

滴灌减氮对四川盆地玉米吐丝后 叶片衰老和物质积累的影响

刘凡¹,刘斌祥¹,郭宗翔¹,崔世磊¹,刘举²,
杨云飞²,李小龙²,孔凡磊¹,袁继超¹

(1.四川农业大学农学院/农业农村西南作物生理生态与耕作重点实验室/作物生理生态及
栽培四川省重点实验室,四川成都611130;2.中江县农业农村局,四川中江618100)

摘要:为研究滴灌减氮对玉米吐丝后叶片衰老特性、碳氮代谢及物质积累的影响,设置正常施氮($240\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$, N_{240})和减氮25%($180\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$, N_{180})2个氮肥量和4个滴灌水平($0\text{ m}^3\cdot\text{hm}^{-2}$, B_0 ; $375\text{ m}^3\cdot\text{hm}^{-2}$, B_1 ; $750\text{ m}^3\cdot\text{hm}^{-2}$, B_2 ; $1125\text{ m}^3\cdot\text{hm}^{-2}$, B_3),并以不施氮且不滴灌为对照组(CK),分析比较了不同氮肥水平下滴灌对玉米吐丝后穗位叶叶绿素含量、保护酶(超氧化物歧化酶,SOD;过氧化物酶,POD;过氧化氢酶,CAT)和碳氮代谢酶(蔗糖合成酶,SS;谷氨酰胺合成酶,GS)活性及物质积累的影响。结果表明:玉米吐丝后穗位叶叶绿素含量、保护酶和碳氮代谢酶活性以及吐丝后物质积累量均随施氮量和滴灌量增加而增加,且二者间存在一定互作效应。 $N_{180}B_0$ 较 $N_{240}B_0$ 处理各测定时期的平均叶绿素含量、SOD、POD、CAT、SS和GS活性及花后干物质积累量分别降低19.01%、19.71%、10.55%、7.32%、10.91%、19.91%和4.46%,但 $N_{180}B_3$ 处理的上述指标与 $N_{240}B_0$ 差异不显著甚至高于 $N_{240}B_0$,表明氮肥水平和滴灌量间存在一定协同作用和互补效应, $N_{180}B_3$ 处理能实现延缓叶片衰老、维持较强的碳氮代谢能力。研究结果可为四川盆地玉米水肥一体化减氮增效技术提供理论依据。

关键词:玉米;滴灌;叶片衰老;碳氮代谢;物质积累

中图分类号:S143.1,S513 文献标志码:A

Effects of nitrogen reduction by drip irrigation on leaf senescence and matter accumulation of maize after silking in Sichuan Basin

LIU Fan¹, LIU Binxiang¹, GUO Zongxiang¹, CUI Shilei¹, LIU Ju²,
YANG Yunfei², LI Xiaolong², KONG Fanlei¹, YUAN Jichao¹

(1.College of Agronomy, Sichuan Agricultural University/Key Laboratory of Crop Ecophysiology and Farming System
in Southwest China, Ministry of Agriculture and Rural Affairs/Key Laboratory of Crop Ecophysiology and Cultivation,
Sichuan Province, Chengdu, Sichuan 611130, China; 2.Agricultural and Rural Bureau
of Zhongjiang County, Zhongjiang, Sichuan 618100, China)

Abstract: The objective of this study was to examine the effects of nitrogen reduction and drip irrigation on leaf senescence, carbon and nitrogen metabolism and matter accumulation of maize after silking. Two levels of normal nitrogen ($240\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$, N_{240}) and nitrogen 25% reduction ($180\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$, N_{180}) and four different drip irrigation quantities ($0\text{ m}^3\cdot\text{hm}^{-2}$, B_0 ; $375\text{ m}^3\cdot\text{hm}^{-2}$, B_1 ; $750\text{ m}^3\cdot\text{hm}^{-2}$, B_2 ; $1125\text{ m}^3\cdot\text{hm}^{-2}$, B_3) with non-irrigation and non-nitrogen application as control (CK) were set. A total of 9 treatments were designed to compare the differences of chlorophyll content, protective enzyme activity (superoxide dismutase, SOD; peroxidase, POD; catalase, CAT), carbon and nitrogen metabolic enzyme activity (sucrose synthetase, SS; glutamine synthetase, GS) and matter accumulation of maize leaves after silking with drip irrigation under different nitrogen fertilizer levels. The results showed that the chlorophyll content, activities of protective enzymes, carbon and nitrogen metabolic enzymes and matter accumulation after silking increased with the increase of nitrogen application and drip

irrigation, and there was a certain interaction between them. Compared with normal nitrogen treatment ($N_{240}B_0$), the average chlorophyll content, SOD, POD, CAT, SS and GS activities and post-anthesis dry matter accumulation of 25% nitrogen reduction treatment ($N_{180}B_0$) decreased by 19.01%, 19.71%, 10.55%, 7.32%, 10.91%, 19.91% and 4.46%, respectively, but there was no significant difference between $N_{180}B_3$ and $N_{240}B_0$ with even higher than that of $N_{240}B_0$. Meanwhile, there was a certain synergistic and complementary effect between nitrogen fertilizer level and drip irrigation amount. This research demonstrated that the $N_{180}B_3$ treatment delayed leaf senescence, maintained strong carbon and nitrogen metabolism. The study provides a theoretical basis for integrated water and fertilizer nitrogen reduction technology for maize production in the Sichuan Basin.

