

引文格式: 刘耀权, 王林林, 李玲玲, 等. 施氮促进旱作覆膜玉米产量和水分利用效率的生理机制[J]. 云南农业大学学报(自然科学), 2022, 37(2): 193–202. DOI: [10.12101/j.issn.1004-390X\(n\).202102032](https://doi.org/10.12101/j.issn.1004-390X(n).202102032)

## 施氮促进旱作覆膜玉米产量和水分利用效率的生理机制\*

刘耀权, 王林林, 李玲玲\*\*, 谢军红, 岳 凯, 王进斌  
(省部共建干旱生境作物学国家重点实验室, 甘肃农业大学 农学院, 甘肃 兰州 730070)

**摘要:**【目的】研究氮肥对玉米产量和水分利用效率的影响及机制, 提出旱作玉米适宜的施氮量。【方法】设置 4 个氮肥水平 ( $N_0$ : 不施氮肥,  $N_1$ : 施纯氮 100 kg/hm<sup>2</sup>,  $N_2$ : 施纯氮 200 kg/hm<sup>2</sup>,  $N_3$ : 施纯氮 300 kg/hm<sup>2</sup>), 分析不同氮素水平对土壤水分亏缺程度以及玉米叶片保护酶活性、光合性能、籽粒产量和水分利用效率的影响。【结果】随着施氮量的增加, 干物质积累量、籽粒产量和水分利用效率均呈增加趋势, 但  $N_2$  和  $N_3$  处理的籽粒产量和水分利用效率差异不显著 ( $P>0.05$ ),  $N_2$  籽粒产量和水分利用效率分别为 10 542.67 kg/hm<sup>2</sup> 和 22.28 kg/(mm·hm<sup>2</sup>), 比  $N_0$  分别提高 161% 和 132%, 方程拟合的最高籽粒产量及其施氮量接近  $N_3$  处理。施氮量对玉米耗水量影响显著 ( $P<0.05$ ), 在生育期内施氮处理的土壤水分亏缺程度大于  $N_0$ , 施氮促进玉米生长, 增加土壤水分消耗, 加剧土壤水分亏缺。随着施氮量的增加, 玉米叶片的 SOD、POD 和 CAT 活性提高, MDA 和可溶性糖含量增加, 可延缓叶片衰老, 增强玉米抗旱性; 随着施氮量增加, 玉米叶片 PEP 羧化酶和 RuBP 羧化酶活性以及叶绿素含量均提高, 净光合速率显著增强 ( $P<0.05$ )。【结论】与不施氮处理相比, 施纯氮约 200 kg/hm<sup>2</sup> 可较好地增加玉米抗旱性, 提高玉米光合碳同化能力, 延缓衰老, 从而提高玉米干物质质量、籽粒产量和水分利用效率。

**关键词:** 氮肥; 抗旱性; 光合特性; 产量; 水分利用效率

中图分类号: S513.062 文献标志码: A 文章编号: 1004-390X (2022) 02-0193-10

## Physiological Mechanism of Nitrogen Fertilization Promoting Yield and Water Use Efficiency of Dryland Maize Fields with Plastic Mulching

LIU Yaoquan, WANG Linlin, LI Lingling, XIE Junhong, YUE Kai, WANG Jinbin

(State Key Laboratory of Aridland Crop Science, Agronomy College of  
Gansu Agricultural University, Lanzhou 730070, China)

**Abstract:** [Purpose] To study the mechanism of nitrogen fertilizer affecting maize yield and water use efficiency, proposing a suitable nitrogen application rate for dryland maize. [Method] Four nitrogen fertilizer levels ( $N_0$ : 0 kg/hm<sup>2</sup>,  $N_1$ : 100 kg/hm<sup>2</sup>,  $N_2$ : 200 kg/hm<sup>2</sup>,  $N_3$ : 300 kg/hm<sup>2</sup>) were set to study the effects of different nitrogen rates on soil water deficit, leaf protective enzyme activities, pho-

收稿日期: 2021-03-01

修回日期: 2022-02-21

网络首发日期: 2022-03-25

\*基金项目: 甘肃省国际科技合作基地项目 (GSPT-2018-56); 国家自然科学基金项目 (31761143004, 31660373); 甘肃省科技计划项目 (20JR5RA033); 中央引导地方科技发展专项资金。

作者简介: 刘耀权 (1992—), 男, 甘肃靖远人, 在读硕士研究生, 主要从事旱地与绿洲农作制研究。

E-mail: [1215641767@qq.com](mailto:1215641767@qq.com)

\*\*通信作者 Corresponding author: 李玲玲 (1977—), 女, 甘肃甘谷人, 博士, 教授, 主要从事旱地与绿洲农作制研究。E-mail: [lill@gsau.edu.cn](mailto:lill@gsau.edu.cn)

网络首发地址: <https://kns.cnki.net/kcms/detail/53.1044.S.20220324.1119.002.html>



tosynthetic performance, grain yield and water use efficiency. [Results] Increasing nitrogen application rate increased dry matter accumulation, grain yield, and water use efficiency, but there was no significant difference between  $N_2$  and  $N_3$  treatments ( $P>0.05$ ). The grain yield and water use efficiency of  $N_2$  was 10 542.67 kg/hm<sup>2</sup> and 22.28 kg/(mm·hm<sup>2</sup>), respectively, and were increased by 161% and 132% as compared to  $N_0$ . The highest grain yield and nitrogen fertilizer application fitted by this equation were close to the  $N_3$  treatment. Nitrogen application rate had a significant impact on corn water consumption ( $P<0.05$ ). During the growth stage, the soil water deficit of nitrogen treatment was greater than  $N_0$ . Nitrogen application promoted corn growth, increased soil water consumption, and exacerbated soil water deficit. With the increase of nitrogen application rate, the SOD, POD and CAT activities of corn leaves increased, and the MDA and soluble sugar content increased, delaying leaf senescence and enhancing the drought resistance of corn. Furthermore, corn leaf PEP carboxylase, RuBP carboxylase activity and chlorophyll content and the net photosynthetic rate significantly increased ( $P<0.05$ ) with the increase of nitrogen application rate. [Conclusion] In contrast to the  $N_0$  treatment, the nitrogen application rate at 200 kg/hm<sup>2</sup> could increase drought resistance of corn, increase the photosynthetic carbon assimilation ability of corn, delay senescence, and improve the quality of corn dry matter, grain yield and water use efficiency.

**Keywords:** nitrogen fertilizer; drought resistance; photosynthetic characteristics; yield; water use efficiency

陇中干旱半干旱区降水稀少, 气候干燥, 蒸发强烈, 年降雨量不足, 且季节分布不均, 属典型的半干旱雨养农业区, 水资源匮乏严重制约着该地区经济的发展和农业生产力的提高<sup>[1]</sup>。全膜双垄沟播栽培技术具有充分纳蓄降水、抑制土壤水分蒸发和增温的多重效应<sup>[2-3]</sup>, 可实现水分的高效利用和产量的大幅提升, 使玉米成为陇中旱农区新的主要作物<sup>[4-5]</sup>。氮素对玉米生长发育有很重要的调节作用, 对其体内生理机能和整体代谢具有不可替代的作用。光合作用是植物获得干物质的主要来源, 氮素可以通过影响成分物质的含量和各种酶的活性影响光合作用<sup>[6]</sup>。合理施用氮肥能够显著增加玉米叶面积指数、干物质积累量和籽粒产量<sup>[7-8]</sup>。研究表明: 适宜的氮肥水平可以提高光合系统关键酶活性<sup>[9-10]</sup>和叶绿素含量, 增加叶面积指数, 提高叶片净光合速率等光合生理参数<sup>[11-12]</sup>, 也可以提高功能叶中保护酶的活性, 减轻衰老过程中活性氧对细胞膜的伤害, 延长叶片光合功能期, 从而有效提高玉米产量<sup>[13]</sup>。然而, 也有研究表明: 施氮会显著增加玉米生育期耗水量<sup>[14]</sup>, 可能导致土壤水分亏缺<sup>[15]</sup>, 使作物的光合能力受到抑制, 同时会造成严重的氧化伤害, 最终影响其生长<sup>[16]</sup>; 还有研究指出: 施氮对水分胁迫

