

褐藻胶-富里酸改性石膏对玉米根系 形态及植株生长的影响

郭洪云¹, 张珂迪², 邵娜², 闫康², 杨阳³,
赵阳², 蔡荣号², 程备久², 李娜², 马庆²

(1. 安徽农业大学农学院, 安徽 合肥 230036; 2. 安徽农业大学生命科学院作物抗逆育种与减灾国家地方联合工程实验室, 安徽 合肥 230036; 3. 中国科学院合肥物质科学研究院安徽省环境友好高效化肥农药工程实验室, 安徽 合肥 230031)

摘要:为探究褐藻胶-富里酸改性石膏 (AFG) 对玉米 (*Zea mays* L.) 根系形态和植株生长的调控作用, 评估 AFG 在玉米生产上的应用价值, 于 2022 年设置 6 个 AFG 施用量: 0 (T0)、20 (T20)、40 (T40)、60 (T60)、80 (T80)、100 kg · hm⁻² (T100), 分析施用 AFG 对玉米根系形态性状和产量的影响。结果表明: 施用 AFG 处理较不施用处理显著提高了土壤有效硫含量; 施用 AFG 对根系形态性状具有明显调控作用, 与 T0 相比, 根总长度、根表面积、根平均直径、根尖数、根体积和根干质量的提高幅度分别为 7.6%~18.2%、14.0%~31.2%、5.1%~11.0%、11.6%~17.9%、20.9%~45.7% 和 7.8%~18.7%。与其他处理相比, T40 处理的根系形态性状最优, 进一步提高 AFG 施用量则调控效果有降低趋势。施用 AFG 处理的玉米单株籽粒产量较不施用处理增加 2.6%~8.9%, 并以 T40 处理的单株籽粒产量最高。根尖数、根表面积、根系体积、根总长度、根冠比、根干质量和根平均直径与单株籽粒产量呈显著相关, 对单株籽粒产量影响最强的根系性状为根干质量、根冠比、根总长度和根尖数。综上, 在合理施用量下, AFG 可优化玉米根系形态性状, 促进玉米丰产。

关键词: 玉米; 生物刺激素; 增效剂; 硫; 根系生长; 产量

中图分类号: S143.8; S184 **文献标志码:** A

Effects of alginate and fulvic acid modified gypsum on maize root morphological traits and plant growth

GUO Hongyun¹, ZHANG Kedi², SHAO Na², YAN Kang², YANG Yang³,
ZHAO Yang², CAI Ronghao², CHENG Beijiu², LI Na², MA Qing²

(1. College of Agronomy, Anhui Agricultural University, Hefei, Anhui 230036, China; 2. National Engineering Laboratory of Crop Stress Resistance Breeding, School of Life Sciences, Anhui Agricultural University, Hefei, Anhui 230036, China; 3. Engineering Laboratory of Environmentally Friendly and High Performance Fertilizer and Pesticide of Anhui Province, Hefei Institutes of Physical Science, Chinese Academy of Sciences, Hefei, Anhui 230031, China)

Abstract: In order to reveal the effects of alginate and fulvic acid modified gypsum (AFG) on maize (*Zea mays* L.) root morphological traits and plant growth as well as assess the application potential of AFG in maize production, a field experiment was conducted during the maize growing season in 2022. The experiment included six treatments, with AFG application rate as 0 (T0), 20 (T20), 40 (T40), 60 (T60), 80 kg · hm⁻² (T80), and 100 kg · hm⁻² (T100), respectively. The effects of AFG application on maize root morphological traits and yield were analyzed. The results showed that compared with the T0 treatment, AFG application significantly increased soil available sulfur concentration and regulated maize root morphological traits. For example, root total length, root sur-

收稿日期: 2022-11-22

修回日期: 2023-02-18

基金项目: 安徽省高等学校自然科学研究项目 (KJ2021A0170); 安徽农业大学引进和稳定人才科研资助项目 (rc422004); 安徽农业大学自然科学基金项目 (2020zd03); 国家重点研发计划项目 (2017YFD0301302)

作者简介: 郭洪云 (1998-), 女, 山东潍坊人, 硕士研究生, 研究方向为作物根系生长调控。E-mail: guohongyun_apply@163.com

通信作者: 李娜 (1988-), 女, 山东菏泽人, 讲师, 主要从事作物抗逆营养调控研究。E-mail: linazhaoworld@163.com

马庆 (1977-), 男, 安徽宿州人, 教授, 主要从事作物抗逆育种与栽培研究。E-mail: qingma_ahau@163.com

face area, root average diameter, number of root tips, root volume, and root dry weight were 7.6% ~ 18.2%, 14.0% ~ 31.2%, 5.1% ~ 11.0%, 11.6% ~ 17.9%, 20.9% ~ 45.7% and 7.8% ~ 18.7% greater in the AFG-applied treatments than in the T0 treatment. Among the five AFG-applied treatments, the best root morphological traits were observed in the T40 treatment while further increase of AFG application rate tended to reduce the regulation effects. Grain yield was 2.6% ~ 8.9% greater in the AFG-applied treatments than in the T0 treatment, with the greatest grain yield observed in the T40 treatment. Grain yield was significantly correlated with number of root tips, root surface area, root volume, root total length, root-shoot ratio, root dry weight, and root average diameter. Root dry weight, root-shoot ratio, root total length, and number of root tips were the top four root traits that greatly affect grain yield. Overall, under reasonable application rates, AFG improved maize root morphological traits and enhance maize productivity.

Keywords: corn; biostimulant; synergist; sulfur; root growth; yield

玉米产量与农田水肥供应条件紧密相关^[1],为满足玉米生长的水分和养分需求,其根系形态特征需适应土壤水肥分布规律^[2]。阶段性干旱及高温是我国不少产区玉米产量提高的限制因素^[3]。通过技术措施改善玉米根系形态性状,优化根系对深层土壤水肥的利用,是增强玉米抗旱及抗高温胁迫能力的重要途径^[4-5]。改善玉米根系形态性状的关键在于构建符合根系生长需求的土壤环境。我国很多产区的土壤条件不利于玉米根系生长发育,如土壤养分不平衡,玉米生长所需的某些重要营养元素不足^[5-6];或是土壤缺乏高生物活性有机物,难以刺激根系生长^[4,7]。因此,针对玉米根系生长限制因素采取相应措施,才能有效优化根系生长条件,促进根系形态建成。

