doi：10.11838/sfsc.1673-6257.21612

减氮施加生物炭对盐碱胁迫下甜菜根际土壤酶活性、根活力及产量的影响

卢　强，武沛然，李　健，张瀚文，王树峰，赵佳楠，王红光，张　贺，王玉波，李彩凤*

（东北农业大学农学院，黑龙江　哈尔滨　150030）

摘　要：通过模拟盐碱土壤环境，在减施氮肥配合施加生物炭条件下，研究甜菜根际土壤酶活性、根际土壤氮素含量、根系活力、块根产量和含糖率的变化，明确减氮条件下施加生物炭对甜菜产量的影响，为今后盐碱土壤环境下种植甜菜、减少氮肥施用量提供依据。试验共设置6个处理，分别为盐碱胁迫全氮处理（CK）、盐碱胁迫施加占风干土壤质量3%生物炭（BC）全氮处理（BC+N180）和减氮10%（BC+N162）、20%（BC+N144）、30%（BC+N126）、40%（BC+N108）处理。结果表明：盐碱胁迫施加生物炭减氮条件下甜菜根际土壤酶的活性和根系活力相较CK明显提高，其中土壤脲酶活性增加14.9% ~ 33.0%；磷酸酶活性增加18.6% ~ 54.7%；蔗糖转化酶活性增加16.5% ~ 22.7%；过氧化氢酶活性增加9.9% ~ 12.2%；根系活力提高12.3% ~ 24.1%。各处理中除减氮40%外，其他处理的甜菜块根产量、含糖率和产糖量均显著高于CK，减氮10%和20%处理产糖量与全氮处理无明显差异。在本试验的条件下，施加占风干土壤质量3%的生物炭，可提高土壤酶活性、甜菜的产糖量，节约氮肥10% ~ 20%的施用量。

关键词：减施氮肥；生物炭；盐碱胁迫；甜菜；土壤酶；产量

土壤盐渍化已成为保证粮食安全和改善农业生态环境过程中面临的重要问题，盐渍化土壤面积占到我国总耕地面积的1/5，且土壤盐渍化和次生盐渍化问题仍在加重[1]。同时，盐渍化土壤的结构性差、生产力低下，对作物正常生长有严重的胁迫作用，严重阻碍了农田土壤的综合利用与农业的可持续发展。

甜菜是我国主要的糖料作物，因其有一定的耐盐碱性而成为北方盐碱地区重要的轮作作物[2]。有研究表明，甜菜在低浓度的盐碱条件下能正常生长，且维持较高的产量和较好的品质[3]。虽然甜菜具有一定的耐盐碱性，但在盐碱土壤条件下种植需要施加更多的氮肥[4]，而盐碱土壤条件下施用过多的氮肥会导致土壤理化性质更加恶化影响甜菜的生长。如何在盐碱土壤条件下通过施加土壤改良剂减少甜菜种植氮肥的用量并评价改良种植的效果成为新的研究方向。

生物炭配施氮肥是减少氮肥用量的有效方法[5]。生物炭是一种利用废弃生物质在高温低氧或缺氧条件下得到的具有多孔性和吸附性、含碳的有机物质。农业上主要在土壤中直接施加生物炭达到改良土壤营养状况、改善作物生长土壤环境的目的[6]。大多数研究表明生物炭对土壤生产性能和作物产量的影响表现为正向效应[7]。土壤中添加生物炭可促进盐碱胁迫条件下水稻幼苗的生长[8]；生物炭配施对盐碱胁迫下玉米的苗期生长有明显促进作用[9]；徐钰等[10]研究发现，盐碱土施加生物炭对大豆产量、品质的优化效果显著。关于生物炭的研究多集中于水稻、玉米和大豆等作物，而关于生物炭对盐碱土壤条件下甜菜的生长促进效应研究较少。

生物炭对盐碱胁迫条件下甜菜的改良种植效果可由土壤酶活性和根系活力的变化来体现[11]。土壤酶是土壤环境中生化反应的重要组成部分，土壤酶活性能够反映土壤中生化反应的速度[12]。在盐碱胁迫下土壤酶活性的提高能反映某些生物活性的提高，也能反映土壤环境条件的改善[13]。根系作为作物吸收土壤水分、营养元素和物质交换的重要

