96±1.69)g	(59.26±2.31)i	(6.70±0.50)de	(6.53±0.32)h	(13.23±0.80)h	
T2	(23.26±0.73)g	(23.39±0.40)g	(42.08±2.16)fg	(65.47±2.56)gh	(7.30±0.60)bcd	(8.42±0.37)e	(15.72±0.96)efg	
T3	(25.65±0.53)f	(27.36±0.26)f	(46.72±1.94)cd	(74.08±2.19)bcd	(7.33±0.56)bcd	(9.39±0.23)d	(16.72±0.76)def	
T4	(28.40±0.77)e	(30.08±0.40)d	(41.44±1.94)g	(71.52±2.31)cde	(6.91±0.55)cde	(10.53±0.44)c	(17.44±0.97)cd	
T5	(29.61±0.49)d	(30.05±0.44)d	(52.64±2.16)a	(82.69±2.60)a	(8.08±0.61)ab	(10.52±0.45)c	(18.60±1.05)bc	
T6	(27.60±0.54)e	(27.42±0.47)f	(42.88±1.94)efg	(70.30±2.37)def	(7.44±0.56)abcd	(9.60±0.42)d	(17.04±0.96)cde	
T7	(33.51±0.70)b	(35.90±0.44)a	(48.64±2.16)bcd	(84.54±2.60)a	(8.11±0.61)ab	(12.81±0.36)a	(20.92±0.96)a	
T8	(29.51±1.21)d	(28.35±0.45)e	(46.72±1.69)cd	(75.07±2.11)bc	(7.79±0.52)abcd	(9.93±0.44)cd	(17.72±0.96)cd	
T9	(36.25±0.92)a	(34.94±0.42)b	(45.92±1.94)cde	(80.86±2.31)a	(7.97±0.60)abc	(12.35±0.31)a	(20.32±0.91)a	
T10	(36.00±0.59)a	(36.61±0.36)a	(48.48±1.92)bcd	(85.09±2.26)a	(8.41±0.60)ab	(12.82±0.49)a	(21.23±1.07)a	
T11	(27.78±0.63)e	(27.23±0.45)f	(49.44±2.40)abc	(76.67±2.83)b	(7.75±0.63)abcd	(9.81±0.43)d	(17.56±1.05)cd	
T12	(31.78±0.17)c	(31.91±0.22)c	(51.36±2.40)ab	(83.27±2.41)a	(8.57±0.67)a	(11.17±0.33)b	(19.74±1.00)ab	
T13	(22.48±0.40)g	(22.37±0.33)h	(39.84±1.92)g	(62.21±1.95)hi	(6.12±0.51)e	(8.05±0.25)ef	(14.17±0.72)gh	
T14	(20.52±0.33)h	(21.41±0.58)i	(47.20±2.16)cd	(68.61±2.74)efg	(7.72±0.62)abcd	(7.50±0.42)fg	(15.22±1.02)fg	
T15	(20.19±0.47)hi	(20.61±0.31)j	(48.00±2.40)bcd	(68.61±2.69)efg	(7.85±0.65)abc	(7.42±0.31)fg	(15.27±0.95)fg	
T16	(19.13±0.73)ij	(21.03±0.72)ij	(45.28±1.69)def	(66.31±0.96)fgh	(7.85±0.54)abc	(7.22±0.15)g	(15.07±0.42)fg	

注: 同列不同字母表示处理间的差异有统计学意义($P<0.05$)。

表4 不同肥料配施处理下‘湘薯203’产量指标的方差分析与极差分析

Table 4 Analysis of variance and range analysis of yield indicators for ‘Xiangshu 203’ under different fertilizer combinations													
指标	变异来源	自由度	均方	<i>F</i>	<i>P</i>	<i>R</i> /(t·hm ⁻²)	指标	变异来源	自由度	均方	<i>F</i>	<i>P</i>	<i>R</i> /(t·hm ⁻²)
实际 鲜薯 产量	<i>A</i>	3	383.42	881.58	<0.01	12.37	地上	<i>A</i>	3	87.38	20.88	<0.01	6.00
	<i>B</i>	3	0.77	1.76	0.17	0.60	部鲜	<i>B</i>	3	27.57	6.59	<0.01	3.36
	<i>C</i>	3	103.72	238.49	<0.01	6.95	质量	<i>C</i>	3	42.12	10.06	<0.01	3.92
	<i>AB</i>	9	43.11	99.12	<0.01			<i>AB</i>	9	32.97	7.88	<0.01	
	<i>AC</i>	9	8.79	20.22	<0.01			<i>AC</i>	9	28.12	6.72	<0.01	
	<i>BC</i>	9	136.34	313.49	<0.01			<i>BC</i>	9	48.06	11.48	<0.01	