导致光合作用的减弱具有显著的补偿作用<sup>[17]</sup>。由此可见, 施氮会直接或间接提高或抑制作物光合作用, 因此, 通过探寻区域农田适宜的施氮量来提高作物的光合能力对玉米生产意义重大。

前人就氮肥对玉米光合作用和生育后期叶片衰老生理等方面的研究较多<sup>[18-20]</sup>, 然而, 在陇中旱农区高氮所导致的土壤水分亏缺程度增加的情况下, 玉米能否维持高的光合作用以增加产量尚不清楚。为此, 本研究结合不同氮素水平对土壤水分亏缺的影响, 分析不同氮肥用量对旱作春玉米叶片保护酶活性、丙二醛和可溶性糖含量以及光合特性的影响, 以期从生理角度探讨氮素影响玉米籽粒产量的机理, 为陇中旱农区玉米合理施氮、高效用氮提供理论基础和科学依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 试验区概况

本研究于 2020 年在甘肃省定西市安定区甘肃农业大学旱农综合实验站进行, 研究所依托的定位试验始于 2012 年。试验区平均海拔 2 000 m, 年无霜期 140 d, 属中温带半干旱偏旱区, 多年平均降水量 390.9 mm, 年蒸发量达 1 531 mm, 2020 年玉米全生育期降雨量为 508.2 mm, 主要

集中在5—8月。试验区光照和水分只能满足一年一熟作物的要求,为陇中典型的半干旱雨养农业区。试验区土壤为黄绵土,容重 $1.29\text{ g/cm}^3$ ,最大持水率 $0.27\text{ cm}^3/\text{cm}^3$ ,土壤有机质含量 $12.01\text{ g/kg}$ ,全氮含量 $0.76\text{ g/kg}$ ,全磷含量 $1.77\text{ g/kg}$ 。

## 1.2 试验材料

供试玉米品种为先玉335;供试氮肥为尿素(N:46%),磷肥为过磷酸钙( $\text{P}_2\text{O}_5$ :12%)。

## 1.3 试验设计

在全膜双垄沟播的基础上设4个施氮水平( $\text{N}_0$ :不施氮肥,  $\text{N}_1$ : $100\text{ kg/hm}^2$ ,  $\text{N}_2$ : $200\text{ kg/hm}^2$ ,  $\text{N}_3$ : $300\text{ kg/hm}^2$ ),均1/3作基肥,2/3作拔节肥;设3次重复,共12个小区,各小区随机区组排列,小区面积为 $18.70\text{ m}^2$ ( $4.40\text{ m}\times 4.25\text{ m}$ ),播种前施 $\text{P}_2\text{O}_5$  $150\text{ kg/hm}^2$ 。播种量为 $5.25\text{ 万株/hm}^2$ ,2020年5月2日用点播器进行播种,10月16日收获。其他管理措施同一般大田。

## 1.4 测定项目与方法

### 1.4.1 土壤含水量的测定

玉米根系扩展范围一般为 $1.25\text{ m}$ ,大部分根系可达 $1.6\text{ m}$ ,有的接近 $2\text{ m}$ ,因此,本研究在玉米播前、收后及关键生育时期测定 $0\sim 2\text{ m}$ 的土壤含水量。 $0\sim 5$ 、 $5\sim 10$ 和 $10\sim 30\text{ cm}$ 采用烘干法:用土钻取各层土壤倒入铝盒,迅速封盖后带回实验室,称铝盒和湿土总质量后,打开铝盒盖子,放入烘箱, $105\text{ }^\circ\text{C}$ 烘干至恒质量,称铝盒和干土总质量; $30\sim 200\text{ cm}$ 采用TRIME(TRIME-PICO TDR,德国)测定,层次分为 $30\sim 50$ 、 $50\sim 80$ 、 $80\sim 110$ 、 $110\sim 140$ 、 $140\sim 170$ 和 $170\sim 200\text{ cm}$ 。每个小区设1个测定点。

### 1.4.2 干物质积累量的测定

在拔节期对各小区长势一致的玉米进行挂牌标记,分别在拔节、大喇叭口、开花、灌浆和成熟期从各小区随机选取挂牌的玉米3株, $105\text{ }^\circ\text{C}$ 杀青 $30\text{ min}$ ,再 $80\text{ }^\circ\text{C}$ 烘干至恒质量,计算单株干物质积累量。

### 1.4.3 光合速率的测定

分别在拔节、大喇叭口、开花、灌浆和蜡熟期从各小区随机选取挂牌的玉米3株,选择晴天9:00—11:00采用光合仪器(GFS-3000,德国)测定植株的净光合速率( $P_n$ )。在拔节和大喇叭口期测定顶端第1枚全展叶中部,开花、灌浆和蜡熟期测定穗位叶中部。每次测定重复3次。

### 1.4.4 叶绿素相对含量(SPAD)的测定

用SPAD-502(北京制造)测定。在拔节和大喇叭口期测定顶端第1枚全展叶中部,开花、灌浆和蜡熟期测定穗位叶中部,每个小区随机测定3株挂牌玉米,每株测定3个值,取平均值。

### 1.4.5 叶片部分生理指标的测定

在玉米拔节、大喇叭口、开花、灌浆和蜡熟期分别采集样品,拔节和大喇叭口期随机取3株挂牌植株顶部的第1枚全展叶,自开花期起,取3株挂牌植株的穗位叶,剪取叶片的中间部位,迅速放入贴有标签的自封袋,然后放入装有干冰的泡沫箱内,带回实验室,保存在 $-80\text{ }^\circ\text{C}$ 冰箱中,室内测定时分别剪取 $0.5\text{ g}$ 无病虫害和机械损伤的叶片进行测定。

(1) 光合关键酶活性。PEP羧化酶活性采用施教耐等<sup>[21]</sup>的方法测定:反应液总体积 $3.2\text{ mL}$ ,包括 $100\text{ mmol/L}$  Tris- $\text{H}_2\text{SO}_4$ 缓冲液( $\text{pH } 9.2$ ) $1\text{ mL}$ 、酶提取缓冲液 $1\text{ mL}$ 、 $10\text{ mmol/L}$   $\text{MgCl}_2$  $0.1\text{ mL}$ 、 $10\text{ mmol/L}$   $\text{NaHCO}_3$  $0.1\text{ mL}$ 、 $40\text{ mmol/L}$  PEP $0.2\text{ mL}$ 、 $1\text{ mg/mL}$  NADH $0.3\text{ mL}$ 和苹果酸脱氢酶 $0.5\text{ mL}$ ,于 $28\text{ }^\circ\text{C}$ 水浴预温 $10\text{ min}$ ,用 $200\text{ }\mu\text{L}$  PEP羧化酶提取液启动反应,迅速在 $340\text{ nm}$ 波长下测吸光度。RuBP羧化酶活性参照RACKER<sup>[22]</sup>的方法测定:反应混合液总体积 $3.0\text{ mL}$ ,包括 $1\text{ mmol/L}$  Tris-HCl缓冲液( $\text{pH } 8.0$ )、 $1\text{ mmol/L}$  EDTA、 $0.1\text{ mmol/L}$   $\text{MgCl}_2$ 、 $50\text{ mmol/L}$  ATP、 $50\text{ mmol/L}$  DTT和 $2\text{ mmol/L}$  NADH各 $0.3\text{ mL}$ 、 $200\text{ }\mu\text{mol/L}$   $\text{NaHCO}_3$  $0.1\text{ mL}$ 、蒸馏水 $1\text{ mL}$ 和三磷酸甘油酸激酶/三磷酸甘油醛脱氢酶( $15\text{ U}/15\text{ U}$ ) $0.1\text{ mL}$ ,于 $30\text{ }^\circ\text{C}$ 恒温水浴 $10\text{ min}$ ,之后加入 $9\text{ mmol/L}$  RuBP $0.1\text{ mL}$ ,最后加入RuBP羧化酶提取液反应开始,迅速在 $340\text{ nm}$ 波长下测吸光度。

