

DOI: 10.13758/j.cnki.tr.2021.02.011

唐冲, 杨劲松, 姚荣江, 等. 生物质炭及硝化/脲酶抑制剂对滨海盐渍土土壤盐分及作物氮素吸收利用的影响. 土壤, 2021, 53(2): 291–298.

# 生物质炭及硝化/脲酶抑制剂对滨海盐渍土土壤盐分及作物氮素吸收利用的影响<sup>①</sup>

唐冲<sup>1,2</sup>, 杨劲松<sup>1\*</sup>, 姚荣江<sup>1</sup>, 王胜<sup>3</sup>, 王相平<sup>1</sup>, 谢文萍<sup>1</sup>

(1 土壤与农业可持续发展国家重点实验室(中国科学院南京土壤研究所), 南京 210008; 2 中国科学院大学, 北京 100049; 3 山东胜伟盐碱地科技有限公司, 山东潍坊 261000)

**摘要:** 为研究生物质炭及硝化/脲酶抑制剂对滨海盐渍土土壤盐碱、氮素有效性、作物氮素吸收利用以及土壤氮平衡的影响, 通过盆栽试验, 共设 9 个处理: 不施氮肥、常规化肥、生物质炭+常规化肥、常规化肥+硝化抑制剂 DCD、常规化肥+脲酶抑制剂 NBPT、常规化肥+DCD+NBPT、生物质炭+常规化肥+DCD、生物质炭+常规化肥+NBPT、生物质炭+常规化肥+DCD+NBPT, 以典型耐盐作物大麦为研究对象开展研究。结果表明: ①各施氮肥处理均增加了盐分的淋洗, 各生物质炭处理显著增加了 10~20 cm 土层的土壤电导率。土壤电导率高的土壤 pH 较低, 生物质炭处理对土壤 pH 略有降低的作用。② NBPT 和 DCD 添加增加了大麦籽粒产量, 配合生物质炭的施用增产更多, 但是却降低了秸秆的产量。NBPT 和 DCD 添加均增加了大麦植株的吸氮量, 其中 NBPT 添加增加了大麦秸秆和籽粒的全氮含量, 但是配合生物质炭施用又有降低作用, 其余抑制剂处理均降低了大麦籽粒和秸秆的全氮含量。③ DCD 和 NBPT 添加均提高了氮肥利用效率, 配合生物质炭施用对各指标的增加更明显。④对作物收获后土壤残留无机氮含量, 添加 DCD 处理相比常规化肥处理有所降低, 添加 NBPT 处理相比常规化肥处理有所增加。添加 DCD 和 NBPT 处理均降低了氮的表观损失。因此, 在滨海盐渍土中, 通过在尿素中添加 DCD 和 NBPT, 可以提高作物产量和氮肥利用率, 其中同时添加生物质炭、DCD 和 NBPT 处理在产量提升、氮素高效利用及减少氮损失等方面表现更好。

**关键词:** 生物质炭; 硝化/脲酶抑制剂; 滨海盐渍土; 土壤盐分; 氮肥利用率

**中图分类号:** S156.4+2; S143.1+6 **文献标志码:** A

## Effects of Biochar and Nitrification / Urease Inhibitors on Soil Salinity and Crop Nitrogen Absorption and Utilization in Coastal Saline Soil

TANG Chong<sup>1,2</sup>, YANG Jinsong<sup>1\*</sup>, YAO Rongjiang<sup>1</sup>, WANG Sheng<sup>3</sup>, WANG Xiangping<sup>1</sup>, XIE Wenping<sup>1</sup>

(1 State Key Laboratory of Soil and Sustainable Agriculture, Institute of Soil Science, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210008, China; 2 University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China; 3 Shandong Sunway Saline and Alkali Land Technology Co. Ltd., Weifang, Shandong 261000, China)

**Abstract:** In order to study the effects of biochar and nitrification/urease inhibitors on soil salinity and alkalinity, nitrogen availability, crop nitrogen absorption and utilization, and soil nitrogen balance in coastal saline soil, a pot experiment was carried out with barley, a typical salt tolerant crop, as the research object, a total of 9 treatments were set up in the experiment: applying no nitrogen fertilizer, conventional fertilizer, biochar + conventional fertilizer, conventional fertilizer + nitrification inhibitor DCD, conventional fertilizer + urease inhibitor NBPT, conventional fertilizer + DCD + NBPT, biochar + conventional fertilizer + DCD, biochar + conventional fertilizer + NBPT, biochar + conventional fertilizer + DCD + NBPT. The results showed that: 1) All nitrogen fertilizer treatments increased salt leaching, and all biochar treatments significantly increased 10–20 cm soil EC. The soil with higher EC had lower pH, and biochar treatment slightly reduced soil pH. 2) NBPT and DCD increased the grain yield of barley, and the application of biochar increased the yield of barley more but decreased the yield of straws. NBPT and DCD

①基金项目: 国家自然科学基金委员会-山东联合基金重点项目(U1806215), 国家自然科学基金面上项目(41977015), 国家重点研发计划项目(2016YFD0200303; 2019YFD1002702), 国家自然科学基金委员会-山东联合基金重点项目(U1906221)和中国科学院重点部署项目(KFZD-SW-112-03-02)资助。

\* 通讯作者(jsyang@issas.ac.cn)

作者简介: 唐冲(1992—), 男, 河南三门峡人, 硕士研究生, 主要从事盐渍土改良与养分高效利用方面研究。E-mail: ctang@issas.ac.cn

increased nitrogen uptake of barley plants, and NBPT increased total nitrogen contents in barley straws and grains, but decreased with biochar application, and other inhibitor treatments decreased total nitrogen contents in barley grains and straws. 3) Both DCD and NBPT improved nitrogen use efficiency, and the effects were enhanced with the application of biochar. 4) Compared with the conventional fertilizer treatment, the content of soil residual inorganic nitrogen in treatment with DCD was lower while that in treatment with NBPT was higher. DCD and NBPT added treatments reduced the apparent loss of nitrogen. Therefore, adding DCD and NBPT to urea can promote crop yield and nitrogen use efficiency in coastal saline soil, and the treatment with biochar + DCD + NBPT performs better in increasing crop yield, nitrogen efficient use and reducing nitrogen loss.

