



减氮配施生物炭对连作草莓生长发育及果实产量品质的影响

张镇武¹, 方英姿¹, 吴慧欣¹, 马玲¹, 李国祥³, 邢承华^{1,2,*}

¹金华职业技术大学, 浙江金华321000

²浙江省农作物收获装备技术重点实验室, 浙江金华321000

³建德市山湾人家畜牧专业合作社, 杭州311605

*通信作者(xingchenghua@hotmail.com)

摘要: 为探究氮肥减量配施生物炭对连作草莓生长以及果实品质影响, 以‘红颊’草莓为试材, 选择连作8年的草莓大棚, 试验设置了6组处理: 对照(CK, N0)、常规施氮(210 kg·hm⁻², N100)、减氮20% (168 kg·hm⁻², N80)、减氮20%+3%生物炭(N80+BC), 减氮40% (126 kg·hm⁻², N60)和减氮40%+3%生物炭(N60+BC), 生物炭添加量为3% (6.3 kg·hm⁻²), 比较不同处理对草莓生长发育及果实品质的影响。结果表明: 随着氮肥施用量的减少, 草莓生长期株高、地上地下部分干重和鲜重、叶片净光合速率、叶绿素含量、可溶性糖含量、叶片根系全氮含量、叶片根系GDH、GS、GOGAT活性、单株产量、可溶性固形物含量、总糖含量、维生素C含量均逐渐降低。然而减氮后配施生物炭明显提高了以上指标, N80+BC处理相较于N80处理在草莓营养生长期、开花坐果期、果实采收期的株高、地上部分鲜重、地下部分鲜重、叶片净光合速率、叶绿素含量、可溶性糖含量、叶片全氮含量、根系全氮含量、叶片GDH、GS、GOGAT、GS活性均提高; 单株产量提升了95.06%; 可溶性固形物提升了22.63%; 总糖含量提升了7.47%; 维生素C含量提升了5.68%。N80+BC处理与N100处理相比以上指标无显著差异。由此可见, 在草莓连作条件下, 施用生物炭可以提高草莓产量品质的同时减少氮肥施用量, 实现草莓栽培过程中氮肥管理的“减量增效”。

关键词: 生物炭; 氮肥减量; 草莓; 产量品质

Effects of nitrogen reduction and biochar on strawberry growth and fruit quality under continuous cropping

ZHANG Zhenwu¹, FANG Yingzi¹, WU Huixin¹, MA Ling¹, LI Guoxiang³, XING Chenghua^{1,2,*}

¹JinHua University of Vocational Technology, Jinhua, Zhejiang 321000, China

²Key Laboratory of Crop Harvesting Equipment Technology of Zhejiang Province, Jinhua, Zhejiang 321000, China

³Jiande Shanwan Family Animal Husbandry Co-Operative Society, Hangzhou 311605, China

*Corresponding author (xingchenghua@hotmail.com)

Abstract: In order to investigate the effect of nitrogen fertilizer reduction and biochar application on the growth and fruit quality of continuous cropping strawberry, 'Red Cheek' strawberry (*Fragaria × ananassa*) was used as the experimental material in the strawberry greenhouses with eight years of continuous cropping. And the experiment was set up with six groups of treatments: control (CK, N0), conventional nitrogen

收稿 2023-09-13 修定 2024-02-25

资助 国家自然科学基金(31101599)和金华市科技项目(2022-2-028和2023-3-163)。

application ($210 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$, N100), 20% nitrogen reduction ($168 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$, N80), 20% N reduction+3% biochar (N80+BC), 40% N reduction ($126 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$, N60), 40% N reduction+3% biochar (N60+BC), and 3% biochar addition ($6.3 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$). The effects of different treatments on strawberry growth and development and fruit quality were compared. The results showed that with the reduction of N fertilizer application, the plant height, dry and fresh weight of above and below ground parts, net photosynthetic rate of leaves, chlorophyll content, soluble sugar content, total nitrogen content of leaf and root, GDH, GS, GOGAT activities of leaf and root, yield per plant, soluble solid content, total sugar content and vitamin C content of strawberry gradually decreased, but the N reduction and the application of biochar significantly improved the above indexes. Compared with N80 treatment, the plant height, fresh weight of above ground part, fresh weight of underground part, net photosynthetic rate of leaves, chlorophyll content, soluble sugar content, total nitrogen content of leaves, total nitrogen content of roots, GDH, GS, GOGAT and GS activities of leaves in N80+BC treatment were increased at nutritive growth stage, flowering and fruiting stage and fruit harvesting stage. The yield per plant increased by 95.06%; soluble solid content increased by 22.63%; total sugar content increased by 7.47%; vitamin C content increased by 5.68%. There was no significant difference in the above indexes between N80+BC treatment and N100 treatment. Therefore, the application of biochar could improve the quality of strawberry and reduce the amount of nitrogen fertilizer applied under the condition of strawberry continuous cropping, thus realizing the "reduction and increase efficiency" of nitrogen fertilizer management in the process of strawberry cultivation.

Key words: biochar; nitrogen reduction; strawberry (*Fragaria × anansissa*); yield quality

草莓(*Fragaria × anansissa*)属于蔷薇科(Rosaceae)草莓属多年生草本植物。近年来,草莓因其独特的口感风味、亩产效益高、营养丰富等原因深受生产者和消费者的喜爱,截至目前我国草莓的栽培面积大约有 $16.7 \text{ 万} \text{ hm}^2$ (高苇等2021)。草莓已成为浙江省最为重要的栽培经济作物之一,并且浙江省草莓以设施栽培为主,2019年草莓设施栽培面积 9.38 万亩 ($6\,253.34 \text{ hm}^2$),作为多年生草本植物,栽培过程中需要大量的氮肥,但大量的氮肥长期施用极易导致草莓在设施栽培过程中容易出现连作障碍(周佳燕等2021)。草莓栽培过程中氮肥施用过少,又会造成草莓根系发育不良、叶片黄化、生长素不能合成、果实质量品质显著下降等问题。研究表明,科学合理的施用氮肥对于提高果实品质具有积极作用,然而在实际生产中,氮利用效率与施氮量呈负相关,大量施氮会提高果实产量,但是氮过量却对果实品质起到了反作用(Jiang等2020)。同时也有研究表明,通过减少氮肥施用量配合其他物质共同施肥对于缓解设施栽培导致的连作障碍具有一定作用(胡平2018)。

