

DOI: 10.3724/SP.J.1006.2023.23045

氮磷配施对夏玉米产量和叶片衰老特性的影响

张振博¹ 贾春兰^{1,2} 任佰朝^{1,2} 刘 鹏¹ 赵 斌¹ 张吉旺^{1,2,*}

¹山东农业大学农学院 / 作物生物学国家重点实验室, 山东泰安 271018; ²山东省玉米技术创新中心, 山东莱州 261400

摘 要: 氮和磷作为玉米生长发育的必需营养元素, 对玉米产量的提高具有重要影响。本试验以登海 111 (Denghai 111, DH111) 为供试材料, 在 2020 年和 2021 年分别设置 11 个氮磷配施处理和 15 个氮磷配施处理来探究氮磷配施对夏玉米叶片衰老特性和产量形成的影响。结果表明: 在相同施磷水平下, 随着施氮量增加, 夏玉米的叶面积指数(leaf area index, LAI)、叶绿素相对含量(SPAD 值)、抗氧化酶活性(超氧化物歧化酶(superoxide dismutase, SOD)、过氧化物酶(peroxidase, POD)和过氧化氢酶(catalase, CAT)呈现先增加后降低的趋势, 丙二醛(malondialdehyde, MDA)含量呈现先降低后增加的趋势, 产量呈现先增加后降低的趋势。在 N0~N2 条件下, 随施磷量增加, LAI、SPAD 值、抗氧化酶活性呈现增加趋势, MDA 含量呈现降低趋势, 产量呈增加趋势; 而在 N3 与 N4 条件下, 随施磷量增加, LAI、SPAD 值、抗氧化酶活性呈现先增加后降低的趋势, MDA 含量呈现先降低后增加的趋势, 产量呈现先增加后降低趋势。在 2020 年, N3 P1 处理相较于 N2 P3 处理产量增加 2.55%; 2021 年, N3 P1 处理相较于 N3 P0 处理、N2 P2 处理产量分别提高 7.36%、3.31%。本试验条件下, 合理氮磷配施(180 kg N hm⁻²、60 kg P hm⁻²)通过提高玉米生育后期抗氧化酶活性, 降低 MDA 含量, 维持较高的叶面积指数与 SPAD 值, 提高玉米穗粒数与千粒重, 进而增加产量。

关键词: 夏玉米; 氮磷配施; 产量; 叶片衰老

Effects of combined application of nitrogen and phosphorus on yield and leaf senescence physiological characteristics in summer maize

ZHANG Zhen-Bo¹, JIA Chun-Lan^{1,2}, REN Bai-Zhao^{1,2}, LIU Peng¹, ZHAO Bin¹, and ZHANG Ji-Wang^{1,2,*}

¹College of Agronomy, Shandong Agricultural University / State Key Laboratory of Crop Biology, Tai'an 271018, Shandong, China; ²Shandong Maize Technology Innovation Center, Laizhou 261400, Shandong, China

Abstract: Nitrogen and phosphorus, as the essential nutrients for maize growth and development, play an important effect on maize yield. In this experiment, to investigate the effect of combined application of nitrogen and phosphorus on leaf senescence physiological and yield formation in summer maize, 11 combined applications of nitrogen and phosphorus treatments in 2020 and 15 combined applications of nitrogen and phosphorus treatments in 2021 were applied using Denghai 111 (DH111) as the test materials. The results showed that the leaf area index (LAI), the relative chlorophyll content (SPAD), and the antioxidant enzyme activities [superoxide dismutase (SOD), peroxidase (POD), and catalase (CAT)] of summer maize increased first and then decreased, and the malondialdehyde (MDA) content decreased first and then increased with the increase of nitrogen application rate under the same phosphorus application conditions. Under N0–N2 conditions, with the increasing phosphorus application, LAI, SPAD value, and antioxidant enzyme activity had an increasing trend, MDA content showed a decreasing trend and yield showed an increasing trend, while with the increasing phosphorus application, LAI, SPAD value, and antioxidant enzyme activity showed an increasing trend and then a decreasing trend, MDA content showed a decreasing trend and then an increasing trend, and yield showed an increasing trend and then a decreasing trend in N3 and N4. In 2020, the N3 P1 treatment increased yields by 2.55%

本研究由山东省农业重大应用技术创新项目(SD2019ZZ013), 山东省重点研发计划项目(2021LZGC014-2)和财政部和农业农村部国家现代农业产业技术体系建设专项(CARS-02-21)资助。

This study was supported by the Shandong Agricultural Application Technology Innovation Project (SD2019ZZ013), the Shandong Province Key Research and Development Program (2021LZGC014-2), and the China Agriculture Research System of MOF and MARA (CARS-02-21).