收稿日期：2021-11-17；**录用日期：**2022-01-30

基金项目：国家自然科学基金项目（32071973）；国家糖料现代农业产业技术体系项目（CARS-170201）。

作者简介：卢强（1992-），在读硕士研究生，主要从事甜菜栽培生理研究。E-mail：luqiang13089937279@163.com。

通讯作者：李彩凤，E-mail：licaifeng@neau.edu.cn。

器官能够感知土壤环境的变化，而根系活力是反映作物适应盐碱环境重要的指标，根系活力一定程度上能够反映土壤酶活性，通过测定作物的根系活力能够反映盐碱土壤的改良效果[14]。

因此，本研究在前人研究的基础上，围绕盐碱胁迫下生物炭配施氮肥对土壤酶活性、土壤速效氮含量变化和甜菜根系活力、块根的产量、含糖率和产糖量的影响展开试验。在施加生物炭后按照10%的梯度减施氮肥，考虑到甜菜耐盐碱性的需要，将甜菜正常土壤下氮肥施用量150 kg/hm^{2}增加20%作为盐碱胁迫下正常施氮处理，即180 kg/hm^2[15]。以筛选出在盐碱胁迫施加生物炭条件下的合理施氮范围，并进一步为盐碱地甜菜优质、高产、高效的栽培提供可靠的理论依据。

1　材料与方法

1.1　试验材料

供试验甜菜品种为KWS0143，由德国KWS公司生产。生物炭由东北农业大学资源与环境学院提供。

1.2　试验设计

试验在黑龙江省哈尔滨市（126.63° E，45.74° N）东北农业大学盆栽场进行。进行桶栽试验，每个处理40桶。供试土壤为黑钙土，土壤中有机质为35.7 g/kg，碱解氮为176.3 mg/kg，有效磷为83.3 mg/kg，速效钾为153.2 mg/kg，水土比为5∶1浸提液的电导率为122 μS/cm、可溶性盐总量为0.08%、pH值为7.65。将盐碱混合加入土壤，使用盐种类为NaCl、Na_2SO_4、Na_2CO_3和$NaHCO_3$（均无结晶水，分析纯99.8%），其物质的量比为4∶2∶2∶1，使Na^+含量占土壤质量比为3 g/kg。生物炭施用量为风干土壤重量的3%，处理后土壤碱化度为32.6%，盐分为0.39 g/kg，电导率为781 μS/cm，pH值为9.15。正常化肥用量按N 180 kg/hm^2、P_2O_5 90 kg/hm^2、K_2O 90 kg/hm^{2}进行施肥，肥料分别选用尿素、磷酸二铵和硫酸钾。试验共设6个处理，分别为盐碱胁迫处理（CK）、盐碱胁迫下施加生物炭处理（BC+N180）和盐碱胁迫下施加生物炭并减施氮10%、20%、30%、40%处理（BC+N162、BC+N144、BC+N126、BC+N108），其中CK、BC+N180处理均为正常施肥量。

2018年4月31日进行人工播种，生育期内浇水、除草同大田管理。第2对真叶展开时进行间苗，每桶留1株。从3对真叶完全展开时开始取样，之后每隔约20 d取样1次，每个处理各随机选择3株长势一致的植株取样，整个生育期内共取样5次，测定土壤酶活性和根系活力。10月1日收获，取5株长势相近的植株，测定产量及含糖率。

1.3　测定指标及方法

根际土采集：播种后第53、72、97、117和138 d在采集甜菜样品的同时取土样，将桶内15 cm左右深度的细根和土壤挖掘出来，轻轻抖动使根系上附着的松散土掉落，然后用毛刷取下细根表面土壤即为根际土样品。将土样装入封口袋，放入冰盒中保存，迅速带回实验室进行处理。

土壤脲酶测定采用靛酚蓝比色法；磷酸酶测定采用苯二钠比色法；蔗糖转化酶测定采用3，5–二硝基水杨酸比色法；过氧化氢酶测定采用高锰酸钾滴定法[16]。

土壤铵态氮、硝态氮测定：称取过2 mm筛的鲜土8 g于50 mL塑料离心管内，加入40 mL 2 mol/L KCl溶液浸提（水土比为5∶1），在25℃下振荡1 h，取滤液分别用靛酚蓝比色法和紫外线分光光度法测定[17]。

根系活力测定采用氯化三苯基四氮唑（TTC）法[18]。

块根产量、含糖率和产糖量：收获时每个处理选取长势一致的5株测定块根重量，计算平均值，即为单株块根的产量（g/株）；用便携式折光仪测量收获时取样的5株甜菜块根的锤度，并计算含糖率，取平均值，块根含糖率（%）= 锤度值 ×0.85（温度修正值）；产糖量（g/株）= 含糖率 × 产量。

