



**宛氏拟青霉提取物对玉米产量及氮代谢相关酶的影响**

孟庆敏, 李泽丽, 李明洋, 陈琪, 陈大印, 杜龙旭, 刘之广

引用本文:

孟庆敏, 李泽丽, 李明洋, 陈琪, 陈大印, 杜龙旭, 刘之广. 宛氏拟青霉提取物对玉米产量及氮代谢相关酶的影响[J]. 农业资源与环境学报, 2022, 39(6): 1145–1154.

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.13254/j.jare.2021.0672>

**您可能感兴趣的其他文章**

**Articles you may be interested in**

**控释尿素对水稻生理特性、氮肥利用率及土壤硝态氮含量的影响**

杜君, 孙克刚, 张运红, 和爱玲, 孙克振

农业资源与环境学报. 2016, 33(2): 134–141 <https://doi.org/10.13254/j.jare.2015.0233>

**控释尿素对春玉米产量、氮效率及氮素平衡的影响**

姬景红, 李玉影, 刘双全, 佟玉欣, 任桂林, 李杰, 刘颖, 张明怡

农业资源与环境学报. 2017, 34(2): 153–160 <https://doi.org/10.13254/j.jare.2016.0231>

**宛氏拟青霉提取物对樱桃萝卜产量及品质的影响**

贾春花, 刘之广, 张民, 贾继文, 郑磊, 王庆彬, 王洪凤

农业资源与环境学报. 2019, 36(2): 176–183 <https://doi.org/10.13254/j.jare.2018.0138>

**养分专家系统推荐施肥对夏玉米生理特性及产量的影响**

王丹丹, 李岚涛, 韩本高, 张倩, 盛开, 王宜伦

农业资源与环境学报. 2022, 39(1): 107–117 <https://doi.org/10.13254/j.jare.2020.0677>

**聚天门冬氨酸尿素对水稻产量及田面水氮素变化的综合影响**

王娜, 徐嘉翼, 张鑫, 隋世江, 叶鑫, 牛世伟

农业资源与环境学报. 2021, 38(1): 96–103 <https://doi.org/10.13254/j.jare.2020.0072>



关注微信公众号，获得更多资讯信息

孟庆敏, 李泽丽, 李明洋, 等. 宛氏拟青霉提取物对玉米产量及氮代谢相关酶的影响[J]. 农业资源与环境学报, 2022, 39(6): 1145-1154.

MENG Q M, LI Z L, LI M Y, et al. Effects of extracts from *Paecilomyces variotii* on maize yield and nitrogen metabolism-related enzymes[J]. *Journal of Agricultural Resources and Environment*, 2022, 39(6): 1145-1154.



开放科学 OSID

# 宛氏拟青霉提取物对玉米产量及氮代谢相关酶的影响

孟庆敏<sup>1</sup>, 李泽丽<sup>1\*</sup>, 李明洋<sup>1</sup>, 陈琪<sup>1</sup>, 陈大印<sup>2</sup>, 杜龙旭<sup>1</sup>, 刘之广<sup>1</sup>

(1. 土肥高效利用国家工程研究中心, 山东农业大学资源与环境学院, 山东 泰安 271018; 2. 山东蓬勃生物科技有限公司, 山东 泰安 271018)

**摘要:**为探讨野生沙棘根系内生真菌宛氏拟青霉菌株的提取物(ZNC)对作物产量及氮肥利用率(NUE)的影响,以玉米(*Zea mays* L.)为试验材料,设置不施氮肥(CK)、单施尿素(U)、尿素配施ZNC灌根(U+ZNC)3个处理,分别于2017、2018年进行盆栽试验,研究尿素配施ZNC灌根对玉米产量、NUE、土壤养分、光合速率及根系、叶片中氮代谢相关酶活性的影响。结果表明:相比于U处理,两年U+ZNC处理玉米产量分别显著提高6.75%和8.22%,氮肥利用率分别显著提高13.05、21.08个百分点。拔节期,U+ZNC处理土壤铵态氮含量较U处理显著增加104.63%,叶片净光合速率显著提升62.37%。大喇叭口期,与U处理相比,U+ZNC处理根系生长素(IAA)及谷胱甘肽还原酶(GSR)、硝酸还原酶(NR)浓度分别提高60.42%、12.46%、68.38%;叶片氮素代谢酶GSR、NR、亚硝酸还原酶(NiR)浓度分别显著提高88.32%、46.27%、56.66%,磷酸烯醇式丙酮酸羧化酶(PEPC)和丙酮酸磷酸双激酶(PPDK)浓度显著提高31.44%和71.07%。研究表明,本试验条件下,尿素配施宛氏拟青霉提取物灌根可增强土壤养分供应强度,提高玉米关键生育时期根系和叶片氮代谢相关酶活性,增强光合酶活性,提高光合速率,显著提高产量和氮肥利用率。

**关键词:**尿素;宛氏拟青霉;灌根;玉米;酶活性;产量;氮肥利用率

中图分类号:S513

文献标志码:A

文章编号:2095-6819(2022)06-1145-10

doi: 10.13254/j.jare.2021.0672

## Effects of extracts from *Paecilomyces variotii* on maize yield and nitrogen metabolism-related enzymes

MENG Qingmin<sup>1</sup>, LI Zeli<sup>1\*</sup>, LI Mingyang<sup>1</sup>, CHEN Qi<sup>1</sup>, CHEN Dayin<sup>2</sup>, DU Longxu<sup>1</sup>, LIU Zhiguang<sup>1</sup>

(1. National Engineering Research Center for Efficient Utilization of Soil and Fertilizer Resources/College of Resources and Environment, Shandong Agricultural University, Tai'an 271018, China; 2. Pengbo Biology Technology Ltd. Co., Tai'an 271018, China)

**Abstract:** To investigate the effects of the extract of the endophytic fungus *Paecilomyces variotii* strain from wild sea buckthorn roots (ZNC) on crop yield and nitrogen use efficiency (NUE), pot experiments were conducted in 2017 and 2018. The effects of urea (U) combined with ZNC root irrigation on maize yield, NUE, soil nutrient changes, photosynthetic rate, and nitrogen metabolism-related enzymes in the roots and leaves were also investigated. Maize (*Zea mays* L.) was used as the experimental material to set three treatments: no nitrogen fertilizer (CK), single application of U, and combined application of U with ZNC root irrigation (U+ZNC). Maize yield under U+ZNC treatment was significantly increased by 6.75% and 8.22% in two consecutive years, respectively, compared with that of U treatment; NUE increased 13.05 percentage points and 21.08 percentage points, respectively. During the jointing period, soil ammonium nitrogen content under U+ZNC treatment was significantly higher than that under U treatment by 104.63%, and the net photosynthetic rate was significantly increased by 62.37%. In the 12-leaf collar period, the concentrations of auxin, glutathione reductase (GSR), and nitrate reductase (NR) in the roots under U+ZNC treatment were increased by 60.42%, 12.46%, and 68.38%, respectively, compared with those under U treatment. The concentrations of nitrogen metabolic enzymes GSR, NR, and NiR in the leaves were significantly increased by 88.32%, 46.27%, and 56.66%, respectively, and the concentrations of phosphoenolpyruvate carboxylase (PEPC) and pyruvate phosphate dikinase (PPDK) were significantly increased by 31.44% and 71.07%, respectively. Under the conditions of this study, U combined with ZNC root irrigation can

收稿日期: 2021-09-30 录用日期: 2021-12-02

作者简介: 孟庆敏(1998—),男,山东德州人,硕士研究生,从事新型肥料的研制与应用研究。E-mail: mqmin1998@163.com

\*通信作者: 李泽丽 E-mail: zeli2016@163.com

基金项目: 山东省重点研发计划项目(2019GNC106011); 先大创新奖学金(250005)

Project supported: Key Research and Development Program of Shandong Province(2019GNC106011); Xianda Innovation Scholarship(250005)

enhance the soil nutrient supply intensity, improve the activities of nitrogen metabolism-related enzymes in the roots and leaves of maize at key growth stages, enhance the activity of photosynase to increase the photosynthetic rate, and improve the yield and NUE.