(2) 叶片保护酶活性。SOD活性采用氮蓝四唑法<sup>[23]</sup>测定,以抑制NBT光化学还原的50%为1个酶活性单位;POD活性采用愈创木酚比色法<sup>[24]</sup>测定,以 $1\text{ min}$ 内 $\Delta\text{OD}_{470}$ 增加 $0.1$ 为1个酶活力单位;CAT活性采用紫外吸收法<sup>[25]</sup>测定,以每分钟OD值减少 $0.1$ 为1个酶活性单位。

(3) 可溶性糖含量:采用蒽酮法<sup>[24]</sup>测定。

(4) 丙二醛(MDA)含量:采用硫代巴比妥酸法<sup>[23]</sup>测定。

### 1.4.6 产量及其构成的测定

按小区单收测定籽粒产量;成熟期各小区随

机选取挂牌且叶片完整的玉米 10 株考种，统计其果穗数，根据群体密度计算各处理果穗数，并统计穗行数、行粒数和百粒质量。

1.5 计算公式

土壤质量含水量 ( $W$ , g):  $W=(m_1-m_2)/m_2\times 100\%$ ;

土壤体积含水量 ( $V$ ,  $\text{cm}^3$ ):  $V=W\times\rho$ ;

土壤贮水量 ( $SW$ , mm):  $SW=H\times V/10$ ;

土壤水分亏缺量 ( $Da$ , mm):  $Da = Fc-SW$ ;

土壤水分亏缺程度 ( $DSW$ ):  $DSW=Da/Fc\times 100$ ;

作物阶段耗水量 ( $ET$ , mm):  $ET = P + SW_{t_1} + SW_{t_2}$ ;

水分利用效率 [ $WUE$ ,  $\text{kg}/(\text{mm}\cdot\text{hm}^2)$ ]:  $WUE=Y/ET$ 。

式中:  $m_1$  为湿土质量, g;  $m_2$  为干土质量, g;  $\rho$  为土壤容重,  $\text{g}/\text{cm}^3$ ;  $H$  为土层厚度, cm;  $Fc$  为田间持水量, mm;  $P$  为  $t_1$  至  $t_2$  时间段的降雨量, mm;  $SW_{t_1}$  为阶段初的土壤贮水量, mm;  $SW_{t_2}$  为阶段末的土壤贮水量, mm;  $Y$  为籽粒产量,  $\text{kg}/\text{hm}^2$ 。

1.6 施氮量与籽粒产量的拟合曲线

在 Excel 中, 以施氮量为自变量 ( $x$ )、籽粒产量为因变量 ( $y$ ) 制作散点图并添加趋势线 (趋势线选择二项式), 得出拟合曲线方程和  $R^2$  值。

1.7 数据处理

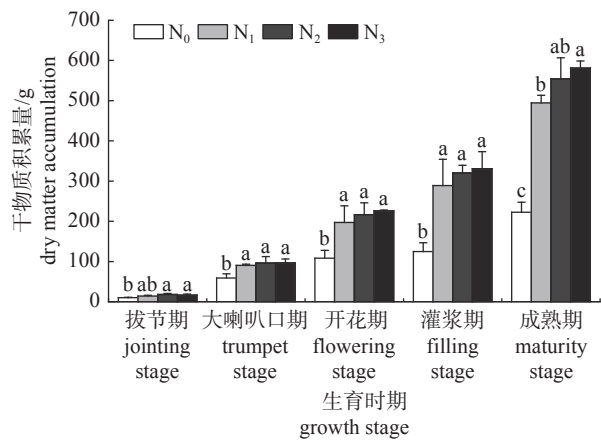
采用 Excel 2016 和 SPSS 19.0 软件进行数据统计与分析, 采用 Origin 7.5 绘图。

2 结果与分析

2.1 施氮量对玉米干物质积累量、籽粒产量和水分利用效率的影响

由图 1 可知: 玉米单株干物质的积累量随着施氮量的增加而增加。拔节期至灌浆期, 各施氮

处理间差异不显著 ( $P>0.05$ ); 在成熟期,  $N_3$  处理的单株干物质积累量较  $N_2$ 、 $N_1$  和  $N_0$  分别提高 4.87%、17.61% 和 161.32%,  $N_2$  和  $N_3$  处理间差异不显著 ( $P>0.05$ )。可见合理的施氮量可以提高单株玉米干物质积累量, 特别是生育后期促进同化物的积累。



注: 不同小写字母表示处理间在 0.05 水平上差异显著; 下同。  
Note: Different lowercase letters indicate significant differences among treatments at  $P=0.05$ ; the same as below.

图 1 施氮量对玉米单株干物质积累的影响

Fig. 1 Effects of nitrogen application rate on the dry matter accumulation of per maize plant

由表 1 可知: 果穗数随施氮量的增加而增加,  $N_2$  和  $N_3$  处理的果穗数分别较  $N_0$  增加 56.67% 和 63.33%, 但  $N_2$  和  $N_3$  处理间差异不显著 ( $P>0.05$ ); 施氮量对穗行数的影响较小, 各处理间差异均不显著 ( $P>0.05$ ); 行粒数表现为  $N_1>N_2>N_3>N_0$ ,  $N_1$ 、 $N_2$  和  $N_3$  处理的行粒数分别较  $N_0$  增加 64.19%、49.78% 和 42.36%; 百粒质量随施氮量的增加而增加, 各施氮处理间差异也不显著 ( $P>0.05$ )。籽粒产量随施氮量的增加而增加,  $N_2$  和  $N_3$  的产量分别比  $N_0$  提高 161% 和 184%, 但  $N_2$  和  $N_3$  处理间差异不显著 ( $P>0.05$ )。

表 1 施氮量对玉米产量、产量构成和水分利用效率的影响

| Tab. 1 Effects of nitrogen application rate on grain yield and its components and water use efficiency of maize |                     |                     |                        |                              |                                      |                             |                                                                         |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------|---------------------|------------------------|------------------------------|--------------------------------------|-----------------------------|-------------------------------------------------------------------------|
| 处理<br>treatment                                                                                                 | 果穗数<br>ears numbers | 穗行数<br>rows numbers | 行粒数<br>kernels numbers | 百粒质量/g<br>100 kernels weight | 籽粒产量/(kg·hm <sup>-2</sup> )<br>yield | 耗水量/mm<br>water consumption | 水分利用效率/(kg·mm <sup>-1</sup> ·hm <sup>-2</sup> )<br>water use efficiency |
| N <sub>0</sub>                                                                                                  | 52500±0 b           | 15.9±0.5 a          | 22.9±1.3 c             | 28.6±1.0 b                   | 4031.84±350.29 c                     | 418.73±1.80 c               | 9.62±0.80 c                                                             |
| N <sub>1</sub>                                                                                                  | 61250±8 750 b       | 16.2±0.3 a          | 37.6±1.4 a             | 33.4±0.8 a                   | 8345.52±558.18 b                     | 460.27±3.82 b               | 18.15±1.30 b                                                            |
| N <sub>2</sub>                                                                                                  | 82250±1 750 a       | 15.7±0.1 a          | 34.3±1.3 ab            | 34.2±1.1 a                   | 10542.67±813.55 a                    | 473.34±5.49 a               | 22.28±1.71 a                                                            |
| N <sub>3</sub>                                                                                                  | 85750±1 750 a       | 16.1±0.2 a          | 32.6±1.1 b             | 36.0±0.8 a                   | 11461.26±124.56 a                    | 466.16±2.55 ab              | 24.59±0.27 a                                                            |

注: 同列不同小写字母表示处理间在0.05水平上差异显著; 下同。  
Note: Different lowercase letters in the same column indicate significant differences among treatments at  $P=0.05$ ; the same as below.

