文章编号:1000-7601(2023)04-0051-10 **doi**:10.7606/j.issn.1000-7601.2023.04.06

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

史多鹏[1],叶子壮[1],李　杰[1],许迎浩[1],
吕慎强[1],王林权[1],周春菊[2]

(1.西北农林科技大学资源环境学院,陕西 杨凌 712100;2.西北农林科技大学生命科学学院,陕西 杨凌 712100)

摘　要:于 2019—2021 年采用再裂区设计,设置氮肥、生物炭和脲酶抑制剂 3 个因素,主处理设 5 个氮水平:0、75、150、225 kg·hm^{-2}和 300 kg·hm^{-2},副处理设 2 个生物炭水平:0 t·hm^{-2}和 7.5 t·hm^{-2},副副处理设 2 个脲酶抑制剂水平:0%和 2%,共 20 个处理,研究氮肥配施生物炭和脲酶抑制剂对夏玉米-冬小麦轮作体系作物产量和氮肥吸收利用的影响。结果表明,施用生物炭显著提高夏玉米和冬小麦产量、植株氮素吸收量、氮肥表观利用率、氮素收获指数以及夏玉米地上部生物量,较不施生物炭处理分别增加 4.4%和 2.9%、2.3%和 3.0%、25.8%和 13.5%、4.9%和 6.1%、4.5%;氮肥单独配施生物炭可显著提高夏玉米和冬小麦产量、植株氮素吸收量和氮肥表观利用率,且氮肥和生物炭具有显著的交互效应。施用脲酶抑制剂显著增加夏玉米植株氮素吸收量和氮肥表观利用率,较不施脲酶抑制剂处理分别提高 1.5%和 3.0%;氮肥单独配施脲酶抑制剂可提高夏玉米植株氮素吸收量和氮肥表观利用率,但氮肥与脲酶抑制剂无显著交互效应。氮肥同时配施生物炭与脲酶抑制剂可显著提高夏玉米和冬小麦产量、植株氮素吸收量和氮肥表观利用率,较单施氮肥处理(B0C0)平均增幅分别为 10.0%和 4.2%、5.4%和 3.4%、11.0%和6.2%,但氮肥、生物炭和脲酶抑制剂三者之间均无显著交互效应。综上,氮肥单独配施生物炭能够提高夏玉米和冬小麦产量及其对氮肥的吸收利用率,且效果优于同时配施生物炭和脲酶抑制剂;氮肥单独配施脲酶抑制剂对提高夏玉米氮肥吸收利用率具有一定的作用。

关键词:氮肥;生物炭;脲酶抑制剂;夏玉米;冬小麦;产量;氮素吸收量;氮肥表观利用率

中图分类号:S513;S512.1^{+}1　　**文献标志码**:A

Effects of nitrogen combined with biochar and urease inhibitor on yield and nitrogen utilization of summer maize-winter wheat system

SHI Duopeng[1], YE Zizhuang[1], LI Jie[1], XU Yinghao[1], LV Shenqiang[1], WANG Linquan[1], ZHOU Chunju[2]

(1. *College of Natural Resources and Environment*, *Northwest A&F University*, *Yangling*, *Shaanxi* 712100, *China*;
2. *College of Life Sciences*, *Northwest A&F University*, *Yangling*, *Shaanxi* 712100, *China*)

Abstract: From 2019 to 2021, a re-split plot design was used to study the effects of nitrogen fertilizer combined with biochar and urease inhibitor on crop yield and nitrogen uptake and utilization in summer maize-winter wheat rotation system. Three factors of nitrogen fertilizer, biochar and urease inhibitor were set up. The main treatment was set up with five nitrogen levels: 0, 75, 150, 225 kg·hm^{-2} and 300 kg·hm^{-2}, and the secondary treatment was set up with two biochar levels: 0 t·hm^{-2} and 7.5 t·hm^{-2}. Under the secondary treatment, two urease inhibitor levels of 0% and 2% were used. The results showed that the application of biochar significantly increased the yield, plant nitrogen uptake, apparent nitrogen use efficiency (ANUE), nitrogen harvest index of summer maize and winter wheat and aboveground biomass of summer maize, which were 4.4% and 2.9%, 2.3% and 3.0%, 25.8% and 13.5%, 4.9% and 6.1%, 4.5% higher than those without biochar application, respectively. Nitrogen

收稿日期:2022-06-07　　**修回日期**:2023-02-09

基金项目:国家自然科学基金(32072682);国家重点实验室基金(A314021402-1920)

作者简介:史多鹏(1995-),男,甘肃山丹人,硕士研究生,研究方向为施肥与环境。E-mail:duoduo17829081609@163.com

通信作者:王林权(1964-),男,陕西凤翔人,教授,主要从事植物营养、施肥与环境、旱地水肥高效利用等研究。E-mail:linquanw@nwsuaf.edu.cn

fertilizer combined with biochar significantly increased the yield of summer maize and winter wheat, plant nitrogen uptake and ANUE, and there was a significant interaction between nitrogen fertilizer and biochar. The application of urease inhibitors significantly increased the nitrogen uptake and ANUE of summer maize plants, which were 1.5% and 3.0% higher than those without urease inhibitors, respectively. Nitrogen fertilizer combined with urease inhibitor could increase nitrogen uptake and ANUE of summer maize, but there was no significant interaction between nitrogen fertilizer and urease inhibitor. Nitrogen fertilizer combined with biochar and urease inhibitor significantly increased the yield, plant nitrogen uptake and ANUE of summer maize and winter wheat, with an average increase of 10.0% and 4.2%, 5.4% and 3.4%, 11.0% and 6.2%, respectively, compared with N fertilization alone, but there was no significant interaction between nitrogen fertilizer, biochar and urease inhibitor. In summary, nitrogen fertilizer alone combined with biochar increased the yield of summer maize and winter wheat and its absorption and ANUE, and the effect was better than that combined use of biochar and urease inhibitor. Nitrogen fertilizer alone with urease inhibitor had a certain effect on improving the absorption and utilization of nitrogen fertilizer in summer maize.

Keywords: nitrogen fertilizer; biochar; urease inhibitor; summer maize; winter wheat; yield; N uptake; apparent nitrogen use efficiency

小麦和玉米作为我国两大主要粮食作物,其充足供应是我国粮食安全的重要保障。在农业生产中氮肥的增产效果显著,氮肥施用为我国小麦和玉米等粮食作物产量增加提供了有力支撑[1]。近年来我国农田化肥施用量不断增加,过量施肥现象普遍存在。过量的氮肥投入并未显著提高作物产量,还造成氮肥利用率低下、资源浪费,甚至产生不良的生态环境效应[2-3]。因此,如何在保证作物产量、经济效益和环境效益的前提下实现化肥减施、提高肥料利用率是我国亟待解决的现实问题。

作为土壤调理剂,生物炭在农业生产中的应用和研究日益增多。生物炭能够吸持并缓释土壤矿质氮,增加植株对土壤氮素的吸收,进而提高作物产量[4]。同时,添加生物炭还可以改善土壤环境,如在华北平原农田施用 5 t · hm^{-2}生物炭可显著提高土壤有机质、全氮和全钾含量[5],生物炭施入 5 a 后土壤有机碳、速效磷和速效钾含量显著提高[6];许云翔等[7]的研究也证实了这一观点,即在施入生物炭 6 a 后,稻田土壤有机碳、有效磷和速效钾含量分别增加了 34.6%、12.4%和26.2%。有研究表明,脲酶抑制剂(NBPT)和硝化抑制剂具有延缓尿素在土壤中的水解与转化、稳定土壤氮素资源、调控产量以及肥料利用率的作用[8-10]。目前大部分研究集中于化肥和脲酶抑制剂的单独施用效应,关于两者配合施用对作物和土壤影响的研究尚不多见。

