

doi:10.11733/j.issn.1007-0435.2026.04.031

引用格式:禹丽红,余易泽,道吉草,等.生物炭配施有机肥对青贮玉米生长及品质的影响[J].草地学报,2026,34(4):1502—1509

YU Li-hong, YU Yi-ze, DAO Ji-cai, et al. Effects of Biochar Combined with Manure on Growth and Quality of Silage Maize[J]. Acta Agrestia Sinica, 2026, 34(4):1502—1509

生物炭配施有机肥对青贮玉米生长及品质的影响

禹丽红,余易泽,道吉草,龙 思,冉姝琪,李晗玉,许岳飞*

(西北农林科技大学草业与草原学院,陕西 杨凌 712100)

摘要:为探究生物炭和有机肥对青贮玉米(*Zea mays*)生长及营养品质的影响,试验以不施肥(CK)为对照,设置生物炭、有机肥、无机肥单施或配施共8种不同施肥处理,分别测定青贮玉米在不同生育期的农艺性状、产量以及营养品质。研究结果表明:生物炭和有机肥可促进青贮玉米生长并改善其营养品质,且生物炭与有机肥配施比单施效果突出;与不施肥相比(CK),单施生物炭(B)处理使青贮玉米鲜草和干草产量分别提高33.5%和29.7% ($P<0.05$),另外,生物炭配施有机肥(BM)处理的粗脂肪、相对饲喂价值、全钾和锌含量最高,并显著提高植物全磷含量,同时降低中性洗涤纤维20.5% ($P<0.05$);在施用无机肥条件下,与单施无机肥(F)处理相比,生物炭配施有机肥(BMF)处理的鲜草产量、干草产量和养分锌含量均最高,且酸性洗涤纤维显著降低9.6% ($P<0.05$)。综上,生物炭配施有机肥能够显著提升青贮玉米的生产性能,为促进干旱、半干旱地区饲草增产和农田改良提供理论指导。

关键词:生物炭;有机肥;青贮玉米;营养品质;微量元素

中图分类号:S548;S513

文献标识码:A

文章编号:1007-0435(2026)04-1502-08

Effects of Biochar Combined with Manure on Growth and Quality of Silage Maize

YU Li-hong, YU Yi-ze, DAO Ji-cai, LONG Si, RAN Shu-qi, LI Han-yu, XU Yue-fei*

(College of Grassland Agriculture, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi Province 712100, China)

Abstract: To investigate the effects of biochar and manure on the growth and nutritional quality of silage maize (*Zea mays*), the experiment was conducted to determine the agronomic traits of silage maize at different growth stages, yield and nutritional quality by setting up 8 fertilization treatments of single or combined application of biochar, manure and inorganic fertilizer with no fertilization (CK) as the control. The results showed that biochar and manure could promote the growth of silage maize and improved its nutritional quality, and the combined application of biochar and manure was more effective than single application. Compared with no fertilization (CK), single application of biochar (B) increased the fresh and hay forage yield of silage maize by 33.5% and 29.7% ($P<0.05$), respectively. Under the condition of no chemical fertilizer, the content of ether extract, relative feeding value, total potassium and zinc in biochar combined with manure (BM) treatment was the highest, and the total phosphorus content of plants was significantly increased, while the neutral detergent fiber was reduced by 20.5% ($P<0.05$). Under the condition of applying inorganic fertilizer, compared with the treatment of applying inorganic fertilizer (F) alone, the fresh forage yield, hay forage yield and zinc content of biochar combined with manure (BMF) treatment were the highest, and the acid detergent fiber decreased by 9.6% ($P<0.05$). In summary, biochar combined with manure can significantly improve the production performance of silage maize, and provides theoretical guidance for promoting forage yield increase and farmland improvement in arid and semiarid areas.

Key words: Biochar; Manure; Silage maize; Nutritional quality; Trace elements

收稿日期:2025-06-30;修回日期:2025-08-20

基金项目:科技部“十四五”国家重点研发计划子课题(No. 2023YFD1301401-2);陕西省重点研发计划项目(No. 2025NC-YBXM-071)资助

作者简介:禹丽红(2000-),女,回族,宁夏固原人,硕士研究生,主要从事人工草地建植与利用研究,E-mail: 2023051717@nwfau.edu.cn;

*通信作者 Author for correspondence, E-mail: xuyuefei@nwfau.edu.cn

近年来我国居民饮食结构不断改变,饲草生产需求也伴随着养殖业规模的扩大不断增大,同时,畜禽养殖废弃物增多,已经严重危害我国农业生态安全^[1-2]。目前,将养殖产生的粪便处理后回归农田,再把农田里产出的物料加工成饲料用来养殖,这种“种养循环”模式下的饲草种植是将种植业与养殖业紧密结合实现农业资源高效循环和优质饲草稳产增产的重要举措^[3]。

生物炭由植物残渣高温热解产生,因其能改善土壤性能、促进植物生长、减少养分流失、提高水肥利用效率等而受到广泛关注^[4-6]。通过将生物炭与养殖业畜禽粪便加工的有机肥配施,可实现废弃物资源化循环利用,有效减少畜禽粪便排放、提高植物残体利用率,降低环境污染风险,同时可提升农田土壤有机质含量^[7-10]。目前,生物炭和有机肥在土壤改良和作物生产上已经得到广泛应用^[11]。研究表明,生物炭单施可显著改善小麦(*Triticum aestivum*)田土壤养分状况^[12],提高土壤养分有效性。在作物生产方面,有机肥施用效果则因来源不同存在显著差异,如鸡粪有机肥能显著提高青贮玉米(*Zea mays*)粗蛋白和中性洗涤纤维含量,但猪粪或牛粪有机肥对常规营养含量和发酵品质的改善作用有限^[13]。此外,研究发现生物炭与有机、无机肥配施可协同促进油菜(*Brassica napus*)养分吸收^[9]和小麦增产^[14],进一步证实了生物炭与肥料配施的协同效应。值得注意的是,前期关于生物炭和有机肥的研究主要集中在土壤养分提升和作物增产等方面^[15]。对于干旱、半干旱地区,土壤水分和养分限制问题突出,生物炭因其持水保肥特性可能和有机肥的养分缓释效应形成协同增效。然而,目前关于生物炭与有机肥配施对干旱、半干旱地区饲草营养品质影响的研究仍非常有限。