**Key words:** Biochar; Nitrification / urease inhibitor; Coastal saline soil; Soil salinity; Nitrogen use efficiency

土壤盐渍化是全世界范围内的一个难题,已经成为农业可持续发展的主要障碍<sup>[1]</sup>。江苏省海岸线长,沿着海岸线分布着大面积的滩涂,且滩涂面积还在不断增加,根据 2009 年《江苏沿海地区发展规划》,截至 2020 年,共新增 18 万  $\text{hm}^2$  滩涂,其中 60% 用于农业<sup>[2]</sup>。新围垦的滩涂具有盐碱程度高、地下水矿化度高、养分含量低以及淡水资源稀缺等特点。滩涂盐渍土壤中含有的大量可溶性盐以及交换性离子,对土壤的物理性质、化学性质和生物学性质都有影响<sup>[3]</sup>,例如过多的  $\text{Na}^+$ ,会减少土壤颗粒的絮凝以及土壤养分的保持<sup>[4]</sup>,对土壤及作物都有不利的影响<sup>[5]</sup>。

氮作为大量营养元素之一,在作物生长与产量形成中有着不可替代的作用,作物吸收利用的氮素主要是铵态氮和硝态氮<sup>[6]</sup>。化学氮肥的施用,是促进作物丰产的重要措施,但是不合理的氮肥施用一方面导致经济效益低,另一方面会增加氮肥在土壤中的残留以及大气和水体中的损失,污染环境<sup>[7]</sup>。盐渍土壤由于特殊的环境,对土壤中氮素有效性与作物氮素吸收有着不利的影响。在滨海盐渍土中,  $\text{Cl}^-$  在阴离子中占据着主导地位,而过多的  $\text{Cl}^-$  会和  $\text{NO}_3^-$  形成竞争作用,减少植物对  $\text{NO}_3^-$  的吸收利用<sup>[8]</sup>。也有学者认为,  $\text{Cl}^-$  会干扰膜转运系统,导致氮的吸收同化减少<sup>[9]</sup>。另外,大量的  $\text{NH}_4^+$  通过固定和氨挥发的形式损失<sup>[10]</sup>。因此,在盐渍土壤中,作物氮素利用率往往较低,且随着盐分含量的增加而降低<sup>[11]</sup>。

目前,对土壤氮素有效性提升的研究主要着眼于有机无机配合施用<sup>[12-13]</sup>、氮肥调控剂(硝化/脲酶抑制剂)施用及改良材料(生物质炭、腐殖酸等)添加<sup>[14]</sup>等。生物质炭是一种在无氧或者低氧的条件下经高温裂解形成的含碳固体残渣,由于其富碳、多孔、含有大量官能团以及各种矿质元素的特性,在土壤改良中被

广泛利用<sup>[15-16]</sup>。尿素中添加硝化/脲酶抑制剂通过降低尿素水解和随后发生的硝化作用,从而可以提高氮肥利用率和减少氮素气态损失。已有学者将生物质炭和硝化/脲酶抑制剂配合施用,对氮肥的气态损失、作物产量和氮利用率开展了相关研究<sup>[17]</sup>,但是在盐渍土中的应用却鲜有报道。因此,本研究以苏北滨海盐渍土为研究对象,采用盆栽试验研究生物质炭及脲酶抑制剂 N-丁基硫代磷酰三胺 (NBPT) 和硝化抑制剂双氰胺 (DCD) 对滨海盐渍土土壤盐分、氮素转化及作物氮素吸收利用的影响,验证硝化/脲酶抑制剂在盐渍土壤上应用的可能性,以期为滨海盐渍农田氮肥高效利用提供新的思路。

## 1 材料与方法

### 1.1 供试材料

供试盆栽土壤采自江苏省东台市弶港镇沿海经济开发区条子泥垦区(32°38'42.01" N, 120°54'8.04" E),是于 2015 年新围垦的滩涂土壤。该地区土壤质地为粉砂壤土,其中砂粒(2~0.02 mm)、粉砂(0.02~0.002 mm)、黏粒(<0.002 mm)的质量分数分别为 3.48%、75.76%、20.76%,土壤类型为冲积盐土类,潮盐土亚类,是典型的淤泥质海岸带盐渍土<sup>[18]</sup>。

供试作物为大麦,由上海海丰大丰种业有限公司提供。试验所用生物质炭由江苏华丰农业生物工程有限公司提供(原材料为秸秆稻壳,炭化温度 600℃,炭化时间 20 s)。供试土壤和生物质炭的基本性质如表 1 所示。

供试硝化抑制剂为双氰胺(DCD),由上海麦克林生化科技有限公司提供;脲酶抑制剂为 N-丁基硫代磷酰三胺(NBPT),由山东千贝化工有限公司提供。

表 1 供试土壤和生物质炭基本性质  
Table 1 Basic properties of tested soil and biochar in pot experiment

供试材料	有机质(g/kg)	全氮(g/kg)	全磷(g/kg)	电导率( $\mu\text{S}/\text{cm}$ )	pH	铵态氮 (mg/kg)	硝态氮(mg/kg)
土壤	4.67	0.56	0.92	688.1	8.84	3.27	11.44

生物质炭	719.13	6.64	6.32	7581.5	9.51	35.01	2.40
------	--------	------	------	--------	------	-------	------

