

黄洁雪, 王晓琳, 邬 劼, 等. 化肥减施配施土壤调理剂对草莓品质和土壤养分的影响[J]. 江苏农业学报, 2024, 40(1): 55-63.
doi: 10.3969/j.issn.1000-4440.2024.01.006

化肥减施配施土壤调理剂对草莓品质和土壤养分的影响

黄洁雪¹, 王晓琳¹, 邬 劼², 乔玉山³, 吉沐祥¹

(1. 江苏丘陵地区镇江农业科学研究所, 江苏 镇江 212400; 2. 镇江市丰达植保有限公司, 江苏 镇江 212404; 3. 江苏省农业科学院, 江苏 南京 210014)

摘要: 以江苏丘陵地区大棚草莓为对象开展大田试验, 研究化肥减施配施土壤调理剂对草莓果实品质和土壤养分的影响。本试验设置 5 个处理, 为不施化肥对照 (CK)、常规量施化肥处理 (F100)、化肥减施 50% 处理 (F50)、化肥减施 50% 同时配施硅钙镁土壤调理剂处理 (F50S1)、化肥减施 50% 同时配施骨粉处理 (F50S2)。试验结果表明, 与 F100 处理相比, 不施化肥对照 (CK) 和 F50 处理草莓单株叶片数和头茬果单果质量显著减少 ($P < 0.05$), 幼苗期土壤电导率、有效磷含量和速效钾含量显著降低 ($P < 0.05$)。与 F100 处理相比, F50S1 处理草莓幼苗期土壤 pH 值显著提高, 缓解了土壤酸化对草莓幼苗生长的抑制作用, 使株高和叶面积、现蕾率显著提高 ($P < 0.05$)。F50S2 处理土壤有效磷含量、速效钾含量以及叶片全氮含量和头茬果单果质量与 F100 处理相比无显著差异 ($P > 0.05$), 二茬果二级果果实硬度比 F100 处理显著提高了 27.03% ($P < 0.05$), F50S2 处理能够显著延长草莓果实的货架期。综上所述, 在过量施肥土壤中应适量减施化肥同时配施土壤调理剂, 可以有效维持土壤养分供应, 促进草莓生长发育, 提高果实品质。

关键词: 草莓; 土壤调理剂; 化肥减施; 草莓品质; 土壤养分

中图分类号: S668.4 文献标识码: A 文章编号: 1000-4440(2024)01-0055-09

Effects of chemical fertilizer reduction combined with soil conditioner application on strawberry quality and soil nutrient

HUANG Jie-xue¹, WANG Xiao-lin¹, WU Jie², QIAO Yu-shan³, JI Mu-xiang¹

(1. Zhenjiang Institute of Agricultural Sciences in Hilly Area of Jiangsu Province, Zhenjiang 212400, China; 2. Zhenjiang Fengda Plant Protection Co., Ltd., Zhenjiang 212404, China; 3. Jiangsu Academy of Agricultural Sciences, Nanjing 210014, China)

Abstract: A field experiment was conducted to study the effects of chemical fertilizer reduction combined with soil conditioner on strawberry fruit quality and soil nutrients in greenhouse in hilly area of Jiangsu province. The experiment included five treatments, no chemical fertilizer control (CK), conventional chemical fertilizer treatment (F100), 50% chemical fertilizer reduction treatment (F50), 50% chemical fertilizer reduction combined with silicon, calcium, magnesium soil conditioner treatment (F50S1), 50% chemical fertilizer reduction combined with bone powder treatment (F50S2).

收稿日期: 2023-02-01

基金项目: 江苏省农业科技自主创新基金关键技术创新项目 [CX(21)2019]; 句容市农业创新基金项目 (重点项目) (ZA32102)

作者简介: 黄洁雪 (1986-), 女, 贵州安顺人, 博士, 助理研究员, 主要从事应时鲜果植物营养和土壤改良研究。 (E-mail) huangjiexue-8612@163.com

通讯作者: 吉沐祥, (E-mail) jilvdun2800@163.com

The results showed that compared with F100 treatment, the number of leaves per plant and the weight of single fruit in first cutting were significantly reduced in CK and F50 treatment ($P < 0.05$), and soil conductivity during seedling stage, available phosphorus content and available potassium content were significantly decreased ($P < 0.05$). Compared with F100 treatment, F50S1 treatment significantly increased soil pH at seedling stage, alleviated the

inhibition of soil acidification on strawberry growth, and significantly increased plant height, leaf area and bud rate ($P < 0.05$). There was no significant difference in soil available phosphorus content, available potassium content, leaf total nitrogen content and the weight of single fruit in first cutting between F50S2 treatment and F100 treatment ($P > 0.05$). Compared with F100 treatment, the fruit hardness of second grade fruit in second cutting in F50S2 treatment was significantly increased by 27.03% ($P < 0.05$). F50S2 treatment could significantly prolong the shelf life of strawberries. To sum up, appropriate reduction of chemical fertilizer combined with soil conditioner in excessive fertilization soil could effectively maintain the supply of soil nutrients, promote the growth and development of strawberry, and improve fruit quality.

