

张书静, 魏娇娇, 徐得甲, 等. 不同施氮量对滴灌水肥一体化模式下玉米生长发育和土壤生物学特性的影响[J]. 江苏农业学报, 2025, 41(11): 2157-2166.

doi: 10.3969/j.issn.1000-4440.2025.11.009

# 不同施氮量对滴灌水肥一体化模式下玉米生长发育和土壤生物学特性的影响

张书静, 魏娇娇, 徐得甲, 叶家骏, 孙权, 蒋鹏, 刘喆

(宁夏大学农学院, 宁夏 银川 750021)

**摘要:** 本研究设置7个梯度施氮量处理,分别为不施氮肥对照(CK)、施氮量 50 kg/hm<sup>2</sup>处理(T1)、施氮量 100 kg/hm<sup>2</sup>处理(T2)、施氮量 150 kg/hm<sup>2</sup>处理(T3)、施氮量 200 kg/hm<sup>2</sup>处理(T4)、施氮量 250 kg/hm<sup>2</sup>处理(T5)、施氮量 300 kg/hm<sup>2</sup>处理(T6),分析施氮量对滴灌水肥一体化模式下玉米生长发育和土壤生物学特性的影响。结果表明,随着施氮量的增加,玉米叶片气孔导度、胞间 CO<sub>2</sub> 浓度、净光合速率、产量、根系活力、土壤脲酶活性、土壤磷酸酶活性、土壤蔗糖酶活性、土壤过氧化氢酶活性均呈先升高后降低的变化趋势。表明适宜施氮量可通过增强玉米光合作用、提升土壤酶活性及改善土壤理化性质等途径显著提高玉米产量。在施氮量为 250 kg/hm<sup>2</sup>时,玉米产量最高。适量施氮可提高土壤微生物生物量碳(MBC)、土壤微生物生物量氮(MBN)、土壤微生物生物量磷(MBP)含量,其中 MBC 含量与玉米单株重、穗重、秸秆重、籽粒重、产量、根长呈极显著正相关( $P < 0.01$ ),与株高、茎粗、叶绿素相对含量、单株穗数呈显著正相关( $P < 0.05$ )。MBN 含量与百粒重呈显著负相关( $P < 0.05$ )。微生物生物量磷(MBP)含量与根体积、根系活力呈极显著正相关( $P < 0.01$ ),与秸秆重呈显著正相关( $P < 0.05$ ),与根相对表面积呈显著负相关( $P < 0.05$ )。表明 MBC 含量、MBN 含量与玉米地上部生物量积累和产量形成密切相关,MBP 含量与根系形态建成密切相关。本研究结果为滴灌水肥一体化模式下玉米氮肥管理提供了理论依据。

**关键词:** 玉米; 滴灌水肥一体化; 施氮量; 产量; 土壤酶活性; 土壤微生物养分库

中图分类号: S513 文献标识码: A 文章编号: 1000-4440(2025)11-2157-10

## Effects of different nitrogen application rates on maize growth and development and soil biological properties under drip irrigation with fertigation integration mode

ZHANG Shujing, WEI Jiaojiao, XU Dejia, YE Jiajun, SUN Quan, JIANG Peng, LIU Zhe

(School of Agriculture, Ningxia University, Yinchuan 750021, China)

**Abstract:** In this study, seven gradient nitrogen application rate treatments were set up, namely no nitrogen fertilizer control (CK), nitrogen application rate of 50 kg/hm<sup>2</sup> (T1), 100 kg/hm<sup>2</sup> (T2), 150 kg/hm<sup>2</sup> (T3), 200 kg/hm<sup>2</sup> (T4), 250 kg/hm<sup>2</sup> (T5), and 300 kg/hm<sup>2</sup> (T6). The effects of nitrogen application rates on maize growth and development and soil biological properties under the drip irrigation and fertigation integration mode were analyzed. The results showed that with the increase of nitrogen application rate, maize leaf stomatal conductance, intercellular CO<sub>2</sub> concentration, net photosynthetic rate,

收稿日期: 2025-02-16

基金项目: 宁夏回族自治区重大科技成果转化项目(2023CJE09052)

作者简介: 张书静(2001-), 女, 宁夏石嘴山人, 硕士研究生, 研究方向为农业资源利用。(E-mail) 1144914074@qq.com

通讯作者: 孙权, (E-mail) sqnxu@sina.com

yield, root activity, soil urease activity, soil phosphatase activity, soil sucrase activity, and soil catalase activity all showed a trend of first increasing and then decreasing. The findings revealed that an appropriate nitrogen application rate significantly increased maize yield by enhancing maize photosynthesis, improving soil enzyme activity, and optimi-

zing soil physical and chemical properties. The highest maize yield was achieved when the nitrogen application rate was 250 kg/hm<sup>2</sup>. Appropriate nitrogen application could increase the contents of soil microbial biomass carbon (MBC), soil microbial biomass nitrogen (MBN), and soil microbial biomass phosphorus (MBP). Among them, MBC content was extremely significantly positively correlated with maize plant weight, ear weight, straw weight, grain weight, yield, and root length ( $P < 0.01$ ), and significantly positively correlated with plant height, stem diameter, relative chlorophyll content, and number of ears per plant ( $P < 0.05$ ). MBN content was significantly negatively correlated with 100-grain weight ( $P < 0.05$ ). MBP content was extremely significantly positively correlated with root volume and root activity ( $P < 0.01$ ), significantly positively correlated with straw weight ( $P < 0.05$ ), and significantly negatively correlated with relative root surface area ( $P < 0.05$ ). These results suggested that MBC and MBN contents were closely related to the accumulation of aboveground biomass and yield formation of maize, while MBP content was closely related to the formation of root morphology. The results of this study provide a theoretical basis for maize nitrogen management under the drip irrigation and fertigation integration mode.

**Key words:** maize; drip irrigation with fertigation integration; nitrogen application rate; yield; soil enzyme activity; soil microbial nutrient pool

玉米是中国主要的粮食作物,具有适应能力强,生产潜力大,经济效益高、机械化种植便捷等优势,在全球干旱半干旱区被广泛栽培<sup>[1-2]</sup>。中国西部半干旱区农业生产面临光热资源丰富与水土资源匮乏的突出矛盾,这一矛盾严重制约了玉米增产潜力的发挥<sup>[3-4]</sup>。随着农村劳动力持续减少和农业技术的不断进步<sup>[5]</sup>,水肥一体化滴灌技术在半干旱区玉米种植中展现出显著优势,具有节水省工、高效高产等优点<sup>[6]</sup>。因此研究玉米的水肥一体化技术,将从追求高产逐渐转变为追求高产、优质、高效的生产目标具有重要意义。

氮素是影响玉米生长发育的重要营养元素<sup>[7]</sup>,与磷肥、钾肥相比,玉米的干物质积累对氮肥的响应更为敏感<sup>[8]</sup>。近年来,氮肥施用显著提高了玉米产量,但是为追求经济效益,常过量投入氮肥,导致施氮量远超作物实际需求。值得注意的是,随着施氮量持续增加,氮肥的边际增产效应逐渐递减,同时引发了一系列土壤环境问题<sup>[9]</sup>。研究表明,施氮量显著影响玉米叶片生长、光合作用和干物质累积<sup>[10]</sup>。适量施用氮肥可延长夏玉米灌浆持续期,提高灌浆速率,促进籽粒干物质积累;而氮素缺乏或过量则会干扰籽粒干物质积累过程,导致百粒重下降<sup>[11]</sup>。多余的氮素会随水分下渗,污染地下水<sup>[12]</sup>。