**Keywords:** urea; *Paecilomyces variotii*; root irrigation; maize; enzyme activity; yield; nitrogen use efficiency

玉米(*Zea mays* L.)在世界各地广泛种植,在国际粮食生产中具有重要作用<sup>[1]</sup>。为了追求高产,农民长期不合理施用氮肥,造成氮肥利用率低、资源浪费及环境污染等问题。据统计,2020年底我国玉米氮肥平均利用率为40.6%<sup>[2]</sup>,农田土壤氮损失的主要途径是氮素挥发和淋溶<sup>[3]</sup>。尿素施入土壤后,经土壤酶和微生物的作用,矿化为 $\text{NO}_3^-$ -N和 $\text{NH}_4^+$ -N, $\text{NH}_4^+$ 易和 $\text{OH}^-$ 反应产生氨,且产生的 $\text{CO}_2$ 和 $\text{OH}^-$ 又会提升局部土壤pH值,降低土壤质量。北方玉米田土壤较干旱,土壤中 $\text{NH}_4^+$ 易通过硝化作用转化为 $\text{NO}_3^-$ , $\text{NO}_3^-$ 在田间土壤含水量超过田间饱和持水量时通过淋溶等方式进入水体,造成水体污染。活化土壤养分可促进玉米根系对氮素的吸收、利用和转运,是提高玉米产量和氮肥利用率的关键因素<sup>[4]</sup>。

土壤微生物在土壤养分矿化和循环过程中具有重要作用,可以协助植物从土壤中获取营养元素,与土壤养分的转化和吸收密切相关<sup>[5]</sup>。但是,外源微生物与土著微生物存在竞争,定殖与扩繁困难,且施用成本较高,通过直接施用微生物代谢物可以弥补上述缺点。刘乐等<sup>[6]</sup>研究得出纳豆酸酵菌发酵制备的聚谷氨酸可以改善土壤性质,增强土壤团聚体稳定性,维持土壤养分平衡等。ZHANG等<sup>[7]</sup>的研究表明,从白蚁共生放线菌的代谢物中分离得到的聚酮类化合物可以显著抑制植物致病菌水稻稻瘟病菌和苹果腐烂病菌,提高作物抗病性。

宛氏拟青霉是从野生沙棘根部分离出的一种内生真菌,再经发酵提取获得提取物(ZNC)。ZNC中含

有33.33%的糖类、19.24%的蛋白质、7.4%的核苷酸、3.75%的脂类、28.96%的氨基酸和7.33%其他成分<sup>[8]</sup>。WANG等<sup>[8]</sup>采用中药色谱指纹图谱(SESTCMCF)、多抗体酶联免疫吸附试验(MA-ELISA)和大田试验相结合的相似度评价体系,验证了ZNC的质量一致性和高活性。王晓琪等<sup>[9]</sup>通过水稻水培试验发现ZNC在 $0.05\sim 0.50\ \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ 浓度范围内时,可以提高叶片光合速率,增加幼苗根系质量,显著降低根系和叶片丙二醛含量。CHEN等<sup>[10]</sup>研究发现,ZNC与包膜磷酸二铵配施可提升玉米对养分的吸收,提高土壤肥力,促进根系生长,减少施肥量和施肥次数。

前人研究多集中于ZNC在作物水培试验中促生抗逆的效果及其调控土壤和肥料养分转化的作用,然而尿素配施ZNC灌根对玉米生长及生理生化特征的影响鲜有报道。本研究通过玉米盆栽试验,探讨ZNC灌根处理对提高玉米产量及氮代谢相关酶活性的影响,为尿素配施ZNC灌根在玉米生产上的应用和推广提供依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 供试材料

试验在山东省泰安市山东农业大学南校区科技创新园( $117^{\circ}09'48''\text{E}$ , $36^{\circ}09'40''\text{N}$ )进行。研究地点属温带大陆性季风气候,年平均气温为 $13.2\ ^{\circ}\text{C}$ ,年平均降雨量 $645.9\ \text{mm}$ (图1)。供试玉米品种为郑单958,该品种在华北平原广泛栽培。供试生物刺激素宛氏拟青霉提取物(ZNC),购自山东省泰安市蓬勃生

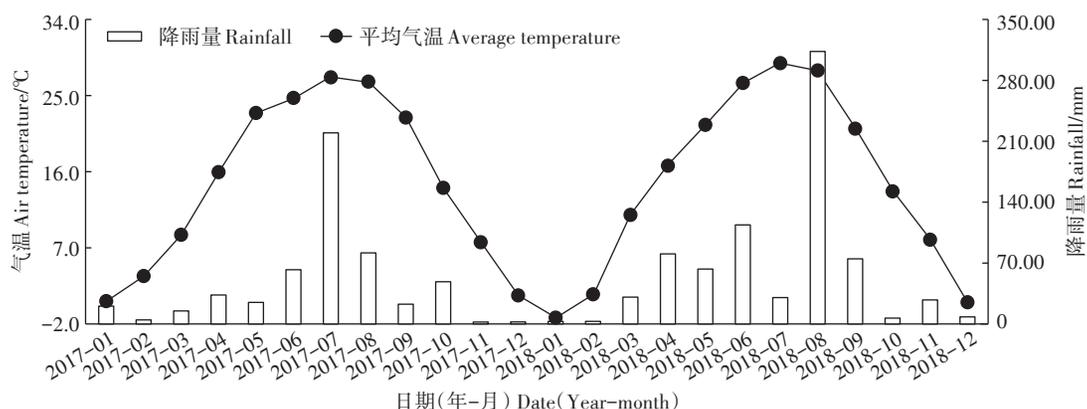


图1 试验地2017—2018年气温及降雨量

Figure 1 Air temperature and rainfall in the experimental site from 2017 to 2018

物科技有限公司。供试容器为陶土盆,上部直径30 cm、高36 cm,盆底铺沙10 kg,每盆装20 kg干土。供试土壤取自试验地0~20 cm耕层土壤,土壤类型为棕壤,在中国土壤系统分类中为普通筒育湿润淋溶土(Typic Hapli-Udic Argosols)。土壤pH值为7.85(土水比1:2.5)。土壤基础养分含量:全氮 $0.65\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ ,有机质 $12.01\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ ,硝态氮 $72.35\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ ,铵态氮 $9.44\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ ,有效磷 $13.22\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ ,速效钾 $92.22\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 。

## 1.2 试验设计

盆栽试验时间为2017年6月至2018年9月,试验共设3个处理:①不施氮肥(CK);②尿素(U);③尿素配施ZNC灌根(U+ZNC)。每个施肥处理设4次重复,共12盆。施肥量为每千克土壤中施入N 0.20 g、 $\text{P}_2\text{O}_5$  0.07 g和 $\text{K}_2\text{O}$  0.20 g,氮肥50%随其他肥料基施,50%于拔节期以追肥施入。ZNC分别于播种期与拔节期灌根,用量为 $0.03\text{ mg}\cdot\text{盆}^{-1}$ 。