Key words: strawberry; soil conditioner; chemical fertilizer reduction; strawberry quality; soil nutrient

草莓(*Fragaria ananassa*)是一种深受消费者喜爱的小浆果,中国草莓生产和消费量均位居全球第一。江苏草莓以设施栽培为主,其中以镇江为代表的丘陵地区的草莓每亩经济效益最高^[1]。草莓自身需肥特性和人们对经济效益的追求使得草莓生产用肥量逐年增加,江苏在草莓种植过程中肥料投入为每1 hm² 1.35×10⁴~3.75×10⁴元,其中绝大部分为化肥投入^[2]。长期连作、偏施化肥和过量施肥造成土壤酸化、盐渍化、养分失衡,草莓肥料利用率低、植株生长不良、生产效益降低,以及其他环境风险^[3-5]。过量施肥会导致草莓品质显著下降,如可溶性蛋白质、维生素C、游离氨基酸含量降低,硝酸盐含量过高^[6],可溶性固形物含量降低,总酸含量升高^[7]。为了应对化肥施用过量、不均衡等带来的成本高、资源浪费、环境污染和土壤退化等问题,中国在2020年基本实现“化肥使用量零增长”,进一步提出了“减少化肥使用总量”的目标,化肥减施增效、化肥减施配施技术成为研究热点。大量研究结果表明,在蜜柚^[8]、西瓜^[9]、葡萄^[10]、樱桃番茄^[11]、柑橘^[12]栽培过程中化肥减施或配施有机肥、微生物菌剂、绿肥等,不仅不会降低产量,还能够增加果实中可溶性固形物含量,提高糖酸比,提升果品品质。施用土壤调理剂是改良土壤性质、提高生产力的常用措施。矿物源类硅钙钾镁土壤调理剂可以提高草莓土壤pH值,显著增加土壤的碱解氮、有效磷和速效钾含量,增加单果质量^[13]。骨粉作为畜牧业副产品,呈弱碱性,富含钙和磷^[14],施用于黑麦草^[15]、玉米^[16]、小麦^[17]中不仅可以调节土壤酸碱度,还能为作物供应钙和磷,降低重金属污染风险,是一种环保经济的土壤调理剂。

化肥减施并配施土壤调理剂改良水果品质和土壤养分的研究较少,目前还未有关于化肥减施配施土壤调理剂对草莓品质和土壤养分影响的报道。本研究在连作20年的草莓地开展试验,以主栽草莓红

颊为试验材料,化肥减量50%并配施不同的土壤改良剂,研究对土壤养分、草莓植株生长发育和草莓产量、品质的影响,以期探明化肥减施与土壤调理剂的最佳组合及其增产增优的机制,为大棚草莓化肥减施增效、可持续栽培提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 供试材料

试验于2021年在江苏省镇江市句容市绿健草莓家庭农场(31°94' N, 119°13' E)开展,土壤为黄棕壤种植水稻后形成的黄白土。土壤基础理化性质为pH值5.33、电导率261 μS/cm、有机质含量29.68 g/kg、碱解氮含量266.23 mg/kg、有效磷含量256.58 mg/kg、速效钾含量492.58 mg/kg、交换性钙含量2.11 g/kg、交换性镁含量0.38 g/kg。供试草莓品种为红颊。

供试土壤改良剂为硅钙镁土壤调理剂[韩国NOUSBO公司生产,中国农业生产资料集团公司代理进口,有机硅(SiO₂)含量≥25%,钙(CaO)含量≥28%,镁(MgO)含量≥2.5%,硼(B)含量≥0.05%,铁(Fe)含量≥0.1%,有机碳含量≥6%,pH值8~10],骨粉由天然动物骨粉制成(青岛八福仙生物科技有限公司产品,总氮含量2%,总磷含量20%,总钙含量18%),有机肥为紫牛有机肥(巴彦淖尔市德源肥业有限公司产品,有机质含量≥90%,N+P₂O₅+K₂O总含量≥12%)。菌肥为可施可力(武汉科诺生物科技股份有限公司产品,每1g含枯草芽孢杆菌KN-42活菌数5×10⁸、胶冻样芽孢杆菌活菌数5×10⁷,有机质含量60%,腐殖酸含量10%),氮磷钾复合肥(N含量:P₂O₅含量:K₂O含量=17:17:17)为中化螯合肥(中化山东肥业有限公司产品)。

1.2 试验设计

田间试验为随机区组设计,在底施有机肥1 200

kg/hm²和菌肥1 200 kg/hm²的基础上,试验设 5 个处理:不施化肥对照(CK)、常规量施化肥(施 N 量 76.5 kg/hm²、P₂O₅ 量 76.5 kg/hm²、K₂O 量 76.5 kg/hm²)处理(F100)、化肥减施 50%(施 N 量 38.25 kg/hm²、P₂O₅ 量 38.25 kg/hm²、K₂O 量 38.25 kg/hm²)处理(F50)、化肥减施 50%配施硅钙镁土壤调理剂(600 kg/hm²)处理(F50S1)、化肥减施 50%配施骨粉(600 kg/hm²)处理(F50S2)。每处理重复 3 次,小区面积为 10 m²,共 15 个小区。2021 年 8 月 31 日(移栽前 7 d),将各处理肥料,混合均匀后撒入各小区并与 0~20 cm 土层土壤翻拌均匀,随后灌水保湿。2021 年 9 月 7 日,选取生长一致的健壮草莓苗,保留 3 叶 1 心移栽。所有处理追肥和田间管理均按照当地常规管理进行。

1.3 样品采集及指标测定

1.3.1 草莓植株生长发育指标测定 2021 年 10 月 14 日调查幼苗期植株的死苗率,每个处理小区选取具有代表性的 5 株,3 次重复合计 15 株,用直尺测定株高、倒数第二片完全展开叶中心小叶的长和宽(叶面积=叶长×叶宽×0.73),游标卡尺测茎粗,并调查叶片数。2021 年 10 月 25 日调查全小区的现蕾率。2021 年 11 月 14 日每个处理小区选取具有代表性的 6 株,3 次重复合计 18 株,调查初果期的单株结果数。