## 1.2 试验设计

试验于 2018 年 12 月至 2019 年 6 月在中国科学院南京土壤研究所温室进行。共设：不施氮肥(CK)、常规化肥(F)、生物质炭+常规化肥(BF)、常规化肥+硝化抑制剂 DCD(FD)、常规化肥+脲酶抑制剂 NBPT(FN)、常规化肥+DCD+NBPT(FDN)、生物质炭+常规化肥+DCD(BFD)、生物质炭+常规化肥+NBPT(BFN)、生物质炭+常规化肥+DCD+NBPT(BFDN)9 个处理，每个处理 3 次重复。不施氮肥处理指仅施用磷肥，且施用量和施氮肥处理相同，常规化肥处理指施用氮肥和磷肥，其中氮肥为尿素，施用量为 N 0.15 g/kg，每盆施用 1.65 g，按基追比为 4:3:3 施用；磷肥为过磷酸钙，施用量为 P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> 0.1 g/kg，每盆施用 1.1 g，作为基肥一次性全部施用。生物质炭的用量为 1% 干土重，硝化/脲酶抑制剂的用量均为尿素用量的 1%。试验用土经自然风干后过 10 目筛混匀。试验用盆直径 25 cm、高 25 cm。试验时，将土壤、生物质炭、化肥及硝化/脲酶抑制剂混匀后再装盆，每盆装土 11 kg，按田间持水量的 60% 浇水，放置 2 d，然后按照 28 株/盆的用量播种大麦。大麦生育期间，定期定量浇水，试验用水为自来水，电导率为 330.7 μS/cm，pH 为 7.99。

## 1.3 样品的采集与测定

大麦收获后，按 0~10 cm 和 10~20 cm 土层分层进行取样，每层取 3 个点混合为一个样品，经自然风干、研磨、过筛后用于土壤 pH、电导率、铵态氮和硝态氮的测定。大麦植株收获后，进行籽粒和秸秆的分离，将秸秆和籽粒放于烘箱中 105℃ 杀青后再 70℃ 恒温烘干至恒重，粉碎、过 0.5 mm 筛后用于植株全氮的测定。

采用 1:5 的土水质量比浸提土壤，用电导率仪和 pH 计分别进行土壤电导率和 pH 的测定。土壤铵态氮和硝态氮采用 2 mol/L KCl 溶液(1:10 土水质量比)浸提，其中铵态氮采用靛酚蓝比色法测定，硝态氮采用紫外分光双波长法测定。植株全氮采用 H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>-H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> 消煮，靛酚蓝比色法测定。

## 1.4 相关指标计算方法<sup>[19]</sup>

籽粒氮吸收量 (kg/hm<sup>2</sup>) = 籽粒量 × 籽粒氮含量；

秸秆氮吸收量 (kg/hm<sup>2</sup>) = 秸秆量 × 秸秆氮含量；

地上部氮吸收量 (kg/hm<sup>2</sup>) = 籽粒氮吸收量 + 秸秆氮吸收量；

氮肥表观利用率 (%) = (施氮区地上部氮吸收

量 - 对照区地上部氮吸收量) / 施氮量 × 100；

氮肥农学效率 (kg/kg) = (施氮区籽粒产量 - 对照区籽粒产量) / 施氮量；

氮肥偏生产力 (kg/kg) = 施氮区籽粒产量 / 施氮量；

植株氮素吸收效率 (%) = 施氮区地上部氮吸收量 / 施氮量 × 100；

氮收获指数 (%) = 籽粒氮吸收量 / 地上部氮吸收量 × 100；

土壤氮素净矿化量 (kg/hm<sup>2</sup>) = 不施氮肥区地上部氮吸收量 + 不施氮肥区土壤无机氮残留量 - 不施氮肥区起始无机氮积累量；

氮素表观损失量 (kg/hm<sup>2</sup>) = 施氮量 + 土壤起始无机氮积累量 + 土壤氮素净矿化量 - 作物收获带走氮量 - 收获后土壤无机氮残留量；

土壤残留硝态氮/铵态氮 (kg/hm<sup>2</sup>) = 硝态氮/铵态氮含量 × 每层土重；

土壤残留无机氮 (kg/hm<sup>2</sup>) = 土壤残留硝态氮 + 土壤残留铵态氮。

## 1.5 数据处理与分析

采用 Microsoft Excel 2016 进行数据处理及作图，IBM SPSS Statistics 24 对数据进行方差分析，并用最小显著性差异 LSD 法进行多重比较，显著水平为 5%。

## 2 结果与分析

### 2.1 生物质炭及硝化/脲酶抑制剂对大麦收获后土壤 EC 和 pH 的影响

从图 1 可以看出，不施氮肥处理的 0~10 cm 土层电导率高于 10~20 cm 土层，而各施氮肥处理的 0~10 cm 土层电导率低于 10~20 cm 土层，这是由于不施氮肥处理植株矮小且早熟，土壤蒸发强烈，在作物生长后期造成盐分的表聚；而施氮肥处理植株茂密，土壤蒸发相对较弱，且在盆栽条件下缺乏排水影响，在多次的灌水后，土壤表层的盐分逐渐淋洗至底层。生物质炭由于自身含有较高的盐分，在大麦收获后增加了土壤的电导率。0~10 cm 土层，施氮肥处理相比不施氮肥处理显著降低了土壤电导率，各施氮肥处理间差异不显著，硝化/脲酶抑制剂对该土层电导率无显著影响。10~20 cm 土层，生物质炭处理显著增加了土壤电导率，硝化/脲酶抑制剂对该层土壤电导率无明显影响。

由图 2 所示，各施氮肥处理的土壤 pH 大致表现

为 0 ~ 10 cm 土层高于 10 ~ 20 cm 土层, 不施氮肥处理的土壤 pH 0 ~ 10 cm 土层低于 10 ~ 20 cm 土层, 添加 NBPT 处理相比添加 DCD 处理略微降低了土壤 pH。对于 0 ~ 10 cm 土层, 各施氮肥处理的土壤 pH 均高于不施氮肥处理, 各氮肥处理间差异不显著。10 ~ 20 cm 土层, 则大致表现为生物质炭处理土壤 pH 低于非生物质炭处理。