## 1.3 测定项目及方法

分别在五叶期(2018年7月9日)、拔节期(7月20日)、大喇叭口期(8月13日)、吐穗后期(9月11日)和成熟期(9月29日)测量株高和茎粗,以玉米茎基部到植株展开叶顶端的长度为株高,以茎基部第一节位置的直径为茎粗。于玉米拔节期取植株最大功能叶的中间部位,采用SPAD-502叶绿素仪(日本Minola公司)测定玉米叶片SPAD值;用LI-6400便携式光合仪(美国LI-COR公司)测定叶片净光合速率( $\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ ,以 $\text{CO}_2$ 计)、蒸腾速率( $\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ ,以 $\text{H}_2\text{O}$ 计)和气孔导度( $\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ ,以 $\text{H}_2\text{O}$ 计)等光合参数;盆栽试验中,使用土钻从0~20 cm深的土层三点法收集土壤样品,然后风干、研磨、过2 mm筛,最后放入纸袋中储存和进一步分析;土壤无机氮含量(土壤鲜样)用 $0.01\text{ mol}\cdot\text{L}^{-1}\text{ CaCl}_2$ 浸提(土水比1:10),浸提液中铵态氮和硝态氮含量采用连续流动注射分析仪(AA3,

Bran-Luebbe,德国)测定;土壤有效磷含量用 $0.5\text{ mol}\cdot\text{L}^{-1}\text{ NaHCO}_3$ (pH 8.5)浸提-钼锑抗比色法测定;土壤速效钾含量用 $1.0\text{ mol}\cdot\text{L}^{-1}\text{ NH}_4\text{OAc}$ (pH 7.0)浸提-火焰光度法测定。收集大喇叭口期玉米最大的功能叶,清洗叶片并去除表面的土壤或污染物,测定样品质量并等分,然后用液氮处理,处理后的样品储存在干冰上运回实验室在超低温冰箱中储存,进行相关指标测定。生长素(IAA)、赤霉素(GA)、谷胱甘肽还原酶(GSR)、谷氨酰胺合成酶(GS)、硝酸还原酶(NR)、亚硝酸还原酶(NiR)、磷酸烯醇式丙酮酸羧化酶(PEPC)、谷氨酸合成酶(GOGAT)、谷氨酸脱氢酶(GLDH)、丙酮酸磷酸双激酶(PPDK)的测定采用酶联免疫法<sup>[11]</sup>。成熟期,玉米秸秆和籽粒先在 $105\text{ }^\circ\text{C}$ 烘箱杀青15 min,然后放在 $65\text{ }^\circ\text{C}$ 的烘箱中烘至恒质量后称量,磨样机磨碎后测定秸秆和籽粒的含氮量计算氮肥利用率。

氮肥利用率(%)=(施氮处理秸秆和籽粒氮累积量-不施氮处理秸秆和籽粒氮累积量)/施氮量 $\times 100$

## 1.4 数据处理

数据的处理与统计分析通过Excel 2016和SAS 8.2完成,包括ANOVA方差分析及Duncan差异显著性检验,比较不同处理间在 $P<0.05$ 水平的差异显著性,并采用Excel 2016和R语言软件绘图。

## 2 结果与分析

### 2.1 尿素配施ZNC灌根处理对玉米产量和肥料利用率的影响

不同处理对玉米产量及肥料利用率的影响表现出一定的差异性(表1)。与施用常规尿素处理(U)相比,U+ZNC处理2017年玉米增产6.75%,生物量无显著差异;2018年玉米增产8.22%,生物量提高9.38%,百粒重、穗行数与行粒数均无显著差异;U+ZNC处理2017

表1 不同处理的玉米产量和肥料利用率

Table 1 Yield and fertilizer use efficiency of maize under different treatments

年份 Year	处理 Treatment	籽粒实收产量/( $\text{g}\cdot\text{盆}^{-1}$ ) Grain yield/( $\text{g}\cdot\text{pot}^{-1}$ )	生物量/( $\text{g}\cdot\text{盆}^{-1}$ ) Dry biomass/( $\text{g}\cdot\text{pot}^{-1}$ )	百粒重 100-seeds weight/g	穗行数 Rows per ear	行粒数 Grains per row	氮肥利用率 N use efficiency/%
2017	CK	39.17 $\pm$ 4.16b	86.42 $\pm$ 5.55b	25.41 $\pm$ 1.45a	13.00 $\pm$ 1.08a	12.00 $\pm$ 0.58b	—
	U	175.17 $\pm$ 4.00a	293.85 $\pm$ 6.75a	29.44 $\pm$ 1.71a	14.50 $\pm$ 0.50a	32.75 $\pm$ 1.65a	31.72
	U+ZNC	187.00 $\pm$ 7.22a	311.62 $\pm$ 5.17a	28.90 $\pm$ 0.61a	15.00 $\pm$ 0.58a	34.25 $\pm$ 1.11a	44.77
2018	CK	85.17 $\pm$ 1.44c	162.07 $\pm$ 4.98c	20.97 $\pm$ 0.73b	12.00 $\pm$ 0.01b	25.00 $\pm$ 2.08b	—
	U	194.19 $\pm$ 2.62b	328.95 $\pm$ 10.14b	28.83 $\pm$ 1.52a	14.00 $\pm$ 1.15ab	36.67 $\pm$ 1.20a	25.37
	U+ZNC	210.15 $\pm$ 4.32a	359.79 $\pm$ 7.19a	31.10 $\pm$ 0.15a	15.33 $\pm$ 0.67a	35.00 $\pm$ 2.65a	46.45

注:同列数据后不同小写字母表示同一年份处理间差异显著( $P<0.05$ ,LSD)。

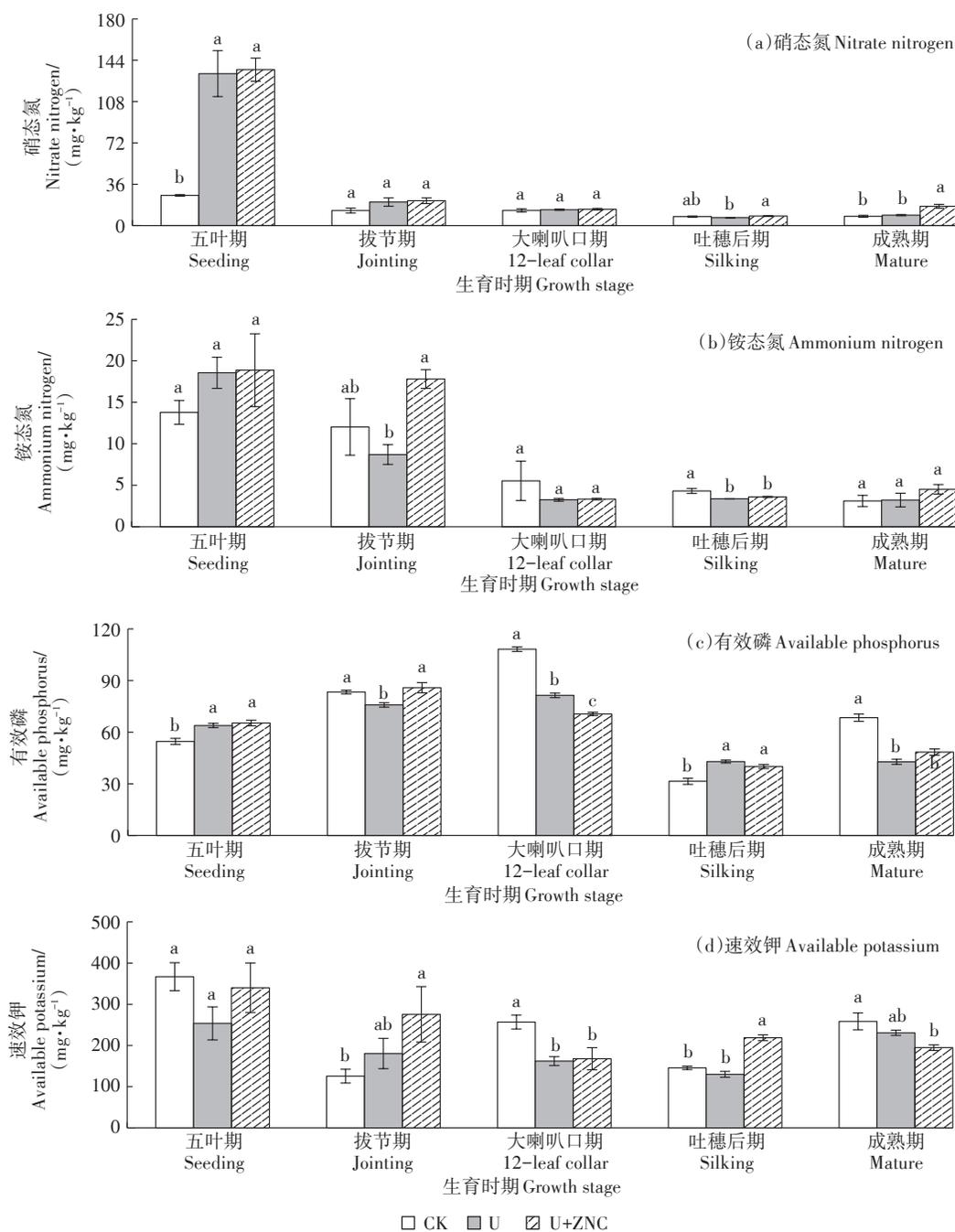
Note: Values followed by different lowercase letters indicate significant difference among treatments of the same year ( $P<0.05$ ,LSD).