玉米耗水量表现为  $N_2 > N_3 > N_1 > N_0$ , 各施氮处理均显著高于  $N_0$  ( $P < 0.05$ )。施氮量对水分利用效率的影响趋势与产量一致,  $N_3$  和  $N_2$  处理间差异不显著 ( $P > 0.05$ ), 但均显著高于  $N_1$  和  $N_0$  ( $P < 0.05$ ), 且  $N_2$  比  $N_0$  提高 132%。

玉米产量与施氮量的相关分析表明 (图 2): 产量随施氮量的增加呈先增加后减小变化, 两者呈抛物线关系, 拟合方程为  $y = -0.0849x^2 + 49.494x + 4073.7$  ( $R^2 = 0.9989$ )。根据拟合方程求得最高产量为  $11\,434.29 \text{ kg/hm}^2$ , 对应的施氮量为  $294.16 \text{ kg/hm}^2$ , 与实际最高单产处理 ( $N_3$ ) 的施氮量接近。

## 2.2 施氮量对土壤水分亏缺程度的影响

由图 3 可知: 在玉米生育期内, 施氮处理 0~200 cm 的土壤水分亏缺程度明显高于不施氮处理, 但各施氮处理间差异不显著 ( $P > 0.05$ )。在拔节期至开花期, 水分亏缺程度为  $N_2 > N_3 > N_1 > N_0$ ; 灌浆期至收获后, 水分亏缺程度为  $N_3 > N_2 > N_1 > N_0$ , 可见, 施氮量不同, 会不同程度地促进玉米生长, 增加耗水量, 导致土壤水分亏缺程度不同。

## 2.3 施氮量对玉米叶片保护酶活性以及 MDA 和可溶性糖含量的影响

由图 4 可知: 随着玉米生育时期的推进, SOD 活性呈先升高后降低再回升的趋势, 且随施氮量的增加而增强, 以蜡熟期为例,  $N_3$  的 SOD

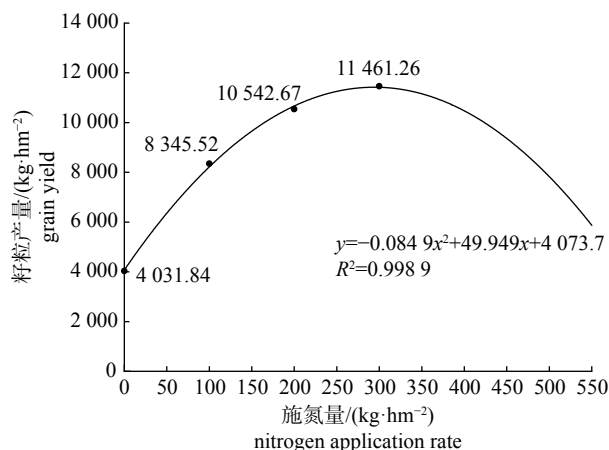
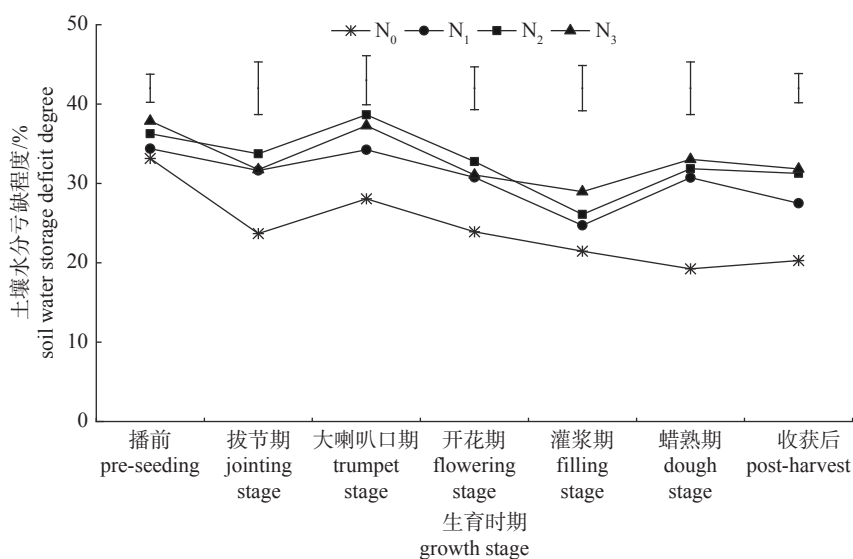


图2 玉米籽粒产量与施氮量的关系

Fig. 2 The relationship between maize grain yield and nitrogen application rate

活性分别较  $N_2$ 、 $N_1$  和  $N_0$  提高 19.34%、52.80% 和 72.01%。随着生育时期的推进,  $N_0$  处理的 POD 活性先升高后降低, 而各施氮处理的 POD 活性逐渐增强。拔节期各处理的 POD 活性差异不显著 ( $P > 0.05$ ), 大喇叭口期和开花期 POD 活性表现为  $N_2 > N_3 > N_1 > N_0$ , 而灌浆期和蜡熟期 POD 活性表现为  $N_3 > N_2 > N_1 > N_0$ , 但在除灌浆期外的其他生育时期,  $N_2$  和  $N_3$  处理间差异均不显著 ( $P > 0.05$ )。随着生育时期的推进, 各处理 CAT 活性先升高后降低, 且随施氮量的增加而升高, 在拔节期处



注: 不同短线表示 0.05 水平上的 LSD 值; 下同。

Note: Different short lines indicate the LSD value at 0.05 level; the same as below.

图3 不同氮素水平下各时期土壤 (0~200 cm) 水分亏缺程度

Fig. 3 Soil water storage deficit degree (0~200 cm) at different stages under different nitrogen levels