硫是谷胱甘肽的关键组成元素,对植物抗坏血酸-谷胱甘肽循环淬灭途径的进行具有重要影响,有助于消除干旱、高温等胁迫诱发的活性氧积累问题^[8-9]。然而,目前很多玉米产区的土壤硫含量偏低(丰缺临界值 $22 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$),且生产上偏施氮磷钾、忽视硫肥投入的问题突出,导致玉米硫营养不足的情况多有发生^[10-11]。此外,常规速溶性硫肥在施用后易淋溶损失,致其肥效降低。与之相比,石膏等微溶性硫肥具有淋溶少、肥效持续时间长等优势,但是其有效硫成分释放依赖于土壤湿度,如果土壤含水量偏低,易导致硫释放不足,无法充分发挥其肥力优势^[12-13]。富里酸是一类分子量较小的腐植酸类物质,在生产上可用作植物生长调节剂,刺激根系的生长^[7,14],但由于其水溶性较好,施入土壤后易脱离根际范围,削弱对根系的调控作用^[7,14-15]。褐藻胶是从藻类植物中提取的高分子化合物^[16]。Ni等^[17]研究表明,褐藻胶易形成水凝胶结构,可实现蓄水保墒、水肥互促。罗晓峰等^[18]研究表明,褐藻胶的化学结构与植物激素相似,具有

调节植物生长的作用。

前人关于硫肥、富里酸和褐藻胶对作物影响的研究主要集中于其单一促生效应,而三者配施对玉米生长发育综合影响的研究较少。团队前期制备出一种褐藻胶-富里酸改性石膏增效剂,利用褐藻胶的凝胶缓释与保水效应改善富里酸和硫素有效性^[19-20],但其田间应用效果尚不清楚。因此,本研究通过大田试验分析褐藻胶-富里酸改性石膏对玉米根系形态性状和植株生长的调控作用,解析决定玉米产量的关键根系形态性状,为玉米根系生长调控及增效剂的研发提供理论基础。

1 材料与方法

1.1 试验地点与材料

试验于2022年6月3日~9月21日在安徽省合肥市大杨镇农业生态园($117^{\circ}12'20''\text{E}$, $31^{\circ}55'58''\text{N}$)开展。该地区属亚热带季风气候区,2022年玉米季的日平均气温 27.78°C ,生长期总降雨量 236.4 mm ,平均日照时数 13.4 h 。试验区土壤类型为人为堆积土,质地为粉质壤土,耕层土壤基本性质如下:有机碳 $11.3 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$,矿质氮 $13.9 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,有效硫 $9.9 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ (属缺硫土壤^[11]),pH值6.8,容重 $1.36 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$ 。

供试玉米品种为‘安农591’(*Zea mays* L. ‘An-nong 591’),由安徽丰大种业股份有限公司提供。供试尿素(46.4% N)由中盐安徽红四方肥业股份有限公司提供,重过磷酸钙(44% P_2O_5)和氯化钾(60% K_2O)由云南云天化股份有限公司提供,富里酸由新疆黑色生态科技股份有限公司提供,褐藻胶和石膏由上海阿拉丁生化科技股份有限公司提供。试验所用褐藻胶-富里酸改性石膏(AFG)的基本成分(按质量)为:褐藻胶15%、富里酸12%、石膏73%,混合物pH值9.2。

1.2 试验设计

试验设置6个AFG施用量处理,即0(T0)、20

(T20)、40(T40)、60(T60)、80(T80)、100 kg · hm⁻² (T100),采取随机区组设计,小区面积为 34.5 m²,重复 3 次。各处理的氮(N)、磷(P₂O₅)、钾(K₂O)施用量保持一致,分别为 200、90、90 kg · hm⁻²。所有肥料及 AFG 混匀后,做基肥施入种植行间的施肥沟内(深度约 15 cm),后期不再追肥。玉米采用常规平作方式种植,播种行距 60 cm,株距 28 cm,于 2022 年 6 月 3 日播种,9 月 21 日收获。按照本地栽培习惯开展田间管理,各处理保持一致。

1.3 样品采集与测定方法

在施肥后的第 7 d,采集耕层(0~20 cm)土壤样品,利用硫酸钡比浊法测定土壤有效硫含量^[21]。在吐丝期和成熟期,各处理分别随机采集长势均匀的植株 6 株,以根茎连接处为圆心,采集半径 30 cm、深度 40 cm 的土柱,将土壤浸泡冲洗,获得洗净的根系。对吐丝期根系样品,利用 WinRHIZO 根系分析系统测定根总长度、根表面积、根平均直径、根尖数、根系体积等参数^[22],然后采用恒温烘干法测定根干质量^[23],计算比根长、根比表面积、根组织质量密度等参数^[24];对成熟期植株样品,按不同器官分别烘干称重,计算各器官干物质质量及根冠比等参数^[25]。成熟期测定的籽粒平均干物质量即为单株籽粒产量,全株干物质质量即为单株生物量。

1.4 数据分析

采用 SAS 9.2 的 Proc ANOVA 过程对试验数据进行方差分析和 Tukey 多重比较,采用 Origin 2022 进行相关分析、线性回归和偏最小二乘(PLS)分析。

2 结果与分析

2.1 褐藻胶-富里酸改性石膏对土壤有效硫的影响

与 T0 相比,施用褐藻胶-富里酸改性石膏 (AFG)可显著提高土壤有效硫含量(图 1)。随着 AFG 施用量的增加,各处理土壤有效硫含量分别比 T0 提高 36.6%、118.5%、128.9%、135.2%和 140.0%(*P*<0.05)。当 AFG 施用量提高到 40 kg · hm⁻²时,进一步提高其施用量,土壤有效硫含量的增高趋势

放缓;T100 处理的土壤有效硫含量比 T60 和 T80 处理分别提高 4.8%和 2.0%,3 个处理之间差异不显著(*P*>0.05)。

2.2 褐藻胶-富里酸改性石膏对玉米根系形态的影响

与 T0 相比,施用 AFG 对玉米根系形态产生明显调控作用,根系生长更发达(图 2)。量化分析结果表明(表 1),随着 AFG 用量的增加,根总长度、根表面积、根平均直径、根尖数、根体积和根干质量均呈先提高后降低的趋势。与 T0 相比,施用 AFG 处理的根总长度、根表面积、根平均直径、根尖数、根体积和根干质量分别提高 7.6%~18.2%、14.0%~31.2%、5.1%~11.0%、11.6%~17.9%、20.9%~45.7%和 7.8%~18.7%;T20 处理的比根长提高 1.3%,其他施用 AFG 处理的比根长降低 0.3%~5.8%,处理之间差异不显著(*P*>0.05);T20 和 T40 处理的根比表面积分别提高 8.3%和 10.5%(*P*<0.05),其他施用 AFG 处理之间差异不显著(*P*>0.05);施用 AFG 处理的根组织质量密度降低 5.3%~18.4%。所有 AFG 处理中,T40 处理的根总长度、根表面积、根平均直径、根尖数、根体积和根干质量最大。