生物炭是由秸秆等生物材料无氧条件下经高

温反应生成的具有微孔多、表面积和阳离子交换量大、吸附性强的一系列多孔隙富营养物质,同时生物炭含有含氧官能团和孔隙结构,能够改善土壤理化性质,与肥料混施可提高作物产量并且生物炭本身就含有氮、磷、钾等植物生长发育所需各种营养元素,可以直接为植物生长发育提供养分(殷武平等2023)。吴强建等(2022)在种植蜜柚的土壤中减氮配施生物炭,显著改善了土壤理化性质。史多鹏等(2023)在玉米上减氮配施生物炭能够在提高玉米氮肥利用率的同时稳定产量。李丹丹等(2023)在水稻上减氮15%配施生物炭促进了水稻产量增加。然而,生物炭对于是否能在氮肥减施的条件下促进草莓生长发育、提高品质仍有待证实。本研究针对设施栽培连作草莓氮肥不合理施用的现实生产情况,探究减氮配施生物炭对草莓生长发育及果实品质的影响,为草莓减氮栽培和生物炭的生产应用提供理论基础。

1 材料与方法

1.1 试验条件

试验地点位于浙江省金华市婺城区浙江师范

大学校内试验场, 年平均气温 17.5°C , 年均降雨量 $1\,200\text{ mm}$ 。试验地土壤类型为黄壤, 其基础土壤性质为: pH 5.73、有机质 $28.46\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 、全氮 $1.39\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 、碱解氮 $134.5\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 、有效磷 $37.22\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 、有效钾 $184.53\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 。

1.2 供试材料

选用试验草莓(*Fragaria × anansissa* Duch.)品种为‘红颊’。试验所用肥料为尿素(氮含量 $\geq 46\%$)、过磷酸钙和硫酸钾。

所用生物炭由辽宁金和福农业开发有限公司生产制备。生物炭基本性质为: pH 9.04, C含量 50.55% 、H含量 1.786% 、N含量 1.89% 、S含量 0.171% 、C/N值 26.79 、C/H值 28.3 。

1.3 试验设计

1.3.1 试验设计

大田试验采取随机区组方式设计, 有6组处理: 对照(CK, N0), 常规施氮($210\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$, N100)、减氮 20% ($168\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$, N80)、减氮 $20\%+3\%$ 生物炭(N80+BC)、减氮 40% ($126\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$, N60)和减氮 $40\%+3\%$ 生物炭(N60+BC), 生物炭添加量为 3% ($6.3\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$)。氮肥为尿素, 氮量(N)为 $300\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 、磷量(P)为 $150\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 、钾量(K)为 $450\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$, 供试的3种肥料分别为尿素 $[\text{CO}(\text{NH}_2)_2]$ 、过磷酸钙 $[\text{Ca}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2\cdot\text{H}_2\text{O}]$ 和硫酸钾(K_2SO_4)。每组处理设置3个重复, 共18个小区, 小区规格为 30 m^2 。

1.3.2 样品采集

在草莓生长不同阶段, 分别于草莓初花期(45 d)和盛果期(140 d)选取新鲜根系和新鲜叶片测定根系活力及叶绿素含量。在果实采收期(250 d), 各以随机取样方法摘取各处理区间内成熟度基本一致的单株草莓所有果实, 用于果实产量品质测定。

1.3.3 数据测定

土壤基本性质数据测定: pH值使用电位法进行测定、有机质含量使用重铬酸钾外加热法测定、全氮和碱解氮采用半微量凯氏定氮法测定、有效磷采用双酸浸提-钼锑抗比色测定、有效钾采用冷硝酸浸提-火焰光度计法测定(李科和李志军2019)。

草莓植株生长数据测定: 株高采用刻度尺测量栽培基质表面到植株最高叶片的高度、地上地下部分鲜重于草莓生长各时期取样使用天平进行

测量、地上地下部分干重使用烘箱烘干后使用天平称重测量。叶片净光合速率使用Li-6400XTP便携式光合仪进行测定, 叶绿素含量使用便携式SPAD计进行测定, 可溶性糖含量使用TD-45数显糖度计测定, 全氮含量采用凯氏定氮法进行测定(王雪等2020)。

氮代谢相关酶活性数据测定: 谷氨酸脱氢酶(glutamate dehydrogenase, GDH)、谷氨酰胺合成酶(glutamine synthetase, GS)和谷氨酸合成酶(glutamate synthase, GOGAT)活性测定使用生工生物工程(上海)股份有限公司生产的微量法活性检测试剂盒。

果实品质数据测定: 在果实采收期, 各处理以随机取样方法摘取区间内成熟度基本一致的果实用于指标测定, 使用天平测量单株果实重量, 结果取平均值、可溶性固形物使用PAL-1型数显糖度计测定、总糖含量采用苯酚-硫酸法测定、维生素C含量采用2,6-二氯靛酚滴定法进行测定(黄鸿晖2021)。

1.3.4 数据分析

利用Excel处理数据, SPSS 20.0分析数据, GraphPad Prism 8.0作图。

2 实验结果

2.1 减氮配施生物炭对草莓生长发育的影响

2.1.1 减氮配施生物炭对草莓生长的影响

由表1可知, 在草莓整个生育期中, 株高、地上和地下生物量逐步增加, CK处理的草莓株高、地上和地下生物量明显低于其他5个处理。在营养生长期, N80、N60与N100相比, 株高明显下降, N80+BC处理株高与N100处理无显著差异, N60+BC处理株高显著低于N100处理; 随着氮肥量的减少, 地上地下部分鲜重和干重明显下降, N80+BC处理的草莓地上地下部分鲜重和干重高于N80处理, 但无显著性差异, N80+BC和N100处理草莓地上地下部分鲜重和干重无显著性差异, N60+BC处理的草莓地上地下部分鲜重和干重和N60无显著差异, 但N60+BC和N60处理的草莓地上地下部分鲜重和干重明显低于N100、N80+BC、N80处理。在开花坐果期, N80+BC处理草莓株高和地上地下部分鲜重干重高于N80、N60、N60+BC处理, 与N100处理