Keywords: maize; drip irrigation; leaf senescence; carbon and nitrogen metabolism; matter accumulation

在玉米生产中为确保高产而普遍存在氮肥施用过量问题^[1-3], 仅约 30% 氮素被吸收, 大部分被淋溶到土壤深层^[4], 造成资源浪费和环境污染^[5-6]。为农业可持续发展, 对合理施氮已开展了大量研究^[1-2, 6-9], 表明适量减氮能在保证粮食高产的同时提高氮肥利用率。Ju 等^[10]认为, 改善氮管理可以降低 30%~60% 当前氮肥用量, 保持产量稳定, 并减少约 1/2 的氮损失。氮和水是限制作物生产潜力的主要因素^[11], 合理的水氮配置能充分发挥水氮耦合效应^[1, 7], 适量灌水或施氮可对缺乏另一因子的负面效应起补偿作用^[5], 因此研究水氮运筹对玉米减氮增效具有重要意义。

吐丝后是玉米物质积累与产量形成的关键时期, 此时叶片进入衰老阶段^[12-14]。在叶片衰老过程中, 活性氧代谢失衡, 膜脂过氧化使生物膜破坏, 导致丙二醛含量升高^[15-16]、叶绿素降解^[17]、叶片光合能力下降^[18], 最终影响籽粒灌浆并降低产量^[19]。延缓叶片衰老, 增加光合持续时间有利于物质积累进而提高玉米产量^[20-22]。充足的氮素供给能延缓营养器官的氮素再动员, 进而延缓叶片衰老^[23]。充足的水分除延缓叶片衰老外^[21], 还能促进根系对氮

素的吸收利用^[23], 合理的水氮运筹能够在提高叶片光合能力同时延缓叶片衰老^[16]。前人在水氮互作和减氮增效方面进行了较多研究^[2, 7], 主要集中在氮利用效率和产量形成方面, 但缺乏吐丝后叶片衰老的相关研究。

四川盆地是西南玉米生产区的重要组成部分, 该区土层瘠薄, 季节性干旱频发, 普遍存在过量施用化肥现象, 化肥减施与集雨补灌是本区玉米抗逆稳产增效与可持续发展的方向。本文就四川盆地滴灌减氮条件下玉米花后叶片衰老特性和物质积累进行研究, 可为玉米水肥一体化减氮增效技术提供理论基础。

1 材料与方法

1.1 试验区概况

试验于 2019 年 4—8 月在四川省德阳市中江县辑庆镇新建村 (31.03°N, 104.68°E) 开展。该地海拔 625.3 m, 属亚热带季风性气候, 无霜期 282 d, 2009—2018 年全年平均降水量 855.59 mm, 试验期间和 2009—2018 年同期的平均降水量和温度见图 1, 日均气温与正常年份相近, 总降水量多于正常年

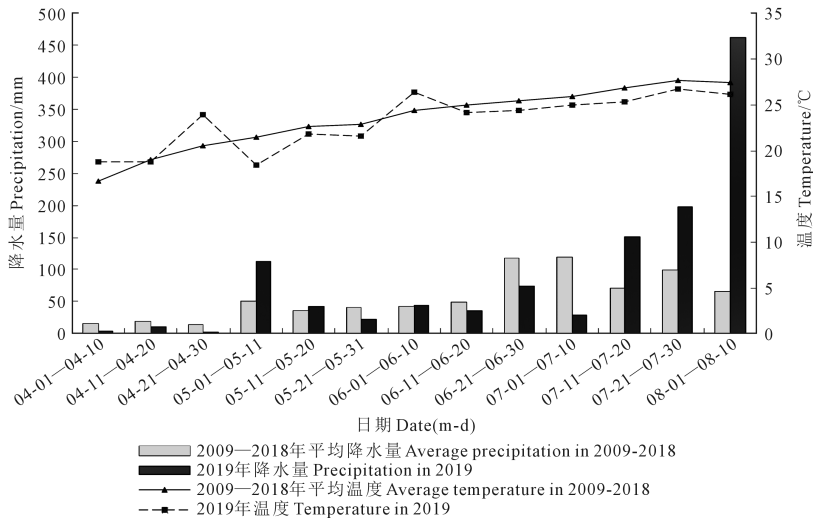


图 1 近 10 年及试验期间降水量与日均温
Fig.1 Precipitation and average daily temperature in the last ten years and during the test period

份,主要是7月16、29日和8月5日有3次大暴雨,其中8月5日和7月28日降水量分别达141.5 mm和86.4 mm,形成了明显的径流,其余时期均有不同程度的阶段性(季节性)干旱,尤其是6月下旬和7月上旬。供试土壤为紫色粘性土,耕层厚约20 cm,播种前土壤的基础养分含量为碱解氮 $54.60\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 、速效磷 $5.25\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 、速效钾 $102.73\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 、有机质 $8.71\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 、pH为6.35、表层土(0~20 cm)储水量448 mm。