1.3.2 土壤理化性质测定 采用 5 点取样法在各小区内取 0~20 cm 耕层土壤样品,剔除石砾和植物残体等杂物,经风干过筛后测定土壤理化性质。土壤 pH 值采用赛多利斯 PB-10 酸度计测定,水土比 5:1(质量比);电导率采用电导法测定;有机质含量采用重铬酸钾外加热法测定;碱解氮含量采用碱解扩散法测定;有效磷用氟化铵-盐酸溶液浸提,含量采用钼锑抗比色法测定;速效钾含量采用乙酸铵浸提-火焰光度计测定;交换性钙、交换性镁含量采用乙酸铵浸提,ICP-OES 测定^[18]。2021 年 10 月 14 日取样检测幼苗期土壤 pH 值和电导率。2021 年 11 月 14 日取样检测结果期土壤 pH 值、电导率、有机质含量、碱解氮含量、有效磷含量、速效钾含量、可交换性钙含量、可交换性镁含量。

1.3.3 草莓叶片营养元素含量测定 2021 年 11 月 14 日,每小区选取具有代表性的倒数第二片完全展开叶中心小叶(鲜叶)100 g,105 ℃杀青 0.5 h 后 80 ℃烘干至恒质量,用于检测叶片中全氮、全磷、全钾

含量。叶片经 H₂SO₄-H₂O₂ 消煮,全氮含量采用凯氏定氮法测定,全磷含量采用钼锑抗比色法测定,全钾含量采用火焰光度法测定^[18]。

1.3.4 草莓产量测定 每小区选取具有代表性的 3 株进行挂牌,每处理共 9 株,跟踪记录头茬商品果(单果质量 10 g 以上)产量。每 3~4 d 记录 1 次成熟果实个数和单果质量,计算平均单株头茬商品果产量。

1.3.5 草莓果实品质测定 2022 年 1 月 14 日,每小区选取具有代表性的成熟二级果 10 个,3 次重复合计 30 个,用于测定单果质量、可溶性固形物含量和硬度。采用自动数字折射仪(日本 ATAGO 公司产品,型号 RX-5000α)测定果实的可溶性固形物含量,利用水果硬度计(意大利 Fruit Test™ 公司产品,型号 FT-02)测定果实硬度,6 mm 探头。

1.4 数据分析

图、表中数据均为 3 次重复的平均值±标准差,分别用 Microsoft Excel 和 Origin Pro 8 软件处理数据和作图,用 DPS 软件对数据进行方差分析,并采用 Duncan's 检验法进行多重比较,检验差异显著性($P<0.05$)。相关性分析采用 Pearson 相关系数表示相关关系的强弱情况。

2 结果与分析

2.1 化肥减施配施土壤调理剂对草莓生长发育的影响

与 F100 处理相比,不施化肥对照(CK)、F50 处理和 F50S2 处理草莓单株叶片数显著降低了 6.91%~10.74%($P<0.05$)(表 1)。与 F100 处理相比,F50S1 处理草莓株高显著增加了 23.65%($P<0.05$),叶面积显著增加了 19.36%($P<0.05$),叶面积为倒数第二完全展开叶中心小叶的叶面积。F100 处理和 F50S1 处理草莓单株叶片数无显著差异。各处理的死苗率、茎粗均无显著差异。结果表明,富营养化的土壤中减施化肥会减缓草莓幼苗的生长,但在减施化肥的同时增施土壤调理剂不仅不会减缓草莓幼苗生长还可以显著促进草莓幼苗生长。

与 F100 处理相比,不施化肥对照(CK)草莓现蕾率显著降低了 23.13%($P<0.05$),F50S1 处理草莓现蕾率显著提高了 25.44%($P<0.05$),F50 处理、F50S2 处理和 F100 处理相比无显著差异($P>0.05$)

(图 1A)。F50S1 处理草莓单株结果数显著高于其他处理,较 F100 处理显著增加了 19.76% ($P < 0.05$) (图 1B)。结果表明,富营养化的土壤中不施化肥会

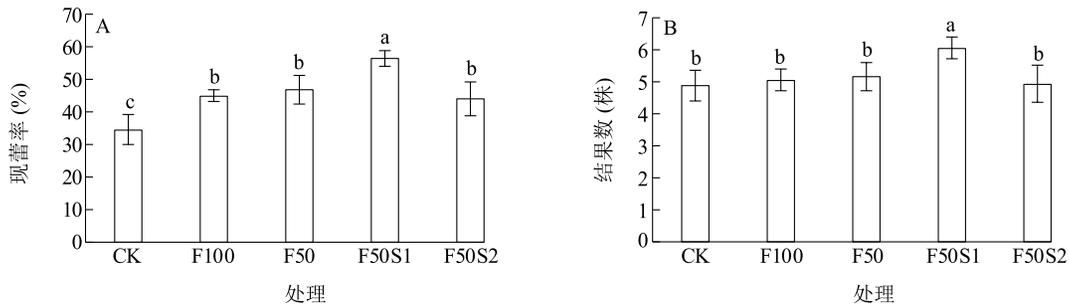
显著延迟草莓现蕾,在减施化肥的同时增施适宜的土壤调理剂不仅能够提高草莓现蕾率,还能增加结果初期的单株结果数,从而提早上市。

表 1 化肥减施配施土壤调理剂对草莓幼苗生长发育的影响

Table 1 Effects of chemical fertilizer reduction combined with soil conditioner on the growth and development of strawberry seedlings