黄土高原区是我国传统农耕区,也是我国主要的旱作农业区之一[11]。关于旱作条件下生物炭和脲酶抑制剂配施对肥料氮吸收和作物产量影响的研究较少。因此,本试验通过研究氮肥与脲酶抑制剂(NBPT)和生物炭配合施用对轮作夏玉米和冬小麦产量、生物量、产量构成因素,以及植株氮素吸收量、氮肥利用率和氮素收获指数等指标的影响,探索生物炭和脲酶抑制剂配合施用的可能性,以期为夏玉米和冬小麦轮作区减氮增效以及栽培技术改良提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 试验地概况

试验在陕西省杨凌示范区西北农林科技大学曹新庄试验农场进行,该农场位于黄土高原南部(108°06′E,34°18′N),为黄土高原南缘夏玉米-冬小麦种植区,海拔 513 m,年均降水量 749 mm,年平均气温 13.9℃。2019—2020 年、2020—2021 年夏玉米和冬小麦生育季内日降水量和日均气温变化情况见图 1。试验土壤类型为土垫旱耕人为土(塿土),土壤基础理化性质为:pH 8.12,有机质 13.28 g · kg^{-1},全氮 0.81 g · kg^{-1},矿质氮 13.28 mg · kg^{-1},速效磷 6.21 mg · kg^{-1},速效钾 124.55 mg · kg^{-1}。

1.2 供试材料与试验设计

供试夏玉米和冬小麦品种分别为‘华农 138’和‘小偃 22’,供试肥料为尿素(46% N);供试生物炭为小麦秸秆生物炭(450℃条件下小麦秸秆无氧热解制成),基本理化性质:pH 为 11,比表面积为 9 m^2 · g^{-1},有机炭含量 50%,全氮含量 6 g · kg^{-1},全磷含量 0.9 g · kg^{-1},全钾含量 23 g · kg^{-1};供试脲酶抑制剂为 N-丁基硫代磷酰三胺(NBPT),含量大于 98%,购于连云港金马生物科技有限公司。

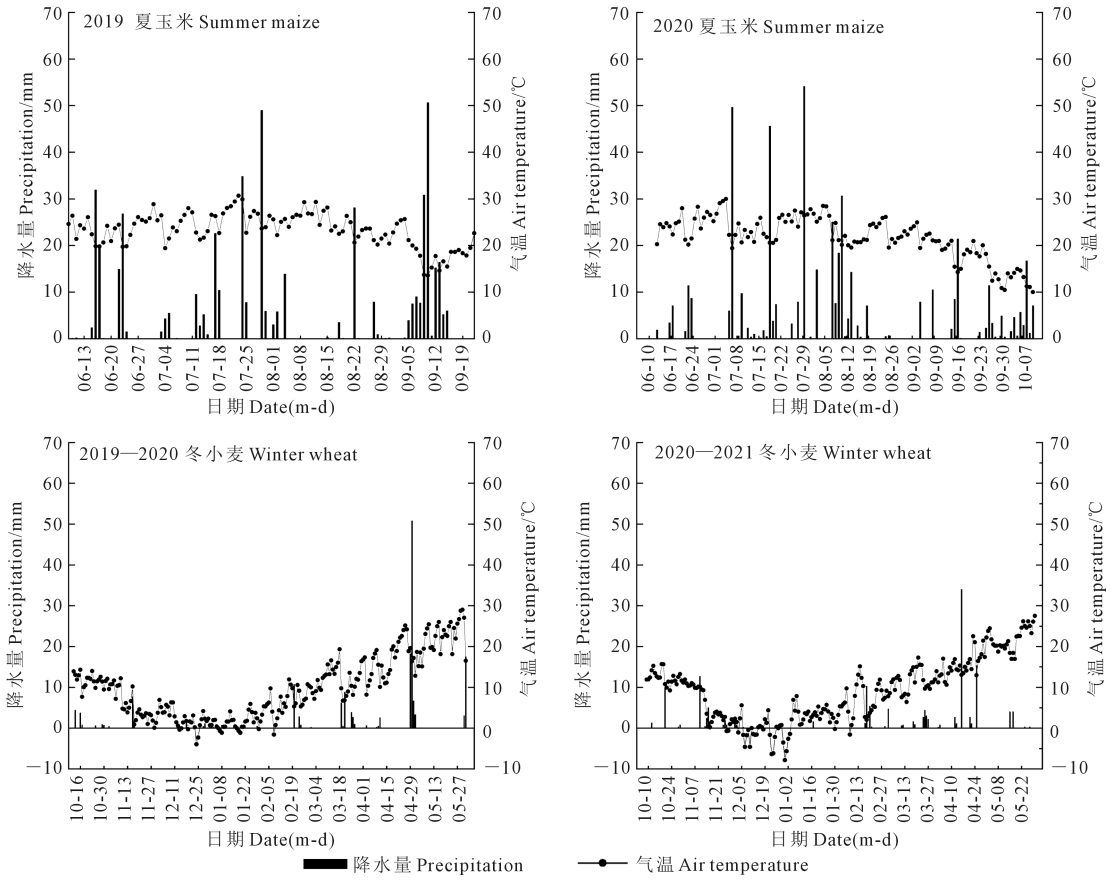


图 1　夏玉米和冬小麦生育季气象条件

Fig.1　Climate condition of growing season of summer maize and winter wheat

试验为夏玉米-冬小麦轮作种植制度的田间小区试验,采用三因素综合的再裂区设计,施氮量为主处理,设 5 个 N 水平,分别为 0(N_0)、75(N_{75})、150(N_{150})、225 kg·hm^{-2}(N_{225})和 300 kg·hm^{-2}(N_{300}),同一水平下,夏玉米和冬小麦生育期施氮量相同;生物炭施用量为副处理,设 2 个水平,单季用量分别为 0 t·hm^{-2}(B0)和 7.5 t·hm^{-2}(B7.5);脲酶抑制剂(NBPT)为副副处理,设 2 个水平,施用量分别为氮肥用量的 0%(C0)和 2%(C2)。共 20 个处理,每个处理 3 次重复,共 60 个小区,小区面积为 10 m^2(2.5 m×4.0 m)。

夏玉米和冬小麦的氮肥均采用基施+追施的方式施用,其中每年玉米季的尿素 50%基施,50%于大喇叭口期开沟追施;每年度小麦季的尿素 70%基施,30%于拔节期开沟追施。生物炭与基施氮肥完全混合后一次施入土壤,脲酶抑制剂则在每次氮肥施用时与其混匀一起施入土壤。夏玉米分别于 2019 年 6 月 13 日和 2020 年 6 月 13 日播种,于 2019 年 10 月 13 日和 2020 年 10 月 13 日收获;冬小麦分别于 2019 年 10 月 19 日和 2020 年 10 月 18 日播种,于 2020 年 6 月 6 日和 2021 年 6 月 7 日收获。夏玉米分别于苗期和拔节期灌溉,灌溉量为 1 050 m^3·hm^{-2};冬小麦全生育期不灌溉。夏玉米种植密度为 5.76 万株·hm^{-2},冬小麦播种量为 120 kg·hm^{-2}。夏玉米和冬小麦田间管理方式均与当地的常规管理相同。