1.2 试验设计

供试玉米品种为‘正红507’,采取膜下滴灌方式进行灌溉。采用两因素随机区组设计,A因素为氮肥施用量,设置正常氮(纯氮 $240\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$, N_{240})和减氮25%(纯氮 $180\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$, N_{180})2个水平;B因素为滴灌量,设置 $0\text{ m}^3\cdot\text{hm}^{-2}$ (B_0)、 $375\text{ m}^3\cdot\text{hm}^{-2}$ (B_1)、 $750\text{ m}^3\cdot\text{hm}^{-2}$ (B_2)和 $1\,125\text{ m}^3\cdot\text{hm}^{-2}$ (B_3)4个水平;并以不施氮且点滴灌为对照组(CK)。试验包括9个处理,各处理3次重复,共计27个小区,小区面积为 26.4 m^2 (长4.8 m,宽5.5 m)。3月29日覆膜直播,宽窄行(宽行1.1 m,窄行0.5 m)种植,单株栽培,密度为 $52\,500\text{ 株}\cdot\text{hm}^{-2}$,氮肥用量按试验方案进行,其中40%作基施,拔节期、大喇叭口期和吐丝期分别滴施10%、40%和10%,另一次性基施 $\text{P}_2\text{O}_5\,90\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 和 $\text{K}_2\text{O}\,120\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$;根据天气和土壤墒情,分别于拔节期、大喇叭口期、吐丝期前后和灌浆期进行滴灌, B_1 、 B_2 、 B_3 处理每次滴灌定额分别为 93.75 、 187.5 、 $281.25\text{ m}^3\cdot\text{hm}^{-2}$ 。

1.3 测定项目与方法

1.3.1 吐丝后干物质积累量和氮素积累量 分别于吐丝期和成熟期,在每小区选取长势均一、有代表性的植株6株,分为叶、茎鞘、穗(成熟期将穗分为穗轴和籽粒)、其他(果柄、苞叶和雄穗),放入烘箱中, 105°C 杀青30 min, 80°C 烘干至恒重后称重。将干样粉碎后过60目筛,称取0.2 g用 $\text{H}_2\text{SO}_4-\text{H}_2\text{O}_2$ 消煮后,用凯氏定氮法测全氮含量。氮积累量=干物质积累量 $\times$ 全氮含量,吐丝后干物质(氮素)积累量=成熟期干物质(氮素)积累量-吐丝期干物质(氮素)积累量。

1.3.2 叶片生理指标 分别于吐丝期和吐丝期后10、20、30、40 d在每小区取3株代表性植株,将穗位叶的中部剪碎混匀后,按汤绍虎等^[24]的方法,测定叶绿素含量,蔗糖合成酶(SS)、谷氨酰胺合成酶(GS)、超氧化物歧化酶(SOD)和过氧化氢酶(CAT)活性,于吐丝期、吐丝期后10、20、30 d测定过氧化物酶(POD)活性。

1.3.3 数据处理 采用Excel 2019与SPSS 22.0统计软件进行数据处理与分析,采用Graph Pad Prism 8作图。

2 结果与分析

2.1 滴灌减氮对玉米吐丝后穗位叶叶绿素含量的影响

吐丝后叶绿素含量呈单峰变化(即先增加再降低)(图2),吐丝后20 d叶绿素含量达到峰值后开始降低,吐丝后40 d与20 d相比,减氮和正常氮条件下分别降低8.27%和18.62%, B_0 、 B_1 、 B_2 、 B_3 处理分别降低17.00%、9.22%、14.59%、12.58%,而CK则降低了30.61%,表明施氮和滴灌均延缓了叶片的衰老。叶绿素含量随施氮量和滴灌量的增加而上升,且处理间差异显著,互作效应在吐丝后10 d达显著水平(表1)。减氮条件下, B_1 、 B_2 、 B_3 处理吐丝后10 d的叶绿素含量较 B_0 处理分别提高11.43%、27.62%、46.67%,而正常氮水平下则分别提高1.03%、1.40%、10.71%。将各时期叶绿素含量进行平均发现, $N_{180}B_3$ 处理与 $N_{240}B_0$ 处理差异不显著。表明滴灌能提高叶绿素含量,弥补减氮带来的影响,延缓叶绿素降解。

2.2 滴灌减氮对玉米吐丝后穗位叶保护酶活性的影响

吐丝后穗位叶的保护酶活性总体呈先升后降趋势,POD和CAT活性的峰值大约在吐丝后10 d,而SOD则出现在吐丝后20 d和30 d(图3)。氮肥水平和滴灌量对保护酶活性均有显著影响,总体表现为随施氮量和滴灌量的增加而增加趋势,但增加幅度有逐渐减小的趋势,氮肥水平和滴灌量间存在

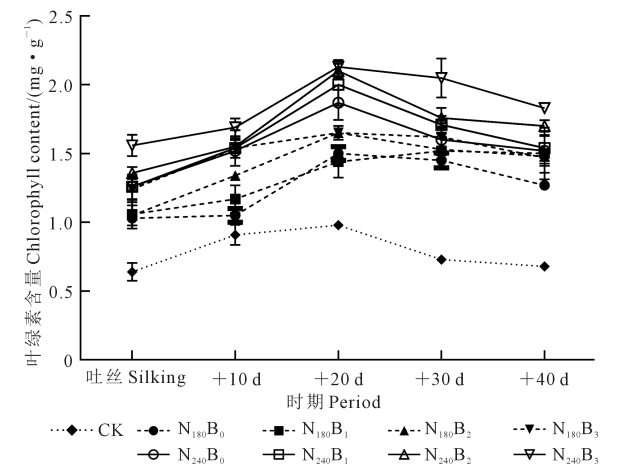


图2 滴灌减氮对玉米吐丝后穗位叶叶绿素含量的影响
Fig.2 Effects of nitrogen reduction by drip irrigation on chlorophyll content of ear leave of maize after silking stage