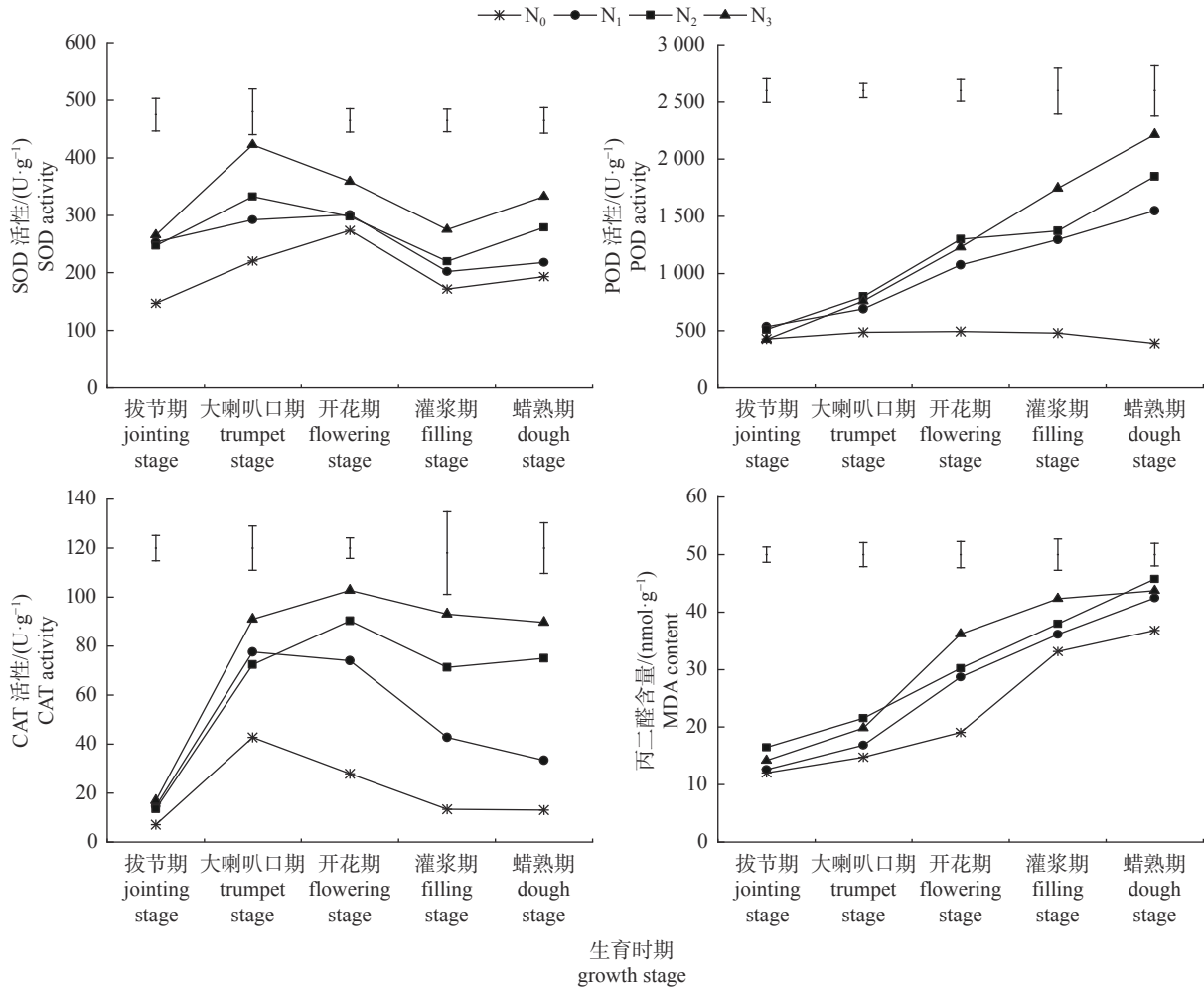


图 4 施氮量对玉米叶片 SOD、POD 和 CAT 活性以及 MDA 含量的影响

Fig. 4 Effects of nitrogen application rate on the SOD, POD, CAT activity and MDA content of maize leaves

理间差异不显著 ( $P>0.05$ ), 到开花期各处理间差异显著 ( $P<0.05$ ), N<sub>3</sub> 的 CAT 活性分别是 N<sub>2</sub>、N<sub>1</sub> 和 N<sub>0</sub> 的 1.14 倍、1.39 倍和 3.69 倍, 灌浆期和蜡熟期的 CAT 活性也表现为 N<sub>3</sub>>N<sub>2</sub>>N<sub>1</sub>>N<sub>0</sub>, 但 N<sub>2</sub> 和 N<sub>3</sub> 处理间差异不显著 ( $P>0.05$ )。随着生育时期的推进, MDA 含量呈上升趋势。开花至灌浆期 MDA 含量表现为 N<sub>3</sub>>N<sub>2</sub>>N<sub>1</sub>>N<sub>0</sub>, 而在拔节、大喇叭口期和蜡熟期 MDA 含量则表现为 N<sub>2</sub>>N<sub>3</sub>>N<sub>1</sub>>N<sub>0</sub>, 但除灌浆期外, N<sub>3</sub> 和 N<sub>2</sub> 处理在其他生育时期差异不显著 ( $P>0.05$ )。

由图 5 可知: 随着生育时期的推进, 施氮处理的玉米叶片可溶性糖含量表现为先降低再升高的趋势, 拔节期至大喇叭口期逐渐下降, 大喇叭口期至蜡熟期逐渐升高。在拔节期和蜡熟期, 可溶性糖含量随施氮量的增加整体呈增加趋势, 施氮处理的可溶性糖含量显著高于 N<sub>0</sub> ( $P<0.05$ ), 但

施氮处理间差异不显著 ( $P>0.05$ ); 而在大喇叭口期和开花期, 可溶性糖含量则表现为相反的趋势, N<sub>0</sub> 的可溶性糖含量显著高于施氮处理 ( $P<0.05$ )。

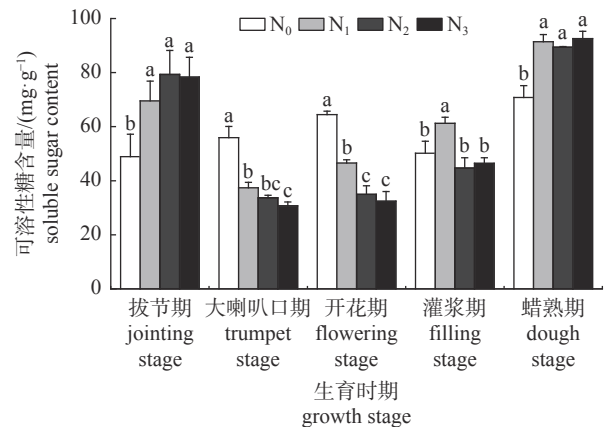


图 5 施氮量对玉米叶片可溶性糖含量的影响

Fig. 5 Effect of nitrogen application rate on the soluble sugar content of maize leaves

2.4 施氮量对玉米叶片光合关键酶活性、净光合速率及叶绿素含量的影响

由图 6 可知: 随着玉米生育时期的推进, 不同处理 PEP 羧化酶活性均呈先增后减的趋势, 不同处理间 PEP 羧化酶活性随施氮量的增加呈明显增加的趋势。在拔节、开花和灌浆期, 3 个施氮处理的 PEP 羧化酶活性显著高于 N<sub>0</sub> 处理 ( $P<0.05$ ), 但施氮处理间差异不显著 ( $P>0.05$ ); 在蜡熟期, N<sub>3</sub> 处理的 PEP 羧化酶活性分别较 N<sub>0</sub>、N<sub>1</sub> 和 N<sub>2</sub> 提高 272.06%、18.86% 和 6.99%, N<sub>2</sub> 和 N<sub>3</sub> 间差异不显著 ( $P>0.05$ )。可见, 合理施氮有助于玉米功能叶片 PEP 羧化酶活性的提高, 但随着氮肥用量的增加, PEP 羧化酶活性增幅变小。RuBP 羧化酶活性变化规律与 PEP 羧化酶基本一致。可见, 合理增施氮肥有助于提高 PEP 羧化酶和 RuBP 羧化酶活性, 促进光合作用。

由表 2 可知: 随着生育时期的推进, 玉米净光合速率先增大再减小, N<sub>0</sub> 在大喇叭口期最大, 而各施肥处理在开花期最大。玉米净光合速率随

施氮量增加而增大, 在拔节期和开花期各处理间差异显著 ( $P<0.05$ ); 在大喇叭口期和蜡熟期, N<sub>2</sub> 和 N<sub>3</sub> 处理间差异不显著 ( $P>0.05$ ), 但均显著高于 N<sub>1</sub> 和 N<sub>0</sub> 处理 ( $P<0.05$ ); 灌浆期 N<sub>1</sub>、N<sub>2</sub> 和 N<sub>3</sub> 处理间差异不显著 ( $P>0.05$ ), 但均显著高于 N<sub>0</sub> ( $P<0.05$ )。说明合理的施氮量可以提高玉米净光合速率, 但超过一定范围, 施氮量对光合速率的促进作用减弱。