1.4　数据处理与分析

使用Excel 2019进行数据分析，使用SPSS 23.0的新复极差法在0.05水平下对试验数据进行差异显著性分析。

2　结果与分析

2.1　盐碱胁迫下减氮施加生物炭对土壤脲酶活性的影响

由表1可知，盐碱胁迫条件下甜菜整个生育期内根际间土壤脲酶活性呈先增后降的趋势，施加生物炭能使土壤脲酶的活性显著增强，而随着施氮量的减少土壤脲酶活性呈逐渐降低的趋势。与CK相比，BC+N180处理的土壤脲酶活性分别提高14.9%（53 d）、17.1%（72 d）、23.4%（97 d）、17.5%（117 d）和33.0%（138 d）。BC+N162处理

在播种后 72、97 和 138 d 显著高于 BC+N180 处理，BC+N144 与 BC+N180 处理之间差异不显著（除 72 和 117 d 外），BC+N126 处理脲酶的活性显著高于 CK（除 117 d 外）。

表 1　盐碱胁迫下减氮施加生物炭对甜菜根际土壤脲酶活性的影响　［mg/（g·d）］

处理	播种后天数（d）				
	53	72	97	117	138
CK	0.82 ± 0.015e	0.87 ± 0.029c	0.77 ± 0.025d	0.63 ± 0.015c	0.39 ± 0.004d
BC+N180	0.96 ± 0.015b	1.00 ± 0.015a	0.95 ± 0.009b	0.74 ± 0.006a	0.52 ± 0.009b
BC+N162	0.97 ± 0.009a	1.01 ± 0.015a	0.98 ± 0.015a	0.75 ± 0.009a	0.56 ± 0.006a
BC+N144	0.92 ± 0.011c	0.98 ± 0.017a	0.93 ± 0.039b	0.68 ± 0.009b	0.50 ± 0.009bc
BC+N126	0.87 ± 0.009d	0.95 ± 0.019b	0.87 ± 0.036bc	0.66 ± 0.019bc	0.49 ± 0.006c
BC+N108	0.81 ± 0.019e	0.86 ± 0.024c	0.81 ± 0.011cd	0.51 ± 0.006d	0.38 ± 0.003d

注：同列数据后不同字母表示处理间在 0.05 水平差异显著。下同。

2.2　盐碱胁迫下减氮施加生物炭对土壤磷酸酶活性的影响

由表 2 可知，盐碱胁迫条件下甜菜整个生育期内根际间土壤磷酸酶活性呈先增后降的趋势，施加生物炭处理能使土壤磷酸酶的活性显著增强，施加生物炭减氮处理的土壤磷酸酶呈逐渐降低的趋势，而磷酸酶的活性仍显著高于 CK。BC+N180 处理的磷酸酶活性于各取样时期较 CK 分别增加 25.0%（53 d）、18.6%（72 d）、54.7%（97 d）、47.6%（117 d）和 42.9%（138 d）。BC+N162 和 BC+N180 处理之间差异不显著，而 BC+N144 处理在播种后 117 d 显著高于 BC+N180 处理。

表 2　盐碱胁迫下减氮施加生物炭对甜菜根际土壤磷酸酶活性的影响　［mg/（g·d）］

处理	播种后天数（d）				
	53	72	97	117	138
CK	0.97 ± 0.099c	0.92 ± 0.006b	0.75 ± 0.009b	0.77 ± 0.021b	0.63 ± 0.021c
BC+N180	1.15 ± 0.051a	1.15 ± 0.017a	1.16 ± 0.017a	1.10 ± 0.021a	0.93 ± 0.021b
BC+N162	1.16 ± 0.015a	1.18 ± 0.021a	1.14 ± 0.015a	1.11 ± 0.041a	0.92 ± 0.017b
BC+N144	1.13 ± 0.021a	1.19 ± 0.045a	1.13 ± 0.026a	1.06 ± 0.038a	0.98 ± 0.015a
BC+N126	1.05 ± 0.006b	1.08 ± 0.029a	1.09 ± 0.058a	1.04 ± 0.006a	0.87 ± 0.015b
BC+N108	1.03 ± 0.057b	1.08 ± 0.015a	1.07 ± 0.025a	1.00 ± 0.029a	0.86 ± 0.019b

2.3　盐碱胁迫下减氮施加生物炭对土壤蔗糖转化酶活性的影响

由表 3 可知，盐碱胁迫条件下甜菜生育期内根际间土壤蔗糖转化酶活性呈先增后降的单峰曲线，施加生物炭能够显著提高蔗糖转化酶的活性，随着施氮量的减少土壤蔗糖转化酶活性呈先增后降的趋势。BC+N180 处