表1 减氮配施生物炭对草莓生长的影响
Table 1 Effects of nitrogen reduction and biochar application on strawberry growth

生长期	处理	株高/cm	地上鲜重/g	地上干重/g	地下鲜重/g	地下干重/g
营养生长期 (45 d)	N0 (CK)	5.28±0.23 ^c	3.21±0.18 ^d	0.81±0.03 ^d	9.11±0.65 ^c	2.39±0.19 ^c
	N100	8.06±0.38 ^a	4.84±0.23 ^a	1.21±0.04 ^a	13.72±0.52 ^a	3.57±0.17 ^a
	N80	7.08±0.32 ^a	4.25±0.16 ^b	1.07±0.06 ^{ab}	12.03±0.67 ^{ab}	3.13±0.18 ^{ab}
	N80+BC	7.79±0.27 ^{ab}	4.39±0.20 ^{ab}	1.12±0.07 ^{ab}	13.28±1.90 ^a	3.46±0.39 ^{ab}
	N60	6.14±0.28 ^d	3.67±0.02 ^{cd}	0.92±0.04 ^{cd}	10.56±0.76 ^{bc}	2.77±0.19 ^{bc}
	N60+BC	6.71±0.30 ^{cd}	4.02±0.17 ^{bc}	1.03±0.06 ^{bc}	11.58±0.49 ^{abc}	3.11±0.30 ^{ab}
开花坐果期 (140 d)	N0 (CK)	6.78±0.36 ^c	4.07±0.06 ^b	0.95±0.04 ^c	10.71±0.34 ^c	2.38±0.10 ^c
	N100	9.65±0.55 ^a	5.79±0.33 ^a	1.47±0.09 ^a	16.32±1.57 ^a	4.24±0.39 ^a
	N80	8.11±0.47 ^b	4.87±0.29 ^{ab}	1.32±0.09 ^{ab}	13.02±0.76 ^b	3.39±0.17 ^b
	N80+BC	9.43±0.58 ^a	5.29±0.53 ^a	1.41±0.13 ^a	16.45±0.39 ^a	4.45±0.15 ^a
	N60	7.06±0.42 ^{bc}	4.21±0.25 ^b	1.12±0.10 ^{bc}	11.25±0.91 ^{bc}	2.93±0.37 ^{bc}
	N60+BC	7.21±0.41 ^{bc}	4.33±0.60 ^b	1.08±0.12 ^{bc}	12.65±0.31 ^{bc}	3.15±0.24 ^b
果实采收期 (250 d)	N0 (CK)	8.48±0.46 ^c	4.90±0.24 ^c	1.35±0.03 ^b	13.38±0.42 ^d	3.36±0.11 ^c
	N100	11.57±0.67 ^a	6.94±0.41 ^a	1.75±0.07 ^a	21.03±1.21 ^a	5.78±0.69 ^a
	N80	10.27±0.64 ^{ab}	6.16±0.35 ^{ab}	1.29±0.16 ^b	17.54±1.19 ^{bc}	4.56±0.46 ^b
	N80+BC	11.54±0.21 ^a	6.90±0.43 ^a	1.74±0.16 ^a	20.16±0.82 ^{ab}	5.78±0.09 ^a
	N60	9.01±1.02 ^{bc}	5.61±0.64 ^{bc}	1.42±0.17 ^b	14.36±1.97 ^{cd}	3.63±0.39 ^{bc}
	N60+BC	9.99±0.31 ^{abc}	5.81±0.33 ^{abc}	1.47±0.07 ^{ab}	16.38±1.05 ^{cd}	4.21±0.06 ^{bc}

表中不同小写字母表示同一时期不同处理在0.05水平上有显著差异, 下表同此。

差异不显著; N60+BC处理的草莓株高、地上和地下生物量高于N60处理但差异不显著, 但显著低于N80+BC处理。在果实采收期, N80+BC处理草莓株高和地上地下部分鲜重干重仍高于N80、N60、N60+BC处理, 与N100处理差异不显著; N60+BC处理的草莓株高、地上和地下生物量同样高于N60处理但差异不显著, 但显著低于N80+BC处理。表明在草莓的整个生长发育期间N80+BC处理能够弥补氮肥减少对草莓生长发育的影响。

2.1.2 减氮配施生物炭对草莓叶片净光合速率的影响

由图1可知, 在草莓的整个生长期内, CK处理的草莓叶片净光合速率明显低于其他5个处理。在草莓营养生长期、开花坐果期和果实采收期, N80+BC与N100处理不存在显著性差异, 同时N80+BC处理的草莓净光合速率明显高于N80、N60、N60+BC处理, 但差异不显著; N60+BC处理的草莓叶片净光合速率高于N60处理, 差异不显著。同时, 在草莓整个生长发育期中, 减氮未添加生物炭处理

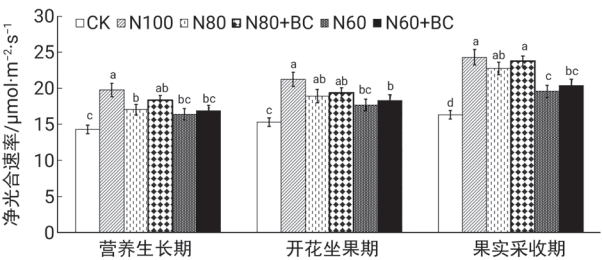


图1 减氮配施生物炭对草莓净光合速率的影响
Fig. 1 Effects of nitrogen reduction and biochar application on net photosynthetic rate of strawberry

图中不同的小写字母表示同一时期不同处理在0.05水平上有显著差异, 下图同此。

的草莓净光合速率都要低于减氮添加生物炭处理。表明在草莓生长过程中N80+BC处理能够弥补氮肥减少对草莓净光合速率的影响。

2.1.3 减氮配施生物炭对草莓叶片叶绿素含量的影响

由图2可知, N100、N80+BC和N60+BC处理与CK相比均提高了草莓叶片中的叶绿素含量(SPAD

值)。在草莓的整个生长期中, N80+BC处理的草莓叶片叶绿素含量均高于N80、N60和N60+BC处理, 与N100处理差异不显著。同时, 在草莓整个生长发育期中, 减氮未添加生物炭处理的草莓叶绿素含量都要低于减氮添加生物炭处理的叶绿素含量, 并且叶绿素含量变化趋势与净光合速率变化趋势基本一致。表明在草莓生长过程中N80+BC处理能够弥补氮肥减少对草莓叶片净光合速率的影响。