处理	死苗率 (%)	株高 (cm)	茎粗 (mm)	叶面积 (cm ²)	单株叶片数 (张)
CK	1.48±1.30a	8.23±1.24b	10.83±0.87a	29.64±3.72b	6.33±0.98b
F100	2.73±2.37a	8.33±1.23b	10.84±0.84a	29.39±5.35b	6.80±1.21a
F50	1.40±1.22a	8.67±1.22b	10.93±0.94a	29.21±6.03b	6.07±0.88b
F50S1	0±0a	10.30±1.49a	11.23±0.89a	35.08±8.85a	6.87±0.99a
F50S2	1.43±1.24a	8.40±1.11b	10.88±0.88a	28.65±5.00b	6.07±0.80b

CK: 不施化肥对照; F100: 常规量施化肥处理; F50: 化肥减施 50% 处理; F50S1: 化肥减施 50% 配施硅钙镁土壤调理剂; F50S2: 化肥减施 50% 配施骨粉处理。同一列数值后不同小写字母表示差异显著 ($P < 0.05$)。



CK、F100、F50、F50S1、F50S2 处理见表 1 注。不同小写字母表示处理间差异显著 ($P < 0.05$)。

图 1 化肥减施配施土壤调理剂对草莓现蕾率和结果数的影响

Fig.1 Effects of chemical fertilizer reduction combined with soil conditioner on the bud rate and number of fruits of strawberries

2.2 化肥减施配施土壤调理剂对草莓叶片矿质营养成分含量的影响

与 F100 处理相比,不施化肥对照 (CK) 草莓叶片中全氮含量显著下降了 6.45% ($P < 0.05$), F50 处理草莓叶片中全氮含量显著下降了 6.55% ($P < 0.05$), F50S1 处理、F50S2 处理与 F100 处理无显著差异 ($P > 0.05$)。叶片中的全磷和全钾含量各处理间无显著差异 ($P > 0.05$) (表 2)。结果表明,不施化肥对照 (CK) 和 F50 处理草莓叶片中的全氮含量会显著降低,而在减施化肥的同时增施土壤调理剂能够保证植株摄入足够量的氮,从而维持草莓正常的生长发育。

2.3 化肥减施配施土壤调理剂对草莓产量品质的影响

产量调查结果表明,与 F100 处理相比,不施化肥对照 (CK) 单株头茬果产量显著下降 19.87% ($P < 0.05$), F50 处理单株头茬果产量显著下降 17.06%

($P < 0.05$), F50S1 处理和 F50S2 处理单株头茬果产量与 F100 处理无显著差异 ($P > 0.05$) (表 3)。各处理单株头茬果果数无显著差异 ($P > 0.05$), 因此头茬果的单果质量与单株产量呈正相关。为进一步调查草莓品质,避免不同等级果实造成差异,统一选取各处理的二茬果的二级果进行品质检测 (表 4)。与 F100 处理相比,不施化肥对照 (CK) 二茬果二级果单果质量显著下降 13.10% ($P < 0.05$), F50 处理二茬果二级果单果质量显著下降 14.39% ($P < 0.05$)。F50S1 处理、F50S2 处理与 F100 处理二茬果二级果单果质量无显著差异 ($P > 0.05$)。各处理草莓二茬果二级果可溶性固形物含量与 F100 处理无显著差异 ($P > 0.05$), 但 F50S2 处理草莓二茬果二级果可溶性固形物含量比 F50S1 处理显著提高 11.14% ($P < 0.05$)。F50S2 处理二茬果二级果果实硬度显著高于其他处理 ($P < 0.05$), F50S2 处理二茬果二级果果实硬度比 F100 处理显著提高 27.03% ($P < 0.05$)。结果表明,与 F100

处理相比,不施化肥对照(CK)和F50处理草莓头茬果和二茬果二级果单果质量显著减少,降低草莓效益,而在减施化肥的同时增施土壤调理剂能够维持与施全量化肥相当的头茬果和二茬果二级果单果质量,F50S2处理还能显著提高果实硬度,在减少化肥施用的情况下提高草莓品质,延长货架期。

表2 化肥减施配施土壤调理剂对草莓叶片矿质营养元素含量的影响

Table 2 Effects of chemical fertilizer reduction combined with soil conditioner on the content of mineral nutrients in strawberry leaves

处理	全氮含量 (g/kg)	全磷含量 (g/kg)	全钾含量 (g/kg)
CK	30.44±0.69b	5.79±0.09a	27.45±1.12a
F100	32.54±0.75a	5.88±0.61a	27.09±0.33a
F50	30.41±1.24b	5.40±0.65a	26.42±1.39a
F50S1	31.17±0.78ab	5.65±0.40a	26.36±0.87a
F50S2	31.60±0.96ab	5.39±0.40a	25.97±1.09a

CK、F100、F50、F50S1、F50S2处理见表1注。同一列数值后不同小写字母表示差异显著($P<0.05$)。

表3 化肥减施配施土壤调理剂对草莓头茬果的影响

Table 3 Effects of chemical fertilizer reduction combined with soil conditioner on the strawberry in first crop

处理	单株产量 (g)	单果质量 (g)	单株果数 (个)
CK	72.62±13.32c	19.43±1.79c	3.78±0.83a
F100	90.63±6.99a	23.40±1.93a	3.89±0.33a
F50	75.17±14.09bc	20.90±1.96bc	3.67±1.00a
F50S1	85.33±15.78ab	22.93±3.04ab	3.78±0.83a
F50S2	90.04±10.05a	23.58±2.60a	3.89±0.78a

CK、F100、F50、F50S1、F50S2处理见表1注。同一列数值后不同小写字母表示差异显著($P<0.05$)。

表4 化肥减施配施土壤调理剂对草莓二茬果二级果的影响

Table 4 Effects of chemical fertilizer reduction combined with soil conditioner on the secondary fruit of strawberry in second crop