年氮肥利用率提高了13.05个百分点,2018年氮肥利用率提高了21.08个百分点。连续两年施用ZNC灌根增产效果显著,同时显著提高了玉米氮肥利用率。

### 2.2 尿素配施ZNC灌根处理对玉米土壤养分含量的影响

相较于U处理,在玉米吐穗后期,U+ZNC处理土壤硝态氮含量显著提高了21.03%;拔节期,土壤铵态

氮含量显著提高104.63%(图2)。土壤中有效磷和速效钾直接决定着农田生产力,与U处理相比,U+ZNC处理拔节期有效磷含量显著提高13.18%,吐穗后期速效钾含量显著增加68.23%。ZNC作为生物刺激素不会直接提供土壤养分含量,然而有效磷和速效钾含量显著提升,可能是由于ZNC诱导根系产生分泌物,活化了土壤养分。



不同小写字母表示处理间差异显著( $P<0.05$ )。下同

Different lowercase letters indicate significant difference among treatments ( $P<0.05$ ). The same below

图2 玉米各生育时期不同施肥处理对土壤养分的影响

Figure 2 Effects of fertilization treatments on soil nutrients in different maize growth stages

### 2.3 尿素配施ZNC灌根处理对玉米根系生长素及氮素代谢酶的影响

大喇叭口期,与U处理相比,U+ZNC处理根系IAA浓度显著提高60.42%。ZNC可通过提高大喇叭口期玉米根系IAA的浓度,诱导生成不定根,增强植株对水分、无机盐的吸收和对同化物的存储,促进植物的生长发育。植物对氮素的利用主要是以NiR和NR还原NO<sub>3</sub><sup>-</sup>为起始,GS参与根系吸收NH<sub>4</sub><sup>+</sup>以及将NH<sub>4</sub><sup>+</sup>同化为有机氮的过程。与U处理相比,U+ZNC处理的GSR、NR和GS浓度分别显著提高12.46%、68.38%和17.49%(图3)。与U处理相比,U+ZNC处理的GOGAT浓度显著提高了22.51%,GLDH浓度显著提高了31.18%。ZNC可以调控作物氮转运关键酶活性,从而提高作物吸收土壤无机氮的能力,加速氮素同化。

### 2.4 尿素配施ZNC灌根处理对玉米生长和光合作用的影响

吐穗后期,U+ZNC处理玉米株高较U处理显著提高了6.03%,其他生育时期株高差异不显著(图4)。

五叶期至吐穗后期,玉米茎粗呈现先升高后降低的趋势。五叶期至大喇叭口期,U+ZNC处理与U处理相比,玉米茎粗无显著差异,吐穗后期U+ZNC处理较U处理显著降低6.25%。

玉米拔节期,与U处理相比,U+ZNC处理SPAD无显著差异,净光合速率、气孔导度和蒸腾速率分别显著升高62.37%、23.13%和14.64%(图5)。玉米的气孔导度与其蒸腾速率存在显著的正相关关系,施用ZNC灌根处理通过提高玉米蒸腾速率和光合速率来增强叶片对水分的利用能力,保证CO<sub>2</sub>反应的正常进行。

### 2.5 尿素配施ZNC灌根处理对玉米叶片内源激素的影响

植物生长素在植物生长和发育方面具有核心作用,生长素反应的时空变化受到局部生长素代谢和运输以及激素感知的严格控制,不同的生长素浓度会导致不同的生长素反应。玉米大喇叭口期,U+ZNC处理叶片生长素IAA浓度较U处理显著升高了20.83%(图6)。GA与IAA协同作用可促进器官发育,大喇

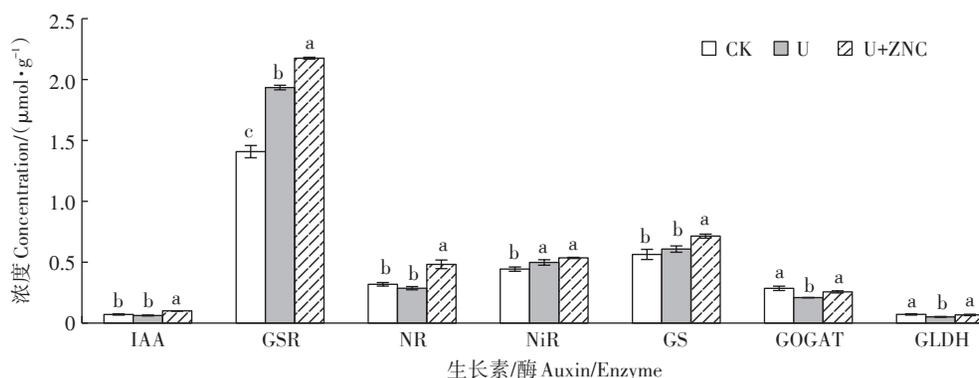


图3 大喇叭口期不同施肥处理对玉米根系生长素及氮素代谢酶的影响

Figure 3 Effects of different fertilization treatments on auxin and nitrogen metabolism enzyme in maize root at 12-leaf collar period

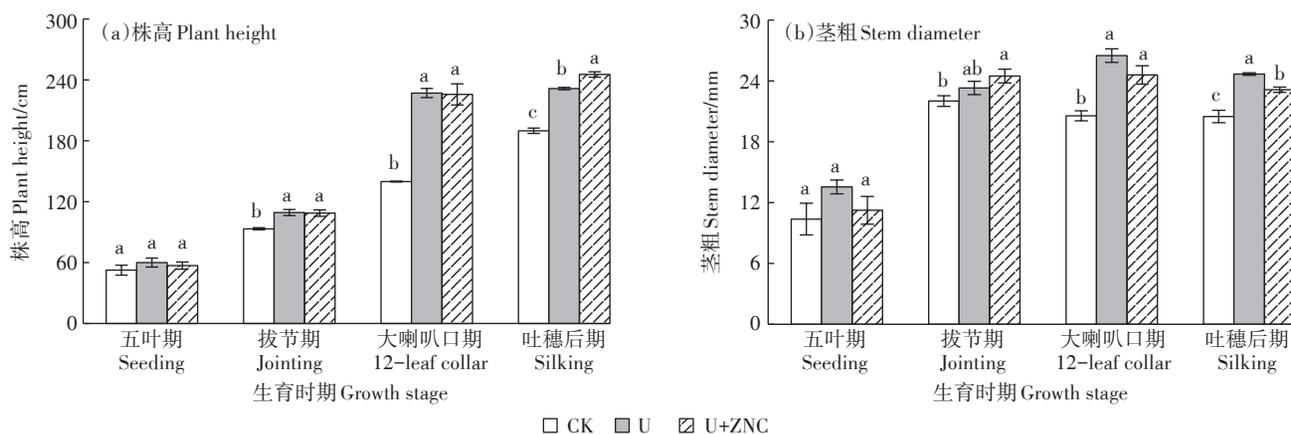


图4 不同施肥处理对不同生育时期玉米生长的影响

Figure 4 Effects of fertilization treatments on maize growth at different growth stages