青贮玉米淀粉含量高、纤维品质好、消化率高,现已成为畜牧业发展不可或缺的饲草^[16]。本研究以青贮玉米品种‘豫青贮23’为研究对象,在施不施无机肥两种肥力条件下对比生物炭和有机肥单施和配施对陕西省关中平原西部青贮玉米生长、营养品质和养分品质等的影响,研究结果为干旱、半干旱地区开展种养循环模式下的饲草栽培模式与技术研究提供理论指导和技术支撑。

1 材料与方法

1.1 试验区概况

本研究田间试验位于陕西省杨凌农业高新技术产业示范区西北农林科技大学农作一站基地

(108°5′34″ E, 34°8′17″ N)。该地区属于干旱、半干旱地区,海拔520 m,属暖温带半湿润偏旱型气候,年均气温13℃,年均降水635 mm,且主要集中在7—9月。0~20 cm耕层土壤有机质含量20.40 g·kg⁻¹,全氮1.40 g·kg⁻¹,全磷0.65 g·kg⁻¹,全钾20.79 g·kg⁻¹,有效磷4.09 mg·kg⁻¹,速效钾169.50 mg·kg⁻¹,铵态氮1.07 mg·kg⁻¹,硝态氮44.62 mg·kg⁻¹,pH值7.50。2024年青贮玉米生育期内日降水量和气温(<https://rp5.ru/>)如图1所示。

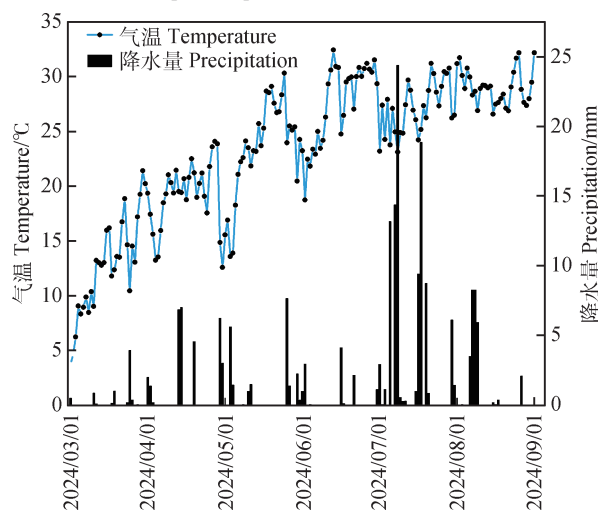


图1 青贮玉米生育期内日降水量和气温

Fig. 1 Daily precipitation and temperature during the growth period of silage maize

1.2 试验设计与材料

本试验供试品种为青贮玉米‘豫青贮23’,购于百绿(天津)国际草业有限公司。供试无机肥购于当地市场,分别为尿素(N 46%)、磷酸二铵(N 18%, P₂O₅ 46%)、硫酸钾(K₂O 52%);有机肥(发酵羊粪有机颗粒肥料,有机质含量30.50%,N含量4.52%,P₂O₅含量3.06%,K₂O含量2.10%)购于高教研(北京)科技有限公司;生物炭购于河南立泽环保科技有限公司。

本试验以不施肥(CK)为对照,设置8种不同施肥处理(各施肥处理及详细养分含量见表1),每个处理4次重复,共计32个小区。小区面积4 m² (2 m×2 m)。无机肥用量为尿素300 kg·hm⁻²、磷酸二铵180 kg·hm⁻²、硫酸钾120 kg·hm⁻²,有机肥用量3.8 t·hm⁻²,生物炭用量20 t·hm⁻²^[12]。其中,有机肥和生物炭在播种前一周均匀翻耕至0~20 cm土层,无机肥则在播种当天犁沟条施,施肥深度10 cm。青贮玉米种植方式为条播,株距25 cm、行距50 cm、播种深度3~5 cm。田间管理为当地常规管理模式。青贮玉米播种时间为2024年4月上旬,收获时间为7月下旬。

表 1 试验处理
Table 1 Test treatment

处理 Treatment	无机肥 Inorganic fertilizer/(kg·hm ⁻²)			有机肥 Manure/(kg·hm ⁻²)			生物炭 Biochar/ (t·hm ⁻²)
	N	P ₂ O ₅	K ₂ O	N	P ₂ O ₅	K ₂ O	
不施肥(CK) No fertilizer	0	0	0	0	0	0	0
生物炭(B) Biochar	0	0	0	0	0	0	20
有机肥(M) Manure	0	0	0	170	115	78	0
生物炭+有机肥(BM) Biochar+Manure	0	0	0	170	115	78	20
无机肥(F) Inorganic fertilizer	170	90	60	0	0	0	0
生物炭+无机肥(BF) Biochar+Inorganic fertilizer	170	90	60	0	0	0	20
有机肥+无机肥(MF) Manure+Inorganic fertilizer	170	90	60	170	115	78	0
生物炭+有机肥+无机肥(BMF) Biochar+Manure+Inorganic fertilizer	170	90	60	170	115	78	20

1.3 测定指标与方法

农艺性状测定:分别在拔节期(5月9日)、大喇叭口期(6月5日)、乳熟末期(7月25日)随机选取长势均一的青贮玉米植株,测定其株高(cm)、叶片数(个)、叶长(cm)、叶宽(cm),同时,使用便携式叶绿素仪测定叶片 SPAD 值(SPAD-502);乳熟末期每个小区刈割测定鲜重,计算产量。