2.1.4 减氮配施生物炭对草莓叶片可溶性糖含量的影响

由图3可知, 在草莓整个生长期中, 叶片可溶性糖含量呈下降趋势, 营养生长期含量最高, 果实采收期最低, CK处理的草莓叶片可溶性糖含量均低于其他5个处理。在营养生长期N80+BC处理草莓叶片中可溶性糖含量最高, 达到56.75%, 明显高于其他5个处理, 但与N100无显著差异。开花坐果期和果实采收期, N80+BC处理草莓叶片中可溶性

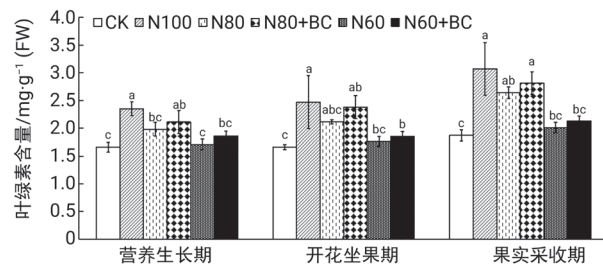


图2 减氮配施生物炭对草莓叶片叶绿素含量的影响

Fig. 2 Effects of nitrogen reduction with biochar application on chlorophyll content of strawberry leaves

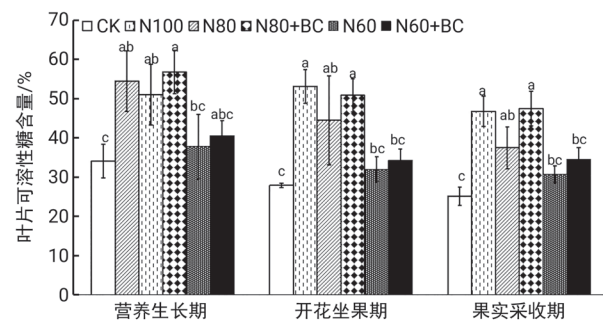


图3 减氮配施生物炭对草莓叶片可溶性糖含量的影响

Fig. 3 Effects of nitrogen reduction with biochar application on soluble sugar content of strawberry leaves

糖含量与N100处理之间无显著性差异, 高于N80、N60和N60+BC处理。表明在草莓生长过程中N80+BC处理能够最大程度缓解氮肥减少对草莓叶片中可溶性糖含量的影响。

2.1.5 减氮配施生物炭对草莓植株全氮含量的影响

由图4、5可知各处理草莓根系中的全氮含量在草莓生长期中均呈上升趋势, 叶片中的全氮含量在营养生长期至开花坐果期内变化趋势不明显, 在果实采收期, 叶片和根系中全氮含量达到最大值。在草莓整个生长期中CK处理的草莓叶片和根系全氮含量均低于其他5个处理; N80+BC处理的叶片和根系全氮含量明显高于N80、显著高于N60和N60+BC处理, 与N100处理无显著性差异。表明在草莓生长过程中N80+BC处理能够最大程度缓解氮肥减少对草莓植株内全氮含量的影响。

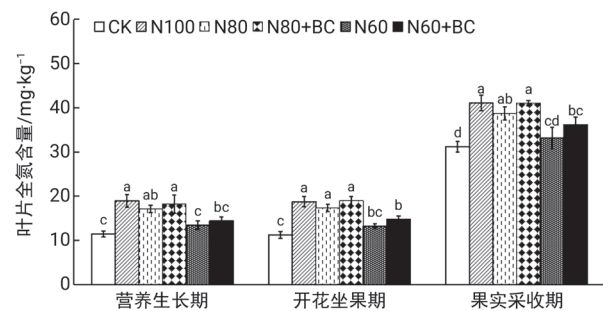


图4 减氮配施生物炭对草莓叶片全氮含量的影响

Fig. 4 Effect of nitrogen reduction and biochar application on the total nitrogen content of strawberry leaves

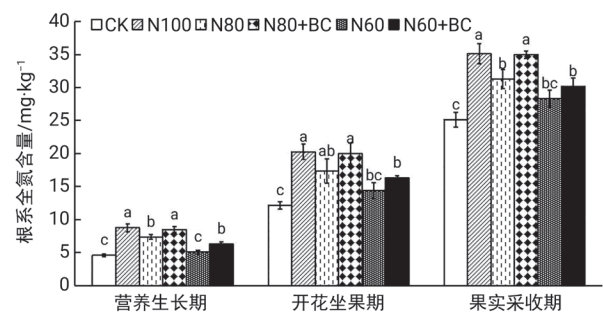


图5 减氮配施生物炭对草莓根系全氮含量的影响

Fig. 5 Effects of nitrogen reduction and biochar application on the total nitrogen content of strawberry roots

2.2 减氮配施生物炭对草莓幼苗叶片根系氮代谢相关酶活性的影响

2.2.1 减氮配施生物炭对草莓叶片GDH活性的影响

GDH作为植物氮转运过程中的关键酶,对植物氮代谢有直接影响。由图6可知,在草莓的生长过程中,草莓叶片GDH含量,处于先降后升的趋势,在开花坐果期有所下降,而在果实采收期又有所提高。在草莓整个生长期内,N80+BC处理草莓叶片GDH活性均显著高于CK、N80、N60和N60+BC处理,与N100处理之间无显著性差异。表明在草莓生长过程中N80+BC处理能够最大程度缓解氮肥减少对草莓叶片GDH活性的影响。

2.2.2 减氮配施生物炭对草莓叶片GS活性的影响

GS活性作为植物氮素同化水平的重要指标,对植物体内氮代谢循环有重要影响。由图7可知,各处理草莓叶片GS活性随着植株生长发育整体呈上升趋势,在各个生长期随着施氮量的降低GS活性均呈下降趋势。在草莓整个生长期内N80+BC处理均显著高于CK、N80、N60和N60+BC处理,与N100处理无显著差异。结果表明N80+BC处理能够最大程度缓解氮肥减少对草莓叶片GS活性的影响。