表 3　盐碱胁迫下减氮施加生物炭对甜菜根际土壤蔗糖转化酶活性的影响　［mg/（g·d）］

处理	播种后天数（d）				
	53	72	97	117	138
CK	2.10 ± 0.101d	2.90 ± 0.005c	1.98 ± 0.073d	2.24 ± 0.031d	1.90 ± 0.019b
BC+N180	2.53 ± 0.018b	3.49 ± 0.049a	2.43 ± 0.032ab	2.61 ± 0.009b	1.94 ± 0.021ab
BC+N162	2.58 ± 0.035a	3.54 ± 0.012a	2.50 ± 0.051a	2.70 ± 0.034a	1.99 ± 0.029a
BC+N144	2.40 ± 0.021c	3.38 ± 0.012b	2.36 ± 0.035b	2.50 ± 0.052c	1.94 ± 0.043ab
BC+N126	2.39 ± 0.006c	3.35 ± 0.042b	2.08 ± 0.026c	2.29 ± 0.039d	1.90 ± 0.063b
BC+N108	2.01 ± 0.065d	2.71 ± 0.007d	1.07 ± 0.029d	1.97 ± 0.004e	1.76 ± 0.008c

理与CK相比分别增加20.5%（53 d）、20.3%（72 d）、22.7%（97 d）、16.5%（117 d）。BC+N162（除53和117 d外）与BC+N180处理差异不显著，BC+N144处理在播种后53、72、97和117 d显著高于CK，BC+N126处理在播种后53、72和97 d显著高于CK。

2.4　盐碱胁迫下减氮施加生物炭对土壤过氧化氢酶活性的影响

由表4可知，盐碱胁迫下甜菜生育期内根际间土壤过氧化氢酶活性呈先升后降的趋势，施加生物炭可显著增强土壤过氧化氢酶的活性。与CK相比BC+N180处理过氧化氢酶活性分别提高9.9%（53 d）、12.2%（72 d）、9.4%（97 d）、10.4%（117 d）、11.9%（138 d）；BC+N162在播种后53和72 d显著高于CK；BC+N144、BC+N126和BC+N108处理与BC+N162处理之间差异不显著。

表4　盐碱胁迫下减氮施加生物炭对甜菜根际土壤过氧化氢酶活性的影响　［mg/（g·d）］

处理	播种后天数（d）				
	53	72	97	117	138
CK	3.17 ± 0.064b	3.24 ± 0.028c	3.78 ± 0.017b	3.01 ± 0.057b	2.65 ± 0.023c
BC+N180	3.52 ± 0.036a	3.69 ± 0.017a	4.17 ± 0.098a	3.36 ± 0.118a	3.01 ± 0.036a
BC+N162	3.52 ± 0.068a	3.48 ± 0.039b	3.83 ± 0.025b	3.16 ± 0.045ab	2.80 ± 0.098b
BC+N144	3.50 ± 0.084a	3.51 ± 0.023b	3.92 ± 0.081b	3.20 ± 0.097ab	2.85 ± 0.078ab
BC+N126	3.51 ± 0.108a	3.53 ± 0.028b	3.94 ± 0.101b	3.21 ± 0.056ab	2.76 ± 0.036b
BC+N108	3.42 ± 0.045a	3.51 ± 0.023b	3.76 ± 0.084b	3.05 ± 0.013b	2.68 ± 0.086b

2.5　盐碱胁迫下减氮施加生物炭对甜菜根系活力的影响

由图1可知，盐碱胁迫下甜菜根系活力会大幅度降低，施加生物炭能够显著提高根系活力，而随着施氮量的减少根系活力逐渐减弱。BC+N180处理较CK分别增加18.3%（53 d）、39.5%（72 d）、30.8%（97 d）、12.3%（117 d）、24.1%（138 d），表明施加生物炭（BC+N180）甜菜的根系活力较CK增加效果显著，除播种后138 d外随着施氮量的减少根系活力呈现明显下降的趋势，BC+N162和BC+N144处理播种后72、97和117 d根系活力均显著高于CK。