营养品质测定^[17-18]:用 H₂SO₄-H₂O₂ 消煮后,靛酚蓝比色法测定植物全氮;钼锑抗比色法测定全磷;火焰光度计法测定全钾;HNO₃-HClO₄ 消煮后,用原子吸收分光光度计法测定钙、镁、铜、锌、铁含量;用连续流动分析仪(AA3, SEAL, 德国)测定植物全氮,用样品中的氮含量乘以系数 6.25 得到粗蛋白含量;粗脂肪含量参照 GB/T6433-2006 方法,采用脂肪测定仪(SOX606, 山东济南)测定(石油醚沸程 30~60℃,抽提温度 80℃,抽提时间 2 h,淋洗时间 20 min,预干燥时间 20 min,冷却时间 10 min);马弗炉(SX-4-10, 上海)直接灰化法测定粗灰分;酸性洗涤纤维和中性洗涤纤维采用酸性洗涤剂和中性洗涤剂法测定,相对饲喂价值(Relative feeding value, RFV)根据下列公式进行计算^[19]:

$$RFV = (88.9 - 0.779 \times ADF\%) \times \frac{120/NDF\%}{1.29}。$$

1.4 数据处理与分析

用 Microsoft Excel 2021 进行原始数据整理;IBM SPSS Statistics 26 软件对数据正态性和方差齐性进行检验,数据正态性通过 Shapiro-Wilk 检验评估,方差齐性通过 Levene 检验评估。未满足正态性或方差齐性则采取对数转换或校正检验等方法校正;数据使用单因素方差分析(One-way ANOVA),并使用 Duncan's 法进行多重比较($P <$

0.05)。使用软件 Origin 2017 绘图,图表中结果以平均值±标准误表示。

2 结果与分析

2.1 生物炭配施有机肥对青贮玉米农艺性状的影响

生育期内青贮玉米生长情况如下(表 2)所示。施用生物炭和有机肥后的各处理(B, M, BM, BF, MF, BMF)均显著提高了拔节期青贮玉米株高、叶片数、叶长和叶宽($P < 0.05$),与 CK 相比,B, M, BM 叶片数分别提升 3.3%, 10.0% 和 11.3%,无机肥条件下,与 F 相比,BF, MF, BMF 株高分别提升 7.0%, 5.5% 和 21.6%,生物炭与有机肥配施 BMF 处理比 BF 和 MF 处理对株高的提升更为明显。施用生物炭和有机肥除对大喇叭口期叶片数和叶长影响无显著差异外,对株高、叶宽和叶片 SPAD 值的提升均有显著作用($P < 0.05$);其中,与 CK 相比,B, M, BM 处理株高分别提升 16.6%, 12.2% 和 24.1% ($P < 0.05$),无机肥条件下,与 F 相比,BF, MF, BMF 株高分别提升 12.3%, 6.3% 和 12.2% ($P < 0.05$);与 CK 相比,B 处理叶宽最大,生物炭与有机肥配施处理 BM 次之,与 F 相比,BMF 处理叶宽最大,比 F 处理显著高出 8.4% ($P < 0.05$),两种肥力条件下,大喇叭口期生物炭与有机肥配施(BM, BMF)对株高和叶宽的促进作用比单施生物炭或单施有机肥更明显。生物炭和有机肥配施在乳熟末期对叶绿素 SPAD 值的提高比前两个时期更有效,无机肥条件下,与 F 相比,MF 和 BMF 处理叶绿素 SPAD 值分别显著高出 7.2% 和 5.9% ($P < 0.05$)。

施用生物炭和有机肥对青贮玉米产量的影响如图 2 所示。不论是否施用无机肥,各生物炭和有机肥

表 2 不同施肥处理下青贮玉米生长指标变化动态

Table 2 Dynamic changes of growth indexes of silage maize under different fertilization treatments