1.3　测定项目与方法

1.3.1　*籽粒产量及产量要素*　夏玉米:于玉米成熟期每个小区取生长发育较为一致的玉米 10 株,风干后测算有效穗数、穗粒数、千粒重和籽粒产量。冬小麦:于小麦成熟期每个小区随机收获 1 m^2样方的小麦样品,风干后测算有效穗数、穗粒数、千粒重和籽粒产量。

1.3.2　*地上部生物量*　夏玉米:玉米成熟期每个小区采集 2 株具有代表性的玉米植株,烘干后测定平均单株质量,结合种植密度计算单位面积玉米地上部生物量。冬小麦:小麦成熟期每小区采集 20 株具有代表性的小麦植株,烘干后测定平均单株质量,结合有效穗数计算单位面积小麦地上部生物量。

1.3.3　*地上植株氮素吸收量*　夏玉米:于玉米成熟期每个小区取 2 株玉米地上部植株,按苞叶、叶片、茎秆、雄穗、穗轴和籽粒 6 个器官分开,烘干并分别

称重,换算得到单株植物干物质量及各器官干物质量。再将各器官分别粉碎过筛,测定其氮素含量。按照各器官干物质量占单株干物质量的比例和各器官含氮量换算得到玉米地上植株平均含氮量,玉米地上植株氮素吸收量(kg·hm^{-2})=玉米地上植株平均含氮量×玉米地上部生物量。

冬小麦:于小麦成熟期每个小区取 20 株小麦地上部植株,按茎秆、颖壳、籽粒和叶片 4 个器官分开,烘干并分别称重,换算得到单株植物干物质量以及各器官的干物质量。将各器官分别粉碎后,测定其氮素含量。按照各器官干物质量占整个植株的比例和各器官含氮量换算得到小麦地上植株平均含氮量,小麦地上植株氮素吸收量(kg·hm^{-2})=小麦地上植株平均含氮量×小麦地上部生物量×0.001。

1.3.4 氮素收获指数

氮素收获指数(%)=玉米(小麦)籽粒氮素吸收量/玉米(小麦)地上植株氮素吸收量

1.3.5 氮肥表观利用率 氮肥表观利用率(%)=(施氮处理玉米(小麦)单位面积植株氮素吸收量-不施氮处理玉米(小麦)单位面积植株氮素吸收量)/施氮量×100%

1.4 数据分析

所有数据均为各作物 2 个生长季平均值,采用 Excel 进行整合、处理。用 SPSS 21.0 进行三因素裂区设计的方差分析、统计分析以及多重比较(LSD 法)。用 Origin 2021 软件作图。

2 结果与分析

2.1 不同处理对夏玉米和冬小麦籽粒产量的影响

夏玉米和冬小麦产量效应年际间差异不显著,故取 2 个生长季产量平均值分析氮肥、生物炭和脲酶抑制剂及其交互效应对 2 种作物的影响。由表 1 可知,氮肥、生物炭均能显著提高夏玉米和冬小麦籽粒产量,且二者对冬小麦籽粒产量的影响具有显著的交互效应;脲酶抑制剂对夏玉米和冬小麦籽粒产量均无显著影响(图 2A)。氮肥与脲酶抑制剂、生物炭与脲酶抑制剂以及三者之间均无显著交互效应。随氮肥施用量的增加,夏玉米和冬小麦籽粒产量表现出先增加后降低的趋势,均在 N_{225}水平下达到最大,与 N_0相比,分别提高 42.6%和 34.0%。生物炭的施用显著增加夏玉米和冬小麦籽粒产量,分别较不施生物炭处理提高 4.4%和 2.9%。

由图 2 可知,在不施用氮肥的条件下,生物炭和脲酶抑制剂增产效果不显著(图 2B)。与单施氮肥处理(B0C0)相比,氮肥配施生物炭和脲酶抑制剂处理

表 1 生物炭、脲酶抑制剂施用及氮肥处理对夏玉米和冬小麦籽粒产量的影响/(kg·hm^{-2})

Table 1 Effects of biochar, urease inhibitor application and nitrogen fertilizer treatments on grain yield of summer maize and winter wheat

处理 Treatment		夏玉米 Summer maize	冬小麦 Winter wheat
氮肥 Nitrogen	N_0	6195d	6234d
	N_{75}	7963c	7607c
	N_{150}	8544ab	8051b
	N_{225}	8831a	8352a
	N_{300}	8321bc	8344a
生物炭 Biochar	B0	7800b	7606b
	B7.5	8141a	7830a
脲酶抑制剂 NBPT	C0	7833a	7693a
	C2	8108a	7743a
方差分析 ANOVA			
氮肥 Nitrogen(N)		**	**
生物炭 Biochar(B)		*	**
脲酶抑制剂 NBPT(C)		NS	NS
N×B		NS	*
N×C		NS	NS
B×C		NS	NS
N×B×C		NS	NS

注:同列不同小写字母表示同类因素处理间差异显著($P<0.05$)。*和**分别表示差异显著($P<0.05$)和差异极显著($P<0.01$),NS 表示差异不显著($P>0.05$)。下同。

Note: Different lowercase letters in the same column indicate significant differences among treatments under the same factor ($P<0.05$). * and ** indicate significant difference at 0.05 and 0.01 levels, respectively. NS indicates no significance difference ($P>0.05$). The same below.

(B7.5C2)在各施氮量下均显著增加了夏玉米籽粒产量,平均增幅为 10.0%;在 N_{75}水平下,氮肥单独配施生物炭处理(B7.5C0)和单独配施脲酶抑制剂处理(B0C2)分别增产 12.8%和 10.1%;在 N_{150}和 N_{225}水平下,氮肥单独配施生物炭(B7.5C0)和单独配施脲酶抑制剂(B0C2)处理均无增产效应;在 N_{300}水平下,氮肥单独配施生物炭表现为减产效应,而单独配施脲酶抑制剂对玉米籽粒产量无显著影响(图 2A)。在 4 个施氮水平下,氮肥配施生物炭和脲酶抑制剂(B7.5C2)处理均显著增加了冬小麦籽粒产量,平均增幅为 4.2%;在 N_{75}、N_{225}、N_{300}水平下,氮肥单独配施生物炭处理(B7.5C0)的小麦籽粒产量显著高于 B0C0 处理,平均增加 251 kg·hm^{-2},单独配施脲酶抑制剂处理对冬小麦籽粒产量影响不显著(图 2B)。综上可知,氮肥同时配施生物炭和脲酶抑制剂对冬小麦和夏玉米均有显著增产作用;氮肥单独配肥生物炭对冬小麦有显著增产效应。