在土壤生态系统中,土壤酶活性与氮肥施用量

密切相关<sup>[13]</sup>。研究表明,适量施用氮肥能够提高土壤微生物生物量碳(MBC)和微生物生物量氮(MBN)含量,但施用氮肥过量时,微生物生物量碳(MBC)和微生物生物量氮(MBN)含量趋于稳定<sup>[14]</sup>。土壤酶活性受作物品种、耕作制度和土壤管理措施的共同影响<sup>[15-17]</sup>。土壤氮素转化涉及多个生物化学过程,这些过程受到多种胞外酶的调控<sup>[18]</sup>。本研究拟以不同施氮水平下的玉米植株作为研究对象,综合探究施氮量与玉米生长发育、产量形成和土壤酶活性的互作关系,旨在建立水肥一体化模式下建立玉米最优施氮方案,实现氮肥精准施用与效益最大化,为玉米高产优质栽培提供理论依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 试验地概况

试验于2020年5-10月在宁夏回族自治区吴忠市盐池县冯记沟乡马儿庄村高产示范区(37°56'84" N, 106°82'22" E)进行,试验地前茬作物为玉米。该地区属中温带干旱、半干旱气候,土壤类型为灰钙土,质地偏砂性,保水性差,土壤肥力较低,土壤理化性质如表1所示。根据试验区气象站数据,玉米生育期内(播种至收获)平均气温20.1℃,总降雨量174.6mm,总日照时数1642.9h,太阳辐射总量5803.8MJ/m<sup>2</sup>。

表1 土壤理化性质

Table 1 Soil physical and chemical properties

土层	pH	全盐含量 (g/kg)	容重 (g/cm <sup>3</sup> )	田间最大持 水量(%)	全氮含量 (g/kg)	全磷含量 (g/kg)	有机质含量 (g/kg)	碱解氮含量 (mg/kg)	速效磷含量 (mg/kg)	速效钾含量 (mg/kg)
耕作层	8.58	0.87	1.43	25.49	0.37	0.46	4.84	37.89	20.83	58.45
犁底层	8.56	0.67	1.47	22.48	0.28	0.34	3.41	31.21	27.16	53.93

## 1.2 试验材料

供试玉米品种为当地主栽品种天赐 19 号。所用氮肥、磷肥、钾肥、微量元素肥料均为水溶性肥料(宁夏润禾丰生物技术有限公司产品),其中 N 含量 46%, ( $P_2O_5+K_2O$ ) 含量  $\geq 50\%$ , 中量元素(Mg+S) 含量 3%, 微量元素(Fe+Zn+Mn+Cu+B) 含量 0.61%, 微量元素肥料均为螯合态。

## 1.3 试验设计

如表 2 所示,试验采用随机区组设计,共设 7 个施氮量处理,分别为不施氮肥对照(CK)、施氮量 50 kg/hm<sup>2</sup>处理(T1)、施氮量 100 kg/hm<sup>2</sup>处理(T2)、施氮量 150 kg/hm<sup>2</sup>处理(T3)、施氮量 200 kg/hm<sup>2</sup>处理(T4)、施氮量 250 kg/hm<sup>2</sup>处理(T5)、施氮量 300 kg/hm<sup>2</sup>处理(T6),每个处理设 3 次重复。每个试验小区面积 132 m<sup>2</sup>(20.0 m × 6.6 m),小区四周设宽度为 2.2 m 的保护行,保护行占地不计入试验区域。采用水肥一体化滴灌系统,带状播种,每个条带种植 2 行,行距 40 cm,带间距 70 cm,株距 21 cm,形成宽窄行距配置。全生育期不施基肥和种肥,总滴灌量定额 3 750 m<sup>3</sup>/hm<sup>2</sup>,分别在玉米三叶期(375 m<sup>3</sup>/hm<sup>2</sup>)、六叶期(450 m<sup>3</sup>/hm<sup>2</sup>)、九叶期(562 m<sup>3</sup>/hm<sup>2</sup>)、十二叶期(375 m<sup>3</sup>/hm<sup>2</sup>)、十五叶期(675 m<sup>3</sup>/hm<sup>2</sup>)、抽雄期(469 m<sup>3</sup>/hm<sup>2</sup>)、吐丝期(469 m<sup>3</sup>/hm<sup>2</sup>)和灌浆期(375 m<sup>3</sup>/hm<sup>2</sup>)随水施肥。其他田间管理措施保持一致。

表 2 试验设计

Table 2 Experimental design

处理	N 施用量 (kg/hm <sup>2</sup> )	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> 施用量 (kg/hm <sup>2</sup> )	K <sub>2</sub> O 施用量 (kg/hm <sup>2</sup> )
CK	0	135	180
T1	50	135	180
T2	100	135	180
T3	150	135	180
T4	200	135	180
T5	250	135	180
T6	300	135	180

## 1.4 试验方法

1.4.1 玉米生长指标和光合指标测定 于玉米蜡熟期,每小区随机选取 10 株玉米植株,测定株高和近地面节间茎粗<sup>[19]</sup>。每小区采集 5 株玉米根系,洗净后利用 WinRHIZO 根系扫描仪(加拿大 Regent 公

司产品)测定根直径、根体积、总根长和根表面积,采用氯化三苯基四氮唑(TTC)法测定根系活力<sup>[20-21]</sup>。利用叶绿素含量测定仪(型号 SPAD-502,日本 Konica Minolta 公司产品)测定棒三叶 SPAD 值,利用植物光合作用测定仪(型号 GH-300,河南云飞科技发展有限公司产品)测定净光合速率( $P_n$ )、蒸腾速率( $Tr$ )、胞间 CO<sub>2</sub> 浓度( $C_i$ )和气孔导度( $G_s$ )

1.4.2 土壤酶活性测定 于玉米蜡熟期,每小区采集 5 株玉米根系周围土壤混合,依据关松荫<sup>[22]</sup>的方法对土壤酶活性进行测定。脲酶活性采用靛酚蓝比色法进行测定;碱性磷酸酶活性采用磷酸苯二钠比色法测定;蔗糖酶活性采用二硝基水杨酸比色法测定;过氧化氢酶活性采用高锰酸钾滴定法测定。土壤微生物生物量碳(MBC)含量、微生物生物量氮(MBN)含量、微生物生物量磷(MBP)含量采用三氯甲烷熏蒸-K<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>浸提法测定<sup>[23]</sup>。

1.4.3 玉米产量指标测定 于玉米完熟期,每小区随机选取 10 个果穗,测定穗长、穗粗、穗行数、单穗重、单株穗数、穗粒重和百粒重,并测定籽粒含水量。在果穗中部随机取 5 粒籽粒,测定粒长、粒宽、粒厚<sup>[24]</sup>。全小区玉米收获后脱粒,计算标准含水量(14%)下的实际产量。

## 1.5 统计与分析

采用 Microsoft Excel 2019、SPSS 软件进行数据统计分析。利用单因素方差分析检验组间差异显著性,利用 LSD 法、Duncan's 法进行多重比较。