**2.2 生物质炭及硝化/脲酶抑制剂对大麦产量的影响**

由表 2 所示, 尿素中添加硝化/脲酶抑制剂可以提高大麦籽粒产量, 但生物质炭处理增产效果更明显, BFDN 处理增产最多, 相较 F 处理增产了 35.02%。各施氮肥处理均显著增加了秸秆的产量和生物量。各抑制剂处理相比 F 处理对秸秆产量均有一定程度的降低, 其中 BFDN 处理降低幅度最大, 达到了 12.92%。对于大麦生物量, BFN、BF、BFD、FD、BFDN 处理相比 F 处理生物量分别增加了 8.24%、7.47%、6.19%、3.23%、0.66%。各氮肥处理相比不施氮肥处理均增加了大麦的千粒重, BF 处理增加最多为 9.6%, 尿素加硝化/脲酶抑制剂处理相比 F 处理降低了大麦的千粒重, 其中 FN 处理降低最多为 5.3%。

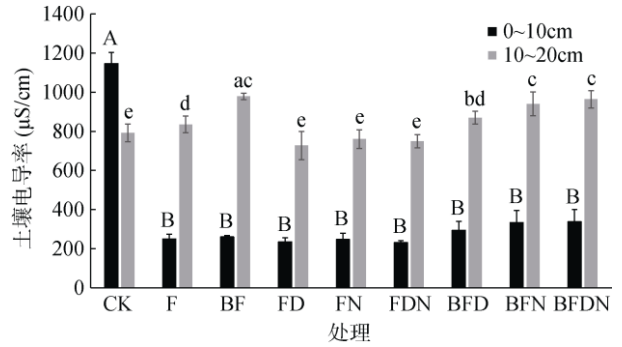
**2.3 生物质炭及硝化/脲酶抑制剂对大麦氮素吸收和氮肥利用率的影响**

**2.3.1 氮素吸收利用** 施氮肥可以增加大麦

对氮素的吸收, 且籽粒的全氮含量高于秸秆的全氮含量。从表 3 可以看出, 各氮肥处理的秸秆和籽粒全氮含量均高于不施氮肥处理, 各氮肥处理间差异不显著, 除 FDN、FN 处理的秸秆全氮和 FN 处理的籽粒全氮含量较 F 处理有所增加外, 其他施氮肥处理的秸秆和籽粒全氮含量对比 F 处理均有所下降, BFN 处理降低最多, 秸秆和籽粒全氮含量分别下降 16.42% 和 6.87%。对于大麦植株的氮素吸收量, 各氮肥处理相比不施氮肥处理均显著增加, 各氮肥处理间差异不

显著, 生物质炭及各抑制剂处理相比 F 处理均有所增加, BFD 处理相比 F 处理增加最多为 7.7%。

**2.3.2 氮肥利用效率** 尿素添加硝化/脲酶抑制剂对大麦氮肥利用效率相关指标均有提高。从表 4 可以看出, 由于生物质炭处理对大麦籽粒产量的提高最明显, 因此生物质炭配合硝化/脲酶抑制剂对氮肥农学



(图中不同的大写和小写字母分别表示 0 ~ 10 cm 土层和 10 ~ 20 cm 土层不同处理间差异显著 (P<0.05); 下同)

图 1 不同处理对大麦收获期土壤电导率的影响

Fig.1 Soil electrical conductivity under different treatments during barley harvest period

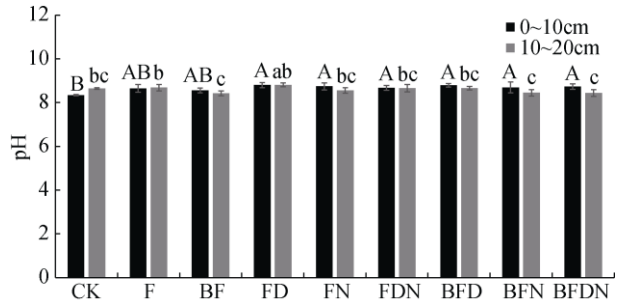


图 2 不同处理对大麦收获期土壤 pH 的影响

Fig. 2 Soil pH values under different treatments during barley harvest period

表 2 不同处理对大麦产量的影响  
Table 2 Barley yields under different treatments

处理	产量(kg/hm <sup>2</sup> )			千粒重(g)
	秸秆	籽粒	生物量	
CK	1 754 ± 35 c	2 594 ± 44 a	4 348 ± 79 c	33.14 ± 0.77 b
F	6 619 ± 200 a	2 616 ± 161 a	9 235 ± 361 ab	36.20 ± 0.42 a
BF	6 602 ± 48 a	3 323 ± 346 a	9 925 ± 298 a	36.31 ± 0.51 a
FD	6 542 ± 322 a	2 991 ± 243 a	9 533 ± 79 ab	35.50 ± 0.49 a
FN	6 215 ± 325 ab	2 709 ± 21 a	8 924 ± 311 b	34.30 ± 0.34 ab
FDN	6 105 ± 164 ab	2 783 ± 168 a	8 888 ± 214 b	34.37 ± 0.71 ab

BFD	6 449 ± 279 a	3 357 ± 130 a	9 807 ± 349 a	35.25 ± 0.96 ab
BFN	6 597 ± 186 ab	3 400 ± 85 a	9 996 ± 268 a	35.42 ± 0.93 a
BFDN	5 764 ± 118 b	3 532 ± 99 a	9 296 ± 78 ab	35.48 ± 0.75 a

注：表中数值为平均值 ± 标准误，同列数据后不同小写字母表示不同处理间差异显著 ( $P < 0.05$ )，下同。

表 3 不同处理对大麦氮素含量及吸氮量的影响  
Table 3 Nitrogen contents and uptake of barleys under different treatments