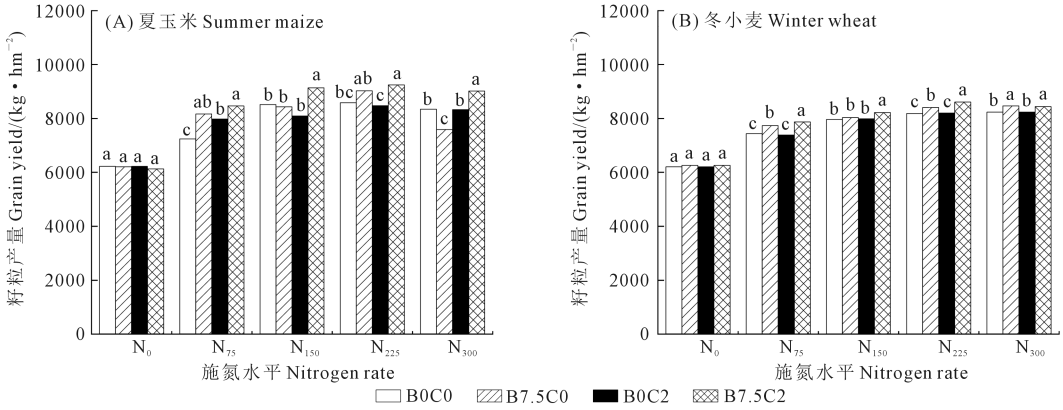
2.2 不同处理对夏玉米和冬小麦产量构成因素的影响

由表 2 可知,氮肥对冬小麦有效穗数、夏玉米和冬小麦穗粒数、夏玉米和冬小麦千粒重有显著影

响;生物炭对夏玉米和冬小麦穗粒数、夏玉米千粒重有显著影响;脲酶抑制剂对冬小麦千粒重有显著影响。氮肥和生物炭对夏玉米穗粒数和千粒重、冬小麦穗粒数的影响具有显著交互效应,而氮肥和脲酶抑制剂对夏玉米穗粒数和冬小麦千粒重的影响具有显著的交互效应。施氮显著提高了冬小麦有效穗数和穗粒数、夏玉米穗粒数和千粒重,与 N_0 相比,N_{225} 水平下冬小麦有效穗数、穗粒数和夏玉米穗粒数、千粒重分别提高 19.4%、24.2% 和 25.0%、19.7%;N_{300} 水平下冬小麦千粒重增加 12.3%。施用生物炭显著增加了夏玉米穗粒数、千粒重和冬小麦穗粒数,较不施生物炭处理增加幅度分别为 1.8%、3.5% 和 2.2%。施用脲酶抑制剂显著增加了冬小麦千粒重,与不施脲酶抑制剂相比增幅为 1.1%。

2.3　不同处理对夏玉米和冬小麦地上部生物量的影响

由表 3 可知,氮肥对夏玉米和冬小麦地上部生物量有显著影响;生物炭对夏玉米地上部生物量有显著影响;脲酶抑制剂对 2 种作物均无显著影响。氮肥与生物炭、氮肥与脲酶抑制剂的交互作用均对



注:不同小写字母表示同一施氮水平处理之间差异显著性($P<0.05$)。下同。

Note: Different lowercase letters indicate significant difference between treatments at the same nitrogen application level ($P<0.05$). The same below.

图 2　氮肥配施生物炭和脲酶抑制剂对夏玉米和冬小麦籽粒产量的影响

Fig.2　Effect of nitrogen fertilizer combined with biochar and urease inhibitor on grain yield of summer maize and winter wheat

表 2　生物炭、脲酶抑制剂施用及氮肥处理对夏玉米和冬小麦产量构成因素的影响

Table 2　Effects of biochar, urease inhibitor application and nitrogen fertilizer treatments on yield components of summer maize and winter wheat

处理 Treatment		有效穗数/(10^4 · hm^{-2}) Spike number		穗粒数 Kernel number per spike		千粒重/g 1000-grain weight	
		夏玉米 Summer maize	冬小麦 Winter wheat	夏玉米 Summer maize	冬小麦 Winter wheat	夏玉米 Summer maize	冬小麦 Winter wheat
氮肥 Nitrogen	N_0	5.76a	390.50c	354.7e	28.5d	247.2d	41.6b
	N_{75}	5.76a	447.92b	385.5d	31.7c	269.9c	45.1a
	N_{150}	5.76a	464.83a	421.3b	31.8bc	284.4b	45.9a
	N_{225}	5.76a	466.08a	443.2a	35.4a	296.0a	46.1a
	N_{300}	5.76a	449.46b	409.0c	32.5b	286.9b	46.7a
生物炭 Biochar	B0	5.76a	439.26a	399.1b	31.6b	272.1b	44.6a
	B7.5	5.76a	448.26a	406.3a	32.3a	281.7a	45.5a
脲酶抑制剂 NBPT	C0	5.76a	442.84a	402.3a	32.0a	278.0a	44.8b
	C2	5.76a	444.67a	403.2a	31.9a	275.8a	45.3a
方差分析 ANOVA							
氮肥 Nitrogen(N)		NS	**	**	**	**	*
生物炭 Biochar(B)		NS	NS	**	**	**	NS
脲酶抑制剂 NBPT(C)		NS	NS	NS	NS	NS	*
N×B		NS	NS	**	**	*	NS
N×C		NS	NS	*	NS	NS	*
B×C		NS	NS	NS	NS	NS	NS
N×B×C		NS	NS	NS	NS	NS	NS

夏玉米地上部生物量具有显著影响,对冬小麦均无显著影响;氮肥、生物炭和脲酶抑制剂的交互作用对夏玉米和冬小麦地上部生物量具有显著影响。施氮显著提高夏玉米和冬小麦地上部生物量,且 2 种作物地上部生物量均随氮肥施用量的增加而增加,与 N_0相比, N_{300}水平下二者地上部生物量分别提高 76.0%和 69.0%。生物炭的施用显著增加夏玉米地上部生物量,较不施生物炭处理提高 4.5%。

2.4 不同处理对夏玉米和冬小麦氮肥吸收利用的影响

2.4.1 植株氮素吸收量 氮素吸收量是指示作物氮素吸收利用水平的重要指标,其与作物生产力指标之间有很强的相关性。由表 4 可知,氮肥和生物炭对冬小麦和夏玉米植株氮素吸收量的影响具有显著的交互效应,氮肥与脲酶抑制剂、生物炭与脲酶抑制剂以及三者之间均无显著交互效应。施氮显著增加夏玉米和冬小麦植株氮素吸收量,与 N_0相比,N_{300}水平下夏玉米植株氮素吸收量显著提高 142.8%,N_{225}水平下冬小麦植株氮素吸收量显著提高 87.5%。施用生物炭显著增加了夏玉米和冬小麦植株氮素吸收量,分别较不施生物炭处理提高 2.3%和 3.0%。施用脲酶抑制剂显著增加了夏玉米植株氮素吸收量,较不施脲酶抑制剂处理提高 1.4%。

由图 3 可知,施用氮肥同时配施生物炭和脲酶抑制剂均对植株氮素吸收量产生显著影响。对夏玉米而言,N_0水平下,单施生物炭显著降低植株氮素吸收量,单施脲酶抑制剂则无显著影响;其余 4 个施氮水平下,B7.5C0 处理和 B7.5C2 处理均显著增加植株氮素吸收量,与 B0C0 处理相比,平均增幅分别为 4.5%和 5.4%;在 N_{150}、N_{225}和 N_{300}水平下,B0C2

表 3 生物炭、脲酶抑制剂施用及氮肥处理对夏玉米和冬小麦地上部生物量的影响/(kg·hm^{-2})

Table 3 Effects of biochar, urease inhibitor application and nitrogen fertilizer treatments on aboveground biomass of summer maize and winter wheat