2.2.3 减氮配施生物炭对草莓叶片GOGAT活性的影响

GOGAT活性作为植物氮同化和固氮作用的重要酶,对植物体氮素利用也有直接影响。由图8可知,各处理草莓叶片GOGAT活性在营养生长期和果实采收期,活性较低,而在开花坐果期,活性最高,GOGAT活性变化呈先升后降趋势。在草莓生

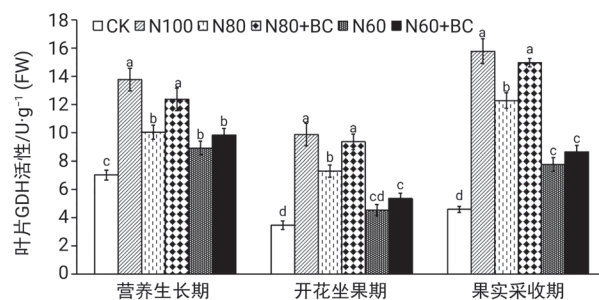


图6 减氮配施生物炭对草莓叶片GDH活性的影响

Fig. 6 Effects of nitrogen reduction with biochar application on GDH activity of strawberry leaves

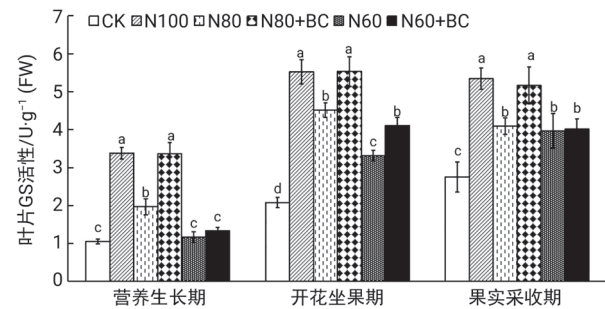


图7 减氮配施生物炭对草莓叶片GS活性的影响

Fig. 7 Effects of nitrogen reduction with biochar application on GS activity of strawberry leaves

长整个生长期内,N80+BC处理草莓叶片GOGAT活性明显高于CK、N80、N60和N60+BC处理,与N100处理无显著差异。N100处理的草莓叶片GOGAT活性在各时期相较于N80处理差异显著。N60+BC处理相较于N60处理,GOGAT活性有所提高,但差异不显著。结果表明N80+BC处理能够最大程度缓解氮肥减少对草莓叶片GOGAT活性的影响。

2.2.4 减氮配施生物炭对草莓根系GDH活性的影响

由图9可知,在草莓的各个生长期,草莓根系GDH活性,在开花坐果期大幅提高,而在果实采收期,降到最低,呈现先升后降的趋势。在草莓整个生长期内,N80+BC处理GDH活性显著高于CK、N80、N60和N60+BC处理,与N100处理无显著差异。在各个生长期,N60+BC处理GDH活性高于N60处理但无显著性差异。表明在草莓生长过程中N80+BC处理能够最大程度缓解氮肥减少对草莓根系GDH活性的影响。

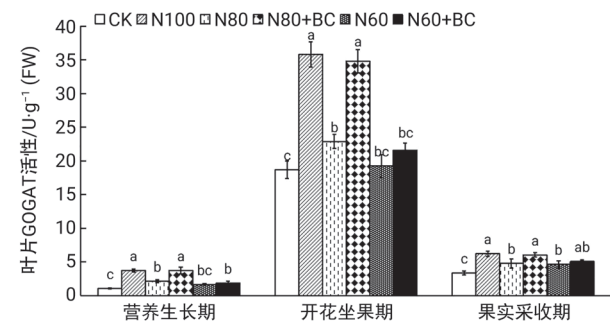


图8 减氮配施生物炭对草莓幼苗叶片GOGAT活性的影响

Fig. 8 Effects of nitrogen reduction with biochar application on GOGAT activity of strawberry leaves

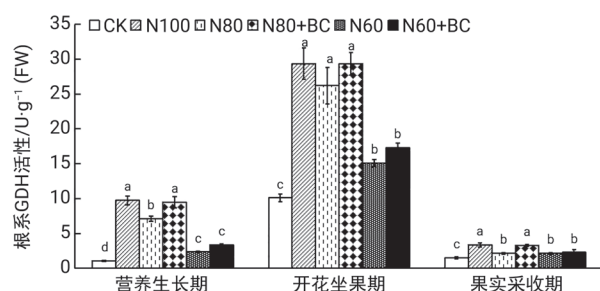


图9 减氮配施生物炭对草莓根系GDH活性的影响
Fig. 9 Effects of nitrogen reduction with biochar application on GDH activity of strawberry roots

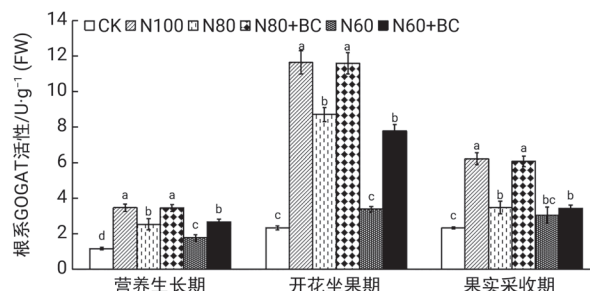


图11 减氮配施生物炭对草莓根系GOGAT活性的影响
Fig. 11 Effects of nitrogen reduction with biochar application on GOGAT activity of strawberry roots

2.2.5 减氮配施生物炭对草莓根系GS活性的影响

由图10可知, 各处理草莓根系GS活性在果实采收期有所下降, 在各个生长阶段随着施氮量的降低, GS活性均呈下降趋势。在草莓整个生长期内, N80+BC处理的草莓根系GS活性明显高于CK、N80、N60和N60+BC处理, 与N100处理无显著差异; N60+BC处理草莓根系GS活性明显高于N60处理, 在营养生长期和开花坐果期存在显著差异。表明在草莓生长过程中N80+BC处理能够最大程度缓解氮肥减少对草莓根系GS活性的影响。