处理	氮素含量(g/kg)		氮素吸收量(kg/hm <sup>2</sup> )		
	秸秆	籽粒	秸秆	籽粒	植株
CK	3.96 ± 0.06 b	14.04 ± 0.13 a	6.95 ± 0.04 c	36.41 ± 0.36 c	43.35 ± 0.39 b
F	14.01 ± 0.37 a	31.14 ± 0.37 a	92.73 ± 4.12 a	81.46 ± 5.45 c	174.19 ± 3.19 a
BF	12.95 ± 1.65 ab	29.10 ± 1.34 a	85.50 ± 6.51 a	96.70 ± 13.24 ab	182.20 ± 6.73 a
FD	12.68 ± 0.11 a	30.99 ± 0.25 a	82.95 ± 3.66 ab	92.70 ± 7.43 b	175.65 ± 3.85 a
FN	14.5 ± 0.48 ab	32.35 ± 1.46 a	90.34 ± 7.14 a	87.65 ± 2.88 b	177.99 ± 7.67 a
FDN	15.49 ± 0.28 a	30.94 ± 1.83 a	94.49 ± 0.95 a	86.11 ± 5.76 b	180.60 ± 5.78 a
BFD	13.21 ± 0.24 a	30.22 ± 1.84 a	85.31 ± 5.15 ab	101.22 ± 1.94 ab	186.52 ± 3.87 a
BFN	11.71 ± 0.34 ab	29.00 ± 0.21 a	77.24 ± 4.35 b	98.59 ± 2.74 ab	175.84 ± 6.99 a
BFDN	12.43 ± 0.56 ab	29.75 ± 1.71 a	71.76 ± 4.65 b	104.96 ± 3.47 a	176.72 ± 7.05 a

表 4 不同处理对大麦氮肥利用效率的影响  
Table 4 Nitrogen use efficiencies of barleys under different treatments

处理	氮肥表观利用率(%)	氮肥农学效率(kg/kg)	氮肥偏生产力(kg/kg)	氮素吸收效率(%)	氮收获指数(%)
CK	-	-	-	-	83.98 ab
F	38.82 a	0.06 b	7.76 b	51.69 a	46.76 b
BF	42.81 a	2.16 ab	9.86 ab	55.67 a	51.54 b
FD	39.26 a	1.18 b	8.87 b	52.12 a	52.77 b
FN	39.95 a	0.34 b	8.04 b	52.82 a	49.37 b
FDN	40.73 a	0.56 b	8.26 b	53.59 a	47.57 b
BFD	42.48 a	2.27 ab	9.96 ab	55.35 a	54.33 b
BFN	39.31 a	2.39 a	10.09 a	52.17 a	56.07 ab
BFDN	39.58 a	2.78 a	10.48 a	52.44 a	59.45 ab

效率、氮肥偏生产力和氮收获指数提升最多。对于氮肥表观利用率和氮素吸收效率，BFD 处理相比 F 处理增加最多。不施氮肥处理的氮收获指数高于各施氮肥处理，这可能是由于当植物响应到缺氮时，养分氮会从植株基部或老叶转移到新器官，满足生殖器官的生长，因此造成籽粒的产量和吸氮量明显高于秸秆。

## 2.4 生物质炭及硝化/脲酶抑制剂对土壤无机氮及氮素养分平衡的影响

**2.4.1 土壤无机氮** 如表 5 所示，土壤无机氮以硝态氮为主，施氮肥可以显著增加土壤无机氮含量，且 10 ~ 20 cm 土层高于 0 ~ 10 cm 土层。随着灌水次数的增加，硝态氮逐渐淋溶至 10 ~ 20 cm 土层，造成 10 ~ 20 cm 土层的硝态氮含量高于 0 ~ 10 cm 土层。

表 5 不同处理对大麦收获后土壤铵态氮和硝态氮的影响  
Table 5 Soil ammonium nitrogen and nitrate nitrogen contents under different treatments after barley harvest

处理	铵态氮含量(mg/kg)		硝态氮含量(mg/kg)		无机氮含量(mg/kg)	
	0 ~ 10 cm	10 ~ 20 cm	0 ~ 10 cm	10 ~ 20 cm	0 ~ 10 cm	10 ~ 20 cm
CK	0.75 b	0.16	4.56	4.14 c	5.31 a	4.29 a
F	3.94 a	3.16	7.3	24.78 ab	11.14 a	27.94 a
BF	4.68 a	3.6	8.41	23.09 ab	13.09 a	26.68 a
FD	4.05 a	5.48	8.19	20.67 b	12.24 a	26.15 a
FN	3.47 a	1.75	11.58	26.25 ab	15.05 a	28.01 a

FDN	3.7 a	5.4	8.99	24.55ab	12.68 a	29.95 a
BFD	5.04 a	5.14	8.54	17.66 b	13.58 a	22.80 a
BFN	4.61 a	2.19	7.73	28.52ab	12.34 a	30.71 a
BFDN	3.65 a	2.42	9.69	24.74 a	13.34 a	27.17 a

对比 F 处理, 添加 DCD 处理增加了土壤 0 ~ 20 cm 土层铵态氮含量, 降低了 10 ~ 20 cm 土层硝态氮的含量, 因此 10 ~ 20 cm 土层无机氮含量相比 F 处理也有降低。添加 NBPT 处理相比 F 处理降低了 0 ~ 20 cm 土层铵态氮含量, 但增加了硝态氮的含量。同时添加 DCD 和 NBPT 相比单独添加 DCD 和 NBPT, 既可以避免硝化抑制剂对铵态氮含量的增加, 又降低了脲酶抑制剂对硝态氮含量的增加。

**2.4.2 土壤氮素养分平衡** 根据氮输入及氮输出, 计算出在盆栽条件下土壤-大麦体系的氮素养分平衡(表 6)。施氮量在氮输入中占据主导地位, 且显著增

加了作物的吸氮量和土壤残留无机氮。在氮输出项中, 主要以作物吸收和氮表观损失为主。尿素中添加脲酶抑制剂可以增加土壤残留无机氮含量, FN、BFN、FDN、BFDN、BF 处理相比 F 处理分别增加了 10.18%、10.16%、9.11%、3.62%、1.73%; 硝化抑制剂降低了土壤残留无机氮含量, FD、BFD 处理相对 F 处理分别降低了 1.77%、6.90%。尿素中添加硝化/脲酶抑制剂均降低了氮表观损失量, FDN、BFD、BF、FN、BFN、BFDN、FD 处理分别相比 F 处理降低了 6.02%、5.37%、5.07%、4.78%、3.53%、2.38%、0.39%。