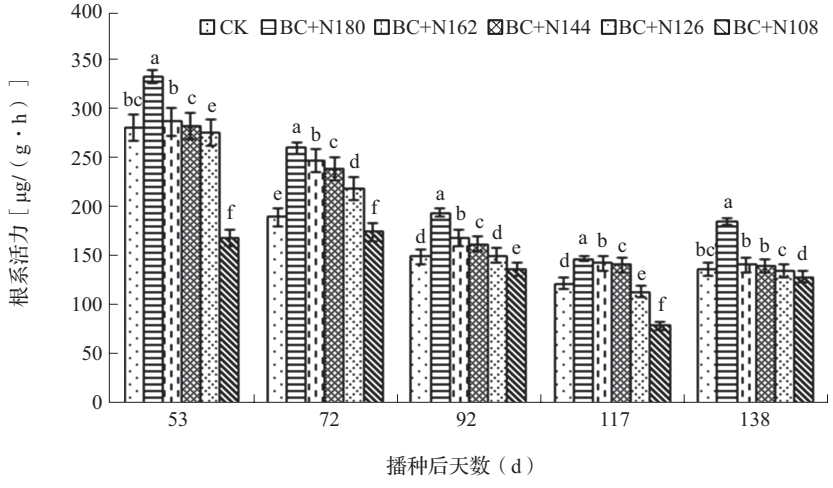

图1　盐碱胁迫下施加生物炭和减少氮肥用量对甜菜根系活力的影响

2.6　盐碱胁迫下减氮施加生物炭对土壤速效氮含量的影响

土壤的速效氮含量是反映盐碱土壤改良效果有效性的指标。如表5所示，随着施氮量的减少土壤中速效氮含量呈下降的趋势。BC+N180处理的速效氮含量显著高于CK，其它减氮处理速效氮的含量均少于CK。

表 5　盐碱胁迫下减氮施加生物炭对甜菜根际间土壤速效氮的影响　（mg/kg）

处理	铵态氮含量	硝态氮含量
CK	2.46 ± 0.19b	155 ± 4.67b
BC+N180	2.84 ± 0.32a	169 ± 4.25a
BC+N162	2.17 ± 0.32c	136 ± 2.35c
BC+N144	1.75 ± 0.27d	127 ± 3.11c
BC+N128	1.26 ± 0.02e	90 ± 4.81d
BC+N108	0.98 ± 0.06f	70 ± 3.86e

表 6　盐碱胁迫下减氮施加生物炭对甜菜块根产量、产糖量、含糖率的影响

处理	块根产量（g/ 株）	含糖率（%）	产糖量（g/ 株）
CK	157 ± 1.05e	14.4 ± 0.23c	22.6 ± 0.34e
BC+N180	204 ± 3.28a	16.1 ± 0.09a	32.9 ± 0.35a
BC+N162	200 ± 1.99ab	16.1 ± 0.12a	32.2 ± 0.34ab
BC+N144	195 ± 1.08b	16.2 ± 0.15a	31.6 ± 0.37b
BC+N128	184 ± 1.99c	15.3 ± 0.12b	28.1 ± 0.51c
BC+N108	168 ± 1.75d	15.3 ± 0.15b	24.8 ± 0.26d

2.7　盐碱胁迫下减氮施加生物炭对甜菜块根产量、含糖率和产糖量的影响

如表 6 所示，在盐碱胁迫条件下 BC+N180 处理相对于 CK 处理甜菜产量增加 30%。甜菜产量随着氮肥施加量的减少而减少，BC+N108 处理的产量仍然高于 CK。含糖率最高的处理为 BC+N180，比 CK 高 1.7 个百分点，且 BC+N162、BC+N144 和 BC+N180 处理之间差异不显著。施加生物炭后产糖量较 CK 显著提高，且 BC+N180 处理比 CK 增加 45%。BC+N162 处理甜菜块根产糖量与 BC+N180 处理差异不显著，BC+N144 与 BC+N180 处理差异显著，且 BC+N108 处理的产糖量仍高于 CK。

2.8　甜菜块根产量、含糖率、产糖量和根系活力与土壤酶活性的相关性

对甜菜块根产量、含糖率、产糖量和根系活力与土壤酶之间进行相关性分析发现（表 7），脲酶、过氧化氢酶与含糖率呈显著正相关，与甜菜块根产量和产糖量呈极显著正相关，磷酸酶、蔗糖转化酶与甜菜块根产量、含糖率、产糖量呈极显著正相关。脲酶与蔗糖转化酶呈极显著正相关，磷酸酶与蔗糖转化酶、过氧化氢酶呈显著正相关，过氧化氢酶与蔗糖转化酶呈显著正相关。根系活力与块根产量呈显著正相关，与脲酶和蔗糖转化酶呈极显著正相关。