* 通信作者(Corresponding author): 张吉旺, E-mail: jwzhang@sdaa.edu.cn

第一作者联系方式: E-mail: 1486693491@qq.com

Received (收稿日期): 2022-05-29; Accepted (接受日期): 2022-10-10; Published online (网络出版日期): 2022-10-26.

URL: <https://kns.cnki.net/kcms/detail/11.1809.S.20221025.1424.006.html>

This is an open access article under the CC BY-NC-ND license (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/>).

compared to the N2 P3 treatment. In 2021, the N3 P1 treatment increased yields by 7.36% and 3.31% compared to the N3 P0 and N2 P2 treatments, respectively. Under the experimental conditions, the reasonable combined application of nitrogen and phosphorus (180 kg N hm^{-2} , 60 kg P hm^{-2}) treatment can increase the activities of antioxidant enzymes at the later stage of fertility, reduce MDA content, maintain a high leaf area index and SPAD values, increase the number of grains per ear and 1000-grain weight, ultimately leading to higher maize yield.

Keywords: summer maize; combined application of nitrogen and phosphorus; yield; leaf senescence physiological characteristics

玉米作为我国第一大粮食作物,其产量的高低对于保障我国粮食安全具有重要意义^[1]。自化肥诞生以来,施肥是增加作物产量最主要的方法^[2-3]。在长时间内,作物产量随化肥施用量的增加而增加。但随着土壤养分含量的不断累积,以华北平原小麦-玉米轮作体系多年多点($n > 500$)的调查结果为例,作物生育期内 0~90 cm 土壤剖面硝态氮含量平均高于 200 kg hm^{-2} ^[4-5]。作物产量并未随化肥的高投入呈现相应的增加趋势,甚至出现作物产量降低的现象,同时,肥料的高投入会带来严重的环境问题^[6-7]。自 2015 年国家提出化肥农药零增长的政策,我国农业氮磷钾肥用量逐年递减^[8],其中氮磷肥占氮磷钾肥减少量的 80%以上^[9]。因此,如何通过合理的氮磷配施在保障玉米产量的同时降低氮磷肥的施用量是现在生产中亟待解决的问题。

氮磷配施一方面可以在保障作物氮素供应的同时减少硝态氮的淋溶,提高氮肥利用效率;另一方面可以促进土壤中磷素的活化,提高土壤中可供能力的速效磷含量,提高土壤的供磷能力^[10-13]。此外,合理的氮磷配施可以提高玉米的净光合速率(P_n)、蒸腾速率(T_r)、水分利用效率(water use efficiency, WUE)及气孔导度(G_s)等光合指标,增加干物质积累,最终促进产量提高^[13-15]。前人研究多集中氮磷配施如何提高玉米氮磷元素利用和提高光合能力方面,而对影响玉米叶片后期衰老的研究较少。

花粒期是玉米进行干物质积累的重要时期,也是籽粒产量形成的关键时期^[16]。花粒期叶片过早衰老会导致玉米籽粒灌浆不足,产量下降^[17-18]。植物生育后期叶片衰老的主要原因是抗氧化酶活性降低,细胞间活性氧的产生与清除机制遭到破坏,细胞活性氧积累过多,膜脂过氧化程度加深,MDA 含量增加^[19-20]。前人研究表明,超氧化物歧化酶(SOD)、过氧化氢酶(CAT)和过氧化物酶(POD)是植物重要的抗氧化保护酶^[21-22],其含量的高低除了受基因型影响外^[23],还受播期、施氮量、灌溉量等栽培措施影响和化控试剂的调控^[24-27]。因此,本试验通过设置不同氮磷配施处理探讨合理氮磷配施对夏玉米叶片衰老特性和产量形成的影响,以期明确合理氮磷配