一定互作效应,且部分测定时期互作效应达到显著水平(表1)。N₂₄₀和N₁₈₀与CK相比,SOD活性分别平均提高66.24%和34.97%,POD活性分别平均提高46.70%和25.20%,CAT活性分别平均提高60.08%和52.95%。在N₂₄₀水平下,B₃、B₂、B₁处理SOD活性较B₀处理分别提高28.33%、24.31%、2.91%,在N₁₈₀水平下,分别提高45.07%、8.43%、7.15%。在N₂₄₀水平下,B₃、B₂、B₁处理POD活性较B₀处理分别提高28.33%、24.31%、2.91%,在N₁₈₀水平下,分别提高45.07%、8.43%、7.15%。在N₂₄₀水平下,B₃、B₂、B₁处理CAT活性较B₀处理分别提高28.33%、24.31%、2.91%,在N₁₈₀水平下,分别提高45.07%、8.43%、7.15%。另外,N₁₈₀B₃处理的保护酶活性均高于N₂₄₀B₀处理,表明适量滴灌可以缓解减氮引起的保护酶活性下降。

2.3 滴灌减氮对玉米吐丝后穗位叶碳氮代谢的影响

2.3.1 蔗糖合成酶活性 蔗糖合成酶是蔗糖合成途径的关键酶,其活性可以衡量叶片蔗糖合成代谢

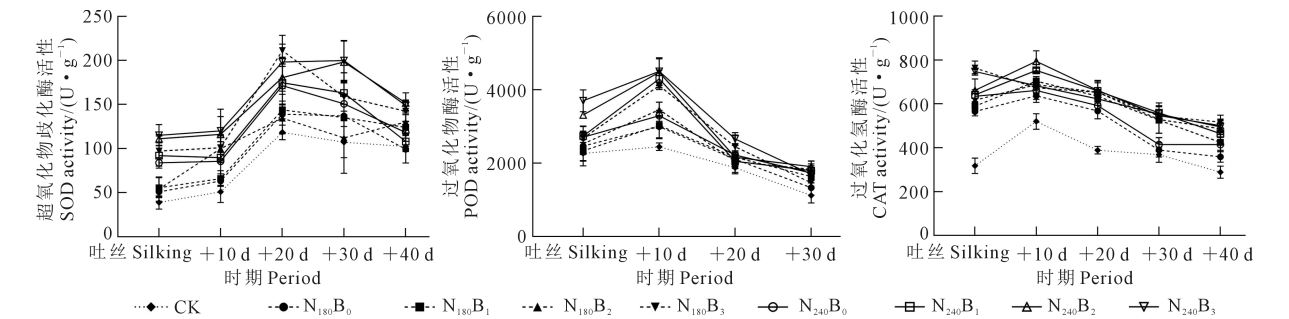


图3 滴灌减氮对玉米吐丝后穗位叶SOD、POD和CAT活性的影响

Fig.3 Effects of nitrogen reduction by drip irrigation on SOD、POD and CAT activity in ear leaves of maize after silking stage

能力。SS活性随生育进程先上升后降低,峰值出现在吐丝后10d左右(图4)。施氮和滴灌显著影响吐丝后SS活性,交互效应在吐丝后30d极显著(表1)。SS活性随着施氮量和滴灌量的增加整体呈增加趋势,从各时期和滴灌水平的平均值来看,N₁₈₀和N₂₄₀处理SS活性较CK处理分别提高15.36%和40.81%;从各时期的平均值看,N₂₄₀B₀处理SS活性较N₁₈₀B₀处理提高12.25%,但与N₁₈₀B₃处理差异不显著。说明滴灌能缓解减氮带来的影响,且能延缓吐丝后SS活性下降幅度。

2.3.2 谷氨酰胺合成酶活性 谷氨酰胺合成酶是衡量氮素同化和再动员能力的关键酶。GS活性变化趋势与SS相同,峰值出现在吐丝期后20d(图5)。施氮量和滴灌显著影响吐丝后GS活性,吐丝后10~20d均达极显著水平(表1),GS活性随施氮

表1 玉米吐丝后穗位叶叶绿素含量、SOD、POD、CAT、SS和GS的显著性检验
Table 1 Significance test of chlorophyll content, SOD, POD, CAT, SS and GS in ear leaves of maize after silking