处理 Treatment		夏玉米 Summer maize	冬小麦 Winter wheat
氮肥 Nitrogen	N_0	8905.08d	9316.25c
	N_{75}	12911.62c	12844.74b
	N_{150}	14156.35b	15315.66a
	N_{225}	15398.94a	15641.61a
	N_{300}	15670.46a	15739.70a
生物炭 Biochar	B0	13112.70b	13566.25a
	B7.5	13704.28a	13976.92a
脲酶抑制剂 NBPT	C0	13410.43a	13871.18a
	C2	13406.54a	13672.00a
方差分析 ANOVA			
氮肥 Nitrogen(N)		**	**
生物炭 Biochar(B)		**	NS
脲酶抑制剂 NBPT(C)		NS	NS
N×B		*	NS
N×C		**	NS
B×C		NS	NS
N×B×C		**	*

表 4 生物炭、脲酶抑制剂施用及氮肥处理对夏玉米和冬小麦植株氮素吸收量的影响/(kg·hm^{-2})

Table 4 Effects of biochar, urease inhibitor application and nitrogen fertilizer treatments on plant nitrogen uptake of summer maize and winter wheat

处理 Treatment		夏玉米 Summer maize	冬小麦 Winter wheat
氮肥 Nitrogen	N_0	80.14e	117.14d
	N_{75}	116.42d	161.45c
	N_{150}	143.96c	207.67b
	N_{225}	173.19b	219.67a
	N_{300}	194.57a	218.93a
生物炭 Biochar	B0	140.04b	182.21b
	B7.5	143.27a	187.73a
脲酶抑制剂 NBPT	C0	140.68b	185.32a
	C2	142.63a	184.62a
方差分析 ANOVA			
氮肥 Nitrogen(N)		**	**
生物炭 Biochar(B)		**	**
脲酶抑制剂 NBPT(C)		**	NS
N×B		**	**
N×C		NS	NS
B×C		NS	NS
N×B×C		NS	NS

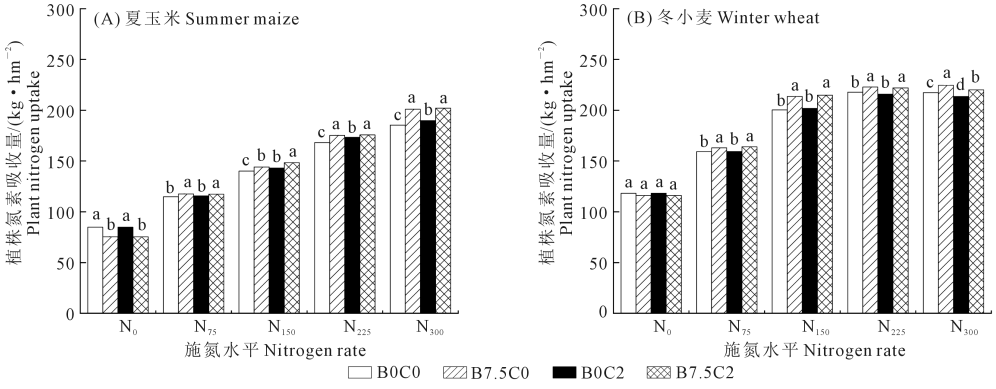


图 3 氮肥配施生物炭和脲酶抑制剂对夏玉米和冬小麦植株氮素吸收量的影响

Fig.3 Effect of nitrogen fertilizer combined with biochar and urease inhibitor on plant nitrogen uptake of summer maize and winter wheat

处理植株氮素吸收量分别较 B0C0 处理显著提高 2.1%、3.2%和 2.4%(图 3A)。对冬小麦而言,除 N_0 外,其余 4 个施氮水平下,B7.5C0 处理和 B7.5C2 处理植株氮素吸收量均显著高于 B0C0,平均增幅分别为3.6%和 3.4%,同时二者也显著高于 B0C2 处理,平均增幅分别为 4.1%和 3.8%(图 3B)。综上可知,氮肥同时配施生物炭和脲酶抑制剂可显著提高夏玉米和冬小麦植株氮素吸收量,氮肥单独配施生物炭对提高夏玉米植株氮素吸收量具有显著效果。

2.4.2　氮肥表观利用率　氮肥表观利用率是反映作物对肥料氮素吸收利用效果的重要指标。由表 5 可知,氮肥、生物炭均显著影响夏玉米和冬小麦氮肥表观利用率,且二者具有显著的交互效应;脲酶抑制剂可显著提高夏玉米氮肥表观利用率,对冬小麦无显著影响。氮肥与脲酶抑制剂、生物炭与脲酶抑制剂以及三者之间均无交互效应。随氮肥用量增加,夏玉米和冬小麦氮肥表观利用率总体呈逐渐下降趋势;施用生物炭显著提高了夏玉米和冬小麦氮肥表观利用率,分别较不施生物炭处理提高 25.8%和 13.5%;施用脲酶抑制剂显著增加夏玉米氮肥表观利用率,较不施脲酶抑制剂处理提高 3.0%。

表 5　生物炭、脲酶抑制剂施用及氮肥处理对夏玉米和冬小麦氮肥表观利用率的影响/%

Table 5　Effects of biochar urease inhibitor application and nitrogen treatment on apparent nitrogen use efficiency of summer maize and winter wheat

处理 Treatment		夏玉米 Summer maize	冬小麦 Winter wheat
氮肥 Nitrogen	N_0		
	N_{75}	48.38a	59.08a
	N_{150}	42.55b	60.35a
	N_{225}	41.35c	45.57b
	N_{300}	38.14d	33.93c
生物炭 Biochar	B0	37.74b	46.59b
	B7.5	47.47a	52.88a
脲酶抑制剂 NBPT	C0	41.97b	49.76a
	C2	43.24a	49.71a
方差分析 ANOVA			
氮肥 Nitrogen(N)		**	**
生物炭 Biochar(B)		**	**
脲酶抑制剂 NBPT(C)		**	NS
N×B		**	**
N×C		NS	NS
B×C		NS	NS
N×B×C		NS	NS

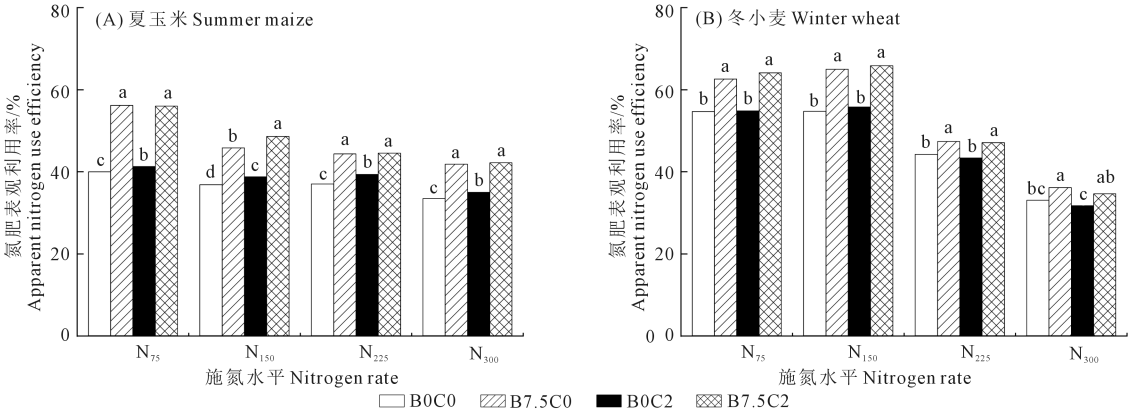


图 4　氮肥配施生物炭和脲酶抑制剂对夏玉米和冬小麦氮肥表观利用率的影响

Fig.4　Effect of nitrogen fertilizer combined with biochar and urease inhibitor on apparent nitrogen use efficiency of summer maize and winter wheat