2.2.6 减氮配施生物炭对草莓幼苗根系GOGAT活性的影响

由图11可知, 各处理草莓根系GOGAT活性在营养生长期和果实坐果期较低, 而在开花坐果期, 活性达到最高, 与草莓叶片中GOGAT活性变化趋势基本一致。在草莓整个生长内, N80+BC处理的草莓根系GOGAT活性显著高于CK、N80、N60和N60+BC处理, 与N100处理无显著差异; N60+BC处

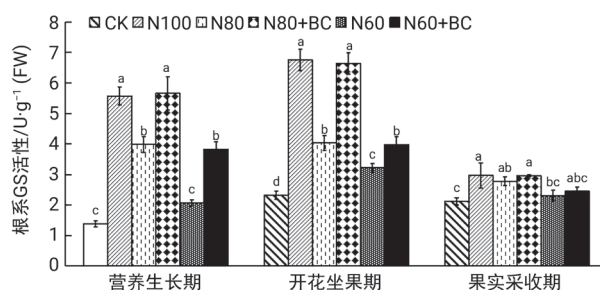


图10 减氮配施生物炭对草莓根系GS活性的影响
Fig. 10 Effects of nitrogen reduction with biochar application on GS activity of strawberry roots

理草莓根系GOGAT活性明显高于N60处理, 在营养生长期和开花坐果期存在显著差异。表明在草莓生长过程中N80+BC处理能够最大程度缓解氮肥减少对草莓根系GOGAT活性的影响。

2.3 减氮配施生物炭对草莓果实产量品质的影响

由表2可知, 不同处理均提高了草莓果实单株产量品质。不同含量氮肥施加对草莓单株产量、可溶性固形物含量、总糖含量、维生素C含量都有影响, 减少氮肥未添加生物炭处理, 单株产量、可溶性固形物含量、总糖含量、维生素C含量均呈现不同程度的下降, 氮肥含量越高, 上述三个品质指标数值越高。N80+BC处理相较于N80处理草莓单株产量显著提高; N80+BC处理相较于N80处理可溶性固形物含量显著提高; 总糖含量有所提高, 但2个处理无显著性差异; N80+BC处理维生素C含量显著高于N80处理。N80+BC处理后的单株产量、可溶性固形物含量、总糖含量、维生素C含量都高于N60和N60+BC处理。表明减氮后添加生物炭能够缓解氮肥施用量减少对草莓果实产量品质造成的负面影响, 其中N80+BC处理能够最大程度缓解因氮肥减少造成的对草莓产量和品质影响。

3 讨论

3.1 减氮配施生物炭对草莓生长发育的影响

植物的生长发育离不开氮肥, 但过量施肥会引起土壤问题, 导致作物产量和品质降低(陈丽楠等2023)。生物炭已经被证实能够对连作土壤改善起到一定的作用, 吕伟静等(2021)在连作土壤中施加生物炭促进了苹果幼苗的生长, 增强了苹果叶

表2 减氮配施生物炭对草莓果实产量品质的影响

Table 2 Effects of nitrogen reduction with biochar application on strawberry fruit yield and quality

处理	单株产量/g	可溶性固形物含量/%	总糖含量/%	维生素C含量/mg·g ⁻¹
N0 (CK)	55.62±7.59 ^d	7.45±0.23 ^d	6.43±0.26 ^c	0.76±0.01 ^c
N100	163.31±6.61 ^b	13.41±0.24 ^{ab}	8.24±0.21 ^{ab}	0.83±0.03 ^a
N80	100.93±9.67 ^c	11.58±0.22 ^a	8.03±0.27 ^{ab}	0.80±0.01 ^{bc}
N80+BC	196.87±5.61 ^a	14.20±0.33 ^a	8.63±0.49 ^a	0.85±0.04 ^a
N60	74.84±7.07 ^d	11.93±0.43 ^c	7.89±0.43 ^{ab}	0.77±0.02 ^b
N60+BC	107.81±6.94 ^c	12.35±0.19 ^{bc}	7.64±0.26 ^b	0.79±0.02 ^b

片酶活性和土壤酶活性,有效地减轻了连作障碍。

本研究中,设置了6个处理,检测了3个草莓生长发育的时期,结果表明施氮肥与不施用氮肥植株生长差异显著,减少氮肥施用20%和40%后植株的生长逐渐减弱,但在减氮的同时配施生物炭,却能显著地弥补氮肥量减少带来的草莓植株生长影响,随着草莓的生长,减氮20%处理配施生物炭能够满足草莓的氮需求。但是减氮40%处理及加生物炭处理对草莓的生长仍有所影响。本研究减氮配施生物炭对草莓植株生长发育的研究结果与柳瑞等(2020)研究结果类似,通过减氮配施生物炭能够在保证植物正常生长的情况下减少氮肥的施用。这可能是由于生物炭的添加对土壤的理化性质起到了积极作用,促进了草莓更有效地吸收氮肥,提高了氮肥的利用率。

植物光合性能对于作物品质形成是十分重要的,目前已经证实氮肥的合理施用能够对作物的光合特性起到调控作用(鲁悦等2023)。合理施氮有助于叶片保持较高活性,促进叶片叶绿素含量提高,从而改善光合性能,有较强的光合源,合成更多光合产物(郭嘉航等2022)。但是,减氮配施生物炭能否影响光合性能仍然不清楚。在研究中,常规施氮和N80+BC处理对于改善草莓叶片光和效率效果最好,减氮添加生物炭后显著提高草莓的叶片净光合速率和叶绿素含量,这与勾玲等(2004)在棉花上的研究结果相似。可溶性糖作为植物光合作用的产物之一,在一定程度上反映光合产物的积累和运转情况,氮肥的合理施用能够提高叶片内可溶性糖含量,从而提高草莓品质(张淑娟2023)。本研究结果表明,减氮配施生物炭处理后草莓植

株可溶性糖含量在草莓整个生育期内均呈逐步上升的趋势,并且整个生育期内减氮配施生物炭时草莓植株的可溶性糖含量均高于CK处理。整个生长期常规处理时草莓植株的氮含量均高于其他处理,综合效果来看减氮20%配施生物炭效果最好,这与宋世龙等(2023)和王力等(2021)得到的研究结果类似,可能原因是减氮配施生物炭改善土壤环境促进根系氮素吸收效率进而提高叶片光合效率,促进可溶性糖含量积累。