## 2 结果与分析

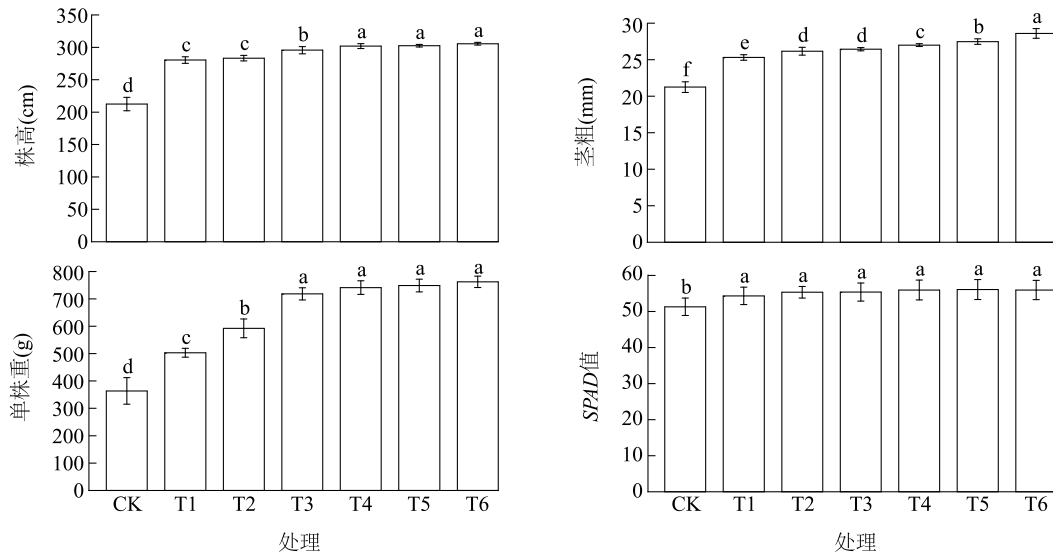
### 2.1 不同施氮量对玉米生长发育的影响

如图 1 所示,T1 处理、T2 处理、T3 处理、T4 处理、T5 处理、T6 处理玉米株高、茎粗、单株重、SPAD 值均显著高于 CK ( $P < 0.05$ )。T4 处理、T5 处理、T6 处理玉米株高显著高于 CK、T1 处理、T2 处理、T3 处理。T6 处理玉米茎粗显著高于 CK、T1 处理、T2 处理、T3 处理、T4 处理、T5 处理( $P < 0.05$ )。T3 处理、T4 处理、T5 处理、T6 处理玉米单株重显著高于 CK、T1 处理、T2 处理( $P < 0.05$ )。T1 处理、T2 处理、T3 处理、T4 处理、T5 处理、T6 处理间玉米 SPAD 值无显著差异( $P > 0.05$ )。

如图 2 所示,T6 处理玉米根长显著高于 CK、T1 处理、T2 处理、T3 处理、T4 处理、T5 处理( $P < 0.05$ )。CK、T3 处理、T4 处理、T5 处理、T6 处理玉

米根表面积显著高于 T1 处理 ( $P < 0.05$ )。T3 处理、T4 处理玉米根直径显著高于 CK、T6 处理 ( $P <$

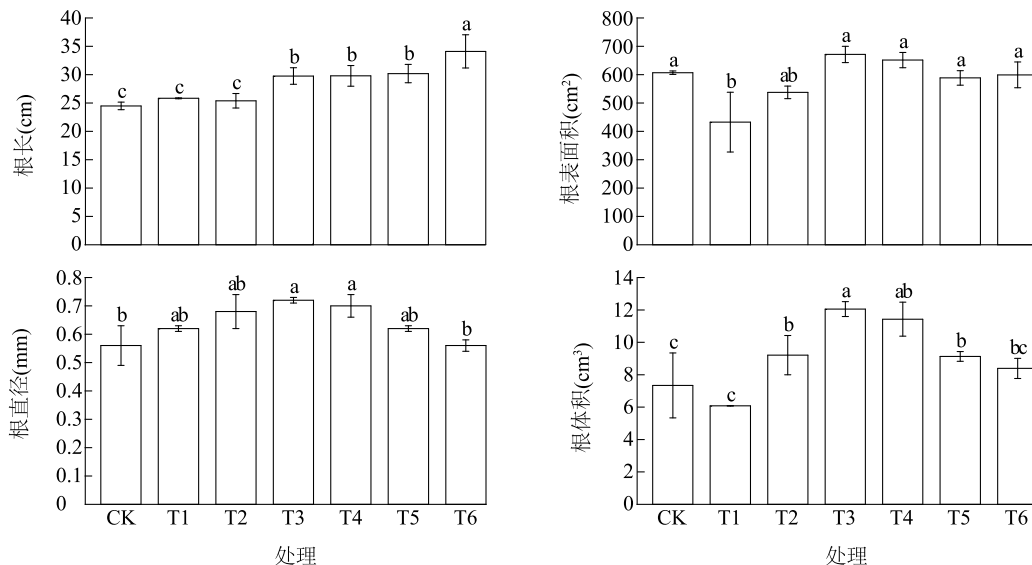
0.05)。T3 处理玉米根体积显著高于 CK、T1 处理、T2 处理、T5 处理、T6 处理 ( $P < 0.05$ )。



CK: 不施氮肥对照; T1: 施氮量 50 kg/hm<sup>2</sup>; T2: 施氮量 100 kg/hm<sup>2</sup>; T3: 施氮量 150 kg/hm<sup>2</sup>; T4: 施氮量 200 kg/hm<sup>2</sup>; T5: 施氮量 250 kg/hm<sup>2</sup>; T6: 施氮量 300 kg/hm<sup>2</sup>。图柱上不同小写字母表示差异显著 ( $P < 0.05$ )。

图 1 不同施氮量对玉米地上部生长发育的影响

Fig.1 Effects of different nitrogen application rates on the aboveground growth and development of maize



CK: 不施氮肥对照; T1: 施氮量 50 kg/hm<sup>2</sup>; T2: 施氮量 100 kg/hm<sup>2</sup>; T3: 施氮量 150 kg/hm<sup>2</sup>; T4: 施氮量 200 kg/hm<sup>2</sup>; T5: 施氮量 250 kg/hm<sup>2</sup>; T6: 施氮量 300 kg/hm<sup>2</sup>。图柱上不同小写字母表示差异显著 ( $P < 0.05$ )。

图 2 不同施氮量对玉米地下部生长发育的影响

Fig.2 Effects of different nitrogen application rates on the underground growth and development of maize