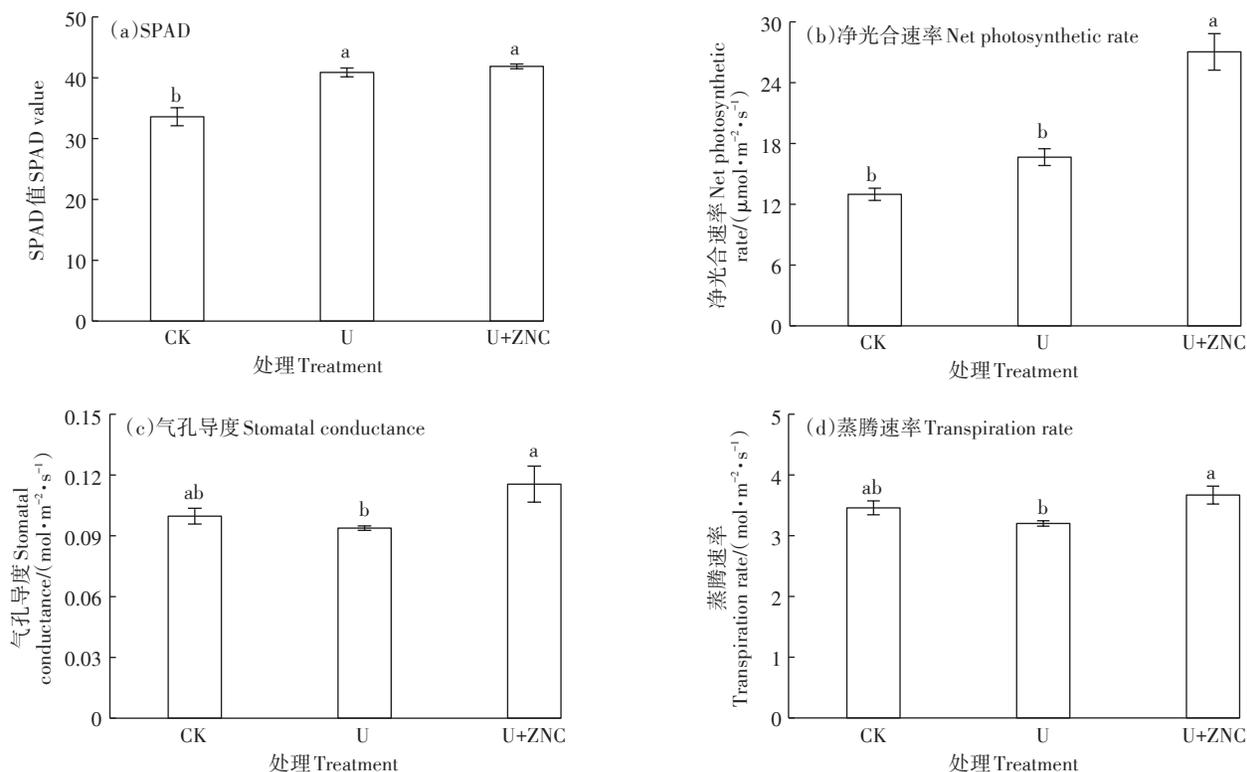


图5 不同施肥处理对玉米拔节期SPAD值和光合作用的影响

Figure 5 Effects of different fertilization treatments on maize photosynthesis at jointing period

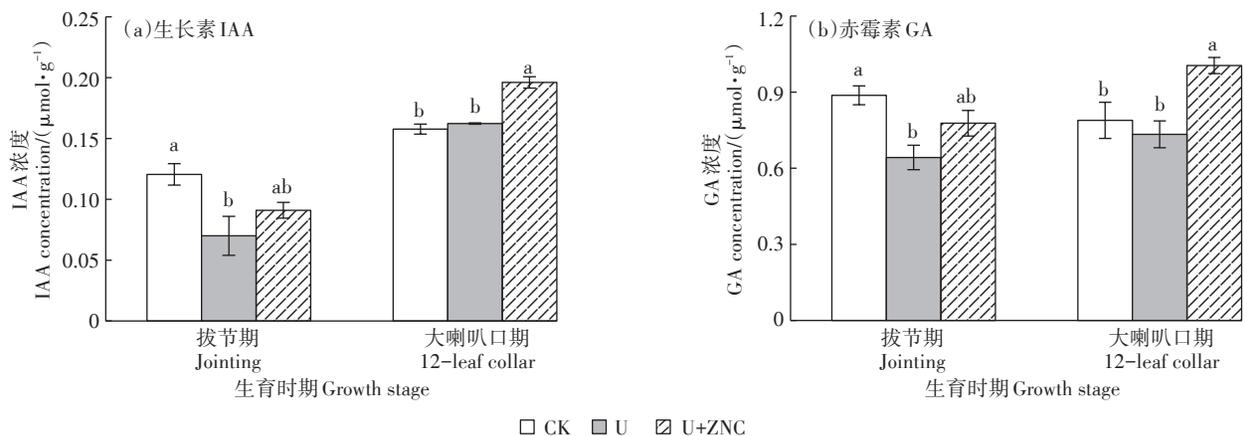


图6 不同施肥处理对玉米叶片内源激素的影响

Figure 6 Effects of fertilization treatments on maize leaf growth-promoting auxin

喇叭口期U+ZNC处理叶片GA浓度较U处理显著升高了36.98%。ZNC灌根促进了大喇叭口期玉米叶片的生长。

### 2.6 尿素配施ZNC灌根处理对玉米叶片氮素代谢酶的影响

玉米大喇叭口期,U+ZNC处理叶片GSR、NR和GS的浓度比U处理分别显著提高了88.32%、46.27%和70.89%(图7)。拔节期和大喇叭口期,U+ZNC处理

NiR浓度较U处理分别显著提高了79.97%和56.66%。GS-GOGAT构成的循环反应是氮代谢的中心,负责无机氮向有机氮的转化,GOGAT是该途径的限速酶。拔节期和大喇叭口期,与U处理相比,U+ZNC处理GOGAT浓度分别显著提高33.98%和22.51%,GLDH浓度分别显著提高46.34%和32.29%。ZNC影响氮的同化,并影响到硝酸还原酶活性等植物氮代谢相关酶的活性,促进氮的吸收和代谢,对硝酸