处理	单果质量 (g)	可溶性固形物 含量(%)	果实硬度 (kg/cm ²)
CK	22.76±4.78b	14.63±1.39ab	0.913±1.30b
F100	26.19±5.61a	14.73±1.17ab	0.893±1.10b
F50	22.42±3.30b	14.64±1.31ab	0.894±1.31b
F50S1	24.35±3.47ab	13.92±0.70b	0.972±0.70b
F50S2	26.79±5.54a	15.47±1.45a	1.127±1.45a

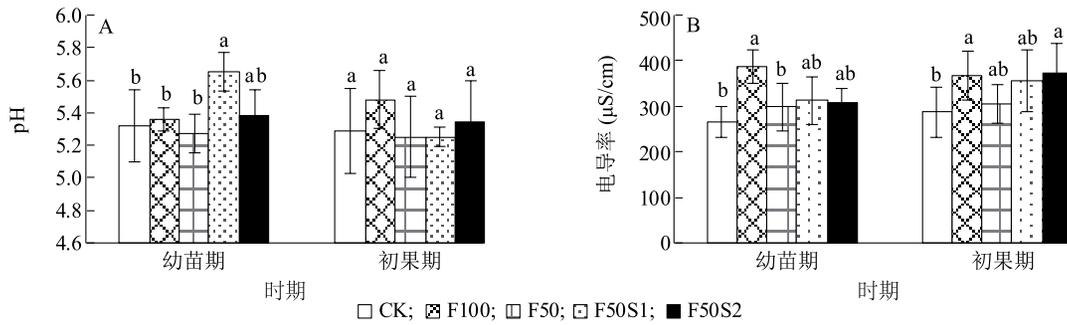
CK、F100、F50、F50S1、F50S2处理见表1注。同一列数值后不同小写字母表示差异显著($P<0.05$)。

2.4 化肥减施配施土壤调理剂对草莓土壤理化性质的影响

幼苗期,F50S1处理土壤pH值显著高于不施化肥对照(CK)、F100处理和F50处理($P<0.05$),F50S1处理土壤pH值与F50S2处理无显著差异($P>0.05$)。初果期,各处理土壤pH值无显著差异($P>0.05$)(图2A)。结果表明,基肥中加入土壤调理剂能够显著提高土壤pH值,缓解土壤酸化对植物造成的胁迫,因此F50S1处理草莓株高、叶面积、现蕾率和单株结果数等指标均显著优于其他处理。然而,随着后期追肥以及土壤的缓冲作用,初果期土壤调理剂的作用逐步消失。

土壤电导率可以反映土壤养分含量。幼苗期,与F100处理相比,不施化肥对照(CK)土壤电导率显著降低31.18%($P<0.05$),F50处理土壤电导率显著降低22.91%($P<0.05$),而F50S1处理和F50S2处理与F100处理无显著差异($P>0.05$);初果期,仅不施化肥对照(CK)土壤电导率显著低于F100处理($P<0.05$),其他处理与F100处理无显著差异($P>0.05$)(图2B)。结果表明,化肥投入量不足导致苗期土壤电导率显著降低,而化肥减施配施土壤调理剂处理的苗期土壤电导率则下降不显著,与苗期不施化肥对照(CK)和F50处理草莓叶片数显著低于F100处理($P<0.05$),而F50S1处理草莓叶片数与F100处理无显著差异的结论相对应。不施化肥对照(CK)土壤电导率幼苗期至初果期均显著低于F100处理($P<0.05$),这与不施化肥对照(CK)草莓现蕾率显著低于F100处理的结论相对应。

各处理土壤有机质含量无显著差异($P>0.05$)(表5)。F50S2处理和F50S1处理土壤碱解氮含量与F100处理相比无显著差异($P>0.05$),但F50S2处理土壤碱解氮含量比F50处理显著提高了25.88%($P<0.05$)。除F50S2处理外,其余化肥减施处理的有效磷和速效钾含量均显著低于F100处理($P<0.05$),与F50S2处理头茬单果质量和二茬二级果单果质量与F100处理无显著差异($P>0.05$)相对应,而不施化肥对照(CK)和F50处理头茬单果质量和二茬二级果单果质量与F100处理相比显著降低($P<0.05$)的结论相对应。F50S2处理交换性钙含量比F50处理、不施化肥对照(CK)显著提高22.44%($P<0.05$)、24.26%($P<0.05$),这是由于骨粉中含有大量的钙。



CK、F100、F50、F50S1、F50S2 处理见表 1 注。不同字母表示处理间差异显著 ($P < 0.05$)。

图 2 化肥减施配施土壤调理剂对草莓生长发育不同时期土壤 pH 值和电导率的影响

Fig.2 Effects of chemical fertilizer reduction combined with soil conditioner on soil pH and electrical conductivity at different growth and development stages of strawberries

表 5 化肥减施配施土壤调理剂对土壤理化性质的影响

Table 5 Effects of chemical fertilizer reduction combined with soil conditioner on the physicochemical properties of soil

处理	有机质含量 (g/kg)	碱解氮含量 (mg/kg)	有效磷含量 (mg/kg)	速效钾含量 (mg/kg)	交换性钙含量 (g/kg)
CK	29.93±1.81a	389.03±15.00ab	322.93±47.22b	830.37±102.46b	2.05±0.19b
F100	31.66±1.32a	435.67±37.46ab	405.08±48.91a	1 038.96±97.05a	2.20±0.08ab
F50	31.57±1.57a	365.00±46.59b	302.38±29.49b	829.76±103.17b	2.02±0.34b
F50S1	30.94±1.97a	378.50±40.20ab	318.34±54.48b	844.93±112.56b	2.20±0.23ab
F50S2	30.67±1.71a	459.45±53.83a	354.61±40.66ab	1 104.58±150.27a	2.51±0.18a