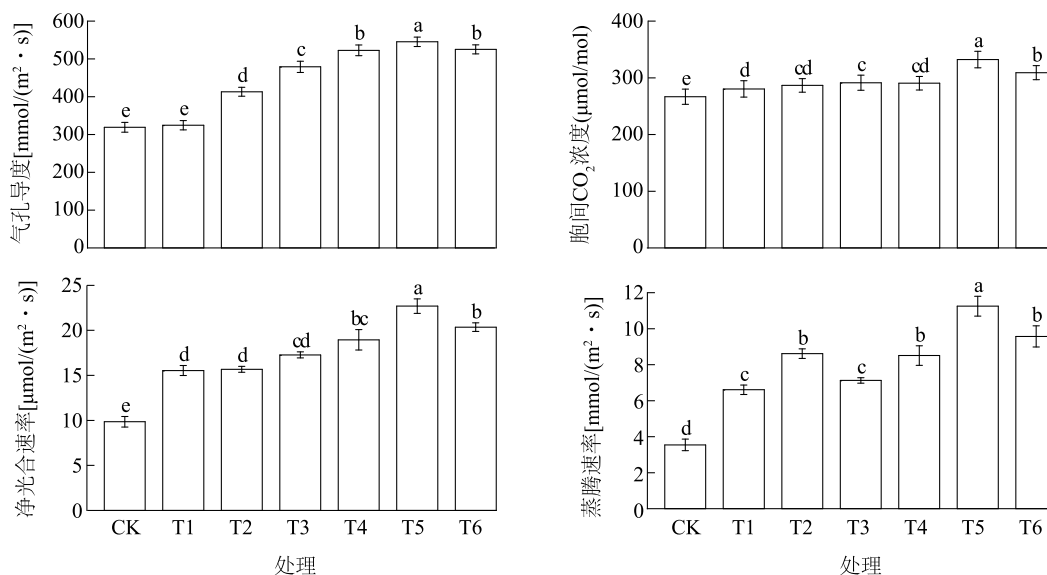
## 2.2 不同施氮量对玉米光合特性的影响

如图 3 所示,随着施氮量的增加,玉米叶片气孔导度、胞间 CO<sub>2</sub> 浓度、净光合速率、蒸腾速率呈先升高后降低的变化趋势。T2 处理、T3 处理、T4 处理、

T5 处理、T6 处理玉米叶片气孔导度显著高于 CK ( $P < 0.05$ )。T1 处理、T2 处理、T3 处理、T4 处理、T5 处理、T6 处理玉米叶片胞间 CO<sub>2</sub> 浓度、净光合速率、蒸腾速率均显著高于 CK ( $P < 0.05$ )。T5 处理玉米

叶片气孔导度、胞间  $\text{CO}_2$  浓度、净光合速率、蒸腾速率均显著高于 CK、T1 处理、T2 处理、T3 处理、T4 处

理、T6 处理。



CK:不施氮肥对照;T1:施氮量  $50 \text{ kg}/\text{hm}^2$ ;T2:施氮量  $100 \text{ kg}/\text{hm}^2$ ;T3:施氮量  $150 \text{ kg}/\text{hm}^2$ ;T4:施氮量  $200 \text{ kg}/\text{hm}^2$ ;T5:施氮量  $250 \text{ kg}/\text{hm}^2$ ;T6:施氮量  $300 \text{ kg}/\text{hm}^2$ 。图柱上不同小写字母表示差异显著 ( $P < 0.05$ )。

图3 不同施氮量对玉米光合特性的影响

Fig.3 Effects of different nitrogen application rates on the photosynthetic characteristics of maize

### 2.3 不同施氮量对玉米产量和产量构成因素的影响

如图4所示,T1处理、T2处理、T3处理、T4处理、T5处理、T6处理玉米穗重、穗长、穗粗、秃尖长、百粒重、行粒数均显著高于CK ( $P < 0.05$ )。T6处理玉米穗重显著高于CK、T1处理、T2处理、T3处理、T4处理 ( $P < 0.05$ )。T1处理、T2处理、T3处理、T4处理、T5处理、T6处理间玉米穗长和穗粗均无显著差异 ( $P > 0.05$ )。T2处理玉米秃尖长显著高于CK、T1处理、T3处理、T4处理、T5处理、T6处理。T5处理、T6处理玉米百粒重显著高于CK、T1处理、T2处理、T3处理、T4处理 ( $P < 0.05$ )。T2处理、T3处理、T4处理、T5处理、T6处理间玉米行粒数无显著差异 ( $P > 0.05$ )。

如图5所示,随施氮量的增加,玉米产量呈先上升后下降的变化趋势。T5处理玉米产量显著高于CK、T1处理、T2处理、T3处理、T4处理 ( $P < 0.05$ )。

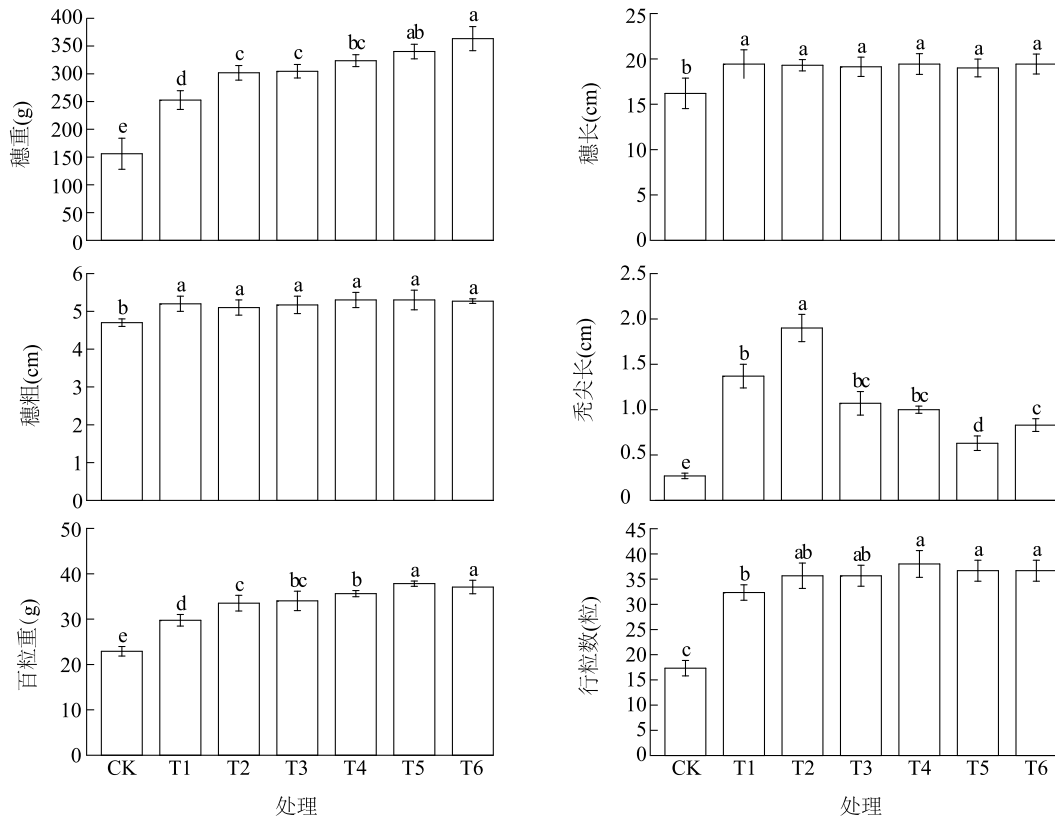
### 2.4 不同施氮量对土壤酶活性、玉米根系活力和土壤微生物养分库的影响

如图6所示,随施氮量的增加,土壤脲酶活性、

磷酸酶活性、蔗糖酶活性、过氧化氢酶活性呈先升高后降低的变化趋势。T3处理土壤脲酶活性、蔗糖酶活性显著高于CK、T1处理、T2处理、T4处理、T5处理、T6处理 ( $P < 0.05$ )。T4处理土壤磷酸酶活性显著高于CK、T1处理、T2处理、T3处理、T5处理、T6处理 ( $P < 0.05$ )。T1处理、T2处理土壤过氧化氢酶活性显著高于CK、T5处理、T6处理 ( $P < 0.05$ )。