表 6 不同处理下盆栽大麦氮素平衡  
Table 6 Nitrogen balances of potted barleys under different treatments

处理	氮输入(kg/hm <sup>2</sup> )			氮输出(kg/hm <sup>2</sup> )		氮表观损失量(kg/hm <sup>2</sup> )
	施氮量	起始无机氮	净矿化	作物吸收	残留无机氮	
CK	0.00	33.04	21.09	43.35 b	10.78 b	0.00
F	337.00	33.04	21.09	174.19 a	43.89 a	173.05 a
BF	337.00	33.04	21.09	182.20 a	44.65 a	164.28 a
FD	337.00	33.04	21.09	175.65 a	43.11a	172.37 a
FN	337.00	33.04	21.09	177.99 a	48.36 a	164.78 a
FDN	337.00	33.04	21.09	180.60 a	47.89 a	162.64 a
BFD	337.00	33.04	21.09	186.52 a	40.86 a	163.75 a
BFN	337.00	33.04	21.09	175.84 a	48.35 a	166.94 a
BFDN	337.00	33.04	21.09	176.72 a	45.48 a	168.93 a

### 3 讨论

生物质炭可以提高土壤孔隙度和导水率, 因此可以加速盐分的淋洗<sup>[20]</sup>。但是也有学者发现, 高灰分的生物质炭增加了土壤的电导率<sup>[21]</sup>。因此在盐渍土中应用生物质炭也应考虑其自身的盐分。本研究结果表明, 各施氮肥处理均增加了土壤盐分的淋洗, 由于缺乏排水措施, 导致底层土壤积聚大量盐分, 此外生物质炭本身含有较多的盐分, 因此生物质炭处理的电导率高于不加生物质炭处理, 且掩盖了生物质炭对盐分的淋洗作用。对于土壤 pH, 土壤电导率较低的处理土壤 pH 反而较高, 可能是因为试验用土为苏北滨海盐渍土, 盐分组成中 Na<sup>+</sup> 的含量占阳离子的 60% ~ 88%, 随着土壤积盐和返盐的频繁进行, 土壤碱化程度也在发生变化; 此外 HCO<sub>3</sub><sup>-</sup> 含量虽然很低, 但是

其相对含量随着土壤全盐含量的下降反而升高, 故土壤 pH 随着盐分的降低而略有增加<sup>[22]</sup>。10 ~ 20 cm 土层的土壤 pH 大致表现为生物质炭处理低于非生物质炭处理, 可能和盐分的淋洗有关。

许多学者针对不同土壤类型及不同作物进行了硝化/脲酶抑制剂对作物产量及氮素吸收利用的研究。有的研究表明硝化/脲酶抑制剂可以提高作物产量及氮素吸收利用<sup>[23]</sup>, 但也有研究发现硝化/脲酶抑制剂没有提高产量<sup>[24]</sup>, 这可能取决于抑制剂及作物的种类、土壤类型等因素。生物质炭对产量的影响也有不同的研究结果, Zhang 等<sup>[25]</sup>研究结果表明, 生物质炭用量 20 t/hm<sup>2</sup> 和 40 t/hm<sup>2</sup> 分别增产了 8.8% 和 12.1%; 然而 Rajkovich 等<sup>[26]</sup>研究结果表明, 26 t/hm<sup>2</sup> 的生物质炭用量降低了产量, 这可能和生物质炭及土壤的性质有关。盐渍土含有过量的可溶性盐和其高

pH, 严重抑制了土壤氮素的有效性和植物对氮素的吸收利用。本研究结果表明, 尿素中添加硝化/脲酶抑制剂可以增加大麦籽粒的产量, 配合使用生物质炭增产更多, 这和 He 等<sup>[17]</sup>的研究结果一致; 除 NBPT 添加增加了秸秆和籽粒的全氮含量外, 其余抑制剂处理皆降低了大麦籽粒和秸秆的全氮含量。大麦为喜硝态氮作物, DCD 及 DCD 加 NBPT 处理大麦生育期内土壤硝态氮含量较低, 因此相比 F 处理降低了大麦秸秆和籽粒的全氮含量; FN 处理增加了秸秆和籽粒的全氮含量, 这是由于脲酶抑制剂处理铵态氮含量较低, 有利于硝化作用的进行, 增加了土壤中硝态氮的含量<sup>[27]</sup>, 从而增加了大麦对氮素的吸收利用; 生物质炭由于高的 pH 会增加氮素的氨挥发损失, 以及可能吸附硝态氮和铵态氮, 降低土壤有机质的分解<sup>[28]</sup>, 因此降低了土壤中无机氮的含量, 故 BFN 处理也降低了大麦的全氮含量。硝化/脲酶抑制剂促进了大麦籽粒产量的增加, 却降低了大麦秸秆的产量, 可能由于抑制剂增加了氮素的供应时间, 使土壤无机氮含量在作物生育期内保持在较低的水平, 而盐渍土含有较多的可溶性盐, 造成土壤渗透势降低<sup>[29]</sup>, 导致作物吸收养分困难, 从而作物吸收的养分会优先满足生殖器官的生长, 这和本试验中不施氮肥处理的籽粒产量高于秸秆一致。此外, 本研究中添加 DCD 和 NBPT 处理相比 F 处理均增加了氮肥的利用效率, 由于生物质炭对大麦籽粒的产量增加更多, 因此生物质炭配合尿素加抑制剂处理相比尿素单加抑制剂处理, 对氮肥农学效率、氮肥偏生产力及氮收获指数增加更多。