指标 Index	因素 Factor	吐丝期 silking	+10 d	+20 d	+30 d	+40 d
叶绿素 Chlorophyll	N	50.690**	70.137**	97.495**	23.104**	21.326**
	B	9.572**	15.932**	4.977*	6.058**	5.333*
	N×B	0.64	4.541*	0.737	1.423	2.173
SOD	N	57.459**	10.265**	7.455*	49.439**	2.687
	B	12.760**	9.172**	7.213**	6.805**	14.602**
	N×B	2.871	0.068	2.086	6.771**	3.26
POD	N	23.081**	47.574**	0.876	10.178**	
	B	5.788**	20.948**	5.786**	4.977*	
	N×B	1.92	4.891*	0.571	1.063	
CAT	N	10.117**	15.678**	0.216	2.387	2.863
	B	36.156**	13.008**	5.666**	26.537**	17.862**
	N×B	2.475	3.215	0.763	0.147	1.73
SS	N	9.368**	35.247**	102.935**	21.267**	2.295
	B	2.334	4.216*	9.240**	19.623**	1.374
	N×B	1.131	3.776*	1.96	7.970**	1.298
GS	N	2.211	9.315**	33.424**	5.417*	0.642
	B	2.182	12.553**	17.372**	5.193*	1.239
	N×B	1.094	1.697	2.373	1.323	3.343

注: * 和 ** 分别代表 $P<0.05$ 和 $P<0.01$ 显著水平。下同。
Note: * and ** represent significant differences at $P < 0.05$ and $P < 0.01$, respectively. The same below.

量和滴灌量增加整体呈增加趋势。从各时期平均值来看,正常氮处理和减氮处理GS活性较CK处理分别提高61.58%和40.54%,减氮条件下B₁、B₂、B₃处理GS活性较B₀处理分别提高23.97%、31.62%、36.53%,正常氮水平条件下其增幅分别为9.20%、20.97%、22.97%,可见减氮条件下的提高幅度大于正常氮。

2.4 滴灌减氮对玉米吐丝后物质积累的影响

施氮和滴灌不仅影响玉米花前(吐丝前)的干物质和氮素积累量,也显著影响吐丝后的干物质和氮素积累,二者互作效应在吐丝后干物质积累上达显著水平(表2)。玉米吐丝后干物质积累量和氮素积累量随施氮量和滴灌量增加而增加,在正常氮处理下吐丝后干物质积累量和氮素积累量较CK分别增加162.32%和54.03%,在减氮处理条件下分别增

加 108.38% 和 33.50%, 且 $N_{180}B_3$ 处理与 $N_{240}B_0$ 处理差异不显著, 说明滴灌能促进物质积累, 弥补减氮施肥的影响; 减氮条件下, 4 个滴灌处理吐丝后氮素积累量和干物质积累量的变异系数均值分别为 0.16 和 0.10, 正常氮条件下则分别为 0.10 和 0.05, 减氮条件下滴灌对吐丝后物质和氮素积累的影响相较于正常氮条件下更大。减氮条件下, 玉米的籽粒产量随滴灌量的增加而增加, 但增幅逐渐减少; 而在正常氮条件下, 产量随滴灌量的增加呈先增加后降低趋势, 过多的灌水会导致减产。

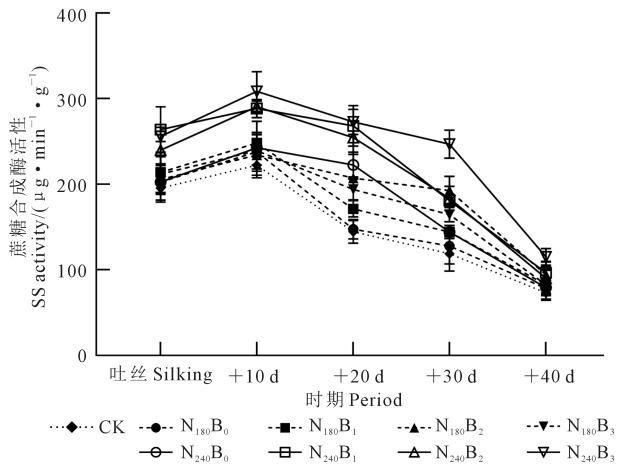


图 4 滴灌减氮对玉米吐丝后穗位叶 SS 活性的影响
Fig.4 Effects of nitrogen reduction by drip irrigation on SS activity in ear leaves of maize after silking stage

2.5 相关分析

玉米生育后期的干物质积累量及籽粒产量主要由花后叶片的光合作用形成, 必然与叶片的生理功能和衰老进程密切相关。相关分析表明(表 3), 吐丝后干物质和氮素积累量及最终的籽粒产量均与吐丝后穗位叶的平均叶绿素含量、SOD、POD、CAT、SS 和 GS 活性极显著正相关。表明增强玉米花后叶片的抗氧化酶活性, 提高其叶绿素含量和碳氮代谢能力, 可以提高玉米花后干物质积累和籽粒产量, 合理施用氮肥配合适量滴灌是实施这一目标的重要技术措施。

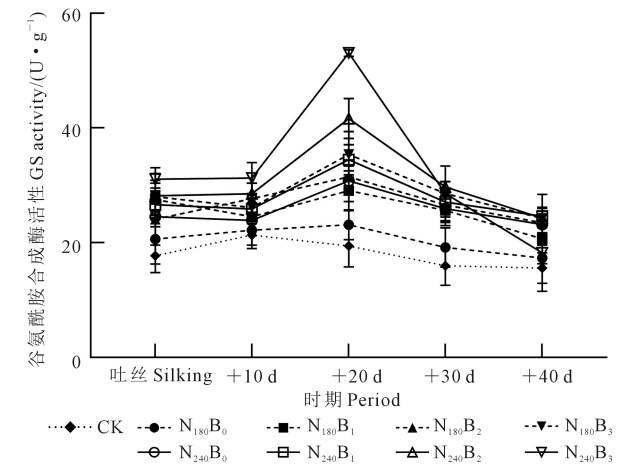


图 5 滴灌减氮对玉米吐丝期后叶片 GS 活性的影响
Fig.5 Effects of nitrogen reduction by drip irrigation on GS activity in ear leaf of maize after silking stage