表4(续)

指标	变异来源	自由度	均方	<i>F</i>	<i>P</i>	<i>R</i> /(t·hm ⁻²)	指标	变异来源	自由度	均方	<i>F</i>	<i>P</i>	<i>R</i> /(t·hm ⁻²)
理论	<i>A</i>	3	321.41	1 600.46	<0.01	11.32	总生	<i>A</i>	3	680.36	121.94	<0.01	15.04
鲜薯	<i>B</i>	3	5.24	26.07	<0.01	1.42	物量	<i>B</i>	3	50.84	9.11	<0.01	4.72
产量	<i>C</i>	3	124.66	620.74	<0.01	7.74		<i>C</i>	3	151.31	27.12	<0.01	7.70
	<i>AB</i>	9	56.47	281.17	<0.01			<i>AB</i>	9	93.365	16.73	<0.01	
	<i>AC</i>	9	16.66	82.95	<0.01			<i>AC</i>	9	59.88	10.73	<0.01	
	<i>BC</i>	9	122.05	607.74	<0.01			<i>BC</i>	9	269.72	48.34	<0.01	

对实际鲜薯产量的影响不显著。施用A、C、B肥料处理的产量的极差(*R*)依次减小,说明A对鲜薯实际产量的贡献率最大,C次之,B最小。通过产量均值分析,推荐最优处理为*A*₃*C*₄*B*₄。

2.2 单一肥料处理下土壤与植株养分指标分析

由表5可知,不同施肥处理之间的土壤养分差异较大,但大部分处理的土壤pH较种植前(CK)的变化不大,仅A4、B3、C2的pH显著小于CK的。其中,

A4的磷、钾养分含量最高,尤其是有效磷质量分数(45.3 mg/kg)、速效钾质量分数(129 mg/kg)均显著高于其他处理的,这表明过量使用复合肥会导致土壤养分的累积,易引发环境问题;C处理区的土壤有机质和总氮质量分数随施用量的增加逐步增加,且C4有机质质量分数显著高于其他处理的;同一施肥水平下,施用B的土壤养分含量相对较低。

表5 不同单一肥料处理下种植‘湘薯203’土壤的理化性质

Table 5 Soil physicochemical properties under individual fertilizer treatments in ‘Xiangshu 203’

处理	pH	有机质质量 分数/(g·kg ⁻¹)	总氮质量分数/ (g·kg ⁻¹)	总磷质量分数/ (mg·kg ⁻¹)	总钾质量分数/ (g·kg ⁻¹)	碱解氮质量 分数/(mg·kg ⁻¹)	有效磷质量 分数/(mg·kg ⁻¹)	速效钾质量 分数/(mg·kg ⁻¹)
CK	6.42ab	20.9cde	1.32cd	413g	22.9cde	137de	17.3gh	58h
A1	6.52a	19.9f	1.31cd	409g	21.8f	131f	14.7fj	63g
A2	6.58a	21.7bc	1.27d	479e	22.1ef	149a	18.4ef	81e
A3	6.50a	20.4ef	1.34bc	548d	22.9cde	142bcd	34.7b	107b
A4	6.02c	20.8de	1.31cd	705a	24.5a	145abc	45.3a	129a
B1	6.21bc	20.4ef	1.33bc	487e	22.5def	134ef	15.1j	69f
B2	6.47a	20.9cde	1.37bc	415g	22.4ef	142bcd	16.7hi	61g
B3	6.13c	20.3ef	1.28cd	482e	21.6f	131f	17.8fg	63g
B4	6.21bc	20.6def	1.36bc	457f	22.3ef	139de	17.4gh	55h
C1	6.47a	20.4ef	1.37bc	438f	23.4bcd	145abc	16.3i	57h
C2	6.15c	21.3cd	1.41ab	535d	22.8cde	141cd	18.9e	83e
C3	6.52a	22.5b	1.45a	603b	24.1ab	147ab	20.4d	96c
C4	6.58a	24.7a	1.47a	581c	23.6abc	142bcd	22.8c	87d