如图7所示,随施氮量的增加,玉米根系活力呈先升高后降低的变化趋势,玉米根相对表面积呈先下降后上升的变化趋势。根系的相对表面积是表征土壤-根系界面物质能量交换效率的关键指标。T3处理玉米根系活力显著高于CK、T1处理、T2处理、T4处理、T5处理、T6处理 ( $P < 0.05$ )。表明适宜的施氮量能够促进根系对土壤中营养物质的吸收。

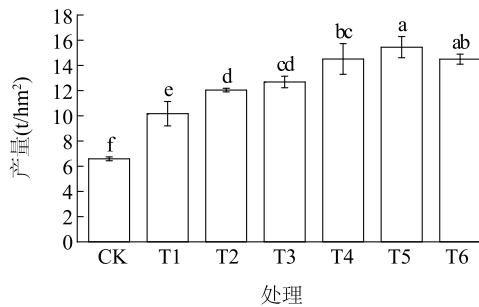
如图8所示,T6处理土壤微生物生物量碳含量显著高于CK、T1处理、T2处理、T3处理、T4处理、T5处理 ( $P < 0.05$ )。T2处理土壤微生物生物量氮含量显著高于CK、T4处理、T5处理、T6处理 ( $P < 0.05$ )。T3处理土壤微生物生物量磷含量显著高于CK、T1处理、T2处理、T4处理、T5处理、T6处理 ( $P < 0.05$ )。



CK: 不施氮肥对照; T1: 施氮量 50 kg/hm<sup>2</sup>; T2: 施氮量 100 kg/hm<sup>2</sup>; T3: 施氮量 150 kg/hm<sup>2</sup>; T4: 施氮量 200 kg/hm<sup>2</sup>; T5: 施氮量 250 kg/hm<sup>2</sup>; T6: 施氮量 300 kg/hm<sup>2</sup>。图柱上不同小写字母表示差异显著 ( $P < 0.05$ )。

图 4 不同施氮量对玉米产量构成因素的影响

Fig.4 Effects of different nitrogen application rates on maize yield components



CK: 不施氮肥对照; T1: 施氮量 50 kg/hm<sup>2</sup>; T2: 施氮量 100 kg/hm<sup>2</sup>; T3: 施氮量 150 kg/hm<sup>2</sup>; T4: 施氮量 200 kg/hm<sup>2</sup>; T5: 施氮量 250 kg/hm<sup>2</sup>; T6: 施氮量 300 kg/hm<sup>2</sup>。图柱上不同小写字母表示差异显著 ( $P < 0.05$ )。

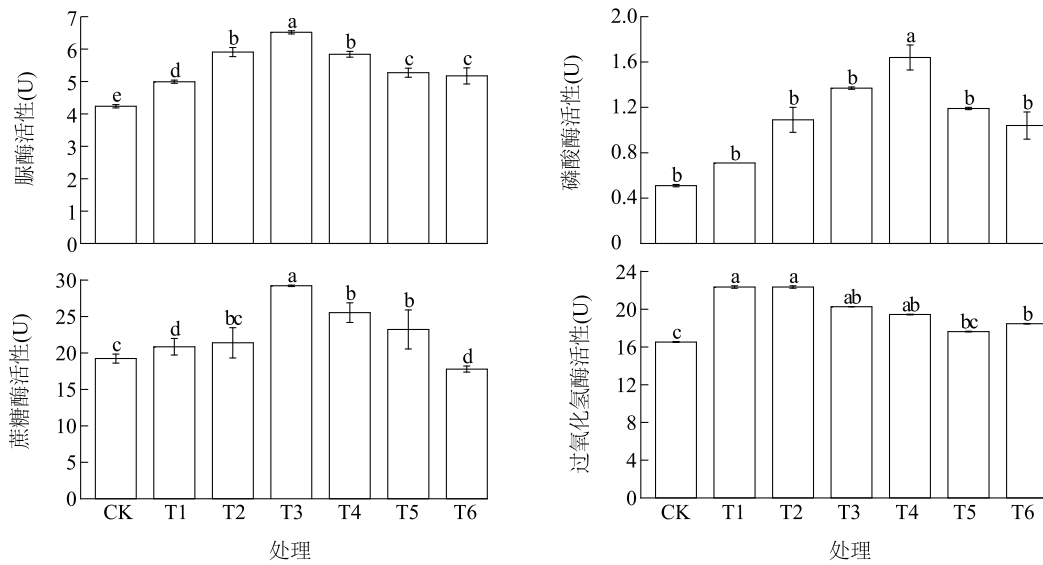
图 5 不同施氮量对玉米产量的影响

Fig.5 Effects of different nitrogen application rates on maize yield

## 2.5 玉米农艺性状、产量构成要素和根际微生态系统的相关性分析

如表 3 所示, 玉米产量与株高、茎粗、叶绿素相

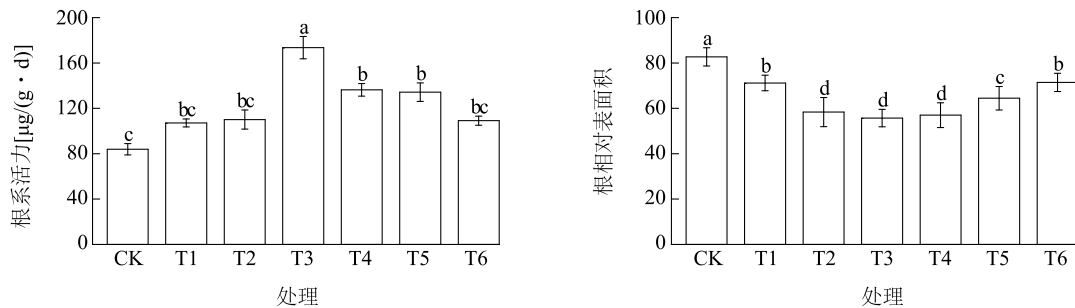
对含量、株重、穗重、秸秆重、籽粒重、穗长、穗粗、行粒数、穗粒数、单株穗数呈极显著正相关 ( $P < 0.01$ )。土壤脲酶活性与根直径呈极显著正相关 ( $P < 0.01$ ), 与根体积、根系活力呈显著正相关 ( $P < 0.05$ ), 与根相对表面积呈极显著负相关 ( $P < 0.01$ )。土壤磷酸酶活性与根体积呈极显著正相关 ( $P < 0.01$ ), 与根系活力呈显著正相关 ( $P < 0.05$ ), 与根相对表面积呈极显著负相关 ( $P < 0.01$ )。土壤蔗糖酶活性与根直径、根系活力呈极显著正相关 ( $P < 0.01$ ), 与根体积呈显著正相关 ( $P < 0.05$ ), 与根相对表面积呈显著负相关 ( $P < 0.05$ )。微生物生物量碳 (MBC) 含量与玉米单株重、穗重、秸秆重、籽粒重、产量、根长呈极显著正相关 ( $P < 0.01$ ), 与株高、茎粗、叶绿素相对含量、单株穗数呈显著正相关 ( $P < 0.05$ )。微生物生物量氮 (MBN) 含量与百粒重呈显著负相关 ( $P < 0.05$ )。微生物生物量磷 (MBP) 含量与根体积、根系活力呈极显著正相关 ( $P < 0.01$ ), 与秸秆重呈显著正相关 ( $P < 0.05$ ), 与根相对表面积呈显著负相关 ( $P < 0.05$ )。