表 7　甜菜块根产量、含糖率、产糖量与土壤酶活性指标之间的相关性分析

指标	块根产量	含糖率	产糖量	脲酶	磷酸酶	蔗糖转化酶	过氧化氢酶	根系活力
块根产量	1							
含糖率	0.841**	1						
产糖量	0.833**	0.699**	1					
脲酶	0.819**	0.561*	0.641**	1				
磷酸酶	0.806**	0.872**	0.676**	0.391	1			
蔗糖转化酶	0.868**	0.625**	0.650**	0.948**	0.503*	1		
过氧化氢酶	0.670**	0.477*	0.707**	0.450	0.540*	0.473*	1	
根系活力	0.541*	0.280	0.425	0.813**	0.023	0.805**	0.327	1

注：* 和 ** 分别表示两指标间的显著相关（$P<0.05$）和极显著相关（$P<0.01$）。

3　讨论

3.1　盐碱胁迫下减氮施加生物炭对甜菜根系间土壤酶活性的调控效应

土壤中脲酶、磷酸酶、蔗糖转化酶和过氧化氢酶分别是土壤氮、磷、碳代谢和氧化还原反应的关键组成部分，它们的活跃程度在一定程度上能够反映土壤的状态[19]。脲酶在土壤中的作用是将土壤中的有机氮转化为作物可利用的氮素形态[20]；磷酸酶活性的提高可促进土壤中有机磷的转化[21]；蔗糖转化酶参与土壤中的碳循环[22]；过氧化氢酶参与土壤中的氧化还原反应，促进植物代谢[23]。生物炭通过改变土壤的基本理化性质、土壤微生物及菌落组分来提高土壤酶活性。本研究结果发现，甜菜根际间土壤酶在甜菜生育期内呈先增高后将降低的趋势，这与甜菜的生长规律一致，盐碱胁迫会导致土壤酶活性降低，施加生物炭后能优化土壤环境使土壤酶的活性大幅度提升，土壤脲酶和蔗糖酶

之间呈极显著正相关，磷酸酶与蔗糖转化酶、过氧化氢酶之间呈显著正相关，说明土壤酶之间有明显的协同促进作用，这与黄剑等[24]、蒋容等[25]的研究结果一致。盐碱胁迫条件下施加生物炭减氮处理对甜菜整个生育期内根际间土壤脲酶和蔗糖酶的影响较大，2 种酶活性随施氮量的减少而减弱，而对磷酸酶和过氧化氢酶的影响较小，说明盐碱胁迫施加生物炭减氮处理减弱了甜菜对土壤中有效氮元素和碳元素的吸收利用，而对磷元素的吸收和土壤的氧化还原反应影响相对较小。

3.2　盐碱胁迫下减氮施加生物炭对甜菜根系活力的调控效应

作物根系是受土壤盐碱胁迫影响最为严重的器官，它的生长状况能反映盐碱土壤的改良效果。根系活力是根系生理特性的重要指标，其数值的提升能够反映根系生长加快、营养物质的吸收及氧化还原能力的提高[26]。本研究结果显示，盐碱胁迫下减氮施加生物炭能够有效提高甜菜根系活力，与 CK 相比，全氮施加生物炭处理根系活力增加最多，减氮 10% 和 20% 施加生物炭的处理根系活力显著增强。通过分析显示根系活力与脲酶、蔗糖酶呈极显著正相关，根系活力同产量呈显著正相关。

3.3　盐碱胁迫下减氮施加生物炭对速效氮含量及甜菜产量、含糖率和产糖率的调控效应

生物炭能够增加土壤对 NH_4^+ 的吸附和保持，减少土壤氮素的流失，从而为作物的生长提供充足的氮素营养[27]。本研究通过分析施加生物炭处理的盐碱土壤中硝态氮、铵态氮含量的变化发现，与 CK 相比，全氮施加生物炭处理土壤中速效氮含量大幅度增加，减氮施加生物炭处理条件下速效氮含量明显减少。通过分析甜菜产量、含糖率和产糖量发现减氮施加生物炭处理甜菜产量、含糖率和产糖量显著高于 CK。纪立东等[28]研究认为氮肥和生物炭的配施对作物产量增加效果显著；白晓山等[29]研究发现，增施氮肥能够有效提高甜菜块根的产量，但会降低含糖率；郭琴波等[30]发现，施加生物炭可减少氮肥的用量，不会对水稻产量产生影响。本研究结果表明，施加生物炭能够减少盐碱胁迫下甜菜氮肥的用量，而在速效氮含量减少的情况下不影响甜菜的块根产量、含糖率和产糖量。通过分析甜菜产量、含糖率和产糖量与土壤酶之间的关系发现，甜菜产量和产糖量与土壤酶呈极显著正相关。以上结果反映了盐碱胁迫条件下施加生物炭的甜菜根际间的土壤环境得到改善，土壤酶活性变强，土壤有效氮含量增加，进而提升甜菜的块根产量。本研究发现，施加生物炭能够有效提升减施氮肥条件下盐碱土壤的养分供应能力，明显提高甜菜块根的产量、产糖量，但是其具体机理还需进一步研究。