注:同列不同字母表示处理间的差异有统计学意义(*P*<0.05)。

从表6可知,不同处理组之间植株养分差异较大,且地上部养分含量高于薯块的。其中,C4的地上部总氮、总钾质量分数均最大,分别较A3的增加了8.70%、13.23%;B4的薯块总氮、总钾质量分数均最大,分别较A3的增加了2.94%、5.16%;C2的薯块总磷质量分数最大,较A3的增加了26.67%;B3的地上部总磷质量分数最大,较A3的增加了24.17%。

综上,施肥显著影响了土壤养分和植株养分的积累,且不同种类肥料之间差异较大,复合肥速效性突出,土壤养分和产量的增速更快,但过量施用可能导致养分盈余及土壤酸化等问题;有机肥对土壤养分的提升和植株养分的均衡积累效果较佳,表现出较好的持续性和稳定性。

表6 不同单一肥料处理下‘湘薯203’植株的氮磷钾养分含量

Table 6 Nutrient content of nitrogen, phosphorus and potassium in ‘Xiangshu 203’ plant under different individual fertilization treatments mg/kg						
处理	总氮质量分数		总磷质量分数		总钾质量分数	
	地上部	薯块	地上部	薯块	地上部	薯块
A1	206.4de	26.4fg	122.1b	13.1cde	328.5e	39.5e
A2	243.1b	25.6g	97.5d	13.1cde	340.6d	38.7ef
A3	250.6b	30.6a	108.4c	12.0f	359.0c	42.6bc
A4	229.1c	26.7efg	89.1e	12.7e	318.2e	39.4e
B1	270.1a	27.2def	97.1d	13.7b	367.2c	40.9d
B2	174.9f	28.1bcd	120.8b	9.7h	295.7f	37.8fg
B3	207.2de	29.1b	134.6a	12.8de	341.8d	41.9bcd
B4	214.9d	31.5a	88.6e	13.3bcd	303.5f	44.8a
C1	245.8b	23.7h	134.2a	13.5bc	380.0b	37.2g
C2	231.9c	27.6cde	85.6e	15.2a	317.5e	42.8b
C3	197.9e	24.1h	107.8c	11.4g	305.7f	35.5h
C4	272.4a	28.5bc	134.1a	12.8de	406.5a	41.3cd

注：同列不同字母表示处理间的差异有统计学意义($P<0.05$)。

2.3 不同肥料产品应用的经济效益评价

从表7可知，单一肥料处理中复合肥与有机肥处理组的经济效益均随施肥量先升后降，A3、C3的最大，分别为15 540、13 240元/hm²，C3的经济效益较A3的降低了14.8%；而微生物菌肥处理下经济效益随施肥量的增加不断下降，B4的最低，为2 180元/hm²，较A3的降低了85.97%，表明高量施用微生物菌肥会导致投入产出比降低。肥料配施处理中仅T5、T9(均为复合肥与有机肥肥效等比例混施)的经济效益高于A3的，分别为16 170、20 620元/hm²，较A3的分别增加了4.05%、32.69%。这说明与单一施肥处理相比，有机肥与化肥混施可提高经济效益。

表7 不同施肥处理下‘湘薯203’的经济效益

Table 7 Economic benefits of ‘Xiangshu 203’ under different fertilization treatments				
处理	肥料成本/ (元·hm ⁻²)	产值/ (元·hm ⁻²)	经济效益/ (元·hm ⁻²)	产投比
A1	0	22 740i	11 490f	2.02
A2	690	24 420gh	12 480d	2.05
A3	1 380	28 170a	15 540a	2.23
A4	2 760	19 460k	5 450j	1.39
B1	0	21 760j	10 510g	1.93
B2	3 000	24 880f	10 630g	1.75
B3	6 000	27 030c	9 780h	1.57
B4	12 000	25 430e	2 180k	1.09
C1	0	24 120h	12 870c	2.14
C2	1 500	24 820fg	12 070e	1.95
C3	3 000	27 490b	13 240b	1.93
C4	6 000	26 060d	8 810i	1.51

表7(续)