3.2 减氮配施生物炭对草莓酶活性的影响

氮的吸收和同化是促进植物生长的重要过程,植物体通过同化作用将自然界中无机氮转化为有机氮才能吸收利用,植物体内与氮素同化息息相关的主要酶有谷氨酰胺合成酶(GS)、谷氨酸合酶(GOGAT)和谷氨酸脱氢酶(GDH),这三种酶在氮素同化中起着重要作用(张华珍和徐恒玉2011)。在本研究中,常规施氮时,氮转运酶的效率最高,随着氮肥量的减少氮素同化相关的酶活性逐渐减弱,可能是因为植物在同化的过程中产生的H⁺浓度过高抑制GS的活性,也可能是因为氮减少造成了氮饥迫,导致反应中提供的腺嘌呤核苷三磷酸(ATP)不足,草莓叶片的光合作用受到抑制,但是添加生物炭后草莓叶片和根系中GS、GOGAT、GDH活性提升至全氮水平,提高了草莓的氮素同化水平,这与宋世龙(2023)研究结果一致。在本研究中叶片中GS、GOGAT活性强于根系,可能是由于叶片作为光合作用主要器官,氮素同化及代谢活动旺盛。综上所述,氮肥合理施用对于促进草莓氮代谢具有一定影响,减氮配施生物炭能够弥补氮肥减少导致的氮素同化水平下降影响,很大原因还是

改善根系环境导致根系酶活性增强, 促进氮吸收, 从而提高植株氮素同化水平。

3.3 减氮配施生物炭对草莓果实产量品质的影响

产量、可溶性固形物、总糖和维生素C作为果实评价的重要指标, 对于评价水果好坏具有重要意义(项丹丹等2022)。在本研究中, 随着草莓施肥氮素比例的下降, 单株产量、可溶性固形物和维生素C含量均出现了不同程度的下降, 但是配施一定的生物炭后, 显著地提升了可溶性固形物和维生素C的含量, 并且与全氮处理无显著性差异, 这与前人的研究结果一致(孙海军等2023)。配施生物炭对草莓总糖含量影响不显著, 可能是合成氮蛋白质和总糖存在一定的竞争关系, 具体机制仍不清楚, 需进一步研究。

参考文献(References)

- Chen LN, Liu XC, Zhou YQ, et al (2023). Characteristics and remediation of secondary salinization in facility soil. *Chin Agric Sci Bull*, 39 (9): 79–84 (in Chinese with English abstract) [陈丽楠, 刘秀春, 周晏起等(2023). 设施土壤次生盐渍化特征及修复进展. *中国农学通报*, 39 (9): 79–84]
- Gao W, Yang LJ, Liu YQ, et al (2021). Research progress on the pathogen and integrated management of strawberry root rot in greenhouse. *J Tianjin Agric Sci*, 27 (2): 36–39 (in Chinese with English abstract) [高玮, 杨利娟, 刘亚全等(2021). 设施草莓根腐病的病原及其综合防治技术. *天津农业科学*, 27 (2): 36–39]
- Gou L, Yan J, Han CL, et al (2004). Effects of nitrogen rates on photosynthetic characteristics and yield of high-yielding cotton in Xinjiang. *J Plant Nutr Fert*, (5): 488–493 (in Chinese with English abstract) [勾玲, 闫洁, 韩春丽等(2004). 氮肥对新疆棉花产量形成期叶片光合特性的调节效应. *植物营养与肥料学报*, (5): 488–493]
- Guo JH, Zhang FQ, Huang JX, et al (2022). Effects of nitrogen application on photosynthetic efficiency of *Bidens pilosa* L. leaves under cadmium stress. *Environ Sci Tech*, 45 (4): 146–153 (in Chinese with English abstract) [郭嘉航, 张福琼, 黄晶心等(2022). 施氮对镉胁迫下鬼针草叶片光合效率的影响. *环境科学与技术*, 45 (4): 146–153]
- Hu P (2018). Effects of nitrogen fertilizer optimization and control measures of continuous cropping obstacles on facility cucumber yield and nitrogen use efficiency (dissertation). Nanjing: Nanjing Agricultural University (in Chinese with English abstract) [胡平(2018). 氮肥优化及连作障碍防控技术对设施黄瓜产量及氮肥利用率的影响(学位论文). 南京: 南京农业大学]
- Huang HH (2021). Effects of exogenous melatonin on antioxidant capacity and sugar and anthocyanin metabolism in strawberry fruit (dissertation). Nanjing: Nanjing Agricultural University (in Chinese with English abstract) [黄鸿晖(2021). 外源褪黑素处理对草莓果实抗氧化能力以及糖和花青素代谢的影响(学位论文). 南京: 南京农业大学]
- Jiang HB, Li HX, Zhao MX, et al (2020). Strategies for timing nitrogen fertilization of pear trees based on the distribution, storage, and remobilization of ^{15}N from seasonal application of $(^{15}\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$. *J Integr Agric*, 19 (5): 1340–1353
- Li DD, He H, Pan FF, et al (2023). Effects of biochar application on greenhouse gas emissions and yield in a double-season rice cropping system under various optimized nitrogen reduction conditions. *J Agro-Environ Sci*, 42 (11): 2625–2634 (in Chinese with English abstract) [李丹丹, 何昊, 潘非凡等(2023). 优化减氮与施用生物炭对双季稻土壤温室气体排放及产量的影响. *农业环境科学学报*, 42 (11): 2625–2634]
- Li K, Li ZJ (2019). *Soil Agrochemical Analysis Methods*. Beijing: China Agricultural Science and Technology Press (in Chinese) [李科, 李志军(2019). 土壤农化分析方法. 北京: 中国农业科学技术出版社]
- Liu R, Gao Y, Li EL, et al (2020). Effects of reduced nitrogen and biochar application on plant growth, dry matter accumulation and rice yield. *Ecol Environ Sci*, 29 (5): 926–932 (in Chinese with English abstract) [柳瑞, 高阳, 李恩琳等(2020). 减氮配施生物炭对水稻生长发育, 干物质积累及产量的影响. *生态环境学报*, 29 (5): 926–932]
- Lu Y, Bao XL, Huo HN, et al (2023). Effects of different amounts of stover mulching on improving photosynthetic characteristics and yield of maize in Mollisol of Northeast China under long-term no-tillage. *J Plant Nutr Fert*, 29 (5): 840–847 (in Chinese with English abstract) [鲁悦, 鲍雪莲, 霍海南等(2023). 免耕条件下不同量秸秆覆盖还田提高东北黑土区玉米光合性能和产量的效应. *植物营养与肥料学报*, 29 (5): 840–847]
- Lü WJ, Chen R, Ma ZT, et al (2021). Effect of biochar and modified biochar on the *Malus hupehensis* seedlings and soil. *Plant Physiol J*, 57 (3): 597–604 (in Chinese with English abstract) [吕伟静, 陈冉, 马志婷等(2021). 生物炭及改性生物炭对平邑甜茶幼苗生长及土壤的影响. *植物生理学报*, 57 (3): 597–604]
- Shi DP, Ye ZZ, Li J, et al (2023). Effects of nitrogen combined with biochar and urease inhibitor on yield and nitrogen utilization of summer maize-winter wheat system. *Agric Res Arid Areas*, 41 (4): 51–60 (in Chinese with English abstract) [史多鹏, 叶子壮, 李杰等(2023). 氮肥配施生物