本试验采取桶栽方式探究盐碱胁迫下减氮施加生物炭对甜菜根际间土壤酶活性、速效氮含量和块根产量的影响，而研究效果还受时间、地域、气候和环境等因素的限制，所以得出的结论仍需要在大田试验中继续验证。

4　结论

减氮条件下施加生物炭能够促进盐碱土壤环境下甜菜的生长，有效地提高盐碱胁迫下甜菜根际土壤脲酶的活性，有利于增加土壤中可供作物吸收的速效氮含量，使甜菜根系活力增强，提高甜菜块根产量和产糖量。本研究条件下，盐碱胁迫条件下施加占风干土壤 3% 的生物炭可减少氮肥 10% ~ 20% 的施用量。

参考文献：

[1]　江杰，王胜. 我国盐碱地成因及改良利用现状[J]. 安徽农业科学，2020，48（13）：85-87.

[2]　黄春燕，苏文斌，郭晓霞，等. 15 个甜菜品种对盐碱胁迫的生理响应及耐盐碱性评价[J]. 北方农业学报，2020，48（4）：1-9.

[3]　邹春雷. 甜菜适应碱性盐胁迫的生理机制及其转录组分析[D]. 哈尔滨：东北农业大学，2019.

[4]　陈婧婷，武沛然，刘新宇，等. 减氮条件下生物炭对甜菜盐碱胁迫的缓解效应[J]. 植物营养与肥料学报，2020，26（8）：1492-1500.

[5]　Ye L，Camps-Arbestain M，Shen Q，et al. Biochar effects on crop yields with and without fertilizer：a meta-analysis of field studies using separate controls[J]. Soil Use and Management，2020，36（1）：2-18.

[6]　孟繁昊，于晓芳，王志刚，等. 生物炭配施氮肥对土壤物理性质及春玉米产量的影响[J]. 玉米科学，2020，28（1）：142-150.

[7]　Yetunde A T. 生物质炭与有机肥对盐碱土壤特性的影响[D]. 哈尔滨：东北农业大学，2018.

[8]　黄晶，孔亚丽，吴龙龙，等. 生物炭调控盐胁迫下水稻幼苗耐盐性能[J]. 生态学杂志，2021，40（3）：627-634.

[9]　杨刚，周威宇. 生物炭对盐碱土壤理化性质、生物量及玉米苗期生长的影响[J]. 江苏农业科学，2017，45（16）：68-72.

[10]　徐钰，杨岩，江丽华，等. 土壤改良措施对盐碱地大豆产量和品质的影响[J]. 山东农业科学，2020，52（11）：86-89.