由图 4A 可知,在各施氮水平下,B7.5C0、B0C2 处理和 B7.5C2 处理夏玉米氮肥表观利用率均显著高于 B0C0 处理,平均增幅分别为 10.2%、1.8%和 11.0%;在 N_{150}水平下,B7.5C2 处理夏玉米氮肥表观利用率较 B7.5C0 处理显著提高 6.0%。如图 4B 所示,在 N_{75}、N_{150}和 N_{225}水平下,B7.5C0 处理和 B7.5C2 处理冬小麦氮肥表观利用率均显著高于 B0C0 处理,平均增幅分别为 6.1%和 6.2%,但 B7.5C0 和 B7.5C2处理之间差异不显著;N_{300}水平下,B7.5C0 处理氮肥表观利用率较 B0C0 处理显著提高 9.3%。可见,氮肥同时配施生物炭和脲酶抑制剂及单独配施生物炭均能显著提高夏玉米和冬小麦氮肥表观利用率,而其单独配施脲酶抑制剂只对夏玉米氮肥表观利用率具有显著作用。

2.4.3　氮素收获指数　氮素收获指数是评估作物氮素向籽粒转移水平的重要指标。由表 6 可知,氮肥、生物炭均显著提高夏玉米和冬小麦氮素收获指数,脲酶抑制剂对 2 种作物均无显著影响。氮肥与生物炭互作、氮肥与脲酶抑制剂互作、三者互作均对夏玉米氮素收获指数具有显著的影响。施用氮

肥显著提高了夏玉米和冬小麦氮素收获指数,与 N_0 相比,在 N_{225} 和 N_{300} 水平下,夏玉米和冬小麦氮素收获指数分别提高了 9.7%、26.5% 和 21.0%、18.3%。施用生物炭显著提高了夏玉米和冬小麦氮素收获指数,提高幅度分别为 4.9% 和 6.1%。

表 6 生物炭、脲酶抑制剂施用及氮肥处理对夏玉米和冬小麦氮素收获指数的影响/%

Table 6 Effects of biochar, urease inhibitor application and nitrogen fertilizer treatments on nitrogen harvest index of summer maize and winter wheat

处理 Treatment		夏玉米 Summer maize	冬小麦 Winter wheat
氮肥 Nitrogen	N_0	66.49e	64.50c
	N_{75}	69.58d	69.00bc
	N_{150}	75.52b	75.42ab
	N_{225}	72.91c	81.58a
	N_{300}	80.48a	76.33ab
生物炭 Biochar	B0	71.24b	71.20b
	B7.5	74.76a	75.53a
脲酶抑制剂 NBPT	C0	72.92a	74.20a
	C2	73.07a	72.53a
方差分析 ANOVA			
氮肥 Nitrogen(N)		**	**
生物炭 Biochar(B)		**	**
脲酶抑制剂 NBPT(C)		NS	NS
N×B		**	NS
N×C		*	NS
B×C		NS	NS
N×B×C		*	NS

3 讨 论

改善氮肥管理措施是提高氮素利用效率的主要途径之一,作物产量、地上部生物量等农艺性状与植株氮素利用效率密切相关。有研究表明,在一定施氮量范围内,作物产量和地上部生物量均随着施氮量增加而增加[12-13],本研究也得到类似结果,且夏玉米和冬小麦籽粒产量均在 N_{225} 水平(施氮量 225 kg·hm^{-2})下达到最大。此外,施氮显著增加了夏玉米和冬小麦植株氮素吸收量,且其随施氮量的增加而增加;而 2 种作物氮肥表观利用率总体随施氮量的增加而下降,可能是因为施入土壤的氮肥未被作物及时吸收利用,而以挥发等形式损失,从而造成农作物氮素利用率下降,这与前人研究结果一致[14-15]。

脲酶可催化尿素水解,使其转化为无机氮供植物吸收利用[16]。但是尿素水解过快会使土壤中铵态氮浓度过高,无法被作物及时吸收利用,导致土壤氨挥发损失及后续硝化-反硝化过程中的氧化亚氮等气态氮损失[17]。外源物脲酶抑制剂(NBPT)的添加可以稳定土壤的氮素资源,降低尿素水解速率,从而减小土壤中矿质氮的浓度、减少气态氮损失,保证植株对肥料氮素的吸收和利用[18],进而影响作物产量。鲁艳红等[19]、刘垚等[20]、李春玲等[9]研究均表明,氮肥配施 NBPT 可以提高作物产量;但也有研究发现两者配施对作物产量的影响不显著[21]。本研究表明,氮肥配施 NBPT 可以显著提高夏玉米植株氮素利用率,但对夏玉米和冬小麦籽粒产量以及冬小麦植株氮素利用率影响不显著,可能是因为 NBPT 的作用有一定时效性,受土壤温度、水分、质地及田间管理措施等外部因素的干预,不同处理作用时效有所不同,其对作物产量及氮素利用率的影响随之表现出一定差异[22]。前人研究表明,NBPT 可以减少土壤中脲酶基因(*ureC*)丰度和脲酶活性,延缓尿素水解、减少土壤氨挥发,但是其抑制效应只可维持 3 周左右[23]。

生物炭具有表面积大、吸附能力强等特点,施入后会改变土壤的理化性质,进而影响土壤对肥料中氮素的吸附转化及作物对养分的吸收利用效率,表现出显著增产效应[24]。有研究表明,氮肥配施生物炭可以显著增加夏玉米和冬小麦产量,单施生物炭则会减少植株的氮素吸收量,具有减产效应,这可能与生物炭引起的氮素固持效应有关[25]。本研究表明,氮肥配施生物炭能有效提高夏玉米和冬小麦植株氮素利用率,且二者具有显著的交互效应,这与前人研究结果一致[26-27]。一方面可能是生物炭提高了旱地土壤的持水能力,降低了容重,改善了土壤理化性质[28],从而有利于植株对氮素的吸收利用;另一方面可能是生物炭具有的强稳定性和高孔隙度等优点能促进土壤对矿质氮的吸附,被吸附的氮素在作物各生育时期逐步释放,有利于维持氮素的供需平衡,减少肥料氮素的损失[29],从而提高作物氮素利用率。此外,生物炭对土壤有机碳、pH、养分含量和土壤肥力具有重要的改善作用,还可以通过增加土壤氨氧化基因(*amoB* 和 *amoA*)丰度,加速硝化作用而抑制土壤氨挥发,与 NBPT 有一定程度的协同效应[30]。

4 结 论

1)施用生物炭显著提高夏玉米和冬小麦产量、植株氮素吸收量、氮肥表观利用率、夏玉米地上部生物量和氮素收获指数;氮肥单独配施生物炭可以显著提高夏玉米和冬小麦产量以及植株氮素吸收利用率,且二者具有显著交互效应。

2)施用脲酶抑制剂显著提高夏玉米植株氮素

吸收量和氮肥表观利用率;氮肥单独配施脲酶抑制剂可以显著提高夏玉米植株氮素吸收利用率,但二者交互作用不显著。

3)施用氮肥同时配施生物炭和脲酶抑制剂显著提高夏玉米和冬小麦产量、植株氮素吸收量和氮肥表观利用率,但三者无显著交互效应。

综上所述,氮肥单独配施生物炭可显著提高旱地夏玉米和冬小麦产量以及肥料氮的吸收利用效率,且效果优于氮肥同时配施生物炭和脲酶抑制剂;氮肥单独配施脲酶抑制剂对提高夏玉米氮肥吸收利用率具有一定的作用。

参 考 文 献:

[1] 王敬国, 林杉, 李保国. 氮循环与中国农业氮管理[J]. 中国农业科学, 2016, 49(3): 503-517.
WANG J G, LIN S, LI B G. Nitrogen cycling and management strategies in Chinese agriculture[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2016, 49(3): 503-517.