由图 7 可知: 随着玉米生育时期的推进, 各施氮处理的叶绿素含量呈单峰抛物线型, 但 N<sub>1</sub> 和 N<sub>2</sub> 在开花期达到峰值, 而 N<sub>3</sub> 在灌浆期达到峰值。N<sub>0</sub> 处理叶绿素含量在拔节期最大, 其次为开花期, 开花期后逐渐降低。此外, 叶绿素含量随施氮量的增加而增大, 生育后期 N<sub>1</sub> 和 N<sub>3</sub> 的叶绿素含量下降均比 N<sub>2</sub> 快, 到蜡熟期, N<sub>2</sub> 和 N<sub>3</sub> 的叶绿素含量差异不显著 ( $P>0.05$ ), 但都显著高于 N<sub>0</sub> 和 N<sub>1</sub> ( $P<0.05$ )。可见, 适宜的施氮量可提高玉米叶片叶绿素含量, 但当氮肥用量超过一定范围后, 施氮并不会使叶绿素含量显著增加。

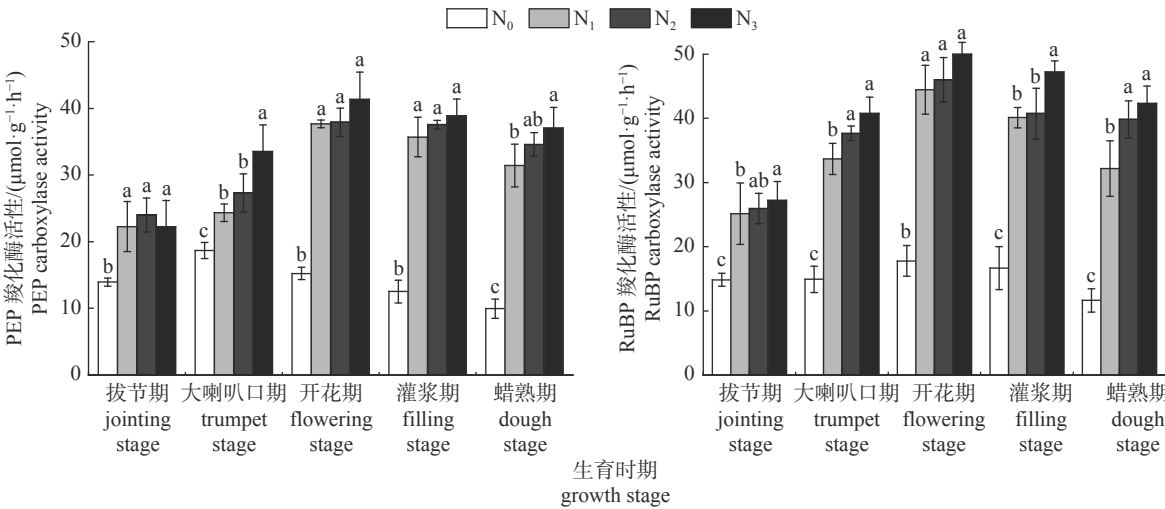


图 6 施氮量对玉米叶片 PEP 羧化酶和 RuBP 羧化酶活性的影响

Fig. 6 Effects of nitrogen application rate on the PEP and RuBP carboxylase activity of maize leaves

表 2 施氮量对玉米净光合速率的影响

Tab. 2 Effect of nitrogen application rate on the net photosynthetic rate of maize

| 处理<br>treatment | 拔节期<br>jointing stage | 大喇叭口期<br>trumpet stage | 开花期<br>flowering stage | 灌浆期<br>filling stage | 蜡熟期<br>dough stage |
|-----------------|-----------------------|------------------------|------------------------|----------------------|--------------------|
| N <sub>0</sub>  | 17.3±0.2 d            | 23.1±1.3 b             | 15.9±0.8 d             | 16.0±0.9 b           | 9.1±0.3 c          |
| N <sub>1</sub>  | 23.0±1.8 c            | 25.4±0.3 b             | 45.6±0.4 c             | 31.6±1.6 a           | 23.3±0.4 b         |
| N <sub>2</sub>  | 30.3±0.8 b            | 45.2±1.7 a             | 48.4±0.3 b             | 34.2±0.1 a           | 26.1±1.1 a         |
| N <sub>3</sub>  | 41.2±0.5 a            | 48.2±1.6 a             | 51.9±0.8 a             | 34.4±0.4 a           | 26.3±0.7 a         |

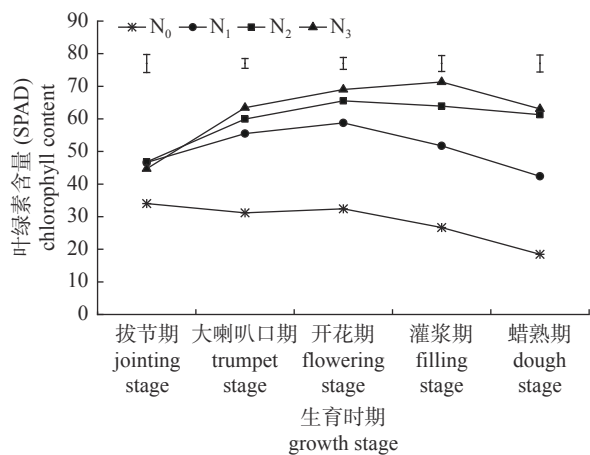


图 7 施氮量对玉米叶片叶绿素含量的影响

Fig. 7 Effect of nitrogen application rate on the chlorophyll content of maize leaves

### 3 讨论

#### 3.1 不同氮素水平对玉米产量和水分利用效率的影响

氮素是影响玉米生长发育的重要元素之一,合理运用氮素是实现玉米高产的有效措施。研究表明:在一定范围内玉米产量随施氮量的增加而增加,但超过一定范围后,产量不再随施氮量的增加而提高,甚至有所下降<sup>[26]</sup>。本研究各处理的籽粒产量随施氮量的增加而增加,但施氮量与籽粒产量的拟合曲线呈抛物线型。果穗数随施氮量的增加而增加, N<sub>2</sub> 和 N<sub>3</sub> 处理分别较 N<sub>0</sub> 增加 56.67% 和 63.33%, N<sub>2</sub> 和 N<sub>3</sub> 处理间差异不显著 ( $P>0.05$ ); 施氮能够促进穗行数、行粒数和百粒质量增加,但由于施氮增加了单株果穗数,导致各施氮处理的穗行数和行粒数并未随施氮量增加而增加,甚至有所下降。玉米单株干物质积累量随施氮量的增加而提高,灌浆期之前各施氮处理间差异不显著,到成熟期 N<sub>3</sub> 与 N<sub>2</sub> 处理差异仍不显著 ( $P>0.05$ ),但 N<sub>3</sub> 显著高于 N<sub>1</sub> ( $P<0.05$ ),这表明合理施氮有利于玉米生育后期干物质的积累和转运,从而提高产量<sup>[27]</sup>。有研究表明:在干旱胁迫条件下,施氮能够提高水分利用效率<sup>[28]</sup>,而氮肥提高产量和水分利用效率的基础是增加植株的蒸腾作用和减少土壤水分蒸发<sup>[29]</sup>。本研究结果显示:总耗水量随施氮量的增加先增大再减小,在生育期内,施氮处理的水分亏缺程度一直高于 N<sub>0</sub> 处理, N<sub>2</sub> 处理在开花前耗水量最大, N<sub>3</sub> 处理在开花后耗水量最大,即施氮能促进玉米对水分