DCD 通过抑制亚硝化细菌的活性, 阻止尿素水解成铵态氮后的进一步氧化, 从而降低土壤的氮素损失<sup>[30]</sup>。NBPT 通过抑制脲酶活性, 延缓尿素的水解, 从而降低土壤中的  $\text{NH}_4^+$  浓度, 减少对作物的毒害作用以及氨挥发损失<sup>[31]</sup>。硝化抑制剂和脲酶抑制剂混合使用, 既能延缓尿素的水解, 减少氨挥发损失, 又能减少  $\text{N}_2\text{O}$  的损失<sup>[32]</sup>。旱作土壤中, 土壤无机氮以硝态氮为主。本研究中, 添加 DCD 处理增加了作物收获后土壤中铵态氮含量, 降低了硝态氮含量, 配合生物质炭处理对铵态氮含量增加更多、硝态氮含量降低更多, 因此降低了土壤中残留无机氮含量, 这可能是由于生物质炭会吸附  $\text{NH}_4^+$ <sup>[33]</sup>; 添加 NBPT 处理降低了土壤中的铵态氮含量, 但提高了硝态氮含量, 配合生物质炭处理增加更多, 导致土壤中残留无机氮含量增加, 与鲁艳红等<sup>[19]</sup>的研究结果相反, 可能是因为脲酶抑制剂抑制了尿素的水解, 使土壤中铵态氮含量处在较低的水平, 从而促进了硝化作用<sup>[27]</sup>。当 DCD

与 NBPT 同时添加时, 相比单独添加 DCD 处理降低了土壤铵态氮含量, 相比单独添加 NBPT 处理降低了土壤硝态氮含量。氮肥施入土壤后的去向主要为被作物吸收、残留在土壤中以及通过氨挥发、硝化和反硝化、淋洗和径流等途径损失<sup>[34]</sup>。本研究通过盆栽试验开展, 缺乏排水设施, 因此氮素的损失途径中缺乏淋洗损失。通过计算盆栽条件下的氮平衡发现, DCD 和 NBPT 对氮表观损失均有降低作用。本研究中氮的表观损失较大, 达到了  $160 \sim 170 \text{ kg/hm}^2$ , 明显高于侯云鹏等<sup>[35]</sup>的研究结果, 这是因为在盐渍土中, 土壤盐分抑制了硝酸还原酶的活性从而增加了  $\text{N}_2\text{O}$  排放<sup>[36]</sup>以及碱性环境下增加了氨挥发损失。此外, 由于盆栽条件下施氮量偏多, 通过对比朱海等<sup>[37]</sup>在本试验用土所属地区的田间试验, 氮的表观损失也有增加。

## 4 结论

1) 在盆栽条件下, 由于缺乏排水设施, 导致土壤盐分被淋洗至底层; 生物质炭自身含有较高的盐分, 因此其添加增加了土壤电导率。总体上, 土壤电导率高的土壤 pH 较低。

2) DCD、NBPT 添加可以增加大麦籽粒的产量、植株吸氮量, 但是却降低了秸秆的产量; 同时添加生物质炭处理增产更多, 其中 BFDN 处理籽粒产量增加最多, 相较于 F 处理增加了 35.02%。DCD 添加降低了大麦秸秆和籽粒的全氮含量; NBPT 添加增加了大麦籽粒和秸秆的全氮含量, 但是同时添加生物质炭条件下又有降低作用。DCD、NBPT 添加可以提高氮肥利用效率, 配合生物质炭使用对各指标的增加更多。

3) 盆栽条件下较多的施氮量, 导致氮的损失量也较大。对比常规化肥处理, DCD 添加降低了土壤中残留的无机氮含量, NBPT 添加增加了土壤中残留无机氮含量。DCD、NBPT 及生物质炭配合施用, 对盆栽条件下土壤-植物系统中氮素表观损失均有降低作用。

4) 从作物产量、氮肥利用率及氮素表观损失 3 个方面考量, 在滨海盐渍土中应用生物质炭加硝化/脲酶抑制剂较为理想。

## 参考文献:

- [1] Sun H J, Shi W M, Zhou M Y, et al. Effect of biochar on nitrogen use efficiency, grain yield and amino acid content of wheat cultivated on saline soil[J]. *Plant, Soil and Environment*, 2019, 65(2): 83-89.