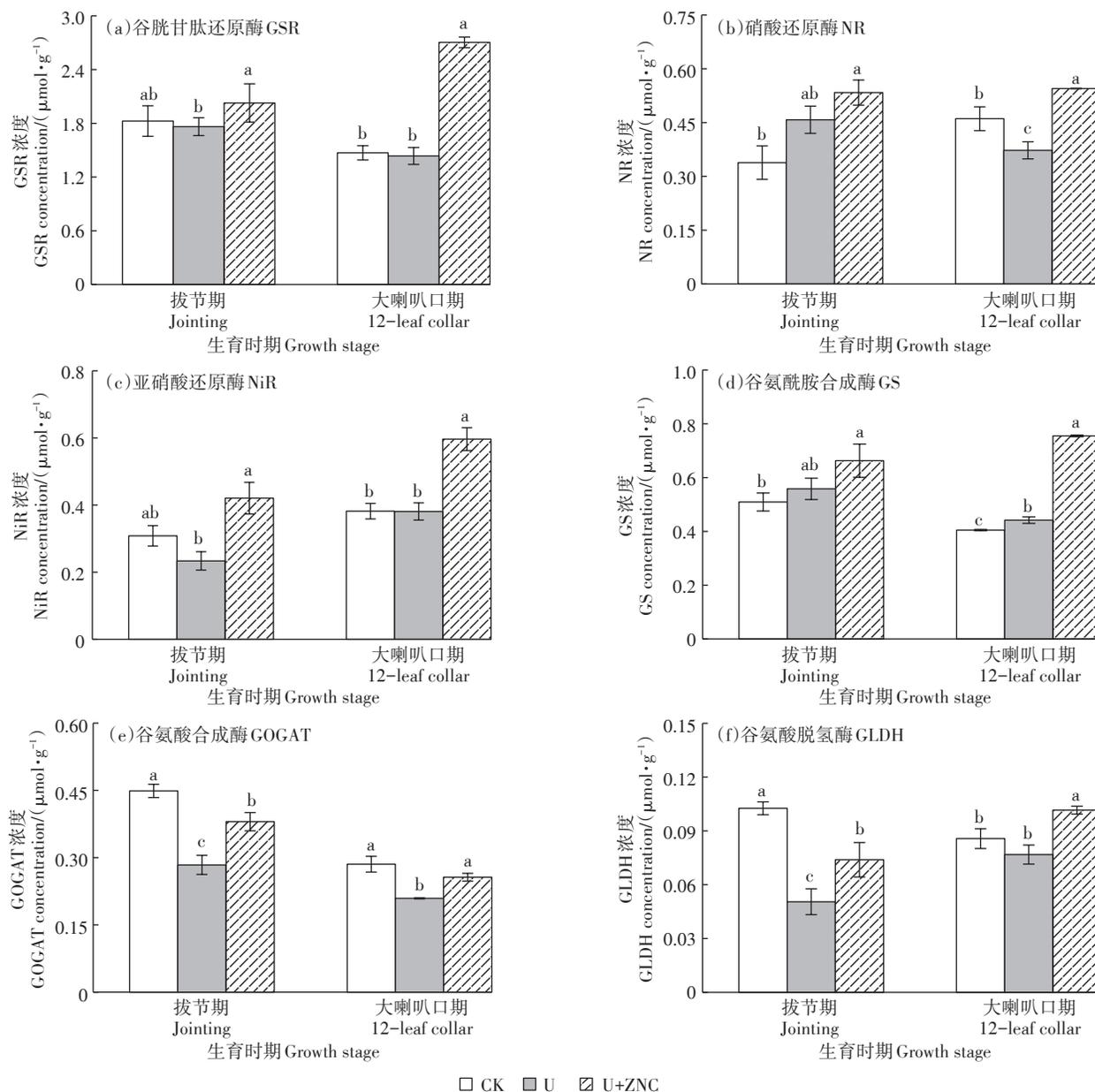


图7 玉米不同生育时期ZNC灌根对叶片氮代谢酶的影响

Figure 7 Effects of fertilization treatments on nitrogen metabolism enzymes in maize at different growth stages

盐代谢产生积极影响。

## 2.7 尿素配施ZNC灌根处理对玉米叶片光合作用相关酶的影响

PEPC和PPDK是碳还原反应过程中的关键酶。与U处理相比,U+ZNC处理拔节期和大喇叭口期的叶片中PEPC浓度分别显著提高了44.00%和31.44%,大喇叭口期的PPDK浓度显著提高了71.07%(图8)。ZNC可提高叶片光合相关酶活性,使玉米光合能力上升,从而显著提高光合速率,增加玉米产量。

## 2.8 多维相关性分析

土壤铵态氮含量与土壤硝态氮、根系硝酸还原

酶、根系谷氨酸脱氢酶呈正相关(图9),土壤中的有效磷与速效钾呈正相关,根系酶之间均存在不同程度的正相关关系。玉米产量与土壤有效磷、根系生长素、谷胱甘肽还原酶、硝酸还原酶、谷氨酸合成酶相关,其中与根系谷氨酸合成酶相关性较强。叶片生理功能与土壤有效磷、根系生长素、谷胱甘肽还原酶、硝酸还原酶、谷氨酰胺合成酶、谷氨酸合成酶相关,其中与根系生长素、谷胱甘肽还原酶、谷氨酸合成酶极相关。ZNC灌根提高了大喇叭口期玉米根系氮代谢相关酶及根系生长素的浓度,增强玉米对氮素的吸收、利用和转化,更好地驱动土壤氮素向植物氮高效利用