CK、F100、F50、F50S1、F50S2 处理见表 1 注。同一列数值后不同小写字母表示差异显著 ($P < 0.05$)。

总体而言,富营养化土壤中不施或少施化学基肥仍会导致土壤养分不足,从而显著影响草莓生长发育,进而影响产量。然而,F50S1 处理可缓解土壤酸化对幼苗生长的抑制,促进幼苗早期生长发育,维持土壤养分供应以确保单果质量不显著降低,提前上市提高经济效益。F50S2 处理可使土壤维持足够的养分供应量,满足草莓生长发育需要,单果质量与 F100 处理相当,并提供足量的中量元素钙以提高草莓硬度,延长货架期提高效益。总之,草莓生产中在化肥减施的同时配施土壤调理剂可实现化肥减施增效。

2.5 相关性分析

相关性分析发现,草莓叶片数与幼苗期和初果期土壤电导率均呈显著正相关 ($P < 0.05$),与有效磷含量呈显著正相关 ($P < 0.05$),草莓头茬果单株果数与幼苗期土壤 pH 值呈显著正相关 ($P < 0.05$),草莓叶片全氮含量则与幼苗期土壤电导率和有效磷含量呈显著正相关 ($P < 0.05$) (表 6)。草莓果实硬度与初果期土壤电导率、碱解氮含量、速效钾含量呈显著正相关 ($P < 0.05$),草莓果实硬度与土壤可交换性钙

含量呈极显著正相关 ($P < 0.01$)。由此可知,在酸化土壤中提高土壤 pH 值可以促进草莓早结果,提高土壤电导率、碱解氮含量、速效钾含量和可交换性钙含量,可以显著提高果实硬度。

表 6 草莓生长发育指标、果实品质指标与土壤理化性质的相关性分析结果

Table 6 Correlation analysis between strawberry growth and development indicators, fruit quality indicators, and soil physicochemical properties

项目	相关系数			
	单株 叶片数	头茬果 单株果数	叶片 全氮含量	果实 硬度
幼苗期土壤 pH 值	0.293	0.616 *	-0.080	0.131
幼苗期土壤电导率	0.590 *	0.145	0.636 *	0.218
初果期土壤电导率	0.529 *	-0.017	0.360	0.537 *
碱解氮含量	0.324	-0.108	0.340	0.558 *
有效磷含量	0.571 *	-0.169	0.584 *	0.259
速效钾含量	0.264	-0.195	0.430	0.518 *
可交换性钙含量	0.021	0.05	0.027	0.737 **

* 表示 $P < 0.05$; ** 表示 $P < 0.01$ 。

3 讨论

过量施肥会导致土壤养分失衡、环境污染以及果实产量和品质下降。因此,化肥减量成为近年的研究热点。本研究中,与 F100 处理相比,不施化肥对照(CK)、F50 处理、F50S2 处理草莓叶片数均显著降低($P < 0.05$)。与 F100 处理相比,不施化肥对照(CK)草莓现蕾率显著降低($P < 0.05$),表明即使是土壤养分非常丰富的田块中,大幅减少化肥投入仍会造成草莓植株生长缓慢,这与前人的研究结果相一致。大量研究结果表明,适量减少化肥投入不影响作物生长,大幅减施化肥则会影响作物生长,京津地区苹果化肥减施 30% 对树体生长无显著影响^[19];化肥减施 25% 不会显著降低设施黄瓜的生物量和产量^[20];化肥减量 20%、40% 配施生物有机肥不仅不会影响香蕉生长,还可以提高产量和品质,而化肥减施 60% 则会显著降低香蕉单果质量和收获率^[21]。

农田长期过量施用化肥还会使土壤快速酸化。在中国,南方土壤酸化速率高于北方,种植经济作物的土壤酸化速率高于种植谷类作物的土壤^[22]。土壤酸化会导致土壤养分的有效性降低,有害元素的浓度提高,养分匮乏和金属中毒会遏制植物生长^[23-24]。前人研究结果表明,酸化土壤会使水稻分蘖期推迟^[25]。本研究中,硅钙镁土壤调理剂提高了幼苗期土壤 pH 值,草莓株高、叶面积和现蕾率的增加表明草莓生长抑制得到缓解,从而促进了草莓早结果,可以提早上市获得较高收益。有研究表明,福建酸性红壤施用 1 500 kg/hm² 钙镁型土壤调理剂能够提高土壤 pH 值,花椰菜集中成熟采收时间提早 5 d,花球单球质量增加 0.35 kg^[26];硅钙钾镁土壤调理剂可以显著提高草莓前期和中期的单果质量以及总产量^[13]。

常规施肥配施土壤调理剂能够提高土壤养分含量。苹果园酸化土壤上施用多种土壤调理剂均显著提高了土壤 pH 值,对有机质、碱解氮、有效磷、速效钾含量均有不同程度的提高^[27]。单纯减少肥料投入会导致土壤养分显著减少,化肥减施配施有机肥、有机物料或土壤调理剂则能维持甚至提高土壤养分供应量。茶园化肥减施 20% 会显著减少土壤中硝态氮含量,化肥减施 40% 则会显