CK:不施氮肥对照;T1:施氮量 50 kg/hm<sup>2</sup>;T2:施氮量 100 kg/hm<sup>2</sup>;T3:施氮量 150 kg/hm<sup>2</sup>;T4:施氮量 200 kg/hm<sup>2</sup>;T5:施氮量 250 kg/hm<sup>2</sup>;T6:施氮量 300 kg/hm<sup>2</sup>。图柱上不同小写字母表示差异显著( $P<0.05$ )。

图6 不同施氮量对土壤酶活性的影响

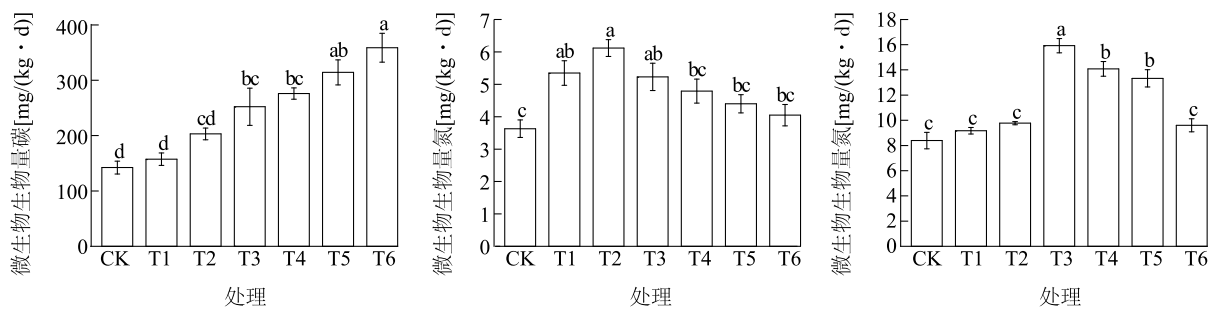
Fig.6 Effects of different nitrogen application rates on soil enzyme activities



CK:不施氮肥对照;T1:施氮量 50 kg/hm<sup>2</sup>;T2:施氮量 100 kg/hm<sup>2</sup>;T3:施氮量 150 kg/hm<sup>2</sup>;T4:施氮量 200 kg/hm<sup>2</sup>;T5:施氮量 250 kg/hm<sup>2</sup>;T6:施氮量 300 kg/hm<sup>2</sup>。图柱上不同小写字母表示差异显著( $P<0.05$ )。

图7 不同施氮量对玉米根系活力和根相对表面积的影响

Fig.7 Effects of different nitrogen application rates on root activity and relative root surface area of maize



CK:不施氮肥对照;T1:施氮量 50 kg/hm<sup>2</sup>;T2:施氮量 100 kg/hm<sup>2</sup>;T3:施氮量 150 kg/hm<sup>2</sup>;T4:施氮量 200 kg/hm<sup>2</sup>;T5:施氮量 250 kg/hm<sup>2</sup>;T6:施氮量 300 kg/hm<sup>2</sup>。图柱上不同小写字母表示差异显著( $P<0.05$ )。

图8 不同施氮量对土壤微生物养分库的影响

Fig.8 Effects of different nitrogen application rates on soil microbial nutrient pools

表 3 玉米农艺性状、产量构成要素和根际微生物生态系统相对指标的相关性分析结果

Table 3 Correlation analysis of maize agronomic traits, yield components and rhizosphere microecosystem indicators

指标	PH	SD	SPAD	PW	EW	SW	KW	SL	ED	BTL	EN	KPR	GNE	HGW	EPP	Y	RL	RSA	RAD	RV	RRSA	RAC	UE	PE	SE	CE	MBC	MBN	MBP									
PH	1.00*																																					
SD	0.97*	1.00*																																				
SPAD	0.99*	0.97*	1.00*																																			
PW	0.92*	0.93*	0.93*	1.00*																																		
EW	0.96*	0.99*	0.98*	0.96*	1.00*																																	
SW	0.84*	0.83*	0.84*	0.97*	0.86*	1.00*																																
KW	0.94*	0.99*	0.96*	0.96*	1.00*	0.86*	1.00*																															
SL	0.94*	0.88*	0.91*	0.74	0.84*	0.61	0.81*	1.00*																														
ED	0.98*	0.94*	0.95*	0.87*	0.91*	0.78*	0.89*	0.93*	1.00*																													
BTL	-0.99*	-0.96*	-0.99*	-0.92*	-0.95*	-0.83*	-0.94*	-0.92*	-0.97*	1.00*																												
EN	0.56	0.51	0.58	0.37	0.50	0.24	0.49	0.57	0.61	-0.62	1.00*																											
KPR	0.98*	0.95*	0.99*	0.89*	0.94*	0.79*	0.92*	0.95*	0.95*	-0.98*	0.58	1.00*																										
GNE	0.99*	0.96*	0.99*	0.89*	0.95*	0.79*	0.93*	0.94*	0.96*	-1.00*	0.66	0.99*	1.00*																									
HGW	-0.55	-0.43	-0.49	-0.22	-0.35	-0.10	-0.29	0.79*	-0.58	0.55	-0.47	-0.60	-0.59	1.00*																								
EPP	0.98*	0.98*	0.95*	0.91*	0.95*	0.82*	0.94*	0.90*	0.97*	-0.97*	0.54	0.94*	0.96*	-0.51	1.00*																							
Y	0.94*	0.96*	0.96*	0.96*	0.98*	0.90*	0.98*	0.77*	0.90*	-0.95*	0.58	0.91*	0.93*	-0.26	0.93*	1.00*																						
RL	0.73	0.81*	0.70	0.77*	0.81*	0.85*	0.83*	0.51	0.69	-0.69	0.08	0.63	0.65	0.03	0.80*	0.80*	1.00*																					
RSA	0.10	0.13	0.15	0.45	0.21	0.60	0.23	-0.17	-0.01	-0.10	-0.45	0.08	0.03	0.53	0.06	0.26	0.46	1.00*																				
RAD	0.45	0.28	0.47	0.39	0.31	0.43	0.27	0.49	0.38	-0.47	0.18	0.54	0.47	-0.52	0.30	0.30	-0.04	0.29	1.00*																			
RV	0.48	0.41	0.52	0.66	0.48	0.76*	0.47	0.32	0.36	-0.49	-0.09	0.51	0.45	-0.02	0.37	0.50	0.40	0.81*	0.81*	1.00*																		
RRSA	-0.73	-0.62	-0.77*	-0.68	-0.65	-0.67	-0.62	-0.72	-0.64	0.75	-0.37	-0.81*	-0.75	0.53	-0.59	-0.64	-0.27	-0.31	-0.92*	-0.81*	1.00*																	
RAC	0.64	0.52	0.62	0.69	0.54	0.78*	0.52	0.51	0.56	-0.66	0.21	0.63	0.62	-0.34	0.58	0.58	0.44	0.53	0.77*	0.83*	-0.80*	1.00*																
UE	0.66	0.56	0.68	0.64	0.58	0.64	0.56	0.66	0.54	-0.68	0.22	0.73	0.67	-0.53	0.55	0.55	0.28	0.38	0.91**	0.83*	-0.96**	0.86*	1.00*															
PE	0.76*	0.69	0.79*	0.84*	0.73	0.87*	0.72	0.63	0.70	-0.76*	0.19	0.79*	0.73	-0.24	0.65	0.74	0.55	0.58	0.75	0.89**	-0.88**	0.79*	0.81*	1.00*														
SE	0.37	0.21	0.37	0.42	0.23	0.54	0.21	0.30	0.32	-0.41	0.09	0.40	0.37	-0.29	0.27	0.29	0.10	0.51	0.88**	0.82*	-0.77*	0.92**	0.81*	1.00*														
CE	0.35	0.24	0.32	0.01	0.18	-0.12	0.13	0.64	0.33	-0.35	0.36	0.45	0.40	-0.93*	0.27	0.06	-0.27	-0.55	0.54	-0.01	-0.50	0.17	0.51	0.14	0.20	1.00*												
MBC	0.77*	0.86*	0.78*	0.92**	0.89**	0.88**	0.90**	0.53	0.72	-0.75	0.25	0.69	0.72	0.08	0.81*	0.90**	0.96**	0.46	0.01	0.45	-0.36	0.43	0.31	0.61	0.10	-0.28	1.00*											
MBN	0.37	0.25	0.39	0.11	0.24	0	0.20	0.61	0.32	-0.40	0.45	0.50	0.45	-0.82*	0.25	0.16	-0.30	-0.36	0.72	0.21	-0.69	0.32	0.68	0.30	0.38	0.93*	-0.23	1.00*										
MBP	0.56	0.45	0.56	0.68	0.48	0.80*	0.47	0.39	0.51	-0.59	0.16	0.56	0.55	-0.15	0.49	0.56	0.42	0.65	0.75	0.88**	-0.77*	0.96**	0.77*	0.84*	0.93*	-0.01	0.44	0.18	1.00*									