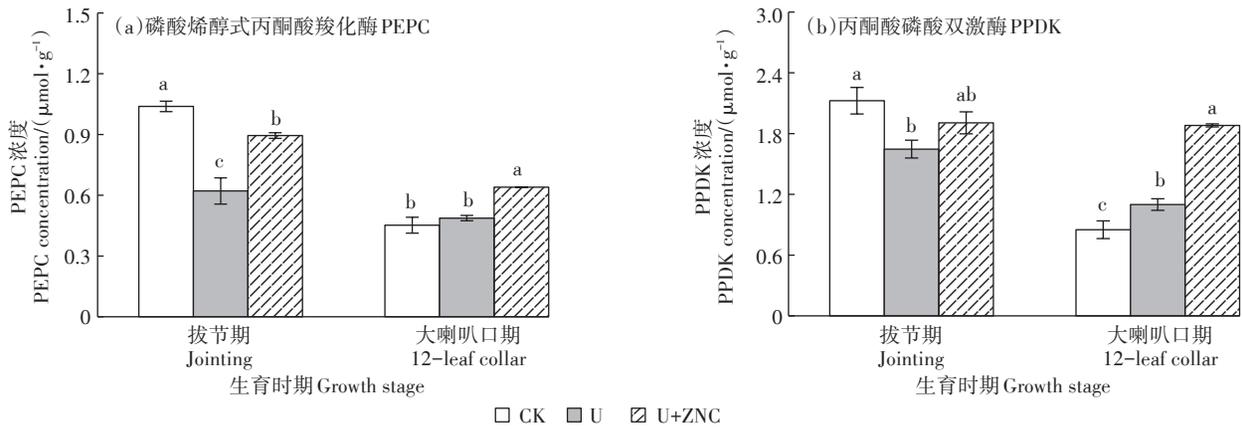


图8 ZNC灌根对玉米光合作用相关酶的影响

Figure 8 Effects of ZNC treatment on photosynthesis-related enzymes in maize

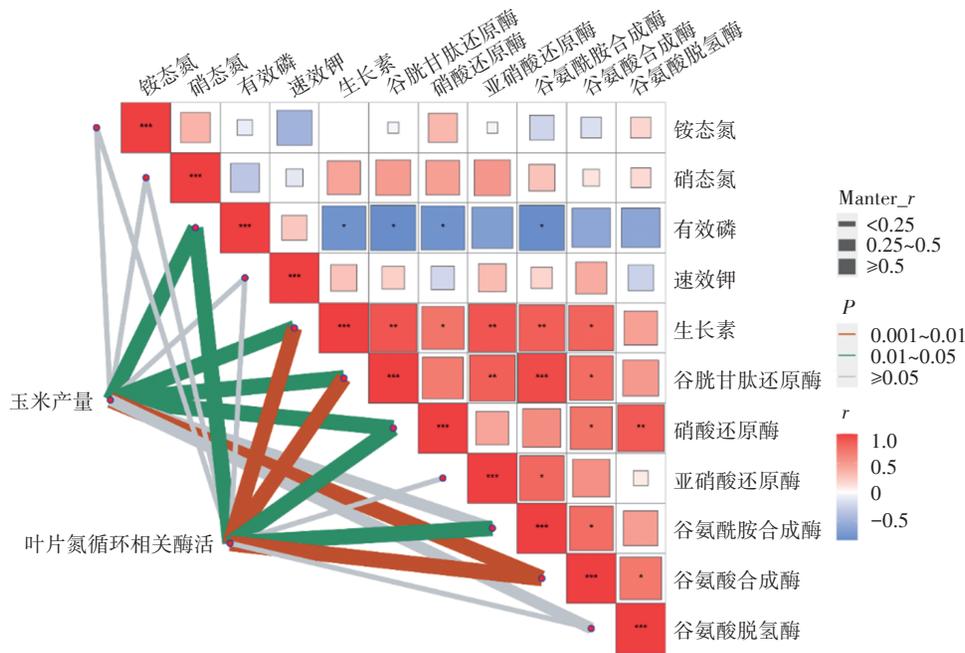


图9 玉米产量、叶片生理功能、根系酶、土壤养分相关性

Figure 9 Correlation among maize yield, leaf physiological function, root enzyme and soil nutrient

的途径转化,最终提高了玉米生物量和产量。

### 3 讨论

#### 3.1 尿素配施ZNC灌根处理对土壤养分及根系生长的影响

ZNC作为一种生物刺激素,已被证实不仅生物活性极高且成本较低,可通过灌根的方式显著提高樱桃萝卜块根产量和品质<sup>[12]</sup>。本试验中,普通尿素配施ZNC灌根后,相对于尿素处理促进了玉米对氮素的吸收,提高了氮素的利用率,使玉米产量显著提高(表

1)。这与WANG等<sup>[13]</sup>开展的水稻田间试验施用ZNC的研究结果一致。CHEN等<sup>[14]</sup>发现生物刺激素会影响土壤微生物活动的各个方面,从而提高作物生长所需有效养分的含量。氮肥利用率提高的原因可能是生物刺激素对土壤根际代谢活动产生积极影响,氮代谢相关的土壤酶增强,同时参与氮氧化还原代谢过程的蛋白质增加<sup>[15]</sup>。本研究还发现ZNC灌根后玉米拔节期土壤铵态氮和有效磷含量以及吐穗后期的硝态氮含量显著提升,这为籽粒发育打下坚实基础。生物刺激素不是生物肥料,不能直接为作物提供养分,而是通过改变

根际和植物代谢促进养分吸收,从而提高养分利用率<sup>[16]</sup>。

作物产量的形成是地上部与根系共同作用的结果<sup>[17]</sup>。生长素促进细胞分裂和不定根原基的形成,侧根数量的增加会促进水分和养分的吸收,进而影响植株的生长和营养成分吸收<sup>[18]</sup>。赤霉素不仅能促进叶片发育,而且与生长素存在协同关系,调节细胞扩大和组织分化,共同调节植物的生长发育<sup>[19]</sup>。在玉米大喇叭口期,与U处理相比,U+ZNC处理根系生长素、叶片生长素和赤霉素浓度显著提高。MEIXNER等<sup>[20]</sup>发现大豆在接种AM真菌后,丛枝菌根根部的IAA浓度与未接种AM真菌处理相比有显著增加,微生物代谢物ZNC具有和微生物AM真菌同样的促生作用,可用其作为替代品以降低成本。

### 3.2 尿素配施ZNC灌根处理对玉米光合速率及氮代谢酶的影响

生物刺激素是一种具有丰富成分的生物活性分子,在少量应用的情况下,可促进土壤养分吸收,改善植物的生长及其对胁迫的耐受性。本试验表明,施用ZNC提高了植株叶片的蒸腾速率,即增强了作物吸收养分的动力。此外,SPAD值、净光合速率也同样受到ZNC灌根施用的影响,这与SERGIO等<sup>[21]</sup>的研究结果一致。SPAD、净光合速率、气孔导度与蒸腾速率的提升表明植株叶片的光合性能增强,有利于提高玉米籽粒淀粉的含量及积累速率。PEPC和PPDK参与光合作用中的碳还原反应,U+ZNC处理提高了大喇叭口期两种酶的浓度,PEPC固定了CO<sub>2</sub>,为C<sub>3</sub>循环提供碳源,介导不可逆的磷酸烯醇式丙酮酸(PEP)和HCO<sub>3</sub><sup>-</sup>的羧化反应,羧化产生的苹果酸可以调节质子和电荷的平衡,促进气孔的开放。PPDK也可催化叶肉细胞叶绿体中的丙酮酸生成PEP,释放出CO<sub>2</sub>,抑制核酮糖-1,5-二磷酸羧化酶/加氧酶的加氧活性,增强羧化性能,使玉米具有更高的光合效率<sup>[22]</sup>。

氮素对玉米生长具有重要的作用,促进植物体内氮的积累和转运,有利于提高玉米产量和肥料利用率<sup>[23]</sup>。氮从硝酸盐或氨中同化为氨基酸的顺序反应是通过NR、NiR、GS和GOGAT完成的<sup>[24]</sup>。分解产生的氨基酸要经过脱氨作用才能分解成离子形式进而被作物吸收,该过程由脱氨酶来完成<sup>[25]</sup>。玉米大喇叭口期ZNC灌根处理提升了NR和NiR的活性,活化了土壤养分,促进了玉米对硝态氮的吸收利用。氮素调控使作物尽可能发挥出生长潜力,合成的氨基酸一方面有利于自身蛋白质的合成,另一方面直

接转运到籽粒中促进蛋白质的合成<sup>[26]</sup>,从而显著提高作物产量。

## 4 结论

(1)本试验条件下,2017年和2018年尿素配施宛氏拟青霉提取物灌根处理玉米产量较单施尿素处理分别提高了6.75%和8.22%,氮肥利用率分别提高了13.05和21.08个百分点。

(2)与单施尿素处理相比,尿素配施宛氏拟青霉提取物灌根处理土壤硝态氮、铵态氮、有效磷和速效钾含量在不同生育时期显著提高,满足了玉米关键生育期对养分的需求。

(3)尿素配施宛氏拟青霉提取物灌根提高了玉米根系生长素、氮素代谢酶及叶片的生长素、光合作用相关酶、氮素代谢酶的活性,促进养分吸收、转化及利用,显著提高玉米产量。

### 参考文献:

- [1] CAMPELO D H, TEIXEIRA A D S, MOREIRA L C J, et al. Growth, production and water and nitrogen use efficiency of maize under water depths and nitrogen fertilization[J]. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, 2019, 23(10):747-753.
- [2] 李嘉,吕慎强,杨泽宇,等. 氮肥运筹对黄土塬区春玉米产量、效益和氮肥利用率的综合效应[J]. *植物营养与肥料学报*, 2020, 26(1):32-41. LI J, LÜ S Q, YANG Z Y, et al. Comprehensive effects of nitrogen fertilizer management on yield, economic performance and nitrogen use efficiency of spring maize in Loess Plateau, China[J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizers*, 2020, 26(1):32-41.
- [3] 肖茜,张洪培,沈玉芳,等. 生物炭对黄土区土壤水分入渗、蒸发及硝态氮淋溶的影响[J]. *农业工程学报*, 2015, 31(16):128-134. XIAO Q, ZHANG H P, SHEN Y F, et al. Effects of biochar on water infiltration, evaporation and nitrate leaching in semi-arid loess area[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2015, 31(16):128-134.
- [4] 王秀康,邢英英,李占斌. 覆膜和施氮肥对玉米产量和根层土壤硝态氮分布和去向的影响[J]. *中国农业科学*, 2016, 49(20):3944-3957. WANG X K, XING Y Y, LI Z B. Effect of mulching and nitrogen fertilizer on maize yield, distribution and fate of nitrogen in root layer[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2016, 49(20):3944-3957.
- [5] 杨宇虹,晋艳,黄建国,等. 长期施肥对植烟土壤微生物的影响[J]. *植物营养与肥料学报*, 2014, 20(5):1186-1193. YANG Y H, JIN Y, HUANG J G, et al. Effects of long-term fertilization on soil microorganisms in tobacco fields[J]. *Plant Nutrition and Fertilizer Science*, 2014, 20(5):1186-1193.
- [6] 刘乐,费良军,陈琳,等.  $\gamma$ -聚谷氨酸对土壤结构、养分平衡及菠菜产量的影响[J]. *水土保持学报*, 2019, 33(1):277-282, 287. LIU L, FEI L J, CHEN L, et al. Effects of  $\gamma$ -polyglutamic acid on soil struc-