施影响夏玉米产量形成的生理机制提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 试验材料与设计

2020—2021 年,本试验在泰安市岱岳区大汶口试验田进行,试验区域土壤类型为棕壤土,气候类型为温带大陆性半湿润季风气候。播前 0~20 cm 深度土壤养分含量如下:有机质 23.30 g kg^{-1} 、全氮 2.81 g kg^{-1} 、全磷 2.27 g kg^{-1} 、碱解氮 $104.60 \text{ mg kg}^{-1}$ 、有效磷(P_2O_5) 84.23 mg kg^{-1} 、速效钾 $190.82 \text{ mg kg}^{-1}$ 。试验采用裂区设计,主区为施磷量,副区为施氮量。在 2020—2021 年,选用登海 111 (Denghai 111, DH111) 为供试材料,设置 5 个施氮量: 0 kg hm^{-2} (N0)、 60 kg hm^{-2} (N1)、 120 kg hm^{-2} (N2)、 180 kg hm^{-2} (N3)、 240 kg hm^{-2} (N4)。2020 年设置 2 个施磷量:低磷为 60 kg hm^{-2} (P1)、高磷为 180 kg hm^{-2} (P3);以不施氮、磷肥(N0 P0)为产量对照,共 11 个处理。2021 年设置 3 个施磷量:不施磷(P0)、低磷为 60 kg hm^{-2} (P1)、高磷 120 kg hm^{-2} (P2),共 15 个处理。施钾量为 67.5 kg hm^{-2} 。氮肥(尿素,含氮量 46%)在播前施入 40%、在小喇叭口期施入 60%。磷肥(过磷酸钙,含磷量 12%)和钾肥(氯化钾,含钾量为 60%)全部在播前以基肥施入。

2020 年,于 6 月 17 日播种,10 月 3 号收获,小区面积为 36 m^2 ;2021 年,于 6 月 20 日播种,10 月 4 号收获,小区面积为 30 m^2 。种植密度均为 $67,500 \text{ 株 hm}^{-2}$,每个处理重复均为 3 次。大田管理参照高产田生产标准进行管理,且冬季种植冬小麦。

1.2 测定项目与方法

1.2.1 叶面积指数(leaf area index, LAI) 分别于抽雄期(VT)、乳熟期(R3)、成熟期(R6),每处理选择 10 株有代表性的植株,测定叶面积。

单叶叶面积(cm^2)=叶长(cm)×叶宽(cm)×0.75;

$\text{LAI}=(\text{单株叶面积} \times \text{每个小区的植株数})/\text{小区面积}$ 。

1.2.2 功能叶片相对叶绿素含量(SPAD 值) 分别于 VT、R3、R6 时期,上午 09:00—12:00 在每个小区选取 10 株生长一致的植株使用 SPAD-502 便携

式叶绿素仪(Soil-plant Analysis Development Section, Minolta Camera Co.,日本)测定穗位叶 SPAD 值,测定时避开主叶脉。

1.2.3 叶片衰老特性 分别于 VT、R3、R6 时期,选取各处理长势均匀一致植株 5 株,取其穗位叶的中部位置,保存于 -40°C 冰箱。液氮研磨成粉末,参照 Giannopolitis 等^[28]方法采用氮蓝四唑法测定超氧化物歧化酶(SOD)活性,采用硫代巴比妥酸法测定丙二醛(MDA)含量;参照 Durner 等^[29]方法采用紫外吸收法测定过氧化氢酶(CAT)活性;参照 Hammerschmid 等^[30]方法采用比色法测定过氧化物酶(POD)活性。

1.2.4 产量 每个小区连续收取中间 3 行具有代表性的 30 个果穗自然风干、脱粒计产(按 14%标准含水量折算产量)。

1.3 数据处理与分析

使用 Microsoft Excel 2016 软件进行数据整理;采用 SPSS 21.0 软件对数据进行方差分析;整理的数据用 SigmaPlot 10.0 作图。

2 结果与分析

2.1 氮磷配施对夏玉米产量及其构成因素的影响

由表 1 可知,氮磷配施对产量影响显著,氮磷交互作用显著。相同施磷量条件,夏玉米产量随着施氮量的增加呈现先增加后降低的趋势。不施磷与低磷条件下,N3 产量最高。N3 P1 处理在 2021 年相较于 N3 P0 处理产量提高 7.36%。高磷条件下,N2 产量最高,出现氮峰偏移现象。N3 P1 处理在 2020 年相较于 N2 P3 处理的产量增加 2.55%;在 2021 年相较于 N2 P2 处理的产量增加 3.31%。DH111 在 N3