[2] WANG J M, YANG R X, FENG Y. Spatial variability of reconstructed soil properties and the optimization of sampling number for reclaimed land monitoring in an opencast coal mine[J]. Arabian Journal of Geosciences, 2017, 10(2): 46.

[3] YANG Y, NI X Y, ZHOU Z J, et al. Performance of matrix-based slow-release urea in reducing nitrogen loss and improving maize yields and profits[J]. Field Crops Research, 2017, 212: 73-81.

[4] 俄胜哲, 丁宁平, 李利利, 等. 长期施肥条件下黄土高原黑垆土作物产量与土壤碳氮的关系[J]. 应用生态学报, 2018, 29(12): 4047-4055.
E S Z, DING N P, LI L L, et al. Relationship of crop yield and soil organic carbon and nitrogen under long-term fertilization in black loessial soil region on the Loess Plateau in China[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2018, 29(12): 4047-4055.

[5] 姚奇, 俞若涵, 张洪宇, 等. 生物炭施用对冬小麦农田土壤养分及作物产量的影响[J]. 中国土壤与肥料, 2022,(3): 68-74.
YAO Q, YU R H, ZHANG H Y, et al. Effects of biochar application on soil nutrients and crop yield in winter wheat farmland[J].Soil and Fertilizer Sciences in China, 2022,(3): 68-74.

[6] 郭书亚, 尚赏, 张艳, 等. 生物炭施用五年后对土壤生物化学特性及夏玉米产量的影响[J]. 土壤与作物, 2022, 11(3): 290-297.
GUO S Y, SHANG S, ZHANG Y, et al. Effects of biochar application after five years on soil biochemical properties and summer maize yield[J]. Soils and Crops, 2022, 11(3): 290-297.

[7] 许云翔, 何莉莉, 刘玉学, 等. 施用生物炭 6 年后对稻田土壤酶活性及肥力的影响[J]. 应用生态学报, 2019, 30(4): 1110-1118.
XU Y X, HE L L, LIU Y X, et al. Effects of biochar addition on enzyme activity and fertility in paddy soil after six years[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2019, 30(4): 1110-1118.

[8] LAN T, HE X Q, WANG Q, et al. Synergistic effects of biological nitrification inhibitor, urease inhibitor, and biochar on NH_3 volatilization, N leaching, and nitrogen use efficiency in a calcareous soil-wheat system[J]. Applied Soil Ecology, 2022, 174: 104412.

[9] 李春玲, 李国山, 于亦忠, 等. 减氮施肥及氮肥添加脲酶抑制剂对凉州灌区春玉米产量和氮肥利用的影响[J]. 干旱地区农业研究, 2021, 39(2): 31-36.
LI C L, LI G S, YU Y Z, et al. Effects of reduced nitrogen fertilization and urease inhibitor on the yield and nitrogen use efficiency of spring maize in irrigation areas of Liangzhou[J]. Agricultural Research in the Arid Areas, 2021, 39(2): 31-36.

[10] WATSON C J, AKHONZADA N A, HAMILTON J T G, et al. Rate and mode of application of the urease inhibitor *N*-(n-butyl) thiophosphoric triamide on ammonia volatilization from surface-applied urea[J]. Soil Use and Management, 2008, 24(3): 246-253.

[11] 李凤民. 黄土高原旱作农业生态化与高质量发展[J]. 科技导报, 2020, 38(17): 52-59.
LI F M. Ecologicalization and high-quality development of dryland farming in the Loess Plateau of NW China[J]. Science & Technology Review, 2020, 38(17): 52-59.

[12] 徐晓峰, 焦念元. 氮肥减施对宽幅播种冬小麦产量形成和氮肥利用效率的影响[J]. 核农学报, 2021, 35(4): 953-959.
XU X F, JIAO N Y. Effects of reduced application of nitrogen fertilizer on yield formation and nitrogen use efficiency of winter wheat with-wide-range sowing[J]. Journal of Nuclear Agricultural Sciences, 2021, 35(4): 953-959.

[13] DIVITO G A, SAINZ ROZAS H R, ECHEVERRÍA H E, et al. Long-term sulfur fertilization: effects on crops and residual effects in a no-till system of argentinean pampas[J]. Communications in Soil Science and Plant Analysis, 2013, 44(12): 1800-1813.

[14] 赵庆雷, 吴修, 高洁, 等. 氮肥不同用量对南四湖区水稻产量及氮素利用率的影响[J]. 山东农业科学, 2013, 45(7): 78-82.
ZHAO Q L, WU X, GAO J, et al. Influence of different nitrogen application amounts on rice yield and nitrogen use efficiency in Nansi Lakearea[J]. Shandong Agricultural Sciences, 2013, 45(7): 78-82.

[15] 郭栋, 党廷辉, 戚龙海. 黄土旱塬不同氮肥用量下冬小麦干物质累积和氮素吸收利用过程研究[J]. 水土保持学报, 2008, 22(5): 138-141.
GUO D, DANG T H, QI L H. Process study of dry matter accumulation and nitrogen absorption use of winter wheat under different N-fertilizer rates on dry highland of Loess Plateau[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2008, 22(5): 138-141.

[16] 徐丽萍, 王旭, 侯晓娜, 等. 脲酶抑制剂 NBPT 对三种类型土壤中 UAN 氮溶液氮素转化和氨挥发的影响[J]. 中国土壤与肥料, 2022,(3): 126-136.
XU L P, WANG X, HOU X N, et al. Effects of urease inhibitors (NBPT) on nitrogen transformation and ammonia volatilization of UAN nitrogen solution in three types of soil[J]. Soil and Fertilizer Sciences in China, 2022,(3): 126-136.

[17] 陶甄, 李中阳, 李松旌, 等. 硝化抑制剂、脲酶抑制剂与生物炭复配对土壤温室气体排放的影响[J]. 农业环境科学学报, 2022, 41(6): 1368-1379.
TAO Z, LI Z Y, LI S J, et al. Impact of compound addition of biochar, nitrification inhibitor, and urease inhibitor on greenhouse gas emissions[J]. Journal of Agro-Environment Science, 2022, 41(6): 1368-1379.

[18] 张文学, 王萍, 孙刚, 等. 脲酶抑制剂不同用量对土壤氮素供应的影响[J]. 中国土壤与肥料, 2018,(6): 38-44, 52.
ZHANG W X, WANG P, SUN G, et al. Effects of urease inhibitor addition rate on nitrogen transformation in paddy soil[J].Soil and Fertilizer Sciences in China, 2018,(6): 38-44, 52.

[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.
LU Y H, NIE J, LIAO Y L, et al. Effects of urease and nitrification inhibitor on yield, nitrogen efficiency and soil nitrogen balance under

double-rice cropping system[J]. Journal of Plant Nutrition and Fertilizers, 2018, 24(1): 95-104.