时期 Time	处理 Treatment	株高 Plant height/cm	叶片数 Number of leaves/个	叶长 Leaf length/cm	叶宽 Leaf width/cm	SPAD
拔节期 Jointing stage	CK	25.07±0.57 ^{bc}	7.50±0.11 ^b	36.07±0.57 ^c	4.40±0.05 ^{cd}	36.43±0.48 ^b
	B	24.62±0.46 ^{bc}	7.75±0.12 ^b	36.22±0.56 ^c	4.96±0.05 ^a	36.19±0.23 ^b
	M	27.45±0.68 ^{ab}	8.25±0.10 ^a	38.88±0.79 ^{bc}	4.43±0.09 ^c	36.29±0.39 ^b
	BM	26.62±0.53 ^b	8.35±0.23 ^a	38.36±0.81 ^{cd}	4.90±0.05 ^a	36.59±0.39 ^b
	F	24.35±0.29 ^c	7.50±0.11 ^b	40.51±0.79 ^b	4.59±0.12 ^{bc}	38.92±0.22 ^a
	BF	26.06±0.63 ^{bc}	8.40±0.18 ^a	36.64±0.67 ^{de}	4.62±0.09 ^{bc}	35.88±0.48 ^b
	MF	25.69±0.60 ^{bc}	8.40±0.17 ^a	37.24±0.67 ^{cde}	4.17±0.11 ^d	35.52±0.41 ^b
	BMF	29.61±0.37 ^a	8.40±0.13 ^a	43.16±0.58 ^a	4.79±0.07 ^{ab}	37.33±0.41 ^b
大喇叭口期 Flare opening	CK	98.10±0.82 ^c	16.30±0.10 ^a	78.76±1.54 ^c	8.39±0.12 ^d	46.41±0.22 ^c
	B	114.40±1.20 ^b	16.85±0.23 ^a	78.93±1.74 ^c	9.16±0.17 ^a	46.94±0.39 ^{abc}
	M	110.05±2.09 ^{bc}	16.70±0.22 ^a	82.11±1.50 ^{abc}	8.83±0.13 ^{abc}	47.46±0.18 ^a
	BM	121.72±1.43 ^a	16.70±0.23 ^a	83.10±1.42 ^{abc}	8.90±0.15 ^{ab}	46.24±0.30 ^c
	F	103.06±2.44 ^c	16.35±0.21 ^a	84.20±1.53 ^{ab}	8.45±0.10 ^{cd}	46.49±0.29 ^{bc}
	BF	115.71±1.62 ^{ab}	16.30±0.23 ^a	79.57±1.53 ^{bc}	8.64±0.13 ^{bcd}	47.31±0.19 ^{ab}
	MF	109.52±1.24 ^{bc}	16.45±0.18 ^a	82.21±1.32 ^{abc}	8.88±0.11 ^{ab}	46.76±0.30 ^{abc}
	BMF	115.60±1.62 ^{ab}	16.75±0.25 ^a	84.43±1.33 ^a	9.16±0.13 ^a	46.63±0.21 ^{bc}
乳熟末期 Late milk stage	CK	249.76±3.51 ^{abc}	18.25±0.16 ^{abc}	89.05±1.06 ^{ab}	9.54±0.03 ^b	50.53±0.26 ^{ab}
	B	254.30±4.24 ^{ab}	18.65±0.11 ^a	92.91±1.07 ^a	10.10±0.11 ^a	49.27±0.55 ^b
	M	245.38±3.58 ^{abc}	18.45±0.15 ^{ab}	89.08±1.18 ^{ab}	9.76±0.16 ^{ab}	51.17±0.46 ^{ab}
	BM	256.52±3.97 ^a	18.50±0.15 ^{ab}	92.34±1.06 ^a	9.59±0.13 ^b	47.75±0.51 ^b
	F	244.42±3.19 ^{bc}	18.15±0.18 ^{bc}	86.03±1.16 ^b	8.99±0.16 ^c	47.98±0.27 ^b
	BF	241.55±3.04 ^c	18.50±0.15 ^{ab}	92.13±0.45 ^a	9.83±0.13 ^{ab}	49.13±0.36 ^b
	MF	248.02±3.78 ^{ab}	18.45±0.17 ^{ab}	89.10±0.83 ^{ab}	9.43±0.12 ^b	51.45±0.32 ^a
	BMF	246.62±3.60 ^{ab}	17.85±0.08 ^c	87.74±0.85 ^b	9.42±0.17 ^b	50.81±0.54 ^{ab}

注:不同小写字母表示不同处理间差异显著($P<0.05$),下同
Note: Different lowercase letters indicate significant differences between different treatments ($P<0.05$), the same as below

添加处理对鲜草产量、干草产量均有提升;其中,在不施无机肥时,生物炭(B)处理比有机肥(M)处理对产量的提升更显著($P<0.05$),与CK相比,B和M处理鲜草产量分别提升33.5%和23.1%,干草产量分别提升29.7%和29.0%,BM处理次之;施用无机肥后,与F相比,生物炭与有机肥及二者配施(BF, MF, BMF)都分别提升鲜草产量19.8%,14.7%和33.0%,干草产量提升43.4%,17.0%和

51.7%($P<0.05$),在施或不施无机肥两种条件下,生物炭与有机肥配施对产量提升效果均最佳,此外,施用无机肥后,与BM处理相比,BMF处理鲜、干草产量分别提升16.1%和26.1%。由此可见,不论是否施用无机肥,生物炭与有机肥配施对生育期内关键生长指标有显著提升,并且,生物炭单施及其与有机肥配施都能明显提高青贮玉米乳熟末期的产量。

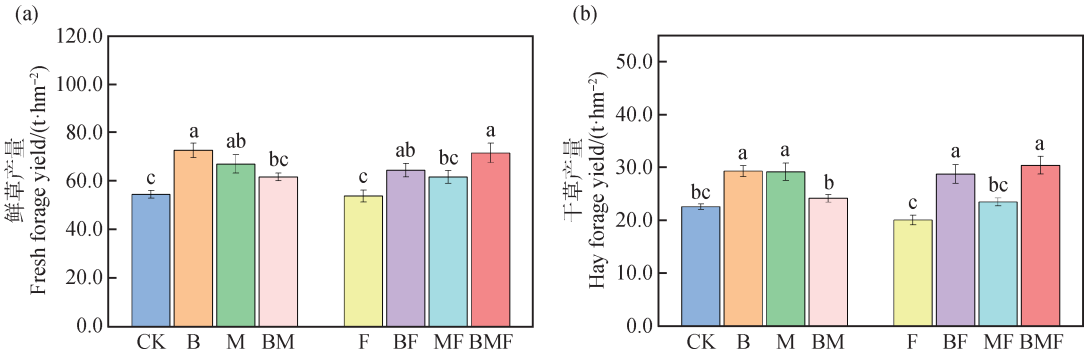


图 2 不同施肥处理下青贮玉米在乳熟末期的产量

Fig. 2 Yield of silage maize at late milk stage under different fertilization treatments

注:不同施肥处理下青贮玉米在乳熟末期的鲜草产量(a)和干草产量(b)
Note: Fresh forage yield (a) and hay forage yield (b) of silage maize at late milk stage under different fertilization treatments

2.2 生物炭配施有机肥对青贮玉米品质的影响

生物炭和有机肥在施无机肥与不施无机肥条件下都显著提高青贮玉米饲用品质($P<0.05$) (图3)。相比B,M,BM处理,施用无机肥后对应的BF,MF,BMF处理的粗蛋白分别提高11.4%,0.7%和0.6%,粗灰分和酸性洗涤纤维分别降低2.8%,6.7%,5.9%和3.0%,1.7%,10.9%;与CK相比,B,M和BM处理粗脂肪含量分别显著提升160.7%,103.6%和214.3% ($P<0.05$),相对饲喂价值显著提升20.9%,12.7%和25.9% ($P<0.05$),中性洗涤纤维分别显著降低14.7%,7.7%