的吸收利用,但是不同氮素水平下,玉米在各生育时期对水分的吸收利用情况不同。N<sub>2</sub> 和 N<sub>3</sub> 处理的水分利用效率显著高于 N<sub>1</sub> 和 N<sub>0</sub> ( $P<0.05$ ),这表明适宜施氮条件下,较多的土壤水分被玉米根系吸收,促进玉米生长发育,从而提高籽粒产量和水分利用效率。N<sub>3</sub> 和 N<sub>2</sub> 处理的籽粒产量和水分利用效率没有显著差异 ( $P<0.05$ ),由施氮量与产量的拟合曲线可知:拟合的最高产量所对应的施氮量为 294.16 kg/hm<sup>2</sup>,而 N<sub>3</sub> 处理的施氮量为 300 kg/hm<sup>2</sup>,可能是过量氮肥抑制了玉米根系的生长<sup>[30]</sup>,减少了根系对养分和水分的吸收利用,限制了增产幅度,施氮量达到 200 kg/hm<sup>2</sup> 后,再增加施氮量可能不会显著提高玉米产量。

#### 3.2 氮素提高玉米产量的生理机制

适量施氮具有全面改善玉米光合效率和内在生理、生化过程的作用<sup>[31]</sup>。有研究表明:适当供氮能提高玉米净光合速率<sup>[30]</sup>和保护酶活性,增强叶肉细胞对活性氧自由基的清除能力,能有效地控制膜脂过氧化水平,维持细胞的稳定性,预防早衰<sup>[32]</sup>。本研究表明:玉米功能叶的 SOD、POD 和 CAT 活性随施氮量的增加而增强,随着生育期的推进, SOD 活性先升高后降低再升高,因为到蜡熟期籽粒干物质积累的高峰期已过<sup>[33]</sup>,叶片中养分的转移速率下降,叶片对活性氧的清除能力又有所加强,促使 SOD 活性提高。CAT 活性呈先升后降的趋势,而 POD 活性逐渐升高,这可能与 POD 功能多样性有关,也可能与采样时的气候或环境条件等因素有关<sup>[15]</sup>。MDA 含量随施氮量的增加而升高,这与李佩艳等<sup>[34]</sup>的研究结果不同,这可能是施氮处理水分亏缺严重导致 MDA 含量较高<sup>[35]</sup>和氮素过量使叶片膜脂过氧化加剧<sup>[16]</sup>共同作用的结果。可溶性糖是逆境下作物主要的渗透调节物质<sup>[36]</sup>。有研究表明:水分胁迫下植物叶片会增加可溶性糖含量以抵御干旱<sup>[37]</sup>;也有研究指出:适宜的氮肥用量可提高叶片可溶性糖含量<sup>[38]</sup>、叶绿素含量和叶片的束缚水含量,从而提高作物的抗旱性<sup>[39]</sup>。本研究结果显示:在拔节期和蜡熟期,可溶性糖含量随施氮量的增加而增加,由于拔节期和蜡熟期降雨量较少,施氮处理通过提高可溶性糖含量来提高玉米的抗旱能力。然而,大喇叭口期至开花期可溶性糖含量随施氮量的增加而减小,因为拔节期之后,玉米生长加快,对养分的需求增大,氮素胁迫导致可溶

性糖含量升高<sup>[40]</sup>。适宜的施氮量能够增强玉米的抗旱能力,而抗旱性的增强有助于提高光合性能<sup>[41]</sup>。本研究中,施氮处理的 PEP 羧化酶和 RuBP 羧化酶活性以及净光合速率均显著高于  $N_0$  ( $P < 0.05$ );在灌浆期,  $N_2$  和  $N_3$  处理的叶绿素含量和光合速率仍保持较高水平,且显著高于  $N_0$  ( $P < 0.05$ ),说明适宜的施氮量能够延缓衰老延长高光合维持时间。研究表明:玉米籽粒产量的 60% 以上来自花后光合同化物质<sup>[42]</sup>,即玉米灌浆期叶片保持较高的光合能力及较长的功能期,是提高籽粒产量和水分利用效率的关键。

#### 4 结论

在陇中旱农区全膜双垄沟播技术种植玉米,施纯氮约 200 kg/hm<sup>2</sup> 能够相对较好地提高玉米的抗旱能力,使叶片光合关键酶活性和叶绿素含量保持较高水平,从而提高净光合速率,并在生育后期能提高保护酶活性,控制丙二醛含量,抑制膜脂过氧化过程,延缓生育后期玉米叶片的衰老进程,延长叶片光合功能期,促进生育后期干物质的积累量和转运,从而提高玉米籽粒产量和水分利用效率。

#### [参考文献]

- [1] LI F R, ZHAO S L, GEBALLE G T. Water use patterns and agronomic performance for some cropping systems with and without fallow crops in a semi-arid environment of northwest China[J]. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 2000, 79(2/3): 129. DOI: 10.1016/S0167-8809(99)00149-8.
- [2] 张雷, 牛建彪, 赵凡. 旱作玉米提高降水利用率的覆膜模式研究[J]. *干旱地区农业研究*, 2006, 24(2): 8. DOI: 10.3321/j.issn:1000-7601.2006.02.002.
- [3] 巩杰, 黄高宝, 陈利顶, 等. 旱作麦田秸秆覆盖的生态综合效应研究[J]. *干旱地区农业研究*, 2003, 21(3): 69. DOI: 10.3321/j.issn:1000-7601.2003.03.015.
- [4] 王红丽, 张绪成, 宋尚有, 等. 西北黄土高原旱地全膜双垄沟播种植对玉米季节性耗水和产量的调节机制[J]. *中国农业科学*, 2013, 46(5): 917. DOI: 10.3864/j.issn.0578-1752.2013.05.006.
- [5] 谢军红, 柴强, 李玲玲, 等. 黄土高原半干旱区不同覆膜连作玉米产量的水分承载时限研究[J]. *中国农业科学*, 2015, 48(8): 1558. DOI: 10.3864/j.issn.0578-1752.2015.08.10.
- [6] 曹翠玲, 李生秀. 氮素形态对作物生理特性及生长的影响[J]. *华中农业大学学报*, 2004, 23(5): 581. DOI: 10.3321/j.issn:1000-2421.2004.05.025.
- [7] 高逖, 李春喜, 周宝元, 等. 种植密度和施氮量耦合对夏玉米干物质积累及氮肥利用率的影响[J]. *玉米科学*, 2017, 25(5): 105. DOI: 10.13597/j.cnki.maize.science.20170517.
- [8] 张林, 武文明, 陈欢, 等. 氮肥运筹方式对土壤无机氮变化、玉米产量和氮素吸收利用的影响[J]. *中国土壤与肥料*, 2021(4): 126. DOI: 10.11838/sfsc.1673-6257.20285.
- [9] 蔡瑞国, 张敏, 尹燕桦, 等. 小麦灌浆过程中旗叶光合及抗氧化代谢与氮素营养关系研究[J]. *中国农业科学*, 2008, 41(1): 53. DOI: 10.3864/j.issn.0578-1752.2008.01.007.
- [10] 杨亮, 赵宏伟, 刘锦红. 氮素用量对春玉米功能叶片谷氨酰胺合成酶活性及产量的影响[J]. *东北农业大学学报*, 2007, 38(3): 320. DOI: 10.3969/j.issn.1005-9369.2007.03.007.
- [11] BERGES J A, CHARLEBOIS D O, FALKOWSKI M P G. Differential effects of nitrogen limitation on photosynthetic efficiency of photosystems I and II in microalgae[J]. *Plant Physiology*, 1996, 110(2): 689. DOI: 10.1104/pp.110.2.689.
- [12] 高向阳, 徐凤彩, 赵亚华, 等. 普通玉米和超甜玉米苗期蔗糖合成酶与磷酸蔗糖合成酶的活力比较[J]. *华南农业大学学报*, 2001, 22(2): 46. DOI: 10.3969/j.issn.1001-411X.2001.02.014.
- [13] 战秀梅, 韩晓日, 杨劲峰, 等. 不同施肥处理对玉米生育后期叶片保护酶活性及膜脂过氧化作用的影响[J]. *玉米科学*, 2007, 15(1): 123. DOI: 10.3969/j.issn.1005-0906.2007.01.031.
- [14] 李婷. 覆膜、施氮和密度对旱地玉米产量和水氮利用效率的互作效应[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2018.
- [15] 杨忠浩, 党廷辉, 路远, 等. 黄土塬区春玉米氮肥—水分—产量关系研究[J]. *水土保持学报*, 2020, 34(4): 237. DOI: 10.13870/j.cnki.stbxb.2020.04.035.
- [16] 胡红玲, 张健, 胡庭, 等. 不同施氮水平对巨桉幼树耐旱生理特征的影响[J]. *西北植物学报*, 2014, 34(1): 118. DOI: 10.7606/j.issn.1000-4025.2014.01.0118.
- [17] 李世清, 田霄鸿, 李生秀. 养分对旱地小麦水分胁迫的生理补偿效应[J]. *西北植物学报*, 2000, 20(1): 22. DOI: 10.3321/j.issn:1000-4025.2000.01.004.
- [18] 王进斌, 谢军红, 李玲玲, 等. 氮肥运筹对陇中旱农区玉米光合特性及产量的影响[J]. *草业学报*, 2019, 28(1): 60. DOI: 10.11686/cyxb2018096.
- [19] 王宜伦. 超高产夏玉米氮肥运筹效应及其生理基础研究[D]. 郑州: 河南农业大学, 2010.
- [20] 刘亚亮, 张治安, 赵洪祥, 等. 氮肥不同比例分期施用对超高产玉米叶片保护酶活性的影响[J]. *西北农林科技大学学报(自然科学版)*, 2011, 39(2): 202. DOI: 10.13207/j.cnki.jnwafu.2011.02.018.
- [21] 施教耐, 吴敏贤, 查静娟. 植物磷酸烯醇式丙酮酸羧化酶的研究: I. PEP羧化酶同功酶的分离和变构特性的比较[J]. *植物生理学报*, 1979, 5(3): 225.
- [22] RACKER E. Ribulose diphosphate carboxylase from spinach leaves[J]. *Methods in Enzymology*, 1962, 5: 266. DOI: 10.1016/S0076-6879(62)05216-7.
- [23] 王学奎. 植物生理生化实验原理与技术[M]. 北京: 高等教育出版社, 2015.