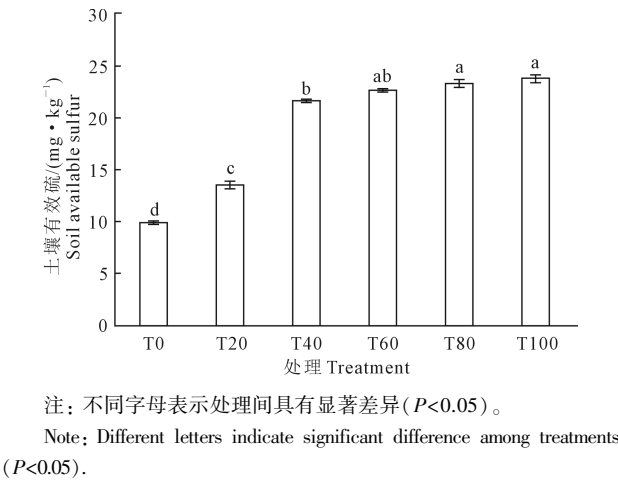


图 1 施肥第 7 天不同褐藻胶-富里酸改性石膏处理的土壤有效硫含量
Fig.1 Soil available sulfur concentration in different alginate and fulvic acid modified gypsum (AFG) treatments at the 7th day after application

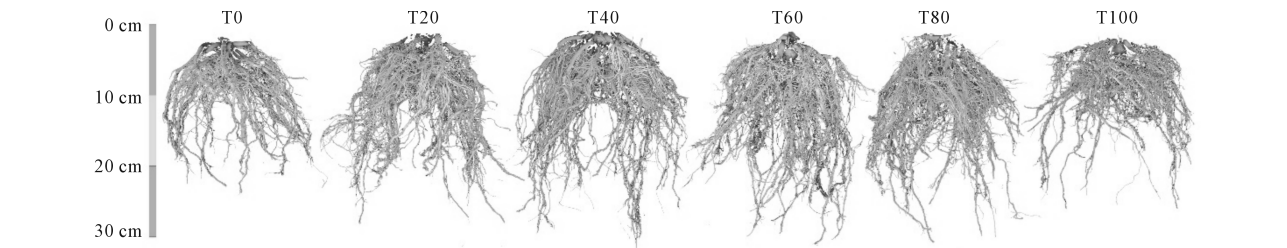


图 2 不同褐藻胶-富里酸改性石膏处理的吐丝期玉米根系形态

Fig.2 Maize roots in different alginate and fulvic acid modified gypsum (AFG) treatments at silking stage

2.3 褐藻胶-富里酸改性石膏对玉米生长量及根冠比的影响

如表 2 所示,施用 AFG 处理玉米植株根、茎鞘、叶、地上部干质量、单株籽粒产量和单株生物量均高于不施 AFG 处理,且随 AFG 施用量的增加呈先提高后降低的趋势。与 T0 相比,施用 AFG 处理的根、茎鞘、叶、雄穗、地上部干质量、单株籽粒产量和单株生物量分别提高 0.6%~4.8%、8.4%~21.4%、3.3%~14.7%、8.8%~15.7%、2.6%~8.9%、1.7%~8.8%和 1.6%~8.6%,穗轴干质量和根冠比分别降低 3.9%~30.3%和 1.0%~5.5%。其中,T40 处理单株籽粒产量和单株生物量均高于其他处理;T40、T60 和 T80 处理的单株籽粒产量较 T0 显著提高 7.2%~

8.9% ($P<0.05$),单株生物量较 T0 显著提高 7.9%~8.6% ($P<0.05$)。

2.4 玉米根系形态与植株生长量的关系

相关分析表明(图 3),单株籽粒产量与根总长度、根表面积、根平均直径、根尖数、根系体积、根干质量呈显著正相关,与根冠比呈显著负相关($P<0.05$);单株生物量与根总长度、根表面积、根平均直径、根尖数、根系体积、根干质量呈显著正相关,与根组织质量密度和根冠比呈显著负相关($P<0.05$)。线性回归分析表明(图 4),单株籽粒产量随根总长度、根表面积、根平均直径、根尖数、根系体积、根干质量的提高而增加,随根冠比的下降而提高。如:根总长度每提高 100 cm,单株籽粒产量提高 5.66 g。

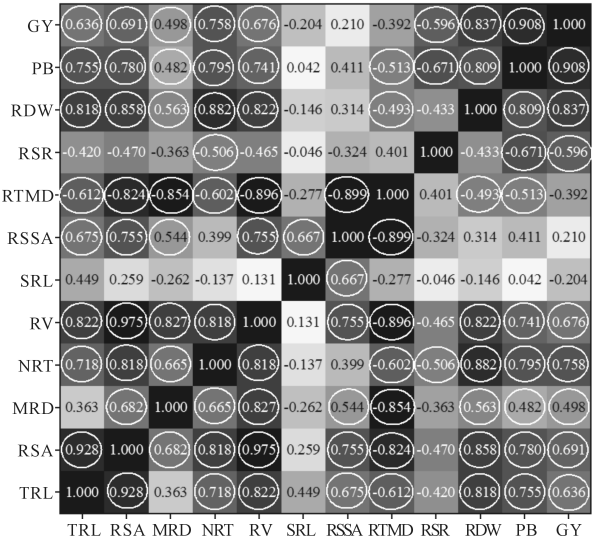
表 1 褐藻胶-富里酸改性石膏对吐丝期玉米根系形态参数的影响

Table 1 Effects of alginate and fulvic acid modified gypsum on maize root morphological traits at silking stage					
处理 Treatment	根总长度/cm Total root length	根表面积/cm ² Root surface area	根平均直径/mm Mean root diameter	根尖数 Number of root tips	根体积/cm ³ Root volume
T0	947.4±42.8b	753.4±20.8c	2.534±0.046c	619.7±9.9b	47.71±0.48c
T20	1032.9±61.0ab	879.7±40.4b	2.714±0.058ab	699.8±2.2a	59.66±2.41b
T40	1119.4±57.2a	988.4±45.3a	2.813±0.026a	730.6±15.4a	69.50±2.90a
T60	1041.0±48.6ab	883.1±27.7b	2.704±0.074ab	720.6±15.6a	59.68±2.16b
T80	1079.3±60.6ab	901.5±34.5ab	2.662±0.064bc	717.0±21.4a	59.97±1.77b
T100	1019.0±64.6ab	859.2±45.8b	2.687±0.028ab	691.8±20.2a	57.69±2.50b
处理 Treatment	根干质量/g Root dry weight	比根长/(cm·g ⁻¹) Specific root length	根比表面积/(cm ² ·g ⁻¹) Root specific surface area	根组织质量密度/(g·cm ⁻³) Root tissue mass density	
T0	15.29±0.31c	61.9±1.6a	49.3±0.5c	0.320±0.003a	
T20	16.48±0.18b	62.7±3.3a	53.4±2.0ab	0.277±0.008cd	
T40	18.15±0.33a	61.7±2.4a	54.5±2.0a	0.261±0.009d	
T60	17.72±0.54a	58.7±1.2a	49.8±1.3bc	0.297±0.015abc	
T80	17.72±0.59a	60.9±1.5a	50.9±0.4abc	0.295±0.008bc	
T100	17.47±0.47ab	58.3±2.2a	49.2±1.3c	0.303±0.005ab	