和20.5%,其中,生物炭与有机肥配施(BM)比单施生物炭或有机肥更能显著提高粗脂肪含量和相对饲喂价值,显著降低中性洗涤纤维含量;施无机肥条件下,生物炭和有机肥及其配施对粗蛋白、粗脂肪和相对饲喂价值的提高和降低中、酸性洗涤纤维等也有显著作用,与F相比,BF,MF,BMF处理粗脂肪分别提升48.0%,57.7%和37.4% ($P<0.05$)。可见,添加生物炭和有机肥在提高青贮玉米饲用品质方面表现出显著优势,特别是生物炭与有机肥配施(BM,BMF)在提高粗脂肪含量和降低纤维组分方面效果突出。

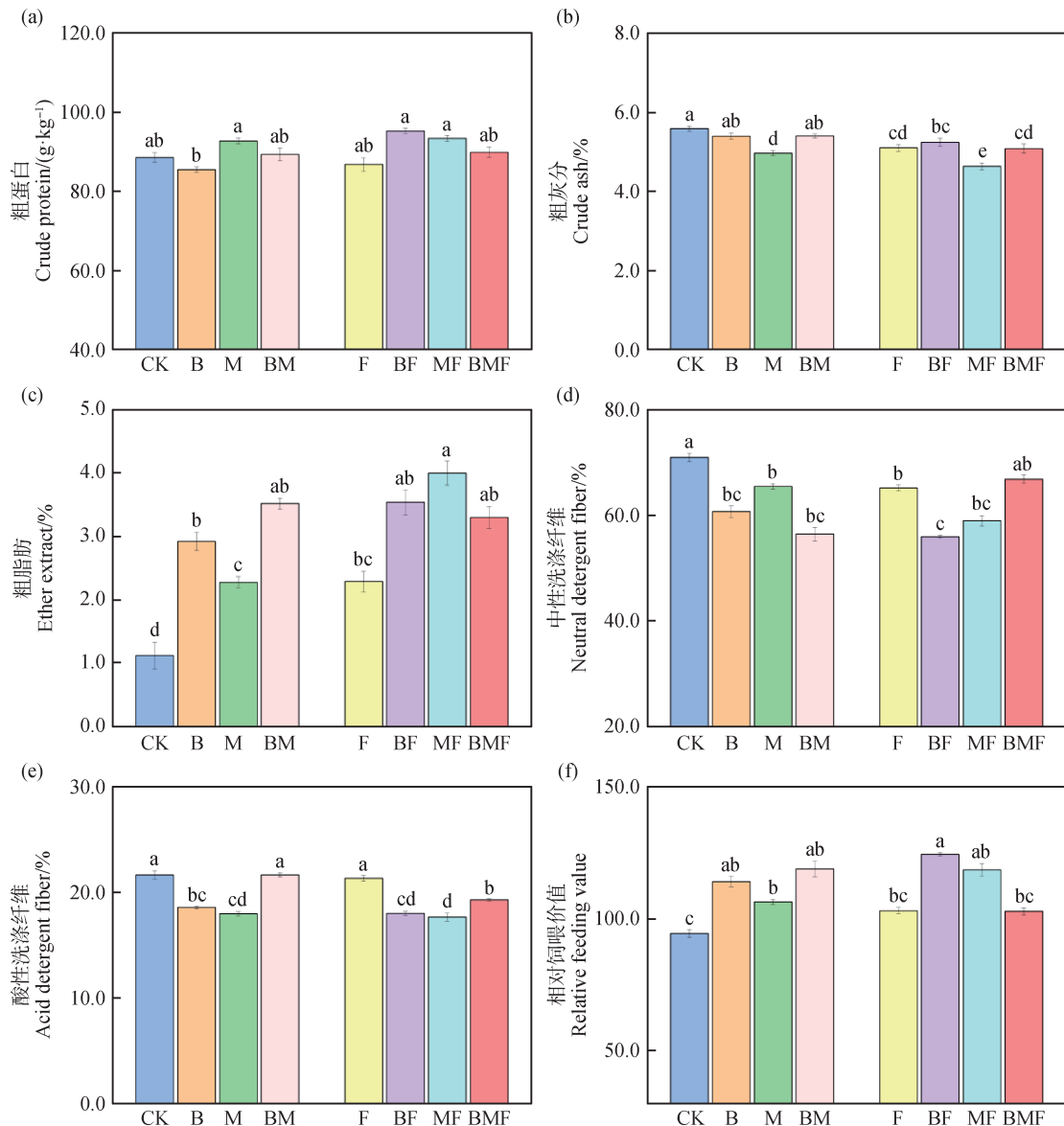


图3 不同施肥处理下青贮玉米营养品质含量

Fig. 3 Nutrient quality content of silage maize under different fertilization treatments

注:不同施肥处理下青贮玉米粗蛋白(a)、粗灰分(b)、粗脂肪(c)、中性洗涤纤维(d)、酸性洗涤纤维含量(e)和相对饲喂价值(f)

Note: Crude protein (a), Crude ash (b), Ether extract (c), Neutral detergent fiber (d), Acid detergent fiber (e) and Relative feeding value (f) of silage maize under different fertilization treatments

2.3 生物炭配施有机肥对青贮玉米植株营养元素含量的影响

如表3所示,添加生物炭和有机肥(B,M,BM,BF,MF,BMF)有利于改善青贮玉米养分含量,特别是提高全磷、全钾以及微量养分锌等的含量;与B,M,BM相比,施用无机肥后对应的BF,MF,BMF处理的养分锌含量分别提高了24.1%,4.5%和11.5%;与CK相比,B,M和BM处理全磷含量分别显著提升32.1%,16.1%和31.0% ($P<0.05$),全钾含量分别提升34.5%,3.1%和

34.6%,锌含量分别提升10.0%,3.5%和34.4% ($P<0.05$),其中,生物炭与有机肥配施(BM)处理获得最大的全钾和养分锌含量,分别为 $9.92\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 和 $29.60\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$;在施用无机肥条件下,与F处理相比,BF和BMF处理养分锌含量分别提升7.3%和17.7%,BMF处理获得最大锌含量;无论是否施用无机肥,生物炭与有机肥配施(BM,BMF)对植物全磷、全钾和养分锌的提升作用都更显著。显然,生物炭与有机肥配施在植物磷、钾和微量元素积累上表现良好。