处理	肥料成本/ (元·hm ⁻²)	产值/ (元·hm ⁻²)	经济效益/ (元·hm ⁻²)	产投比
T1	0	18 304l	6 830h	1.61e
T2	4 500	23 392h	7 510g	1.48f
T3	9 000	27 360g	5 400j	1.27h
T4	18 000	30 080e	-850m	0.97l
T5	2 190	30 048e	16 170b	2.20b
T6	3 690	27 424g	12 660d	1.85c
T7	12 690	35 904b	9 570e	1.40g
T8	15 690	28 352f	2 570k	1.10j
T9	4 380	34 944c	20 620a	2.32a
T10	10 380	36 608a	14 370c	1.66d
T11	7 380	27 232g	9 160f	1.49f
T12	14 880	31 904d	5 650i	1.22i
T13	8 760	22 368i	2 470k	1.12j
T14	8 760	21 408j	510l	1.03k
T15	10 260	20 608k	-1 320n	0.94m
T16	14 760	21 024jk	-6 880o	0.74n

注：同列不同字母表示同一试验处理间差异有统计学意义($P<0.05$)。

通过对产值、经济效益与产投比进行极差分析(表8)发现，以产值为评价指标推荐的最优因素组合为A₃B₄C₄，与以鲜薯实际产量为评价指标的结果一致；以经济效益为评价指标推荐的最优因素组合为A₃B₁C₃，即T9处理；以产投比为评价指标推荐的最优因素组合为A₃B₁C₂。综上，从经济效益考虑，A₃B₄C₄高产但低效益，不具备生产应用价值，因此，推荐采用复合肥与有机肥的等肥效混施处理(如T9)，以提高经济效益。

表8 不同肥料配施下‘湘薯203’经济效益指标极差分析结果

Table 8 Range analysis of economic benefit indicators for ‘Xiangshu 203’ under different fertilizer combinations									
指标因素	产值/(元·hm ⁻²)			经济效益/(元·hm ⁻²)			产投比		
	A	B	C	A	B	C	A	B	C
K ₁	24 784	26 416	23 496	4 723	11 523	5 443	1.33	1.81	1.42
K ₂	30 432	27 208	26 488	10 243	8 763	7 003	1.64	1.51	1.46
K ₃	32 672	27 776	28 016	12 450	5 703	7 275	1.67	1.28	1.43
K ₄	21 352	27 840	31 240	-1 305	123	6 390	0.96	1.01	1.29
R	11 320	1 424	7 744	13 755	11 400	1 832	0.72	0.81	0.17
最优组合	A ₃ B ₄ C ₄			A ₃ B ₁ C ₃			A ₃ B ₁ C ₂		

注：K₁、K₂、K₃、K₄分别代表推荐施肥用量的0.0倍、0.5倍、1.0倍、2.0倍。

3 结论与讨论

从单一施肥试验来看，3种肥料施用均能提升鲜薯产量，但其在连作障碍地施用的增产效果并不理想。对比单因素试验，配施肥料处理的鲜薯产量普遍更高，如有机肥部分替代化肥处理(T5)，产量为29.61 t/hm²，高于单独施用复合肥的(28.17 t/hm²)或有机肥的(27.49 t/hm²)，说明不同种类配施更有利于植株生长和产量提升。研究^[26-28]表明，有机肥部分替代化肥产量高于单独施用化肥处理的，有机肥有着提升土壤有机质和有效养分含量、重塑土壤微生物群落结构的作用，这有利于光合作用的提升和干物质向生殖器官分配。本研究中，在不同肥料配施处理中，T9(1.0倍专用复合肥施用量+1.0倍有机肥施用量)的实际鲜薯产量最高，其肥料用量相当于单因素处理的2.0倍施肥量，但未出现单因素处理中2.0倍施肥量处理减产的情况，说明单因素试验的推荐施用量可能并未达到增产阈值，也可能是增施有机肥促使养分均衡吸收，缓解了肥料过量带来的减产问题。此外，微生物菌肥对植株地上部积累有显著影响，但对鲜薯增产效果相对有限。这主要与微生物益生菌群的形成有关：一方面，这种菌群的形成受施肥方式的影响很大，与有机肥等其他功能型肥料配施效果更好^[29]；另一方面，这种差异可能与微生物菌肥施用年限较短，未形成稳定的微生物群落有关。

适宜的干物质积累是甘薯产量形成的前提，施肥可以促进甘薯地上部干物质积累，继而向地下部转运。本研究中，T9(复合肥与有机肥混施)和T10(复合肥、有机肥与微生物菌肥配施)均促进了干物质的积累，尤其是向薯块的分配。这与袁辉等^[30]提出的有机肥能够增强光合产物向地下部分转移的研究结果一致。此外，对比T5与T9生物量及其分配情况