注:同列带不同字母的平均值之间具有显著差异($P<0.05$)。下同。
Note: In the same column, means with different letters are significantly different ($P<0.05$). The same below.

表 2 褐藻胶-富里酸改性石膏对成熟期玉米单株各器官干物质质量和根冠比的影响

Table 2 Effects of alginate and fulvic acid modified gypsum on maize dry weight and root-shoot ratio at maturity					
处理 Treatment	根/(g·plant ⁻¹) Root	茎鞘/(g·plant ⁻¹) Stem-sheath	叶/(g·plant ⁻¹) Leaf	雄穗/(g·plant ⁻¹) Tassel	单株籽粒产量/(g·plant ⁻¹) Grain yield
T0	17.83±0.60a	88.41±2.23c	36.25±0.11d	2.61±0.09b	162.55±2.94b
T20	17.94±0.04a	95.87±2.97b	39.11±0.74bc	3.02±0.09a	166.81±1.67ab
T40	18.66±0.20a	107.37±3.90a	41.58±0.46a	2.84±0.08a	177.07±3.29a
T60	18.68±0.18a	100.38±1.24b	41.47±0.34a	2.96±0.08a	177.02±3.64a
T80	18.21±0.66a	98.57±0.35b	40.65±0.90ab	2.89±0.09a	174.21±6.51a
T100	17.96±0.25a	95.84±2.55b	37.44±0.87cd	2.85±0.07a	169.96±3.75ab
处理 Treatment	穗轴/(g·plant ⁻¹) Cob	苞叶/(g·plant ⁻¹) Bract	地上部/(g·plant ⁻¹) Shoot	单株生物量/(g·plant ⁻¹) Plant biomass	根冠比 Root-shoot ratio
T0	28.80±0.81a	21.72±0.96bc	340.35±3.73b	358.18±3.14b	0.0524±0.0023a
T20	24.02±0.66b	22.31±0.32b	351.13±4.59b	369.07±4.61b	0.0511±0.0006a
T40	23.04±0.30b	18.49±0.33d	370.39±1.44a	389.05±1.64a	0.0504±0.0003a
T60	24.01±0.67b	22.24±0.96b	368.07±4.44a	386.74±4.53a	0.0507±0.0006a
T80	27.67±1.06a	24.19±0.81a	368.18±8.88a	386.40±9.50a	0.0495±0.0007a
T100	20.08±0.28c	19.93±0.17cd	346.10±6.72b	364.06±6.68b	0.0519±0.0014a



注: GY、PB、RDW、RSR、RTMD、RSSA、SRL、RV、NRT、MRD、RSA、TRL 分别为单株籽粒产量、单株生物量、根干质量、根冠比、根组织质量密度、根比表面积、比根长、根体积、根尖数、根平均直径、根表面积、根总长度;图中数值为 Pearson 相关系数,圆形标记表示相关关系达到统计学显著水平 ($P<0.05$)。

Note: GY, PB, RDW, RSR, RTMD, RSSA, SRL, RV, NRT, MRD, RSA and TRL represents grain yield, plant biomass, root dry weight, root-shoot ratio, root tissue mass density, root specific surface area, specific root length, root volume, number of root tips, mean root diameter, root surface area, and total root length, respectively. The values represent the Pearson correlation coefficients. The values marked with circles indicate significant correlations ($P<0.05$).

图 3 玉米根系形态与植株生长量的相关关系
Fig.3 Correlations between root morphological traits and maize growth parameters

为进一步研究不同根系形态参数对单株籽粒产量和单株生物量的影响程度,对各指标进行 PLS 分析发现,根系形态性状对单株籽粒产量的影响程度表现为:根干质量>根冠比>根总长度>根尖数>比根长>根比表面积>根表面积>根组织质量密度>根系体积>根平均直径(图 5a);根系形态性状对单株生物量的影响程度表现为:根冠比>根干质量>根尖数>根总长度>根表面积>根系体积>根平均直径=根组织质量密度>根比表面积>比根长(图 5b)。

3 讨论

3.1 玉米根系形态性状对褐藻胶-富里酸改性石膏的响应

富里酸和褐藻胶是重要的植物生长调节物质,其对植株和根系生长的促进作用已在不少研究中得到证实,张水勤等^[26]研究表明,富里酸的分子量小、活性高,对根系生长具有明显刺激效应;罗晓峰等^[18]研究发现,褐藻胶的化学结构与部分植物激素类似,可有效刺激植物生长。作为补充土壤养分的

重要肥料,硫肥对植物也有良好的促生作用,研究表明,在缺硫条件下施用硫肥可显著促进玉米根系生长^[5]。本研究从生物刺激效应^[7,14]、生物活性物质缓释^[16-17]、硫营养^[8-9]等方面综合考虑,设计制备了玉米增效剂(褐藻胶-富里酸改性石膏,AFG),通过田间试验发现,施用 AFG 显著提高了耕层土壤有效硫含量,玉米根总长度、根表面积、根干质量、根尖数、根体积等根系性状增大,根组织质量密度减小。AFG 优化了玉米根系形态性状,可能是褐藻胶和富里酸刺激作物生长功能,配合石膏的增硫效应共同作用的结果。漆栋良等^[27]研究发现,根总长度、根表面积和根干质量的增加有利于玉米增产。李金婷等^[28]研究表明,根尖数和根体积的增大有利于玉米增产。可见,玉米根系形态性状的优化有利于改善其在土壤中的分布,增强玉米对土壤水肥资源的获取能力,促进玉米丰产高效^[2,22,29]。