- [2] 金雯晖, 杨劲松, 侯晓静, 等. 轮作模式对滩涂土壤有机碳及团聚体的影响[J]. 土壤, 2016, 48(6): 1195–1201.
- [3] Tejada M, Garcia C, Gonzalez J L, et al. Use of organic amendment as a strategy for saline soil remediation: Influence on the physical, chemical and biological properties of soil[J]. Soil Biology and Biochemistry, 2006, 38(6): 1413–1421.
- [4] 王会, 何伟, 段福建, 等. 秸秆还田对盐渍土团聚体稳定性及碳氮含量的影响[J]. 农业工程学报, 2019, 35(4): 124–131.
- [5] Mahmoodabadi M, Yazdanpanah N, Sinobas L R, et al. Reclamation of calcareous saline sodic soil with different amendments (I): Redistribution of soluble cations within the soil profile[J]. Agricultural Water Management, 2013, 120: 30–38.
- [6] 陆景陵. 植物营养学—上册[M]. 2 版. 北京: 中国农业大学出版社, 2003: 209.
- [7] 巨晓棠, 谷保静. 我国农田氮肥施用现状、问题及趋势[J]. 植物营养与肥料学报, 2014, 20(4): 783–795.
- [8] Abdelgadir E M, Oka M, Fujiyama H. Characteristics of nitrate uptake by plants under salinity[J]. Journal of Plant Nutrition, 2005, 28(1): 33–46.
- [9] Queiroz H M, Sodek L, Haddad C R B. Effect of salt on the growth and metabolism of *Glycine max*[J]. Brazilian Archives of Biology and Technology, 2012, 55(6): 809–817.
- [10] Dendooven L, Alcántara-Hernández R J, Valenzuela-Encinas C, et al. Dynamics of carbon and nitrogen in an extreme alkaline saline soil: A review[J]. Soil Biology and Biochemistry, 2010, 42(6): 865–877.
- [11] 左青松, 蒯婕, 刘浩, 等. 土壤盐分对油菜氮素积累、运转及利用效率的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2017, 23(3): 827–833.
- [12] 周连仁, 杨德超. 盐渍化农田有机无机肥配施比例的筛选[J]. 东北农业大学学报, 2013, 44(11): 25–28.
- [13] 李玉, 田宪艺, 王振林, 等. 有机肥替代部分化肥对滨海盐碱地土壤改良和小麦产量的影响[J]. 土壤, 2019, 51(6): 1173–1182.
- [14] Zhang J H, Bai Z G, Huang J, et al. Biochar alleviated the salt stress of induced saline paddy soil and improved the biochemical characteristics of rice seedlings differing in salt tolerance[J]. Soil and Tillage Research, 2019, 195: 104372.
- [15] 高婧, 杨劲松, 姚荣江, 等. 不同改良剂对滨海重度盐渍土质量和肥料利用效率的影响[J]. 土壤, 2019, 51(3): 524–529.
- [16] 武爱莲, 王劲松, 董二伟, 等. 施用生物炭和秸秆对石灰性褐土氮肥去向的影响[J]. 土壤学报, 2019, 56(1): 176–185.
- [17] He T H, Liu D Y, Yuan J J, et al. Effects of application of inhibitors and biochar to fertilizer on gaseous nitrogen emissions from an intensively managed wheat field[J]. Science of the Total Environment, 2018, 628/629: 121–130.
- [18] 张建兵, 杨劲松, 姚荣江, 等. 有机肥与覆盖方式对滩涂围垦农田水盐与作物产量的影响[J]. 农业工程学报, 2013, 29(15): 116–125.
- [19] 鲁艳红, 聂军, 廖育林, 等. 氮素抑制剂对双季稻产量、氮素利用效率及土壤氮平衡的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2018, 24(1): 95–104.
- [20] Saifullah, Dahlawi S, Naeem A, et al. Biochar application for the remediation of salt-affected soils: Challenges and opportunities[J]. Science of the Total Environment, 2018, 625: 320–335.
- [21] Smider B, Singh B. Agronomic performance of a high ash biochar in two contrasting soils[J]. Agriculture, Ecosystems & Environment, 2014, 191: 99–107.
- [22] 王遵亲, 祝寿泉, 俞仁培, 等. 中国盐渍土[M]. 北京: 科学出版社, 1993: 153–154.
- [23] 方玉凤, 王晓燕, 庞荔丹, 等. 硝化抑制剂对春玉米氮素利用及土壤 pH 值和无机氮的影响[J]. 中国土壤与肥料, 2015(6): 18–22.
- [24] Ding W X, Chen Z M, Yu H Y, et al. Nitrous oxide emission and nitrogen use efficiency in response to nitrophosphate, N-(n-butyl) thiophosphoric triamide and dicyandiamide of a wheat cultivated soil under sub-humid monsoon conditions[J]. Biogeosciences, 2015, 12(3): 803–815.
- [25] Zhang A, Liu Y M, Pan G X, et al. Effect of biochar amendment on maize yield and greenhouse gas emissions from a soil organic carbon poor calcareous loamy soil from Central China Plain[J]. Plant and Soil, 2012, 351(1/2): 263–275.
- [26] Rajkovich S, Enders A, Hanley K, et al. Corn growth and nitrogen nutrition after additions of biochars with varying properties to a temperate soil[J]. Biology and Fertility of Soils, 2012, 48(3): 271–284.
- [27] Wang Z P, Cleemput O, Demeyer P, et al. Effect of urease inhibitors on urea hydrolysis and ammonia volatilization[J]. Biology and Fertility of Soils, 1991, 11(1): 43–47.
- [28] Song Y Z, Li Y F, Cai Y J, et al. Biochar decreases soil N<sub>2</sub>O emissions in Moso bamboo plantations through decreasing labile N concentrations, N-cycling enzyme activities and nitrification/denitrification rates[J]. Geoderma, 2019, 348: 135–145.
- [29] Irshad M, Eneji A E, Yasuda H. Comparative effect of nitrogen sources on maize under saline and non-saline conditions[J]. Journal of Agronomy and Crop Science, 2008, 194(4): 256–261.
- [30] 张昊青, 赵学强, 张玲玉, 等. 石灰和双氰胺对红壤酸化和硝化作用的影响及其机制[J]. 土壤学报, 2021, 58(1): 169–179.
- [31] 隽英华, 陈利军, 武志杰, 等. 脲酶/硝化抑制剂在土壤 N 转化过程中的作用[J]. 土壤通报, 2007, 38(4): 773–780.
- [32] 陈利军, 史奕. 脲酶抑制剂和硝化抑制剂的协同作用对尿素氮转化和 N<sub>2</sub>O 排放的影响[J]. 应用生态学报, 1995, 6(4): 368–372.
- [33] Soares J R, Cantarella H, Menegale M L D C. Ammonia volatilization losses from surface-applied urea with urease



- and nitrification inhibitors[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2012, 52: 82–89.
- [34] 朱兆良. 农田中氮肥的损失与对策[J]. *土壤与环境*, 2000, 9(1): 1–6.
- [35] 侯云鹏, 李前, 孔丽丽, 等. 不同缓/控释氮肥对春玉米氮素吸收利用、土壤无机氮变化及氮平衡的影响[J]. *中国农业科学*, 2018, 51(20): 3928–3940.
- [36] Ghosh U, Thapa R, Desutter T, et al. Saline-sodic soils: Potential sources of nitrous oxide and carbon dioxide emissions?[J]. *Pedosphere*, 2017, 27(1): 65–75.
- [37] 朱海, 杨劲松, 姚荣江, 等. 有机无机肥配施对滨海盐渍农田土壤盐分及作物氮素利用的影响[J]. *中国生态农业学报*, 2019, 27(3): 441–450.