- [24] 李小方, 张志良. 植物生理学实验指导[M]. 北京: 高等教育出版社, 2016.
- [25] 陈建勋, 王晓峰. 植物生理学实验指导[M]. 广州: 华南理工大学出版社, 2006.
- [26] 杨恩琼, 黄建国, 何腾兵, 等. 氮肥用量对普通玉米产量和营养品质的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2009, 15(3): 509. DOI: [10.3321/j.issn:1008-505X.2009.03.003](https://doi.org/10.3321/j.issn:1008-505X.2009.03.003).
- [27] 张磊, 孔丽丽, 侯云鹏, 等. 施氮水平对玉米开花后干物质积累、转运及土壤无机氮含量的影响[J]. 玉米科学, 2020, 28(4): 155. DOI: [10.13597/j.cnki.maize.science.20200423](https://doi.org/10.13597/j.cnki.maize.science.20200423).
- [28] LI S X, WANG Z H, LI S Q, et al. Effect of nitrogen fertilization under plastic mulched and non-plastic mulched conditions on water use by maize plants in dryland areas of China[J]. Agricultural Water Management, 2015, 162: 15. DOI: [10.1016/j.agwat.2015.08.004](https://doi.org/10.1016/j.agwat.2015.08.004).
- [29] LI S X, WANG Z H, MALHI S S, et al. Nutrient and water management effects on crop production, and nutrient and water use efficiency in dryland areas of China[J]. Advances in Agronomy, 2009, 102: 223. DOI: [10.1016/S0065-2113\(09\)01007-4](https://doi.org/10.1016/S0065-2113(09)01007-4).
- [30] 黄高宝, 张恩和, 胡恒觉. 不同玉米品种氮素营养效率差异的生态生理机制[J]. 植物营养与肥料学报, 2001, 7(3): 293. DOI: [10.3321/j.issn:1008-505X.2001.03.008](https://doi.org/10.3321/j.issn:1008-505X.2001.03.008).
- [31] 吕鹏. 氮素运筹对高产夏玉米产量和品质及相关生理特性影响的研究[D]. 泰安: 山东农业大学, 2011.
- [32] 刘艳, 汪仁, 华利民, 等. 施氮量对玉米生育后期叶片衰老与保护酶系统的影响[J]. 玉米科学, 2012, 20(2): 124. DOI: [10.3969/j.issn.1005-0906.2012.02.026](https://doi.org/10.3969/j.issn.1005-0906.2012.02.026).
- [33] 金继运, 何萍. 氮钾互作对春玉米生物产量及其组分动态的影响[J]. 玉米科学, 1999, 7(4): 57.
- [34] 李佩艳, 尹飞, 王俊忠, 等. 施氮量和氮肥后施对夏玉米叶片衰老生理的影响[J]. 河南农业科学, 2010(10): 26. DOI: [10.3969/j.issn.1004-3268.2010.10.012](https://doi.org/10.3969/j.issn.1004-3268.2010.10.012).
- [35] 谢幸华, 郭书亚, 张艳, 等. 水肥管理对夏玉米叶片衰老及产量的影响[J]. 农业科技通讯, 2017(1): 4. DOI: [10.3969/j.issn.1000-6400.2017.01.033](https://doi.org/10.3969/j.issn.1000-6400.2017.01.033).
- [36] 李春燕, 陈思思, 徐雯, 等. 苗期低温胁迫对扬麦16叶片抗氧化酶和渗透调节物质的影响[J]. 作物学报, 2011, 37(12): 2293. DOI: [10.3724/SP.J.1006.2011.02293](https://doi.org/10.3724/SP.J.1006.2011.02293).
- [37] 王静, 杨德光, 马凤鸣, 等. 水分胁迫对玉米叶片可溶性糖和脯氨酸含量的影响[J]. 玉米科学, 2007, 15(6): 57. DOI: [10.3969/j.issn.1005-0906.2007.06.013](https://doi.org/10.3969/j.issn.1005-0906.2007.06.013).
- [38] 王帅. 高产玉米生理生化特性及推荐施肥研究[D]. 沈阳: 沈阳农业大学, 2008.
- [39] 熊亚梅. 水分与氮素对蔬菜产量和品质及土壤环境的影响[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2007.
- [40] 李朝苏, 吴晓丽, 汤永禄, 等. 小麦产量对中后期氮素胁迫的响应及品种间差异[J]. 作物学报, 2019, 45(8): 1260. DOI: [10.3724/SP.J.1006.2019.81083](https://doi.org/10.3724/SP.J.1006.2019.81083).
- [41] 杜伟莉, 高杰, 胡富亮, 等. 玉米叶片光合作用和渗透调节对干旱胁迫的响应[J]. 作物学报, 2013, 39(3): 530. DOI: [10.3724/SP.J.1006.2013.00530](https://doi.org/10.3724/SP.J.1006.2013.00530).
- [42] 张仁和, 郭东伟, 张兴华, 等. 吐丝期干旱胁迫对玉米生理特性和物质生产的影响[J]. 作物学报, 2012, 38(10): 1884. DOI: [10.3724/SP.J.1006.2012.01884](https://doi.org/10.3724/SP.J.1006.2012.01884).

责任编辑: 何承刚