本研究还发现,AFG 施用量为 $40\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 时,其对玉米根系生长调控作用最强,进一步提高施用量,调控效果有所减弱。原因可能是 AFG 中含有的富里酸属于生物刺激素,其施用量需要控制在适宜范围才能发挥最佳的生物刺激功能^[14,30]。孟阿静等^[31]研究表明,在碱性灰漠土灌溉条件下,随着富里酸施用量的提高,玉米根系生长量先提高后降低,在 $150\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 的适中施用量下根系生长最旺盛。可见,AFG 对玉米根系生长的影响存在剂量阈值,且不同玉米产区的水分条件和土壤性质等存在一定差异^[32-33],AFG 最适施用量选择也需因地制宜。本研究后期将开展多年多点研究,探究不同降水年型及不同玉米产区适宜的 AFG 施用量。

3.2 褐藻胶-富里酸改性石膏对玉米产量的调控作用

吴琼等^[34]研究表明,施用褐藻胶后,玉米籽粒产量较不施用处理提高 $4.8\%\sim6.6\%$ 。芦大伟等^[35]发现,与不施用处理相比,施用富里酸处理玉米籽粒产量提高 $10.2\%\sim12.6\%$ 。Li 等^[5]研究发现,施用硫肥有效提高了土壤有效硫含量,使玉米籽粒产量提高 $8.6\%\sim15.4\%$ 。本研究结果表明,施用 AFG 具有提高玉米籽粒产量及全株生物量的作用,与不施用 AFG 处理相比, $40、60、80\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 施用量处理增产作用较显著,且 $40\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 施用量处理增产效果最好,单株籽粒产量和单株生物量分别较不施用处理提高 8.9% 和 8.6% ,提高施用量并未进一步促进玉米增产。可能是因为与 T0 和 T20 处理相比,T40 处理的土壤有效硫含量大幅提高,而进一步提高 AFG 施用量后土壤有效硫的增加趋势明显放缓;且

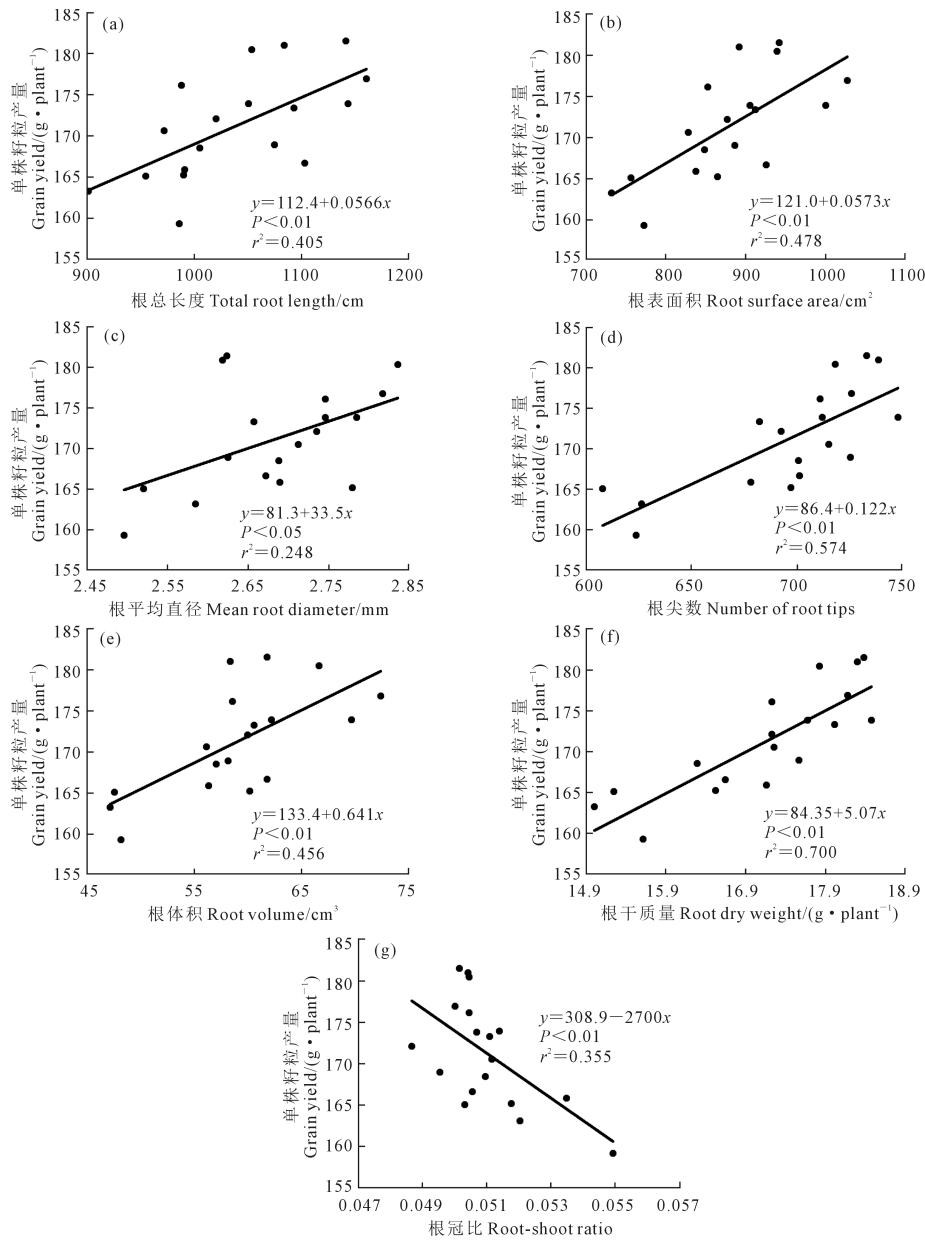


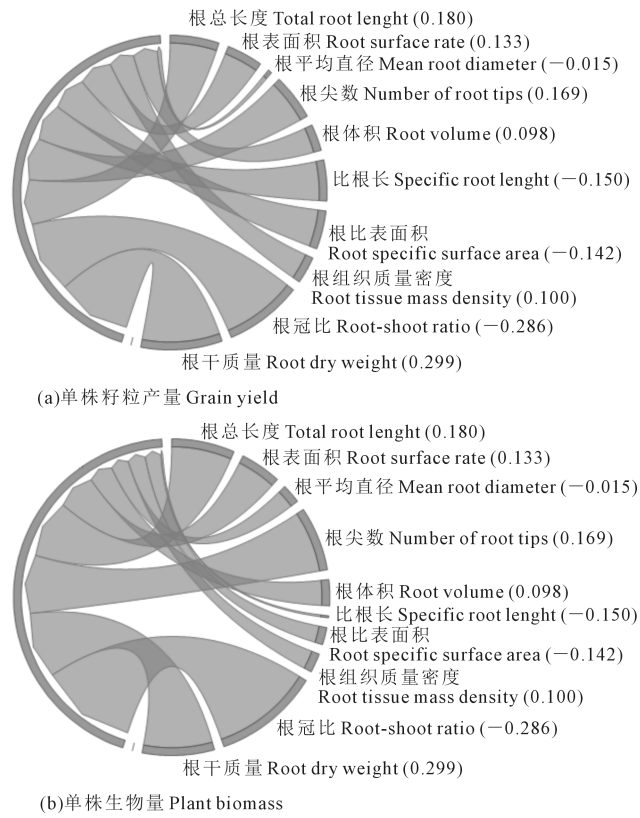
图 4 玉米根系形态与单株籽粒产量的线性回归模型

Fig.4 Linear relationship between root morphological traits and maize grain yield