著减少铵态氮、硝态氮、有效磷和速效钾含量,化肥减施同时配施有机肥则能维持土壤养分供应,甚至提高土壤中速效钾含量^[28]。甜瓜栽培过程中氮、磷投入量减少 50%,土壤硝态氮、铵态氮、有效磷含量均显著降低;但在化肥减施的同时配施有机肥后,收获期土壤有效磷含量与常规施肥无显著差异^[29]。本研究中,与 F100 处理相比,不施化肥对照(CK)、F50 处理、F50S1 处理 0~20 cm 土层的土壤有效磷和速效钾含量均显著降低($P < 0.05$),而 F50S2 处理土壤有效磷和速效钾含量与 F100 处理无显著差异($P > 0.05$)。这是因为骨粉能够提高土壤有效磷供应量,如酸性土壤中施用含骨粉的土壤调理剂能增加 66%~93% 的土壤有效磷含量^[17],在土壤养分匮乏条件下骨粉可以作为植物磷和钾的有效来源^[30]。化肥减施会减少土壤养分供应量,进而影响植株矿质养分的吸收量^[31-34]。本研究结果表明,相较于 F100 处理,大量减少化肥投入如不施化肥对照(CK)和 F50 处理叶片氮含量会显著降低($P < 0.05$),而 F50S1 处理和 F50S2 处理叶片氮含量则与 F100 处理无显著差异($P > 0.05$),这表明土壤调理剂能够促进草莓对氮的吸收。类似的研究结果表明,增施硅钙钾镁土壤调理剂能够显著提高内蒙古马铃薯植株氮素含量^[35]。

配施适宜的土壤调理剂不仅能够改善土壤理化性质,还能提高果品品质。骨粉 Ca 含量高达 283.0 g/kg,施入土壤后可显著提高土壤中可交换性钙含量^[17]。与 F100 处理相比,本研究中含有骨粉的 F50S2 处理土壤交换性钙含量显著提高($P < 0.05$),果实硬度也显著提高($P < 0.05$)。大部分试验通过叶面喷施钙肥来提高草莓果实硬度,如喷施 240 mg/L Ca+60 ml/L B 可以使果实硬度提高 14%^[36]。但也有研究表明,土壤中施入石灰氮(CaCN₂)能使草莓果实硬度提高 5%~10%^[37]。然而,当化肥过量减施,配施土壤调理剂无法保持果实品质。张筠筠等^[38]在贺兰山东麓酿酒葡萄中的研究表明,化肥和有机肥各减施 75% 同时配施土壤调理剂处理的葡萄产量较全量施用化肥处理增产了 69.07%,但葡萄浆果中单宁和总酚含量显著下降,综合品质显著降低。这表明,土壤调理剂不能完全替代化肥,化肥适量减施

同时配施土壤调理剂是实现化肥减施增效的有效途径。本研究的相关性分析结果表明,在化肥减施前提下,提高土壤电导率、碱解氮含量、速效钾含量和可交换性钙含量可以显著提高果实硬度。而在基础肥力较高的桃园上过多施入氮肥会导致桃果实硬度下降,土壤碱解氮含量与桃果实硬度呈反比^[39]。本研究中,2种土壤调理剂分别具有提早上市和延长货架期的作用,为进一步提高综合效能,土壤调理剂的选择和及其与化肥的配比还需进一步研究。

4 结论

与常规量施化肥处理相比,基施中不施化肥或化肥减施50%处理,土壤养分供应量均会显著降低,植株生长发育和草莓单果质量受到影响。化肥减施50%同时配施硅钙镁土壤调理剂可以显著提高草莓幼苗期土壤pH值,缓解酸化土壤对草莓幼苗生长的抑制,显著增加株高、叶面积和现蕾率,提早结果,提早上市。化肥减施50%同时配施骨粉不仅可以维持与化肥全量施用相当的土壤养分供应量、叶片全氮含量和单果质量,还能提高果实硬度,延长货架期。

参考文献:

- [1] 常向阳,车晶晶. 江苏省草莓生产状况调查及成本收益分析[J]. 中国果树,2020,203(3):126-131.
- [2] 常向阳,葛悦. 江苏省草莓生产投入现状分析[J]. 中国蔬菜,2021(9):7-11.
- [3] 赵帆,赵密珍,王钰,等. 草莓不同连作年限土壤养分及微生物区系分析[J]. 江苏农业科学,2017,45(16):110-113.
- [4] 李梦雅,陈莎莎,王世梅. 连作草莓低发病土壤与高发病土壤理化性质及生物学特征差异比较[J]. 江苏农业学报,2021,37(4):910-918.
- [5] LI X Y, LEWIS E E, LIU Q Z, et al. Effects of long-term continuous cropping on soil nematode community and soil condition associated with replant problem in strawberry habitat[J]. Scientific Reports,2016,6:30466.
- [6] 张智,党思荣,李曼宁,等. 基于GRA-TOPSIS耦合的草莓品质综合评价[J]. 东北农业大学学报,2021,52(10):47-56.
- [7] 吴愉萍,连瑛,沈岚,等. 多年连续种植草莓地块化肥减量施用对草莓产量和品质的影响[J]. 浙江农业科学,2021,62(5):894-897.
- [8] 李江鹤,胡承孝,刘怀伟,等. 连续五年氮、磷减量施用对琯溪蜜柚产量和品质的影响[J]. 植物营养与肥料学报,2022,28(6):1081-1091.
- [9] 谭军利,马永鑫,王西娜,等. 生物有机肥替代氮肥对压砂西瓜生长、产量及品质的影响[J]. 北方园艺,2022(7):30-38.
- [10] 马忠明,陈娟,牛小霞,等. 减施化肥和配施有机肥对酿酒葡萄梅鹿辄产量和品质的影响[J]. 水土保持通报,2021,41(2):188-193,200.
- [11] 岳明灿,王志国,陈秋实,等. 减施化肥配施微生物菌剂对番茄产质量和土壤肥力的影响[J]. 土壤,2020,52(1):68-73.
- [12] 田想,张威,伍玉鹏,等. 绿肥种植配施减量氮肥对橘园土壤肥力及果实质量的影响[J]. 中国土壤与肥料,2020(6):197-204.
- [13] 戴黎,杜延全,朱建强. 几种土壤调理剂改良大棚种植草莓土壤的效果[J]. 中国土壤与肥料,2021(2):276-282.
- [14] GARCIA R A, ROSENTRATER K A. Concentration of key element in North American meat & bone meal[J]. Biomass Bioenerg,2008,32:887-891.
- [15] YLIVAINIO K, UUSITALO R, TURTOLA E. Meat bone meal and fox manure as P sources for ryegrass (*Lolium multiflorum*) grown on a limed soil[J]. Nutrient Cycling in Agroecosystems,2007,81:267-278.
- [16] NOGALSKA A, CZAPLA J, NOGALSKI Z, et al. The effect of increasing dose of meat and bone meal on maize (*Zea mays* L.) grown for grain[J]. Agricultural and Food Science,2012,21:325-331.
- [17] SHI R Y, LI J Y, NI N, et al. Effects of biomass ash, bone meal, and alkaline slag applied alone and combined on soil acidity and wheat growth[J]. Journal of Soils and Sediments,2017,17:2116-2126.
- [18] 鲍士旦. 土壤农化分析[M]. 北京:中国农业出版社,2016.
- [19] 王贺,邓明江,王旋,等. 减施化肥对京津地区苹果生长发育的影响[J]. 果树学报,2020,37(2):196-203.
- [20] 董飞雨,焦祎梦,杨迪文,等. 蚓粪替代部分化肥对温室黄瓜钾素吸收与产量的影响[J]. 土壤通报,2022,53(5):1131-1139.
- [21] 谢荣淳,黄丽娜,雷菲,等. 化肥减量配施生物有机肥对香蕉产量及品质的影响[J]. 中国南方果树,2021,50(2):58-62.
- [22] GUO J H, LIU X J, ZHANG Y, et al. Significant acidification in major Chinese cropland[J]. Science,2010,327:1008-1010.
- [23] KOCHIAN L V, HOEKENGA O A, PIÑEROS M A. How do crop plants tolerate acid soils? Mechanisms of aluminum tolerance and phosphorous efficiency[J]. Annual Review of Plant Biology,2004,55:459-493.
- [24] 赵鹏,黄占斌,任忠秀,等. 中国主要退化土壤的改良剂研究与应用进展[J]. 排灌机械工程学报,2022,40(6):618-625.
- [25] 陈平平. 酸化土壤对水稻产量与氮利用效率的影响途径研究[D]. 长沙:湖南农业大学,2015.
- [26] 张明来. 福建酸性红壤施用钙镁型土壤调理剂的效果研究[J]. 中国土壤与肥料,2021(2):283-288.
- [27] 孙瑶,马金昭,傅国海,等. 土壤调理剂和生草互作对果园酸化土壤化学性质及产量的影响[J]. 中国土壤与肥料,2021(2):61-68.

- [28] 王子腾,耿元波,梁涛,等. 减施化肥和配施有机肥对茶园土壤养分及茶叶产量和品质的影响[J]. 生态环境学报,2018,27(12):2243-2251.
- [29] 郭雨浓,刘宝玉,郑直,等. 不同施肥对河套灌区瓜田土壤养分及甜瓜生长和养分利用的影响[J]. 水土保持学报,2021,35(4):230-236.
- [30] BROD E, HARALDSEN T K, BRELAND T A. Fertilization effects of organic waste resources and bottom wood ash; results from a pot experiment [J]. *Agricultural and Food Science*, 2012, 21(4):332-347.
- [31] 胡中泽,衣政伟,杨大柳,等. 氮肥减施与花生秸秆还田对麦田土壤氨挥发、氮肥利用率及产量的影响[J]. 江苏农业学报,2022,38(6):1492-1499.
- [32] 刘中良,高俊杰,陈震,等. 氮肥减量配施有机肥对大白菜产量、品质及氮肥利用率的影响[J]. 排灌机械工程学报,2022,40(11):1138-1144.
- [33] 赵文军,薛开政,杨继周,等. 氮肥减施下光叶紫花苕不同翻压量对烟草产量和品质的影响[J]. 江苏农业科学,2022,50(16):73-78.
- [34] 赵子婧,孙建平,戴相林,等. 秸秆还田结合减量施肥对水稻产量和土壤养分的影响[J]. 江苏农业科学,2022,50(10):66-71.
- [35] 王贺东,杨海波,万夫伟,等. 硅钙钾镁土壤调理剂对内蒙古马铃薯产量及经济效益的影响[J]. 中国土壤与肥料,2022(7):126-131.
- [36] MOHAMED M H M, PETROPOULOS S A, ALI M M E. The application of nitrogen fertilization and foliar spraying with calcium and boron affects growth aspects, chemical composition, productivity and fruit quality of strawberry plants [J]. *Horticulturae*, 2021, 7(8):257.
- [37] SABATINO L, D'ANNA F, PRINZIVALLI C, et al. Soil solarization and calcium cyanamide affect plant vigor, yield, nutritional traits, and nutraceutical compounds of strawberry grown in a protected cultivation system [J]. *Agronomy*, 2019, 9(9):513.
- [38] 张筠筠,王竞,孙权,等. 化肥减施对贺兰山东麓土壤肥力及酿酒葡萄品质的影响[J]. 西南农业学报,2019,32(7):1601-1606.
- [39] 冯新新,刘韶华,宋宇琴,等. 太谷区桃园养分投入、土壤养分状况及其与桃果品质的关系[J]. 经济林研究,2021,39(1):33-40.

(责任编辑:成纾寒)