PH:株高;SD:茎粗;SPAD:叶绿素相对含量;PW:单株株重;EW:穗重;SW:秸秆重;KW:籽粒重;SL:穗长;ED:穗粗;BTL:秃尖长;EN:穗行数;KPR:行粒数;GNE:穗粒数;HGW:百粒重;EPP:单株穗数;Y:产量;RL:根长;RSA:根长;RAD:根直径;RV:根体积;RRSA:根相对表面积;RAC:根系活力;UE:土壤脲酶活性;PE:土壤蔗糖酶活性;SE:土壤磷酸酶活性;CE:土壤过氧化氢酶活性;MBC:土壤微生物量碳含量;MBN:土壤微生物量氮含量;MBP:土壤微生物量磷含量。\*:在0.05水平上相关性显著;\*\*在0.01水平上相关性显著。

### 3 讨论与结论

#### 3.1 施氮量对玉米生物学形态建成和产量的影响

玉米的氮肥施用过量已成为制约玉米产量与品质提升、阻碍农业可持续发展的瓶颈<sup>[25-28]</sup>。本研究发现,随着施氮量的增加,玉米地上部先增长后趋于平缓,与前人研究结论<sup>[29-31]</sup>一致。适量施氮可促进根系发育,扩大根表面积与体积,增强根系对水分和养分吸收能力,而过量施氮则抑制根系生长<sup>[32-33]</sup>。本研究发现,随着施氮量的增加,玉米根直径和根体积呈先升高后降低的变化趋势。玉米地上部生长指标与地下部生长指标中,根长与茎粗、单株重、秸秆重存在显著相关,根体积与秸秆重存在显著相关,揭示玉米地上部与地下部生物量增长的同源性,可能与地上部地下部维管束协同生长存在内在关联。

增施氮肥可延长玉米灌浆期并提高灌浆速率,从而提升产量<sup>[34-35]</sup>。本研究发现,随施氮量的增加,玉米产量呈先上升后下降的变化趋势。T5 处理玉米产量显著高于 CK、T1 处理、T2 处理、T3 处理、T4 处理( $P<0.05$ )。

#### 3.2 施氮量对玉米根际土壤酶活性和微生物的影响

施氮量是影响土壤酶活性的重要因素,增加施氮量可提高土壤酶活性,但施氮量过高会导致土壤酶活性降低<sup>[36-38]</sup>。本研究发现,随施氮量的增加,土壤脲酶活性、磷酸酶活性、蔗糖酶活性、过氧化氢酶活性呈先升高后降低的变化趋势。玉米根系生长发育对土壤微生物活性具有重要影响。本研究发现土壤脲酶活性与根直径呈极显著正相关( $P<0.01$ ),与根体积、根系活力呈显著正相关( $P<0.05$ ),与根相对表面积呈极显著负相关( $P<0.01$ )。土壤磷酸酶活性与根体积呈极显著正相关( $P<0.01$ ),与根系活力呈显著正相关( $P<0.05$ ),与根相对表面积呈极显著负相关( $P<0.01$ )。土壤蔗糖酶活性与根直径、根系活力呈极显著正相关( $P<0.01$ ),与根体积呈显著正相关( $P<0.05$ ),与根相对表面积呈显著负相关( $P<0.05$ )。

本研究发现,适宜的施氮量能够显著提升微生物生物量碳(MBC)含量、微生物生物量氮(MBN)含量、微生物生物量磷(MBP)含量。微生物生物量碳(MBC)含量是评价土壤生态功能的核心指标<sup>[39]</sup>。MBC 含量与玉米单株重、穗重、秸秆重、籽粒重、产量、根长呈极显著正相关( $P<0.01$ ),与株高、茎粗、

叶绿素相对含量、单株穗数呈显著正相关( $P<0.05$ )。表明土壤微生物通过固碳作用提升了有机质分解与养分周转效率,为玉米地上部生长创造了适宜的土壤环境。微生物生物量氮(MBN)含量与百粒重呈显著负相关( $P<0.05$ )。在玉米生育后期,氮素被土壤微生物固定,导致氮素向籽粒的转移受到阻碍,进而影响百粒重。微生物生物量磷(MBP)含量与根体积、根系活力呈极显著正相关( $P<0.01$ ),与秸秆重呈显著正相关( $P<0.05$ ),与根相对表面积呈显著负相关( $P<0.05$ )。这可能是由于微生物通过分泌有机酸和磷酸酶溶解难溶性磷,提高根际有效磷浓度,在较高有效磷浓度条件下,玉米根系发生适应性改变,表现为细根分枝减少、根体积增大。