AFG 中添加的富里酸(生物刺激素)具有剂量效应,在 40 kg · hm⁻²施用量下,其对玉米根系生长的促进作用最强,更有利于玉米植株生长,进而能更有效提高玉米产量。

根系是作物获取土壤养分和水分的关键器官,其生长情况对大田作物产量形成具有重要影响^[23]。隋凯强等^[36]研究表明,玉米产量与其生长中后期的根系形态相关,较大的根总长度、根表面积和根体积有利于玉米增产。漆栋良等^[27]研究也表明,玉米生长中后期(抽雄-成熟)根系形态性状与籽粒产量具有显著相关关系,在灌浆期按相关系数大小排序为:根干质量>根总长度>根表面积。本研究通过分析不同 AFG 施用量下,玉米吐丝期根系形态指标的

变化情况及其与产量的相关关系,发现根干质量、根尖数、根表面积、根系体积、根总长度、根冠比和根平均直径与单株籽粒产量具有显著线性关系,可见通过施用 AFG 调整上述根系性状,有利于玉米增产。吴琼等^[34]研究也发现,施用褐藻胶后,玉米根系干质量与产量呈正相关。刘世昌等^[37]研究表明,在不同富里酸施用量下,玉米根系鲜质量与产量具有正相关关系。本研究采用 PLS 方法消除共线性等问题^[38],进一步解析根系形态性状对玉米产量的综合影响,发现根干质量、根冠比、根总长度和根尖数是对籽粒产量和全株生物量影响最大的根系形态性状。根系吸收能力除与形态性状相关以外,与其生理活性也有密切关系,例如根系活力可反映根



注:括号中数值为 PLS 系数;系数绝对值越大,该参数对玉米籽粒产量或生物量影响越大。
Note: Values in parentheses represent the PLS coefficients; higher coefficients (absolute value) represent stronger effects of the traits on maize grain yield or plant biomass.

图 5 玉米不同根系形态参数对单株籽粒产量和生物量的影响

Fig.5 Effects of different root morphological traits on maize grain yield and plant biomass

系代谢活性^[39],根系抗氧化酶系统对环境胁迫具有较敏感响应^[40]。本研究在分析玉米根系形态性状与产量的关系的基础上,未来将探索玉米根系生理特性对施用 AFG 的响应,以更全面揭示 AFG 对玉米根系的调控效应及其增产机制。

作物生长增效剂能否在农业生产中推广应用,需要综合考虑物料投入、产量表现、环境效应等因素^[22,41],即在实现作物丰产的基础上,尽量减少物料投入和环境影响。本研究表明,施用 AFG 可有效提高玉米产量,但其对肥料利用效率的影响尚不明确,且氨挥发是玉米田氮素气态损失的重要途径,其挥发量与氮肥投入量和土壤 pH 呈正相关^[42],而 AFG 混合物呈碱性(pH 为 9.2),有增加氨挥发损失的风险^[43]。因此,在一定目标产量下,可探索施用 AFG 与减施化肥的配合增效途径^[44],确定合理的 AFG 和化肥配施方案,以有效减少土壤氮素损失,提高肥料利用效率,促进玉米绿色丰产增效。

4 结 论

施用褐藻胶-富里酸改性石膏 (AFG) 可显著提高土壤有效硫含量,有效调控多种玉米根系形态性状,T40 处理 (AFG 施用量为 40 kg · hm⁻²) 的根总长度、根表面积、根平均直径、根尖数、根体积和根干质量高于其他处理,进一步提高 AFG 施用量,调控效果有所降低。40 kg · hm⁻² AFG 施用量下,玉米单株籽粒产量和单株生物量最高,分别比 T0 处理增加 8.9% 和 8.6%。线性回归及 PLS 分析表明,9 种根系性状中,根干质量、根冠比、根总长度和根尖数对玉米籽粒产量影响最大。本研究条件下,40 kg · hm⁻² 是较合理的 AFG 施用量,可在较少的物料投入下促进玉米丰产。

参 考 文 献:

[1] REN K Y, XU M G, LI R, et al. Optimizing nitrogen fertilizer use for more grain and less pollution[J]. Journal of Cleaner Production, 2022, 360: 132180.

[2] 岳艳军, 吴跃进, 杨阳, 等. 含 2.5% 基质材料尿素的氮缓释特性及其与作物生长吻合性[J]. 植物营养与肥料学报, 2019, 25(11): 2009-2018.

YUE Y J, WU Y J, YANG Y, et al. Slow-release property of urea containing 2.5% additives and the fitness of nutrient supply with crop growth[J]. Journal of Plant Nutrition and Fertilizers, 2019, 25(11): 2009-2018.

[3] ZHENG J, WANG H M, FAN J L, et al. Wheat straw mulching with nitrification inhibitor application improves grain yield and economic benefit while mitigating gaseous emissions from a dryland maize field in northwest China[J]. Field Crops Research, 2021, 265: 108125.

[4] 周丽平, 袁亮, 赵秉强, 等. 不同分子量风化煤腐殖酸对玉米植株主要代谢物的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2019, 25(1): 142-148.

ZHOU L P, YUAN L, ZHAO B Q, et al. Contents of the main metabolites in maize affected by humic acids with different molecular weight derived from weathered coal[J]. Journal of Plant Nutrition and Fertilizers, 2019, 25(1): 142-148.

[5] LI N, YANG Y, WANG L Q, et al. Combined effects of nitrogen and sulfur fertilization on maize growth, physiological traits, N and S uptake, and their diagnosis [J]. Field Crops Research, 2019, 242: 107593.

[6] CRUSCIOL C A C, ALMEIDA D S, ALVES C J, et al. Can micronized sulfur in urea reduce ammoniacal nitrogen volatilization and improve maize grain yield? [J]. Journal of Soil Science and Plant Nutrition, 2019, 19(4): 701-711.