- ture, nutrient balance and spinach yield[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2019, 33(1):277-282, 287.
- [7] ZHANG Y, LI S, JIANG D, et al. Antifungal activities of metabolites produced by a termite-associated *Streptomyces canus* BYB02[J]. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 2013, 61(7):1521-1524.
- [8] WANG Q, PENG C, SHI L, et al. A Technical system for the large-scale application of metabolites from *Paecilomyces variotii* SJI in agriculture[J]. *Frontiers in Bioengineering and Biotechnology*, 2021, 9(5):671879.
- [9] 王晓琪, 姚媛媛, 陈宝成, 等. 宛氏拟青霉提取物增强水稻抗低温胁迫的最佳施用水平[J]. *植物营养与肥料学报*, 2019, 25(12):2133-2141. WANG X Q, YAO Y Y, CHEN B C, et al. Optimum levels of *Paecilomyces variotii* extracts in regulating resistance of rice seedlings to low temperature stress[J]. *Plant Nutrition and Fertilizer Science*, 2019, 25(12):2133-2141.
- [10] CHEN Q, LI Z, QU Z, et al. Maize yield and root morphological characteristics affected by controlled-release diammonium phosphate and *Paecilomyces variotii* extracts[J]. *Field Crops Research*, 2020, 255(9):1-9.
- [11] 黄冰心, 韩丽君, 范晓. 海藻中的植物激素检测方法[J]. *海洋科学*, 2001, 10(1):28-30. HUANG B X, HAN L J, FAN X. The method methods of phytohormones in algae[J]. *Marine Science*, 2001, 10(1):28-30.
- [12] 贾春花, 刘之广, 张民, 等. 宛氏拟青霉提取物对樱桃萝卜产量及品质的影响[J]. *农业资源与环境学报*, 2019, 36(2):176-183. JIA C H, LIU Z G, ZHANG M, et al. Effects of extracts from *Paecilomyces variotii* on the yield and quality of cherry radish[J]. *Journal of Agricultural Resources and Environment*, 2019, 36(2):176-183.
- [13] WANG X Q, YAO Y Y, CHEN B C, et al. *Paecilomyces variotii* extracts and controlled-release urea synergistically increased nitrogen use efficiency and rice yield[J]. *ACS Omega*, 2020, 5(22):13303-13311.
- [14] CHEN S K, EDWARDS C A, SUBLER S. The influence of two agricultural biostimulants on nitrogen transformations, microbial activity, and plant growth in soil microcosms[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2003, 35(1):9-19.
- [15] MATTAROZZI M, DI ZINNO J, MONTANINI B, et al. Biostimulants applied to maize seeds modulate the enzymatic activity and metaproteome of the rhizosphere[J]. *Applied Soil Ecology*, 2020, 148(4):103480.
- [16] KAPOORE R V, WOOD E E, LLEWELLYN C A. Algae biostimulants: A critical look at microalgal biostimulants for sustainable agricultural practices[J]. *Biotechnology Advances*, 2021, 49(7):1-27.
- [17] 赵全志, 乔江方, 刘辉, 等. 水稻根系与叶片光合特性的关系[J]. *中国农业科学*, 2007, 40(5):1064-1068. ZHAO Q Z, QIAO J F, LIU H, et al. Relationship between root and leaf photosynthetic characteristic in rice[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2007, 40(5):1064-1068.
- [18] 董春娟, 曹宁, 王玲玲, 等. 黄瓜子叶源生长素对下胚轴不定根发生的调控作用[J]. *园艺学报*, 2016, 43(10):1929-1940. DONG C J, CAO N, WANG L L, et al. Regulatory roles of cotyledon-generated auxin in adventitious root formation on the hypocotyls of cucumber seedlings[J]. *Acta Horticulturae Sinica*, 2016, 43(10):1929-1940.
- [19] 李保珠, 赵翔, 安国勇. 赤霉素的研究进展[J]. *中国农学通报*, 2011, 27(1):1-5. LI B Z, ZHAO X, AN G Y. Recent advances in research of gibberellin[J]. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2011, 27(1):1-5.
- [20] MEIXNER C, LUDWIG-MÜLLER J, MIERSCH O, et al. Lack of mycorrhizal autoregulation and phytohormonal changes in the supernodulating soybean mutant *nts1007*[J]. *Planta*, 2005, 222(4):709-715.
- [21] SERGIO S, GIUSEPPE C, GIAMPAOLO R, et al. An endophytic fungi-based biostimulant modulated lettuce yield, physiological and functional quality responses to both moderate and severe water limitation[J]. *Scientia Horticulturae*, 2019, 256(10):108595.
- [22] 聂江婷, 白云凤, 贺飞燕, 等. 籽粒苋丙酮酸磷酸二激酶(PPDK)基因的密码子偏好性[J]. *植物学报*, 2014, 49(6):672-681. NIE J T, BAI Y F, HE F Y, et al. Codon bias of pyruvate orthophosphate dikinase gene in *Amaranth hypochondriacus*[J]. *Chinese Bulletin of Botany*, 2014, 49(6):672-681.
- [23] 王玉雯, 郭九信, 孔亚丽, 等. 氮肥优化管理协同实现水稻高产和氮肥高效[J]. *植物营养与肥料学报*, 2016, 22(5):1157-1166. WANG Y Y, GUO J X, KONG Y L, et al. Nitrogen optimize management achieves high grain yield and enhances nitrogen use efficiency of rice[J]. *Plant Nutrition and Fertilizer Science*, 2016, 22(5):1157-1166.
- [24] YONEYAMA T, SUZUKI A. Exploration of nitrate-to-glutamate assimilation in non-photosynthetic roots of higher plants by studies of  $^{15}\text{N}$ -tracing, enzymes involved, reductant supply, and nitrate signaling: A review and synthesis[J]. *Plant Physiology and Biochemistry*, 2019, 136(3):245-254.
- [25] 孔雪静. 地膜覆盖和秸秆还田对玉米地与土壤氮素转化相关的土壤酶活性影响研究[D]. 兰州:兰州大学, 2016:1-7. KONG X J. Effects of plastic film mulch and straw incorporation on soil nitrogen-transformation-related enzymes in maize-cropped farmlands[D]. Lanzhou: Lanzhou university, 2016:1-7.
- [26] 荣湘民, 谢桂先, 刘强, 等. 生长调节剂对玉米氮代谢的影响[J]. *植物营养与肥料学报*, 2005, 11(5):634-640. RONG X M, XIE G X, LIU Q, et al. Effects of plant growth regulator on nitrogen metabolism of maize[J]. *Plant Nutrition and Fertilizer Science*, 2005, 11(5):634-640.