表3 不同施肥处理青贮玉米植株养分含量

Table 3 Nutrient content of silage maize plants under different fertilization treatments

处理 Treatment	全氮 Total Nitrogen/ ($\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$)	全磷 Total phosphorus/ ($\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$)	全钾 Total potassium/ ($\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$)	钙 Calcium/ ($\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$)	镁 Magnesium/ ($\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$)	铜 Copper/ ($\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)	锌 Zinc/ ($\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)	铁 Iron/ ($\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)
CK	14.17 ± 0.18^b	1.68 ± 0.06^e	7.37 ± 0.08^d	2.65 ± 0.03^{bc}	2.57 ± 0.10^{abc}	4.58 ± 0.13^a	22.02 ± 0.66^b	130.07 ± 4.64^{abc}
B	13.85 ± 0.25^b	2.22 ± 0.08^{ab}	9.91 ± 0.13^a	2.24 ± 0.09^e	2.37 ± 0.05^{cd}	4.79 ± 0.18^a	24.23 ± 1.69^{ab}	114.96 ± 3.86^d
M	13.60 ± 0.14^b	1.95 ± 0.06^d	7.60 ± 0.04^{cd}	3.14 ± 0.06^a	2.60 ± 0.15^{ab}	4.54 ± 0.11^a	22.9 ± 0.49^b	119.56 ± 3.89^{bcd}
BM	11.43 ± 0.40^d	2.20 ± 0.02^{abc}	9.92 ± 0.21^a	2.59 ± 0.05^{bc}	2.42 ± 0.02^{bc}	4.65 ± 0.09^a	29.60 ± 0.62^a	132.13 ± 6.87^{ab}
F	15.16 ± 0.24^a	2.32 ± 0.03^a	7.86 ± 0.05^c	2.47 ± 0.06^{cd}	2.70 ± 0.05^a	4.54 ± 0.13^a	28.02 ± 0.60^a	117.42 ± 3.63^{cd}
BF	14.21 ± 0.23^b	2.03 ± 0.04^{cd}	9.71 ± 0.25^a	2.30 ± 0.06^{de}	2.06 ± 0.03^e	4.65 ± 0.12^a	30.07 ± 0.81^a	122.37 ± 3.21^{bcd}
MF	13.62 ± 0.33^b	2.11 ± 0.04^{bcd}	6.54 ± 0.06^e	2.68 ± 0.03^b	2.62 ± 0.03^{ab}	4.64 ± 0.13^a	23.81 ± 0.43^b	141.91 ± 5.95^a
BMF	12.36 ± 0.05^c	2.16 ± 0.08^{abc}	8.58 ± 0.17^b	2.19 ± 0.08^e	2.16 ± 0.05^{de}	4.54 ± 0.07^a	32.99 ± 1.02^a	116.12 ± 0.60^{cd}

3 讨论

大量研究表明,生物炭和有机肥的施用能够有效改善土壤养分状况,优化土壤微环境,进而影响作物的生长发育^[11-20]。作物在各生育期的生长状况直接关系到其最终产量的高低^[7],本研究结果显示,与未施用生物炭和有机肥的处理相比,添加生物炭、有机肥尤其是二者配施(BM,BMF)显著提高了青贮玉米各生育期的株高、叶长及叶宽,表明生物炭和有机肥的施用促进了青贮玉米生长,为产量的提高奠定了良好的基础。值得注意的是,生物炭与有机肥配施(BM,BMF)对株高的提升效应尤为显著,特别是在拔节期与大喇叭口期,与单施生物炭和有机肥处理相比,二者配施提升幅度更大,其效应可能源于生物炭和有机肥协同作用。生物炭具有良好的吸附性和缓释性,能稳定土壤养分供应^[4],生物炭通过吸附与缓释延长养分有效期;而有机肥中的易降解有机物(如糖类、氨基酸)可提供速效养分与微生物底物,快速激发微生物活性^[14],二者共同优化了根际微环境,弥补了有机肥前期养分释放缓慢与作物快速需肥之间的矛盾。乳熟末期是籽粒灌浆的关键阶段,维持营养生长的同时需要大量

光合产物向籽粒转移^[21]。SPAD值作为反映叶绿素含量的重要指标,其升高通常意味着更强的光合能力和更大的光合产物积累潜力^[22]。本研究发现,生物炭与有机肥配施对青贮玉米SPAD值的提升在乳熟末期更有效,反映出植株在生长后期仍具备较强的光合活性,进而支撑了籽粒灌浆和干物质的积累。乳熟末期的产量数据发现,BMF处理的鲜草和干草产量较单施无机肥处理(F)显著增加,进一步验证了生物炭与有机肥协同施用的增产效果。

营养品质是评估饲草优劣的关键指标^[23-24]。粗蛋白含量直接决定了饲草的氮素供应能力,粗脂肪具有芳香味,可提供动物所需的热能,对动物的适口性具有一定的影响,纤维组分是植物细胞壁的成分^[24]。粗蛋白、粗脂肪含量越高,纤维含量越低,饲草品质越好^[24],前人研究表明,施用有机肥能显著提高作物粗蛋白含量和相对饲喂价值,显著降低酸性洗涤纤维和中性洗涤纤维的含量^[19,24-25]。本研究结果显示,添加生物炭、有机肥及二者配施能显著提高青贮玉米粗脂肪含量(图3),另外,不论是否施用无机肥,生物炭(B,BF)和有机肥(M,MF)处理均显著降低中、酸性洗涤纤维含量,这可能与肥料养分缓释效应有关^[9-10]。生物炭和有机肥的施