[7] CONSELVAN G B, PIZZEGHELLO D, FRANCIOSO O, et al. Bios-timulant activity of humic substances extracted from leonardites [J]. Plant and soil, 2017, 420(1): 119-134.

[8] LIANG T S, DING H, WANG G D, et al. Sulfur decreases cadmium translocation and enhances cadmium tolerance by promoting sulfur as-

- simulation and glutathione metabolism in *Brassica chinensis* L.[J]. *Eco-toxicology and Environmental Safety*, 2016, 124: 129-137.
- [9] 韩彦莎, 马利, 仪慧兰. 二氧化硫通过调节谷胱甘肽稳态增强谷子幼苗抗旱性[J]. *中国生物化学与分子生物学报*, 2020, 36(5): 559-565.
- HAN Y S, MA L, YI H L. Sulfur dioxide enhances drought tolerance of foxtail millet seedlings by the modulation of glutathione homeostasis [J]. *Chinese Journal of Biochemistry and Molecular Biology*, 2020, 36(5): 559-565.
- [10] 李娜, 杨阳, 赵玉霞, 等. 施用硫肥对关中地区夏玉米硫素吸收及产量的影响[J]. *干旱地区农业研究*, 2013, 31(5): 168-172.
- LI N, YANG Y, ZHAO Y X, et al. Effects of sulfur application rate on sulfur utilization and grain yield of summer maize in Guanzhong plain[J]. *Agricultural Research in the Arid Areas*, 2013, 31(5): 168-172.
- [11] 钱晓华, 杨平, 周学军, 等. 安徽省土壤有效硫现状及时空分布[J]. *植物营养与肥科学报*, 2018, 24(5): 1357-1364.
- QIAN X H, YANG P, ZHOU X J, et al. Current situation and spatial-temporal distribution of soil available sulfur in Anhui province [J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizers*, 2018, 24(5): 1357-1364.
- [12] 马春雪, 邓跃全, 董发勤, 等. 脲甲醛-石膏-膨润土基大豆缓释肥的研制及其养分释放性能评价[J]. *大豆科学*, 2013, 32(2): 220-223.
- MA C X, DENG Y Q, DONG F Q, et al. Preparation of urea-formaldehyde-gypsum-bentonite based specialty slow-release fertilizers for soybean and evaluation of nutrient release characteristics[J]. *Soybean Science*, 2013, 32(2): 220-223.
- [13] 邹茸, 王秀斌, 迟克宇, 等. 不同品种硫肥对苋菜镉累积的影响[J]. *农业环境科学学报*, 2018, 37(10): 2135-2141.
- ZOU R, WANG X B, CHI K Y, et al. Effects of different sulfur fertilizers on cadmium accumulation in *Amaranthus mangostanus* L.[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2018, 37(10): 2135-2141.
- [14] CALVO P M A, NELSON L, KLOEPPER J W. Agricultural uses of plant biostimulants[J]. *Plant and soil*, 2014, 383(1): 3-41.
- [15] 周莉娜, 孙丽蓉, 毛晖, 等. 黄腐酸抗早营养剂对小麦和玉米生长的影响[J]. *干旱地区农业研究*, 2012, 30(1): 154-158.
- ZHOU L N, SUN L R, MAO H, et al. Effects of drought-resistant fulvic acid liquid fertilizer on wheat and maize growth [J]. *Agricultural Research in the Arid Areas*, 2012, 30(1): 154-158.
- [16] 阿拉腾珠拉, 胡永飞. 褐藻寡糖的制备方法及生物活性研究进展[J]. *生物工程学报*, 2022, 38(1): 104-118.
- ALA T Z L, HU Y F. Advances in the preparation of alginate oligosaccharides and its biological functions[J]. *Chinese Journal of Biotechnology*, 2022, 38(1): 104-118.
- [17] NI B L, LIU M Z, LÜ S Y, et al. Multifunctional slow-release organic-inorganic compound fertilizer[J]. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 2010, 58(23): 12373-12378.
- [18] 罗晓峰, 代宇佳, 宋艳, 等. 三种植物生长调节剂对大豆生长发育及产量的影响[J]. *核农学报*, 2021, 35(4): 980-988.
- LUO X F, DAI Y J, SONG Y, et al. Effects of three plant growth regulators on growth and yield of soybean[J]. *Journal of Nuclear Agricultural Sciences*, 2021, 35(4): 980-988.
- [19] XIANG Y B, ZHANG G L, CHEN C W, et al. Fabrication of a pH-responsively controlled-release pesticide using an attapulgite-based hydrogel[J]. *ACS Sustainable Chemistry & Engineering*, 2018, 6(1): 1192-1201.
- [20] WEN P, WU Z S, HE Y H, et al. Microwave-assisted one-step synthesis and characterization of a slow release nitrogen fertilizer with inorganic and organic composites[J]. *RSC Advances*, 2016, 6(44): 37337-37346.
- [21] 鲍士旦. 土壤农化分析[M]. 3版. 北京: 中国农业出版社, 2000: 67-68.
- BAO S D. Soil and agricultural chemistry analysis[M]. 3rd ed. Beijing: China Agriculture Press, 2000: 67-68.
- [22] CHEN Y L, PALTA J, CLEMENTS J, et al. Root architecture alteration of narrow-leaved lupin and wheat in response to soil compaction [J]. *Field Crops Research*, 2014, 165: 61-70.
- [23] 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.
- [24] PENG B, LIU X W, DONG X J, et al. Root morphological traits of winter wheat under contrasting environments[J]. *Journal of Agronomy and Crop Science*, 2019, 205(6): 571-585.
- [25] 李彪, 孟兆江, 段爱旺, 等. 调亏灌溉对夏玉米根冠生长关系的调控效应[J]. *干旱地区农业研究*, 2018, 36(5): 169-175, 186.
- LI B, MENG Z J, DUAN A W, et al. Effect of regulated deficit irrigation on growth relation of root to shoot in summer maize[J]. *Agricultural Research in the Arid Areas*, 2018, 36(5): 169-175, 186.
- [26] 张水勤, 袁亮, 林治安, 等. 腐植酸促进植物生长的机理研究进展[J]. *植物营养与肥科学报*, 2017, 23(4): 1065-1076.
- ZHANG S Q, YUAN L, LIN Z A, et al. Advances in humic acid for promoting plant growth and its mechanism[J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizers*, 2017, 23(4): 1065-1076.
- [27] 漆栋良, 潘晨, 李瑞. 局部灌水施氮下玉米根系形态特征与产量的关系研究[J]. *节水灌溉*, 2023,(1): 86-91, 98.
- QI D L, PAN C, LI R. Study on relationships between maize root morphological traits with grain yield under partial root-zone supply of irrigation water and nitrogen[J]. *Water Saving Irrigation*, 2023,(1): 86-91, 98.
- [28] 李金婷, 覃满敏, 覃宏宇, 等. 间作对玉米根系形态特征及其氮磷养分吸收的影响[J]. *南方农业学报*, 2022, 53(5): 1348-1356.
- LI J T, QIN X M, QIN H Y, et al. Effects of maize and soybean intercrop on maize root morphological traits and its nitrogen and phosphorus nutrient absorption[J]. *Journal of Southern Agriculture*, 2022, 53(5): 1348-1356.
- [29] ABIVEN S, HUND A, MARTINSEN V, et al. Biochar amendment increases maize root surface areas and branching: a shovelomics study in Zambia[J]. *Plant and soil*, 2015, 395(1): 45-55.
- [30] HALPERN M, BAR-TAL A, OFEK M, et al. The use of biostimulants for enhancing nutrient uptake[J]. *Advances in Agronomy*, 2015, 130: 141-174.
- [31] 孟阿静, 齐莹莹, 吕彩霞, 等. 不同量黄腐酸配施微生物菌肥对玉米生长、养分积累及苗期光合特征的影响[J]. *新疆农业科学*,