表 2 滴灌减氮对玉米吐丝后物质和氮素积累的影响/(kg · hm⁻²)
Table 2 Effects of nitrogen reduction by drip irrigation on matter accumulation after silking in maize

处理 Treatment	DAB	NAB	DAA	NAA	Yield
CK	2660.86C	26.80C	9324.32C	177.61C	6984.96B
$N_{180}B_0$	2958.07e	34.89c	10716.25e	107.48e	9468.52e
$N_{180}B_1$	3146.23de	37.39c	12209.53d	132.48d	9890.24de
$N_{180}B_2$	3474.69cd	40.13bc	13226.06cd	147.56c	9975.73cde
$N_{180}B_3$	3844.46bc	45.34b	13641.99bc	156.69bc	10021.61bcd
平均 Average	3355.87B	39.44B	12448.46B	237.11B	9839.02A
$N_{240}B_0$	3780.79bc	45.28b	14060.50bc	156.99bc	10337.24bcd
$N_{240}B_1$	4157.83ab	50.92a	13665.34bc	163.46b	10518.76b
$N_{240}B_2$	4012.81ab	51.44a	14482.54ab	169.08b	11097.75a
$N_{240}B_3$	4407.63a	55.10a	15239.46a	195.55a	10461.75bc
平均 Average	4089.76A	50.67A	14361.96A	273.56A	10603.88A
显著性检验 Significant test			F 值 F value		
N	26.66 **	77.022 **	63.88 **	105.36 **	37.75 **
B	7.37 **	10.705 **	15.84 **	26.15 **	4.34 *
N×B	0.33	0.413	4.37 *	2.717	1.41

注:数据后不同字母表示各处理间有显著差异($P<0.05$),大写字母和小写字母分别代表不同施氮量和不同滴灌量的多重比较。DAB:吐丝期干物质积累;NAB:吐丝期氮素积累;NAA:吐丝后氮素积累量;DAA:吐丝后干物质积累量,下同。

Note: Different letters after data indicate a significant difference among treatments ($P<0.05$). Capital letters and lowercase letters represent multiple comparisons of different nitrogen application rates and different drip irrigation rates, respectively. DAB: Dry matter accumulation before silking; NAB: Nitrogen accumulation before silking; NAA: Nitrogen accumulation after silking; DAA: Dry matter accumulation after silking. The same below.

表 3 玉米吐丝后穗位叶衰老特性与物质积累的相关性

Table 3 Correlation between post-anthesis physiological indexes and matter accumulation in ear leaves of Maize									
指标 Index	叶绿素 Chlorophyll	SOD	POD	CAT	SS	GS	NAA	DAA	籽粒产量 Yield
叶绿素 Chlorophyll	1								
SOD	0.842 **	1							
POD	0.903 **	0.835 **	1						
CAT	0.873 **	0.779 **	0.765 **	1					
SS	0.840 **	0.759 **	0.880 **	0.688 **	1				
GS	0.863 **	0.798 **	0.752 **	0.867 **	0.760 **	1			
NAA	0.967 **	0.845 **	0.887 **	0.883 **	0.833 **	0.865 **	1		
DAA	0.927 **	0.852 **	0.861 **	0.837 **	0.804 **	0.886 **	0.917 **	1	
籽粒产量 Yield	0.842 **	0.643 **	0.688 **	0.801 **	0.590 **	0.731 **	0.803 **	0.756 **	1

3 讨 论

吐丝后玉米叶片衰老和籽粒灌浆是同步进行的^[25],因此在吐丝后延缓叶片衰老维持较强的光合能力和较长的光合持续时间有利于高产。玉米叶片衰老除受遗传基因控制外,还受氮素供给的调控^[22-23]。叶绿素作为光合作用的重要色素^[26],其含量是表征叶片光合能力的重要参数^[27],同时也是衡量叶片衰老程度的重要指标^[28]。李广浩等^[16]认为,施氮量和滴灌量增加均能提高吐丝后玉米穗位叶叶绿素含量。本试验条件下,减氮会降低吐丝后叶绿素含量,但 N₁₈₀B₃处理叶绿素含量与 N₂₄₀B₀处理差异不显著,说明滴灌能弥补减氮对叶片叶绿素含量降低的影响,因为减氮条件下滴灌能促进氮素的吸收利用^[1],进而有利于叶绿素的合成。SOD、POD 和 CAT 是活性氧清除系统的关键酶,对维持活性氧代谢平衡、避免膜脂过氧化损伤具有重要意义^[29]。前人研究认为,氮肥不足会导致保护酶活性降低^[29],而本试验中相同灌溉条件下 N₁₈₀处理中保护酶活性低于 N₂₄₀,但 N₁₈₀B₃处理保护酶活性高于 N₂₄₀B₀处理,说明适量减氮并合理滴灌有利于增强吐丝后叶片抗氧化酶活性,维持叶片功能,表明水氮之间存在一定的协同效应。