可知，两者生物量相当，T5(0.5倍专用复合肥施用量+0.5倍有机肥施用量)处理光合产物更多地积累在地上部，而T9(1.0倍专用复合肥施用量+1.0倍有机肥施用量)处理的则更多地转运到薯块。

土壤作为植株的直接生长环境，其养分的丰贫直接影响了植株的产量，研究^[31]表明土壤养分失衡(氮钾比过高)和生物菌群结构变化是连作减产的原因。甘薯作为典型的喜钾作物，本研究中，施入适宜的专用复合肥(高钾)与有机肥均降低了土壤氮钾比，满足了甘薯对钾的需求，部分缓解了连作地块养分失衡造成的减产效应。此外，有机质养分均衡缓释可以有效减少土壤养分劣化，本研究中，施入有机肥显著提高了土壤有机质含量，显著增加了鲜薯产量。微生物菌肥具有改善养分循环和微生物活性的特点，但其矿质养分相对不足，因此，对土壤养分影响不大。此外，可能受施用年限的影响，微生物菌肥对土壤养分的作用还未体现。综合来看，矿质元素从土壤吸收转运到植株是一个复杂的过程，施用高钾复合肥和有机肥可以有效优化土壤养分结构，缓解连作障碍。

作物产量和经济效益协调发展是农业生产所追求的目标。本研究中，复合肥增产增效最明显，微生物菌肥和有机肥单独施用时较高的投入限制了种植效益的提高，生产上应用有限。从不同肥料配施处理的结果来看，有机肥等肥效配施复合肥的产值与经济效益最高，且在总用量为2.0倍推荐用量下达到最大，建议在实际生产中推广该配施方案，有利于提高效益和改良土壤。而微生物菌肥因成本较高，施用后经济效益偏低，如能通过政策优化给予补贴支持，将会有效推动其在甘薯连作地块生产上的应用。

综上，本研究中，施肥可以减轻连作地块的减产效应，3种肥料单施的鲜薯产量、生物量、地上

部及薯块干物质质量均在推荐施肥用量下最大,其中,单施甘薯专用复合肥时鲜薯产量最高,经济效益最好;3种肥料配施处理中,以常量专用复合肥下等肥效增施有机肥处理的甘薯鲜薯产量最高。由此可见,合理的有机肥替代化肥能节本增收,在正常化肥用量的基础上增施等肥效有机肥是缓解湖南省甘薯主产区连作障碍的较优施肥方案。

参考文献:

- [1] 王欣,李强,曹清河,等.中国甘薯产业和种业发展现状与未来展望[J].中国农业科学,2021,54(3):483-492.
- [2] ZHU X Y, ZHAO P, WANG J, et al. Long-term stationary fertilization decreased soil health in field-grown sweetpotato by increasing soil-borne diseases or allelochemicals [J]. *Applied Soil Ecology*, 2024, 203: 105658.
- [3] 张道微,张超凡,项伟,等.劳动力变化对湖南省甘薯生产及机械应用的影响[J].作物研究,2019,33(7):48-53.
- [4] 汤宏,王建伟,曾掌权,等.烤烟连作对根际与非根际土壤养分及其生态化学计量特征的影响[J].干旱区资源与环境,2024,38(10):154-165.
- [5] CHEN Y D, DU J F, LI Y, et al. Evolutions and managements of soil microbial community structure drove by continuous cropping[J]. *Frontiers in Microbiology*, 2022, 13: 839494.
- [6] CHENG F, CHENG Z H. Research progress on the use of plant allelopathy in agriculture and the physiological and ecological mechanisms of allelopathy[J]. *Frontiers in Plant Science*, 2015, 6: 1020.
- [7] 陈雅琼,杨松兵,郭存,等.土壤消毒与微生态改良对连作障碍烟田烤烟生长、病害和产质量的影响[J].江苏农业科学,2024,52(13):74-80.
- [8] 李光,史丽娟,崔旭东,等.耕作方式对连作高粱产量及土壤水分与有机碳含量的影响[J].华北农学报,2023,38(2):170-178.
- [9] 韩镁琪,张玉芹,杨恒山,等.秸秆深翻还田年限对西辽河平原连作玉米田土壤细菌群落的影响[J].华北农学报,2023,38(5):148-157.
- [10] 汤晓仪,王勃,韩俊杰,等.不同冬季复种轮作对甘薯耕层土壤真菌群落及块根产量的影响[J].江苏农业科学,2024,52(11):267-272.
- [11] 许仙菊,姜晓蕊,陈丹艳,等.甘薯连作障碍发生的土壤养分因素探讨[J].中国土壤与肥料,2024(4):102-107.
- [12] 许仙菊,姜晓蕊,陈丹艳,等.耐连作甘薯品种的筛选及薯块氮、磷、钾营养状况分析[J].江苏农业学报,2023,39(3):657-664.
- [13] 高志远,胡亚亚,刘兰股,等.甘薯连作对根际土壤微生物群落结构的影响[J].核农学报,2019,33(6):1248-1255.
- [14] 贾峥嵘,李江辉,武宗信,等.生物菌肥对甘薯产量、品质及经济效益的影响[J].山西农业科学,2018,46(9):1506-1508,1514.
- [15] 王嘉,王艳霞,潘璐,等.不同生物反应堆对设施黄瓜根际土壤细菌群落结构多样性的影响[J].华北农学报,2024,39(5):170-178.
- [16] 李青,李其胜,谢昶琰,等.生物有机肥与生物炭灰渣配施对连作甜瓜生长及土壤性质的影响[J].土壤通报,2024,55(5):1386-1394.
- [17] 王艳平,李萍,吴文强,等.生物有机肥和微生物菌剂对北京山区连作茶菊生长及土壤肥力的影响[J].中国土壤与肥料,2023(12):107-113.
- [18] 周家昊,孙万春,俞巧钢,等.3种有机肥部分替代化肥对春茶产量与品质的影响[J].湖南农业大学学报(自然科学版),2023,49(1):79-85.
- [19] 康世东,黄艳岚,张亚,等.湖南甘薯连作障碍缓解肥的筛选及其应用效果[J].湖南农业科学,2024(9):68-72.
- [20] 李敏,刘亚军,王文静,等.施肥方式对连作甘薯田土壤团聚体稳定性及酶活性的影响[J].江苏农业科学,2023,51(13):252-260.
- [21] 刘亚军,逯昀,王文静,等.有机肥与土壤调理剂对连作甘薯生长发育及土壤肥力的影响[J].作物杂志,2024(3):168-174.
- [22] 刘中良,郑建利,孙哲,等.土壤改良剂对设施番茄土壤微生物群落、品质及产量的影响[J].华北农学报,2016,31(S1):394-398.
- [23] 张继东,张亚雄,程伟,等.生物质炭和有机肥配施对苹果重茬育苗地土壤理化性质和微生物群落特征的影响[J].中国农业科技导报,2024,26(8):213-222.
- [24] 张帆,杨阳,王鸿,等.生物肥和有机肥对桃重茬土壤理化性状和细菌群落的改善作用[J].园艺学报,2024,51(9):2089-2104.
- [25] 张军,胡川,周起晖,等.减氮及有机肥替代对旱地冬小麦干物质积累、转运、分配和产量的影响[J].作物学报,2025,51(1):207-220.
- [26] 孙子隽,钟国兴,张少搏,等.化肥减量配施有机肥对植烟土壤理化特性和微生物群落结构的影响[J].华北农学报,2024,39(3):146-158.
- [27] 李司童,毛凯伦,韦成才,等.蚯蚓粪肥替代部分化肥对连作烟田土壤肥力的影响及评价[J].华北农学报,2018,33(S1):238-245.
- [28] 李静,李青松,杨艳霞,等.前茬小麦有机肥替代化肥氮对后茬玉米抗倒伏性状的影响[J].湖南农业大学学报(自然科学版),2024,50(1):9-14.
- [29] 肖占文,赵致禧,赵芸晨,等.化肥减量下有机肥配施土壤调理剂和生物菌肥对玉米连作土壤的生态修复效应[J].中国土壤与肥料,2023(10):48-54.
- [30] 袁辉,谢军红,李玲玲,等.有机肥替代化肥对马铃薯生长生理特性及产量的影响[J].甘肃农业大学学报,2024,59(4):35-43.
- [31] GAO J X, PEI H X, XIE H. Synergistic effects of organic fertilizer and corn straw on microorganisms of pepper continuous cropping soil in China[J]. *Bioengineered*, 2020, 11(1): 1258-1268.

责任编辑:邹慧玲

英文编辑:柳正