2021, 58(12): 2312-2319.

MENG A J, QI Y Y, LYU C X, et al. Effects of different quantities of fulvic acid combined application with microbial fertilizer on corn growth, nutrient accumulation and photosynthetic characteristics at seedling stage[J]. Xinjiang Agricultural Sciences, 2021, 58(12): 2312-2319.

[32] HAN K, ZHOU C J, SHENG H Y, et al. Agronomic improvements in corn by alternating nitrogen and irrigation to various plant densities [J]. Agronomy Journal, 2015, 107(1): 93-103.

[33] WANG S J, LUO S S, LI X S, et al. Effect of split application of nitrogen on nitrous oxide emissions from plastic mulching maize in the semiarid Loess Plateau[J]. Agriculture, Ecosystems & Environment, 2016, 220: 21-27.

[34] 吴琼, 郑殿峰, 冯乃杰, 等. 植物生长调节剂对玉米幼苗生长、光合荧光特性及产量的影响[J]. 西南农业学报, 2021, 34(3): 520-528.

WU Q, ZHENG D F, FENG N J, et al. Effects of plant growth regulators on maize seedling growth, photosynthetic fluorescence characteristics and yield[J]. Southwest China Journal of Agricultural Sciences, 2021, 34(3): 520-528.

[35] 芦大伟, 李青军, 陈署晃, 等. 黄腐酸与氮肥配施对滴灌玉米产量及氮肥利用率的影响[J]. 新疆农业科学, 2019, 56(10): 1888-1894.

LU D W, LI Q J, CHEN S H, et al. Effect of combined application of fulvic acid and urea on yield and nitrogen use efficiency of drip irrigation maize [J]. Xinjiang Agricultural Sciences, 2019, 56(10): 1888-1894.

[36] 隋凯强, 赵龙刚, 刘树堂, 等. 水肥耦合对夏玉米根系形态及产量的影响[J]. 华北农学报, 2018, 33(4): 232-238.

SUI K Q, ZHAO L G, LIU S T, et al. Effects of coupling water and fertilizer on root morphology and yield of summer maize[J]. Acta Agriculturae Boreali-Sinica, 2018, 33(4): 232-238.

[37] 刘世昌, 任先顺, 王子浩, 等. 生化黄腐酸钾对玉米生长的影响[J]. 黑龙江农业科学, 2022,(9): 51-55.

LIU S C, REN X S, WANG ZI H, et al. Effects of biochemical fulvic acid potassium on maize growth [J]. Heilongjiang Agricultural Sciences, 2022,(9): 51-55.

[38] YANG Y, LI N, WU Y J, et al. Key phenotypes related to wheat grain yield in a two-site multicultivar test [J]. Agronomy Journal, 2022, 114(5): 2874-2885.

[39] 张文新, 段迎新, 章爽, 等. 基于 3 种水分控制条件的玉米品种抗旱性综合评价[J]. 干旱地区农业研究, 2022, 40(1): 163-174, 183.

ZHANG W X, DUAN Y X, ZHANG S, et al. Comprehensive evaluation of drought resistance in maize varieties based on three water conditions[J]. Agricultural Research in the Arid Areas, 2022, 40(1): 163-174, 183.

[40] 薛新伟, 杨恒山, 张瑞富. 不同灌溉模式对西辽河平原玉米根系形态特征和生理生化特性的影响[J]. 干旱地区农业研究, 2022, 40(2): 111-118.

XUE X W, YANG H S, ZHANG R F. Effects of different irrigation methods on root morphological and physiological biochemical characteristics of maize in the west Liaohe plain[J]. Agricultural Research in the Arid Areas, 2022, 40(2): 111-118.

[41] LI N, YANG Y, WU Y J, et al. Better performance of compound fertilizers than bulk-blend fertilizers on reducing ammonia emission and improving wheat productivity[J]. Agriculture, Ecosystems & Environment, 2022, 335: 108018.

[42] 杨阳, 倪晓宇, 刘斌美, 等. 施用不同剂型基质氮肥对玉米田氨挥发与氮肥利用率的影响[J]. 中国农学通报, 2020, 36(24): 14-22.

YANG Y, NI X Y, LIU B M, et al. Matrix-based nitrogen fertilizers with different matrix-material doses: effects on ammonia volatilization and nitrogen use efficiency in maize field[J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2020, 36(24): 14-22.

[43] YANG Y, LI N, NI X Y, et al. Combining deep flooding and slow-release urea to reduce ammonia emission from rice fields[J]. Journal of Cleaner Production, 2020, 244: 118745.

[44] 杨阳, 刘灿华, 葛树春, 等. 减量配施新型基质缓释肥对水稻产量及氮肥利用率的影响[J]. 安徽农业大学学报, 2020, 47(3): 442-447.

YANG Y, LIU C H, GE S C, et al. Effects of reduced application of novel matrix-based slow-release fertilizer on rice grain yield and nitrogen use efficiency [J]. Journal of Anhui Agricultural University, 2020, 47(3): 442-447.

撤稿声明

2023 年第 41 卷第 5 期发表的论文“蒜头高精度动态称重信号获取与分级方法研究”(作者:耿令新,王恒一,李洋,胡潇楠,孙文雅,张利娟),由于作者写作不严谨,导致论文部分内容与作者本人已发表的前期论文存在重复现象,现予以撤稿,特此声明。