蔗糖合成酶作为蔗糖合成运转途径的关键酶,其活性是衡量叶片碳代谢能力的重要指标^[30]。谷氨酰胺合成酶参与植物氮同化和氮素转运^[31],其活性可以作为衡量叶片氮代谢能力的指标。前人研究表明,合理增施氮肥可提高玉米叶片的 SS 和 GS 活性^[31],本试验表明,合理滴灌也可提高 SS 和 GS 活性,且氮肥水平和滴灌量之间存在一定互作效应,在减氮配合适量滴灌(N₁₈₀B₃)下玉米穗位叶在吐丝后的叶绿素含量、蔗糖合成酶和谷氨酰胺合成酶活性仍能维持在较高水平,为吐丝后的物质积累奠定生理基础。氮作为构成叶绿素和蛋白质的核

心元素^[1],减少施氮量会降低叶绿素含量、保护酶活性以及碳氮代谢酶活性^[16, 29, 31],而前期试验表明减氮 25%再配合适量滴灌(N₁₈₀B₃)能够促进氮素的吸收^[1],保证了氮素的供给,有利于叶绿素和酶的合成以及吐丝后叶片生理功能的维持。吐丝后较高的物质积累量是玉米高产的物质基础^[12, 32],吐丝后物质积累量(干物质积累和氮素积累量)与籽粒产量呈显著正相关。

上述结果表明,水氮不仅在玉米的氮素吸收利用上存在耦合效应,在吐丝后叶片衰老和物质生产方面也存在一定的协同作用和互补效应,适量滴灌可以弥补减氮的影响,防止叶片早衰,从而保障较高的籽粒产量,因而是促进氮肥减施增效的重要措施之一。

4 结 论

氮肥和滴灌对玉米吐丝后穗位叶的叶绿素含量、保护酶和碳氮代谢酶活性及干物质积累均有显著影响,而且二者之间存在一定的互补效应。减氮 25%(180 kg·hm⁻²纯氮)配以 1 125 m³·hm⁻²滴灌,能促进玉米植株对氮素的吸收利用,使玉米吐丝后叶绿素含量和 SS、GS、SOD、POD、CAT 活性维持在较高水平,延缓叶片衰老,增加干物质积累,研究结果可为四川盆地玉米水肥一体化减氮增效技术提供理论依据。

参 考 文 献:

[1] 刘凡,刘斌祥,刘佳媛,等.水氮互作对川中丘陵区玉米水肥利用效率和产量形成的影响[J].干旱地区农业研究,2021,39(6): 200-206.
LIU F, LIU B X, LIU J Y, et al. Effect of water and nitrogen interaction on maize utilization efficiency of fertilizer, water and yield formation in the Middle Hilly Area of Sichuan Province[J]. Agricultural Research in the Arid Areas, 2021, 39(6): 200-206.
[2] 王旭敏,雒文鹤,刘朋召,等.节水减氮对夏玉米干物质和氮素积累转运及产量的调控效应[J].中国农业科学,2021,54(15):