[20] 刘垚, 李光华. 脲酶抑制剂(NBPT)对玉米产量及农艺性状的影响[J]. 耕作与栽培, 2016,(6): 48-49.
LIU Y, LI G H. The study of NBPT applying on yield and agronomic traits of maize[J]. Tillage and Cultivation, 2016,(6): 48-49.

[21] 王小彬, 辛景峰, GRANTCA, 等. 尿素与脲酶抑制剂配用对春小麦植株氮吸收的影响[J]. 干旱地区农业研究, 1998,(3): 9-13.
WANG X B, XIN J F, GRANTCA, et al. Effects of urease with NBPT on N uptake of spring wheat[J]. Agricultural Research in the Arid Areas, 1998,(3): 9-13.

[22] FAN D J, HE W T, SMITH W N, et al. Global evaluation of inhibitor impacts on ammonia and nitrous oxide emissions from agricultural soils:a meta-analysis[J]. Global Change Biology, 2022, 28(17): 5121-5141.

[23] ABDO A I, XU Y H, SHI D P, et al. Nitrogen transformation genes and ammonia emission from soil under biochar and urease inhibitor application[J]. Soil and Tillage Research, 2022,223: 105491.

[24] 高鸣慧, 李娜, 彭靖, 等. 秸秆和生物炭还田对棕壤团聚体分布及有机碳含量的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2020, 26(11): 1978-1986.
GAO M H, LI N, PENG J, et al. Effects of straw and biochar returning on soil aggregates distribution and organic carbon content in brown soil[J]. Journal of Plant Nutrition and Fertilizers, 2020, 26(11): 1978-1986.

[25] DEENIK J L, MCCLELLAN T, UEHARA G, et al. Charcoal volatile matter content influences plant growth and soil nitrogen transformations[J]. Soil Science Society of America Journal, 2010, 74(4): 1259-1270.

[26] 张爱平, 刘汝亮, 高霁, 等. 生物炭对宁夏引黄灌区水稻产量及氮素利用率的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2015, 21(5): 1352-1360.
ZHANG A P, LIU R L, GAO J, et al. Effects of biochar on rice yield and nitrogen use efficiency in the Ningxia Yellow River irrigation region[J]. Journal of Plant Nutrition and Fertilizers, 2015, 21(5): 1352-1360.

[27] 曲晶晶, 郑金伟, 郑聚锋, 等. 小麦秸秆生物质炭对水稻产量及晚稻氮素利用率的影响[J]. 生态与农村环境学报, 2012, 28(3): 288-293.
QU J J, ZHENG J W, ZHENG J F, et al. Effects of wheat-straw-based biochar on yield of rice and nitrogen use efficiency of late rice[J]. Journal of Ecology and Rural Environment, 2012, 28(3): 288-293.

[28] 张云舒, 唐光木, 龙晓双, 等. 生物炭一次性施入对灌耕风沙土土壤性质及玉米产量的影响[J]. 干旱地区农业研究, 2021, 39(4): 137-141.
ZHANG Y S, TANG G M, LONG X S, et al. Effects of one-time biochar input on soil properties and corn yield in irrigation sandy soil[J]. Agricultural Research in the Arid Areas, 2021, 39(4): 137-141.

[29] 陈琳, 乔志刚, 李恋卿, 等. 施用生物质炭基肥对水稻产量及氮素利用的影响[J]. 生态与农村环境学报, 2013, 29(5): 671-675.
CHEN L, QIAO Z G, LI L Q, et al. Effects of biochar-based fertilizers on rice yield and nitrogen use efficiency[J]. Journal of Ecology and Rural Environment, 2013, 29(5): 671-675.

[30] 崔文芳, 陈静, 鲁富宽, 等. 生物炭与氮肥减量调控对土壤养分和肥力的影响[J]. 西南农业学报, 2021, 34(11): 2429-2436.
CUI W F, CHEN J, LU F K, et al. Effects of biochar and nitrogen reduction on soil nutrient and fertility[J]. Southwest China Journal of Agricultural Sciences, 2021, 34(11): 2429-2436.

(上接第50页)

[27] 陈雪. 干旱胁迫对不同大麦生长发育、产量和品质的影响[D]. 杭州:浙江大学,2015.
CHEN X. Effects of drought stress on growth,yield and quality of different barley genotypes[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2015.

[28] 徐银萍, 潘永东, 张廷红, 等. 30份大麦种质资源的苗期抗旱性鉴定及抗旱指标筛选[J]. 甘肃农业科技, 2021, 52(9): 56-67.
XU Y P, PAN Y D, ZHANG T H, et al. Drought resistance identification and drought resistance indices screening of 30 barley germplasm resources at seedling stage[J]. Gansu Agricultural Science and Technology, 2021, 52(9): 56-67.

[29] 冉生斌, 蔡立群. 干旱胁迫对不同基因型啤酒大麦品种(系)生长发育的影响[J]. 甘肃农业科技, 2017,(5): 28-33.
RAN S B, CAI L Q. Effects of drought stress on growth and development of different genotypes of malting barley cultivars (lines)[J]. Gansu Agricultural Science and Technology, 2017,(5): 28-33.

[30] 惠宏杉, 林立昊, 齐军仓, 等. 干旱胁迫对大麦幼苗根系的影响[J]. 麦类作物学报, 2015, 35(9): 1291-1297.
HUI H S, LIN L H, QI J C, et al. Effect of drought stress on the roots of barley seedling[J]. Journal of Triticeae Crops, 2015, 35(9): 1291-1297.

[31] 代小冬, 徐心志, 朱灿灿, 等. 谷子苗期对不同程度干旱胁迫的响应及抗旱性评价[J]. 作物杂志, 2016,(1): 140-143.
DAI X D, XU X Z, ZHU C C, et al. Seeding stage response to different water availability and drought resistance evaluation of foxtail millet[J]. Crops, 2016,(1): 140-143.

[32] 蔺豆豆, 赵桂琴, 琚泽亮, 等. 15份燕麦材料苗期抗旱性综合评价[J]. 草业学报, 2021, 30(11): 108-121.
LIN D D, ZHAO G Q, JU Z L, et al. Comprehensive evaluation of drought resistance of 15 oat varieties at the seedling stage[J]. Acta Prataculturae Sinica, 2021, 30(11): 108-121.

[33] 赵洪兵.空间环境诱变小麦叶绿素缺失突变体的研究[D].北京:中国农业科学院,2010.
ZHAO H B. Studies on chlorophyll-deficient wheat mutants induced by spaceflight environment[D]. Beijing: Chinese Academy of Agricultural Sciences, 2010.

[34] SHEKOOFA A, SINCLAIR T R. Aquaporin activity to improve crop drought tolerance[J]. Cells, 2018, 7(9): 123.

[35] DESHMUKH R K, SONAH H, BÉLANGER R R. Plant aquaporins: genome-wide identification, transcriptomics, proteomics, and advanced analytical tools[J]. Frontiers in Plant Science, 2016, 7: 1896.

[36] 曾黎明, 曾坚. 水通道蛋白在植物抗逆中的功能及调控研究进展[J]. 热带农业科学, 2020, 40(7): 59-65.
ZENG L M, ZENG J. Research progress on the function and regulation of aquaporin in plant response to stress[J]. Chinese Journal of Tropical Agriculture, 2020, 40(7): 59-65.