#### 参考文献:

- [1] DARYANTO S, LANG L X, JACINTHE P A. Global synthesis of drought effects on maize and wheat production[J]. *PLoS One*, 2017, 11(5): e0156362.
- [2] TANG H J, ZHANG L, XIE X Q, et al. Resilience of maize to environmental stress: insights into drought and heat tolerance[J]. *International Journal of Molecular Sciences*, 2025, 26(11): 5274.
- [3] 王红丽,张绪成,魏胜文. 气候变化对西北半干旱区旱作农业的影响及解决途径[J]. *农业资源与环境学报*, 2015, 32(6): 517-524.
- [4] 李成. 宁夏盐池荒漠草原生态系统光能利用效率动态特征研究[D]. 北京:北京林业大学, 2020.
- [5] 肖让,康永德,张永玲,等. 河西走廊制种玉米不同施肥与灌溉定额优化研究[J]. *节水灌溉*, 2021(12): 30-37.
- [6] 江景涛,杨然兵,鲍余峰,等. 水肥一体化技术的研究进展与发展趋势[J]. *农机化研究*, 2021, 43(5): 1-9.
- [7] HOU Y P, XU X P, KONG L L, et al. Improving nitrogen contribution in maize post-tasseling using optimum management under mulch drip irrigation in the semiarid region of northeast China[J]. *Frontiers in Plant Science*, 2022, 13: 1095314.
- [8] 严富来,张富仓,范兴科,等. 基于评价模型的宁夏沙土春玉米最佳灌水施氮量研究[J]. *农业机械学报*, 2020, 51(9): 258-265.
- [9] 刘云柯,李丰琇,孙飞雪,等. 干旱区覆膜滴灌和施氮量对夏玉米生长发育和产量的影响[J]. *玉米科学*, 2023, 31(4): 140-147.
- [10] 李鸣钰,陈妮娜,米娜,等. 干旱条件下施氮对春玉米生长发育、产量及籽粒品质的影响[J]. *生态学杂志*, 2024, 43(11): 3291-3299.
- [11] 魏庆薪,于振文,张永丽,等. 氮磷钾用量对小麦冠层不同层次光截获和干物质分配的影响[J]. *麦类作物学报*, 2020, 40(11): 1351-1356.

- [12] XU M Z, ZHANG Y J, WANG Y H, et al. Optimizing nitrogen input and nitrogen use efficiency through soil nitrogen balance in a long-term winter wheat-summer maize rotation system in North China[J]. *European Journal of Agronomy*, 2023, 149:126908.
- [13] SUN J, LU X R, WANG S, et al. Biochar blended with nitrogen fertilizer promotes maize yield by altering soil enzyme activities and organic carbon content in black soil[J]. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 2023, 20(6):4939.
- [14] LIU E K, YAN C R, MEI X R, et al. Long-term effect of chemical fertilizer, straw, and manure on soil chemical and biological properties in northwest China[J]. *Geoderma*, 2010, 158(3/4):173-180.
- [15] NAVEEN S, BALACHANDAR D. Extracellular polymeric substances of plant-growth-promoting rhizobacteria modulate the positive plant-soil feedback in maize via soil conditioning[J]. *The Science of the Total Environment*, 2025, 975:179256.
- [16] MANENT L, MACHOLDT J, GARCIA F O, et al. Resilience of maize, wheat, and soybean cropping systems as affected by fertilization: analysis of a long-term field network[J]. *Agronomy Journal*, 2023, 115(4):2017-2029.
- [17] KHAN Z, ZHANG K K, KHAN N M, et al. Effects of biochar persistence on soil physicochemical properties, enzymatic activities, nutrient utilization, and crop yield in a three-year rice-rapeseed crop rotation[J]. *European Journal of Agronomy*, 2024, 154:127096.
- [18] HOLMAN J D, MAULER P S, OBOUR A K, et al. Forage rotation and tillage effects on soil physical and chemical properties[J]. *Agrosystems, Geosciences & Environment*, 2024, 8(1):e70031.
- [19] 张月应, 张瑞华, 程宏州, 等. 玉米新品种天赐 19 高产栽培技术[J]. *种子科技*, 2017, 35(8):52, 54.
- [20] 高陆旭. 基于水肥一体化的饲用玉米高效栽培技术与效益分析[D]. 银川: 宁夏大学, 2017.
- [21] 白宝璋, 金锦子, 白崧, 等. 玉米根系活力 TTC 测定法的改良[J]. *玉米科学*, 1994(4):44-47.
- [22] 关松荫. 土壤酶及其研究法[M]. 北京: 中国农业出版社, 1986.
- [23] 马源, 杨洁, 张德罡, 等. 高寒草甸退化对祁连山土壤微生物生物量和氮矿化速率的影响[J]. *生态学报*, 2020, 40(8):2680-2690.
- [24] 王成宝, 霍琳, 温美娟, 等. 灌耕灰钙土耕层物理性质及其对玉米产量的影响[J]. *甘肃农业科技*, 2021, 52(7):24-32.
- [25] 翟娟, 薛军, 张园梦, 等. 水肥一体化条件下施氮量对密植春玉米茎秆抗倒伏性状的影响[J]. *玉米科学*, 2021, 29(5):137-144.
- [26] 武阳春, 高婷婷, 侯宗运, 等. 玉米自交系在苗期耐低氮能力的鉴定与筛选[J]. *江苏农业科学*, 2024, 52(22):62-68.
- [27] 戴明, 冯鹏羽, 郭海滨, 等. 氮肥运筹对东北寒区春玉米氮素吸收、利用及淀粉合成的影响[J]. *江苏农业科学*, 2024, 52(7):101-109.
- [28] 饶东云, 周锋, 周世永, 等. 施氮量和磷肥运筹对青贮玉米产量及养分利用的影响[J]. *南方农业学报*, 2023, 54(1):90-101.
- [29] 赵笃勤, 刘淑慧, 赵凯超. 玉米-大豆间作和减量施氮对玉米生长、产量及土壤硝态氮含量的影响[J]. *西北农业学报*, 2020, 29(8):1159-1166.
- [30] 李波, 张凌一, 魏新光, 等. 滴灌施肥条件下不同施氮模式对玉米生长和产量的影响[J]. *中国农村水利水电*, 2017(2):14-18.
- [31] 刘洋, 栗岩峰, 李久生. 东北黑土区膜下滴灌施氮管理对玉米生长和产量的影响[J]. *水利学报*, 2014, 45(5):529-536.
- [32] 袁鹏伟, 杨树青, 张万锋, 等. 盐渍化耕地秸秆深埋配施氮对玉米根系及产量的影响[J]. *中国土壤与肥料*, 2024(1):86-94.
- [33] 米国华, 陈范骏, 吴秋平, 等. 玉米高效吸收氮素的理想根构型[J]. *中国科学: 生命科学*, 2010, 40(12):1112-1116.
- [34] 陈浩源, 张玉斌, 朱建国, 等. 氮素追施对玉米花后光合特性和籽粒灌浆特征的影响[J]. *玉米科学*, 2024, 32(2):135-143.
- [35] 刘文童, 监立强, 郭晋杰, 等. 玉米穗部性状及其一般配合力的关联分析[J]. *植物遗传资源学报*, 2020, 21(3):706-715.
- [36] 吕艳杰, 于海燕, 姚凡云, 等. 秸秆还田与施氮对黑土区春玉米田产量、温室气体排放及土壤酶活性的影响[J]. *中国生态农业学报*, 2016, 24(11):1456-1463.
- [37] 朱利霞, 岳善超, 沈玉芳, 等. 施氮和覆膜对旱作春玉米农田土壤微生物量和土壤酶活性的影响[J]. *干旱地区农业研究*, 2019, 37(1):130-136.
- [38] 王爱萍, 姜彧宸, 冯月, 等. 施氮与种植方式对北方旱作农田土壤酶活力及养分含量的影响[J]. *华北农学报*, 2023, 38(3):130-138.
- [39] 吕宁宁, 刘子晗, 杨培蓉, 等. 不同遮荫处理对杉木幼苗生长及土壤碳氮代谢酶活性的影响[J]. *生态学报*, 2024, 44(9):3600-3611.

(责任编辑:成纾寒)