用,有效调控了肥料中养分释放速率^[26],提高了植物对土壤养分的利用率,使植物在每个生育期都能获得稳定的养分供给,提高蛋白和脂肪含量的同时,降低纤维含量。

此外,植物营养元素是植物从土壤或生长介质中吸收的养分元素,是植物生长发育的物质基础,施肥与地上部植物营养元素的积累存在密切联系^[3]。本研究结果显示,添加生物炭和有机肥显著提高了青贮玉米全磷、全钾及微量养分锌的含量。与此结果相似的研究中,Schröder等关于蚯蚓粪和高温堆肥种植生菜的研究发现,有机粪肥处理的生菜地上部磷和钾含量最高^[3],有机肥施用后菜心磷、钾等养分积累量显著提高^[27],但本研究中,由于有机肥和无机肥磷素不等量,并且有机磷释放速度慢,不利于植物磷素吸收^[26],因此,添加无机肥后,有机肥无机肥处理(MF)比单施有机肥处理(M)植物全磷含量高,而生物炭无机肥处理(BF)比单施生物炭处理(B)全磷含量低可能是由于生物炭的吸附作用使得全磷含量降低^[8]。另外,与单施生物炭和有机肥相比,生物炭与有机肥配施(BM,BMF)对养分提升的效果更显著。一方面可能是因为肥料互补效应,生物炭因其发达的孔隙结构可有效吸附养分物质,显著降低养分流失率,但本身养分含量低^[8],而有机肥本身含有很多有机养分,通过矿化作用持续释放养分元素^[14],二者配施后,有机肥中富含的有机养分在生物炭的吸附作用下,其有机分子的释放过程得以延缓^[10],这种互补机制不仅提高了养分利用效率,还实现了肥效的持续稳定释放,所以生物炭和有机肥配施情况下植物养分含量更高;另一方面,由于原料不同,生物炭和有机肥养分含量也有所不同,导致二者施用后对土壤养分的影响差异较大^[15],所以生物炭和有机肥单施及其配施后对植物养分含量的提升效果存在差异。本研究关注了青贮玉米生长和营养品质的改善,关于生物炭和有机肥对土壤微生物或酶活性的影响效果还未知,而这些可能是影响养分吸收的关键机制,未来可重点关注地下土壤养分、土壤磷、钾相关微生物与地上植物生长互作机制。

4 结论

生物炭和有机肥的施用能显著提高青贮玉米在不同生育阶段的株高等农艺性状,并提高产量和

营养品质;在施用和不施用无机肥的条件下,生物炭与有机肥配施(BM,BMF)在促进株高、叶宽、产量及营养品质方面均表现出显著的协同效应。因此,生物炭与有机肥配施可为青贮玉米的高效栽培提供理论依据和参考。

参考文献

- [1] 方维鑫,武慧君,朱慧敏,等. 巢湖流域禽类规模养殖碳氮足迹时空特征研究[J]. 生态与农村环境学报, 2025, 41(4): 473-482
FANG W X, WU H J, ZHU H M, et al. Spatio-temporal characterizations of carbon and nitrogen footprints of poultry scale-breeding in the Chaohu Lake Basin[J]. Journal of Ecology and Rural Environment, 2025, 41(4): 473-482
- [2] AWASTHI S K, KUMAR M, SARSAIYA S, et al. Multi-criteria research lines on livestock manure biorefinery development towards a circular economy: From the perspective of a life cycle assessment and business models strategies [J]. Journal of Cleaner Production, 2022, 341: 130862
- [3] SCHRÖDER C, HÄFNER F, LARSEN O C, et al. Urban organic waste for urban farming: Growing lettuce using vermicompost and thermophilic compost [J]. Agronomy, 2021, 11(6): 1175
- [4] 李明玉,丁梧秀,王新武,等. 施加生物炭对土壤理化性质的影响及其农业应用[J]. 东北农业大学学报, 2024, 55(1): 79-96
LI M Y, DING W X, WANG X W, et al. Influence of applying biochar on soil physicochemical properties and its agricultural applications [J]. Journal of Northeast Agricultural University, 2024, 55(1): 79-96
- [5] 张乾,李金升,赵天赐,等. 生物炭对土壤的影响及在草地生态系统中应用的研究进展[J]. 草地学报, 2019, 27(2): 279-284
ZHANG Q, LI J S, ZHAO T C, et al. Research progress on the effect of biochar on soil and its application in grassland ecosystem [J]. Acta Agrestia Sinica, 2019, 27(2): 279-284
- [6] YAN T T, XUE J H, ZHOU Z D, et al. Biochar-based fertilizer amendments improve the soil microbial community structure in a karst mountainous area [J]. Science of the Total Environment, 2021, 794: 148757
- [7] LIU M, LINNA C, MA S M, et al. Effects of biochar with inorganic and organic fertilizers on agronomic traits and nutrient absorption of soybean and fertility and microbes in purple soil [J]. Frontiers in Plant Science, 2022, 13: 871021
- [8] CHEN L M, LI X Y, PENG Y T, et al. Co-application of biochar and organic fertilizer promotes the yield and quality of red pitaya (*Hylocereus polyrhizus*) by improving soil properties [J]. Chemosphere, 2022, 294: 133619
- [9] LIU M, LINNA C, MA S M, et al. Biochar combined with organic and inorganic fertilizers promoted the rapeseed nutrient