[11] Liu C，Wang H，Li P，et al. Biochar's impact on dissolved organic matter（DOM）export from a cropland soil during natural rainfalls[J]. Science of the Total Environment，2019，650：1988-1995.
[12] 邱莉萍，刘军，王益权，等. 土壤酶活性与土壤肥力的关系研究[J]. 植物营养与肥料学报，2004，10（3）：277-280.
[13] 吴丹，孙萍，路鹏展，等. 浒苔生物炭对滨海盐碱土壤改良的效果及途径[J]. 环境科学，2020，41（4）：1941-1949.
[14] 靳辉勇，黎娟，朱益，等. 土壤调理剂对烤烟根系活力及根际土壤微生物碳代谢特征的影响[J]. 核农学报，2019，33（1）：158-165.
[15] 刘新宇，武沛然，李彩凤，等. 盐碱胁迫下施加生物炭和减少氮肥用量对甜菜光合特性的影响[J]. 西北农林科技大学学报（自然科学版），2021，49（1）：108-116，125.
[16] 关松荫. 土壤酶及其研究方法[M]. 北京：农业出版社，1986.
[17] 鲍士旦. 土壤农化分析[M]. 北京：中国农业出版社，2000. 263-274.
[18] 李小方，张志良. 植物生理学实验指导（第5版）[M]. 北京：高等教育出版社，2016.
[19] 樊俊，谭军，王瑞，等. 秸秆还田和腐熟有机肥对植烟土壤养分、酶活性及微生物多样性的影响[J]. 烟草科技，2019，52（2）：12-18，61.
[20] Dawar K，Fahad S，Jahangir M，et al. Biochar and urease inhibitor mitigate NH_3 and N_2O emissions and improve wheat yield in a urea fertilized alkaline soil[J]. Scientific Reports，2021，11（1）：17412.
[21] 郭潇潇，王雪莱，梁海芸，等. 盐碱胁迫对芸豆根际土壤微生物数量及酶活性的影响[J]. 华北农学报，2019，34（4）：148-157.
[22] 赵仁竹，汤洁，梁爽，等. 吉林西部盐碱田土壤蔗糖酶活性和有机碳分布特征及其相关关系[J]. 生态环境学报，2015，24（2）：244-249.
[23] 高转琴，王丹，牛灵安，等. 冀南平原盐渍化改造区土壤过氧化氢酶活性变化研究[J]. 土壤通报，2019，50（6）：1434-1441.
[24] 黄剑，张庆忠，杜章留，等. 施用生物炭对农田生态系统影响的研究进展[J]. 中国农业气象，2012，33（2）：232-239.
[25] 蒋容，余一，唐玉蓉，等. 增温和生物炭添加对农田土壤酶活性的影响[J]. 四川农业大学学报，2018，36（1）：72-77，85.
[26] 修好，梁晓艳，石瑞常，等. 混合盐碱胁迫对藜麦苗期植株及根系生长特征的影响[J]. 江苏农业科学，2020，48（4）：89-94.
[27] 孟繁昊. 生物炭配施氮肥对土壤理化性质及春玉米产量和氮效率的影响机制[D]. 呼和浩特：内蒙古农业大学，2018.
[28] 纪立东，柳骁桐，司海丽，等. 生物炭对土壤理化性质和玉米生长的影响[J]. 干旱地区农业研究，2021，39（5）：114-120.
[29] 白晓山，刘华君，林明，等. 不同施肥水平对甜菜植物学性状及产质量的影响[J]. 中国糖料，2016，38（4）：24-28.
[30] 郭琴波，王小利，段建军，等. 施用生物炭对黄壤稻田水稻品质及氮肥利用效率的影响[J]. 作物研究，2021，35（4）：287-292.

The effect of nitrogen reduction and biochar application on soil enzyme activity，root vigor and yield of sugar beet rhizosphere under saline-alkali stress

LU Qiang，WU Pei-ran，LI Jian，ZHANG Han-wen，WANG Shu-feng，ZHAO Jia-nan，WANG Hong-guang，ZHANG He，WANG Yu-bo，LI Cai-feng*（College of Agriculture，Northeast Agricultural University，Harbin Heilongjiang 150030）

Abstract：By simulating the saline-alkali soil environment，under the condition of reducing nitrogen fertilizer and applying biochar，the changes in enzyme activity of sugar beet rhizosphere soil，nitrogen content in rhizosphere soil，root vitality，root yield and sugar content of sugar beet were studied，the effect of biochar application on yield of beet under nitrogen reduction was clarified. The study could provide theoretical basis and technical guidance for planting sugar beet in saline-alkali soil environment to reduce nitrogen fertilizer application in the future. A total of 6 treatments were set up in the experiment，namely，salt-alkali stress total nitrogen treatment（CK），saline-alkali stress applying biochar（BC）3% of the mass of air-dried soil with total nitrogen treatment（BC+N180）and 10% nitrogen reduction（BC+N162），20% nitrogen reduction（BC+N144），30% nitrogen reduction（BC+N126），40% nitrogen reduction（BC+N108）. The results showed that the soil enzyme activity and root system activity of sugar beet rhizosphere under the condition of biochar application and nitrogen reduction under saline-alkali stress were significantly increased compared with CK，in which soil urease activity increased by 14.9% ~ 33.0%；phosphatase activity increased by 18.6% ~ 54.7%；sucrose invertase activity increased by 16.5% ~ 22.7%；catalase activity increased by 9.9% ~ 12.2%；root activity increased by 12.3% ~ 24.1%. In addition to 40% nitrogen reduction，the sugar beet root yield，sugar content and sugar yield of other treatments were significantly higher than those of CK. The sugar yield of 10% and 20% reduction treatments was not significantly different from the total nitrogen treatment. Under the conditions of this experiment，applying biochar of 3% of the mass of air-dried soil can improve the activity of soil enzymes，the sugar production of sugar beet，and the application of nitrogen fertilizer by 10% ~ 20%.

Key words：reduced application of nitrogen fertilizer；biochar；saline alkali stress；beet；soil enzyme；yield