- 炭和脲酶抑制剂对夏玉米-冬小麦产量及氮素利用的影响. 干旱地区农业研究, 41 (4): 51–60]
- Song SL (2023). Effects of nitrogen reduction combined with biochar on soil organic carbon, nitrogen utilization and yield of spring wheat (dissertaion). Urumqi: Xinjiang Agricultural University (in Chinese with English abstract) [宋世龙(2023). 减氮配施生物质炭对土壤有机碳、春小麦氮素利用及产量的影响(学位论文). 乌鲁木齐: 新疆农业大学]
- Song SL, Yang WJ, Chen YX, et al (2023). Effect of reduced nitrogen fertilizer combined with biochar on photosynthetic characteristics, dry matter accumulation and distribution, and yield of spring wheat in irrigated area of Northern Xinjiang. *J Triticeae Crops*, 43 (3): 311–320 (in Chinese with English abstract) [宋世龙, 杨卫君, 陈雨欣等(2023). 氮肥减量配施生物炭对北疆灌区春小麦光合和干物质转运特性及产量的影响. 麦类作物学报, 43 (3): 311–320]
- Sun HJ, Wu S, Xiao HD, et al (2023). Effect of biochar application on yield and quality of white gourd and soil nitrogen leaching with fertilizer nitrogen reduction. *Chin J Soil Sci*, 54 (3): 673–681 (in Chinese with English abstract) [孙海军, 吴思, 萧洪东等(2023). 化肥氮素减施条件下生物炭施用对冬瓜产量和品质及土壤氮素淋失的影响. 土壤通报, 54 (3): 673–681]
- Wang L, Gu H, Li JL, et al (2021). Effect of nitrogen fertilizer combined with biochar on the biomass and photosynthetic characteristics of flue-cured tobacco/silage corn relay intercropping on slope farmland. *J Yunnan Agric Univ (Nat Sci)*, 36 (6): 985–992 (in Chinese with English abstract) [王力, 顾浩, 李嘉亮等(2021). 氮肥配施生物炭对坡耕地烤烟/青贮玉米套作生物量和光合特性的影响. 云南农业大学学报(自然科学), 36 (6): 985–992]
- Wang X (2020). Application of Dumas combustion and Kjeldahl methods in the determination of nitrogen concentration in wheat. *Agric Tech Equip*, (11): 7–8 (in Chinese with English abstract) [王雪(2020). 杜马斯燃烧法和凯式定氮法在小麦氮含量测定中的应用研究. 农业技术与装备, (11): 7–8]
- Wu QJ, Hu MD, Hou SF, et al (2022). Effect of nitrogen reduction with carbon-based fertilizer on the physico-chemical properties and enzyme activity of pomelo soil. *J Henan Agric Univ*, 56 (5): 732–741 (in Chinese with English abstract) [吴强建, 胡梦蝶, 侯松峰等(2022). 减氮配施生物炭基肥对蜜柚土壤理化性质及酶活性的影响. 河南农业大学学报, 56 (5): 732–741]
- Xiang Y, Wang YB, Chen MW, et al (2022). Sensory index evaluation on fruit quality of different strawberry varieties. *China Veget*, (4): 62–66 (in Chinese with English abstract) [项丹丹, 王云冰, 陈梦微等(2022). 不同草莓品种果实品质的感官指标评价. 中国蔬菜, (4): 62–66]
- Yin WP, Yuan ZH, Peng Y, et al (2023). Effects of partial substitution of chemical fertilizer by biochar organic fertilizer on the growth, yield, quality and N nutrient utilization of amaranth. *China Cucur Veget*, 36 (6): 77–83 (in Chinese with English abstract) [殷武平, 袁祖华, 彭莹等(2023). 生物炭有机肥部分替代化肥对苋菜生长、产量、品质和氮素利用率的影响. 中国瓜菜, 36 (6): 77–83]
- Zhang HZ, Xu HY (2011). Research progress on the enzymes during plant nitrogen assimilation. *Northern Hortic*, (20): 180–183 (in Chinese) [张华珍, 徐恒玉(2011). 植物氮素同化过程中相关酶的研究进展. 北方园艺, (20): 180–183]
- Zhang SJ, Li L, Pan ZZ (2023). Effects of different fertilizer treatments on yield and quality of strawberries. *Spec Econo Anim Plant*, 26 (6): 41–43 (in Chinese) [张淑娟, 李利, 潘之政(2023). 不同施肥处理对草莓产量及品质的影响. 特种经济动植物, 26 (6): 41–43]
- Zhou JY, Zhi YH, Ding J, et al (2021). SWOT analysis and suggestions on development of strawberry industry in Zhejiang province. *J Changjiang Veget*, (14): 73–76 (in Chinese with English abstract) [周佳燕, 杜叶红, 丁检等(2021). 浙江省草莓产业发展SWOT分析及建议. 长江蔬菜, (14): 73–76]