- uptake and improved the purple soil quality [J]. *Frontiers in Nutrition*, 2022, 9: 997151
- [10] NOBILE C, LEBRUN M, VÉDÈRE C, et al. Biochar and compost addition increases soil organic carbon content and substitutes P and K fertilizer in three French cropping systems [J]. *Agronomy for Sustainable Development*, 2022, 42(6): 119
- [11] LI Z M, SHEN J P, WANG F F, et al. Impacts of organic materials amendment on the soil antibiotic resistome in subtropical paddy fields [J]. *Frontiers in Microbiology*, 2023, 13: 1075234
- [12] AZIZ M A, KHAN K S, KHALID R, et al. Integrated application of biochar and chemical fertilizers improves wheat (*Triticum aestivum*) productivity by enhancing soil microbial activities [J]. *Plant and Soil*, 2024, 502(1): 433-448
- [13] 黄荣才. 畜禽粪肥对玉米青贮品质的影响及粪肥源抗生素在青贮饲料中的蓄积与降解规律 [D]. 北京: 中国农业科学院, 2019: 21-25
- HUANG R C. Effect of animal manures on corn silage quality and accumulation and degradation of antibiotics from animal manure in silage [D]. Beijing: Chinese Academy of Agricultural Sciences, 2019: 21-25
- [14] WANG X J, SALE P, FRANKS A, et al. An insight into the effect of organic amendments on the transpiration efficiency of wheat plant in a sodic duplex soil [J]. *Frontiers in Plant Science*, 2021, 12: 722000
- [15] 杨丽, 王劲松, 董二伟, 等. 长期施用秸秆生物炭对土壤养分及作物生长的影响 [J]. *干旱地区农业研究*, 2024, 42(2): 62-70
- YANG L, WANG J S, DONG E W, et al. Effects of long-term application of straw biochar on soil nutrient and crop growth [J]. *Agricultural Research in the Arid Areas*, 2024, 42(2): 62-70
- [16] 刘晓, 王博, 朱晓艳, 等. 21个粮饲兼用型青贮玉米在河南的品种比较试验 [J]. *草业学报*, 2019, 28(8): 49-60
- LIU X, WANG B, ZHU X Y, et al. A comparison of 21 varieties of silage maize in Henan Province [J]. *Acta Prataculturae Sinica*, 2019, 28(8): 49-60
- [17] 鲍士旦. 土壤农化分析 [M]. 3版. 北京: 中国农业出版社, 2000: 245-327
- BAO S D. Soil and agricultural chemistry analysis [M]. 3rd ed. Beijing: China Agriculture Press, 2000: 245-327
- [18] 朱芝宜, 李培根, 陆晓彤, 等. 假单胞菌与褐藻寡糖协同提高梨果实产量及品质 [J]. *植物营养与肥料学报*, 2024, 30(10): 1964-1973
- ZHU Z Y, LI P G, LU X T, et al. Synergistic effects of *Pseudomonas CD1* and brown algal oligosaccharides on pear fruit yield and quality [J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizers*, 2024, 30(10): 1964-1973
- [19] 闫得朋, 巩林, 袁玉莹, 等. 不同时期喷施叶面肥对紫花苜蓿生长和产草量营养品质的影响 [J]. *草地学报*, 2018, 26(5): 1255-1261
- YAN D P, GONG L, YUAN Y Y, et al. Effects of spraying foliar fertilizer on alfalfa growth, grass yield, and nutrient quality at different stages [J]. *Acta Agrestia Sinica*, 2018, 26(5): 1255-1261
- [20] ZHANG P F, YANG F F, ZHANG H, et al. Beneficial effects of biochar-based organic fertilizer on nitrogen assimilation, antioxidant capacities, and photosynthesis of sugar beet (*Beta vulgaris* L.) under saline-alkaline stress [J]. *Agronomy*, 2020, 10(10): 1562
- [21] 张晓娟, 孙权, 陈永伟, 等. 宁夏引黄灌区饲用小黑麦复种青贮玉米高效栽培技术 [J]. *饲料工业*, 2024, 45(6): 125-129
- ZHANG X J, SUN Q, CHEN Y W, et al. High-efficient cultivation techniques of forage triticale multiple cropping silage corn in Ningxia irrigation area [J]. *Feed Industry*, 2024, 45(6): 125-129
- [22] 胡润慧, 汪军成, 司二静, 等. 小麦苗期耐旱耐盐种质筛选及抗旱耐盐综合评价 [J]. *作物学报*, 2025, 51(9): 2371-2386
- HU R H, WANG J C, SI E J, et al. Screening of drought and salt tolerant germplasm during wheat seedling stage and comprehensive evaluation of drought and salt tolerance [J]. *Acta Agonomica Sinica*, 2025, 51(9): 2371-2386
- [23] LIU Q H, ZHOU X B, SUN Z W. Application of silicon fertilizer affects nutritional quality of rice [J]. *Chilean Journal of Agricultural Research*, 2017, 77(2): 163-170
- [24] 蒋阿宁, 管建慧. 不同水平有机肥对黑麦草产量、营养品质及发酵品质的影响 [J]. *饲料研究*, 2024, 47(3): 112-116
- JIANG A N, GUAN J H. Effects of different levels of organic fertilizer on yield, nutritional quality, and fermentation quality of ryegrass [J]. *Feed Research*, 2024, 47(3): 112-116
- [25] 李文, 魏廷虎, 阿保地, 等. 化肥减施配合有机肥对高寒区燕麦营养品质和土壤养分的影响 [J]. *草地学报*, 2021, 29(12): 2878-2886
- LI W, WEI T H, A B D, et al. Effects of reduction of chemical fertilizer and organic manure supplement on oat nutrient quality and soil nutrient in alpine cold region [J]. *Acta Agrestia Sinica*, 2021, 29(12): 2878-2886
- [26] BIEDERMAN L A, PHELPS J, ROSS B J, et al. Biochar and manure alter few aspects of prairie development: A field test [J]. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 2017, 236: 78-87
- [27] 李晓晴, 杨佳雨, 陈少明, 等. 氮肥与生物炭、有机肥配施对菜心生长及养分积累的影响 [J]. *植物营养与肥料学报*, 2024, 30(11): 2150-2160
- LI X Q, YANG J Y, CHEN S M, et al. Effects of nitrogen fertilizer combined with biochar or organic fertilizer on the growth and nutrient accumulation of Chinese flowering cabbage [*Brassica campestris* L. ssp. *chinensis* (L.) var. *utilis* Tsen et Lee] [J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizers*, 2024, 30(11): 2150-2160

(责任编辑 刘婷婷)