- 3183-3197.
- WANG X M, LUO W H, LIU P Z, et al. Regulation effects of water saving and nitrogen reduction on dry matter and nitrogen accumulation, transportation and yield of summer maize[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2021, 54(15): 3183-3197.
- [3] ISLA R, VALENTÍN-MADRONA F, MATURANO M, et al. Comparison of different approaches for optimizing nitrogen management in sprinkler-irrigated maize[J]. *European Journal of Agronomy*, 2020, 116: 126043.
- [4] LIU X J, ZHANG Y, HAN W X, et al. Enhanced nitrogen deposition over China[J]. *Nature*, 2013, 494(7438): 459-462.
- [5] 杨宇, 李霞, 潘晨, 等. 水氮互作对玉米生长和产量影响的研究进展[J]. *节水灌溉*, 2021, (5): 41-45.
- YANG Y, LI X, PAN C, et al. Research progresses on coupling effects of water and nitrogen on growth and grain yield of maize[J]. *Water Saving Irrigation*, 2021, (5): 41-45.
- [6] LU J S, GENG C M, CUI X L, et al. Response of drip fertigated wheat-maize rotation system on grain yield, water productivity and economic benefits using different water and nitrogen amounts[J]. *Agricultural Water Management*, 2021, 258: 107220.
- [7] 王悦, 陈立欣, 范海燕, 等. 节水减氮对北京地区夏玉米水氮利用的影响[J]. *中国水土保持科学(中英文)*, 2021, 19(4): 103-113.
- WANG Y, CHEN L X, FAN H Y, et al. Effects of water saving and nitrogen reduction on the water and nitrogen use efficiency of summer maize in Beijing[J]. *Science of Soil and Water Conservation*, 2021, 19(4): 103-113.
- [8] 李英豪, 张政, 朱吉祥, 等. 管渠自动控水灌溉施氮量对夏玉米产量、氮素吸收利用的影响[J]. *灌溉排水学报*, 2020, 39(5): 35-41.
- LI Y H, ZHANG Z, ZHU J X, et al. Effects of nitrogen application on yield, nitrogen uptake and utilization by summer maize under automatically controlled pipe-channel irrigation[J]. *Journal of Irrigation and Drainage*, 2020, 39(5): 35-41.
- [9] YAN F L, ZHANG F C, FAN X K, et al. Determining irrigation amount and fertilization rate to simultaneously optimize grain yield, grain nitrogen accumulation and economic benefit of drip-fertigated spring maize in northwest China[J]. *Agricultural Water Management*, 2021, 243: 106440.
- [10] JU X T, XING G X, CHEN X P, et al. Reducing environmental risk by improving N management in intensive Chinese agricultural systems [J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2009, 106(9): 3041-3046.
- [11] SEPASKHAH A R, FAHANDEZH-SAADI S, ZAND-PARSA S. Logistic model application for prediction of maize yield under water and nitrogen management[J]. *Agricultural Water Management*, 2011, 99(1): 51-57.
- [12] 吴雅薇, 蒲玮, 赵波, 等. 不同耐低氮性玉米品种的花后碳氮积累与转运特征[J]. *作物学报*, 2021, 47(5): 915-928.
- WU Y W, PU W, ZHAO B, et al. Characteristics of post-anthesis carbon and nitrogen accumulation and translocation in maize cultivars with different low nitrogen tolerance [J]. *Acta Agronomica Sinica*, 2021, 47(5): 915-928.
- [13] 张忠学, 尚文彬, 齐智娟, 等. 不同水氮管理下玉米叶片衰老对氮转移效率的影响[J]. *农业机械学报*, 2019, 50(12): 297-303, 267.
- ZHANG Z X, SHANG W B, QI Z J, et al. Effects of different water and nitrogen managements on nitrogen remobilization efficiency during leaf senescence in maize[J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2019, 50(12): 297-303, 267.
- [14] 朱昆仑, 靳立斌, 董树亭, 等. 综合农艺管理对夏玉米叶片衰老特性的影响[J]. *中国农业科学*, 2014, 47(15): 2949-2959.
- ZHU K L, JIN L B, DONG S T, et al. Effects of integrated agronomic practices on leaf senescence physiological characteristics of summer maize [J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2014, 47(15): 2949-2959.
- [15] 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): 124-127.
- LIU Y, WANG R, HUA L M, et al. Effect of N application rates on leaf senescence and protective enzyme system at later stage of maize [J]. *Journal of Maize Sciences*, 2012, 20(2): 124-127.
- [16] 李广浩, 刘平平, 赵斌, 等. 不同水分条件下控释尿素对夏玉米产量和叶片衰老特性的影响[J]. *应用生态学报*, 2017, 28(2): 571-580.
- LI G H, LIU P P, ZHAO B, et al. Effects of water conditions and controlled release urea on yield and leaf senescence physiological characteristics in summer maize[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2017, 28(2): 571-580.
- [17] 任佰朝, 张吉旺, 李霞, 等. 大田淹水对夏玉米叶片衰老特性的影响[J]. *应用生态学报*, 2014, 25(4): 1022-1028.
- REN B C, ZHANG J W, LI X, et al. Effect of waterlogging on leaf senescence characteristics of summer maize in the field[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2014, 25(4): 1022-1028.
- [18] 李广浩, 赵斌, 董树亭, 等. 控释尿素水氮耦合对夏玉米产量和光合特性的影响[J]. *作物学报*, 2015, 41(9): 1406-1415.
- LI G H, ZHAO B, DONG S T, et al. Effects of coupling controlled release urea with water on yield and photosynthetic characteristics in summer maize [J]. *Acta Agronomica Sinica*, 2015, 41(9): 1406-1415.
- [19] 徐田军, 董志强, 高娇, 等. 聚糠茶水剂对不同积温带玉米叶片衰老和籽粒灌浆速率的影响[J]. *作物学报*, 2012, 38(9): 1698-1709.
- XU T J, DONG Z Q, GAO J, et al. Effect of PASP-KT-NAA on leaf senescence and grain filling rate during the grain-filling period in different temperature zones[J]. *Acta Agronomica Sinica*, 2012, 38(9): 1698-1709.
- [20] 李强, 马晓君, 程秋博, 等. 氮肥对不同耐低氮性玉米品种花后物质生产及叶片功能特性的影响[J]. *中国生态农业学报*, 2016, 24(1): 17-26.
- LI Q, MA X J, CHENG Q B, et al. Effects of nitrogen fertilizer on post-silking dry matter production and leaves function characteristics of low-nitrogen tolerance maize[J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2016, 24(1): 17-26.
- [21] 王国栋, 曾胜和, 陈云, 等. 控墒补灌下春玉米光合特性、叶片衰老研究及最适灌溉量估算[J]. *干旱地区农业研究*, 2017, 35(6): 19-26.
- WANG G D, ZENG S H, CHEN Y, et al. Estimation of photosynthetic characteristics, leaf senescence and optimal irrigation amount for spring maize by drip irrigation under controlled soil moisture and supplementary irrigation[J]. *Agricultural Research in the Arid Areas*, 2017, 35(6): 19-26.
- [22] KITONYO O M, SADRAS V O, ZHOU Y, et al. Nitrogen supply and sink demand modulate the patterns of leaf senescence in maize[J]. *Field Crops Research*, 2018, 225: 92-103.