P1 处理获得最高产量,2 年结果基本一致。

由表 1 可知,氮磷配施对穗粒数与千粒重影响显著,氮磷交互作用显著,而对公顷穗数影响不显著。相同施磷量条件,夏玉米穗粒数与千粒重随着施氮量的增加基本呈现先增加后降低的趋势。不施磷与低磷条件下,穗粒数与千粒重在 N3 最高。N3 P1 处理在 2021 年相较于 N3 P0 处理公顷穗数、穗粒数、千粒重分别增加 1.53%、0.81%、4.92%。高磷条件下,穗粒数与千粒重相较于低磷呈现 N0 到 N2 增加,N3 与 N4 降低的趋势,在 N2 最高,2 年结果基本一致。N3 P1 处理在 2020 年相较于 N2 P3 处理的公顷穗数、千粒重分别增加 2.66%、1.17%,穗粒数降低 1.28%;在 2021 年相较于 N2 P2 处理分别增加 2.05%、1.66%,穗粒数降低 0.26%。

2.2 氮磷配施对夏玉米叶面积指数的影响

由图 1 和表 2 可知,氮磷配施对叶面积指数影响显著。相同施磷量条件,夏玉米叶面积指数随着施氮量的增加基本呈现先增加后平稳的趋势。不施磷和低磷条件下,叶面积指数在 VT 到 R6 时期于 N3 达到最高,N3 与 N4 没有显著性差异。N3 P1 处理在 2021 年相较于 N3 P0 处理的叶面积指数在 VT、R3、R6 时期分别提高 1.68%、2.70%、12.95%。高磷条件下,叶面积指数相较于低磷条件在 VT 到 R6 时期并没有显著增加,N3 与 N4 呈现降低趋势,于 N2 达到最高,N2 与 N3、N4 不存在显著性差异,2 年结果基本一致。N3 P1 处理在 2020 年相较于 N2 P3 处理的叶面积指数在 VT、R3、R6 时期分别提高 1.87%、1.41%、0.15%;在 2021 年相较于 N2 P2 处理的叶面积指数在 VT、R3、R6 时期分别提高 4.53%、2.92%、15.38%。

表 1 氮磷配施对夏玉米产量与产量构成因素的影响(2020–2021)

Table 1 Effects of combined application of nitrogen and phosphorus on yield and yield components of summer maize in 2020 and 2021

年份 Year	处理 Treatment	公顷穗数 Harvest ear number (ears hm^{-2})	穗粒数 Grains per ear	千粒重 1000-grain weight (g)	公顷产量 Yield (kg hm^{-2})
2020	N0 P0	62,740 c	357.5 h	337.0 g	8789 k
	N0 P1	63,782 bc	371.7 g	327.6 h	9029 j
	N1 P1	66,700 ab	432.0 e	350.3 f	11,738 h
	N2 P1	66,978 a	440.8 c	366.9 bc	12,595 c
	N3 P1	66,978 a	453.4 b	370.7 a	13,091 a
	N4 P1	67,117 a	433.9 de	368.3 ab	12,471 d
	N0 P3	65,866 abc	383.3 f	323.1 i	9485 i
	N1 P3	65,449 abc	439.5 cd	360.6 e	12,060 f
	N2 P3	65,241 abc	459.3 a	366.4 bc	12,766 b
	N3 P3	65,033 abc	440.4 c	364.9 cd	12,151 e
	N4 P3	64,847 abc	435.9 cde	363.2 d	11,939 g

(续表 1)

年份 Year	处理 Treatment	公顷穗数 Harvest ear number (ears hm^{-2})	穗粒数 Grains per ear	千粒重 1000-grain weight (g)	公顷产量 Yield (kg hm^{-2})
2021	N0 P0	63,365 c	388.5 g	298.9 ab	8558 j
	N1 P0	66,367 ab	450.3 f	276.8 ef	9618 h
	N2 P0	65,700 abc	467.5 e	286.5 d	10,232 fg
	N3 P0	65,366 abc	492.7 ab	286.5 d	10,729 cd
	N4 P0	67,034 a	480.4 cd	276.3 f	10,345 efg
	N0 P1	64,699 abc	444.9 f	278.5 ef	9322 i
	N1 P1	66,700 a	467.2 e	280.1 e	10,149 fg
	N2 P1	65,700 abc	473.8 de	295.3 bc	10,689 cd
	N3 P1	66,367 ab	496.7 ab	300.6 a	11,519 a
	N4 P1	66,700 a	476.1 cde	285.0 d	10,526 de
	N0 P2	63,699 bc	441.4 f	293.4 c	9592 h
	N1 P2	64,366 abc	474.1 de	285.2 d	10,117 g
	N2 P2	65,033 abc	498.0 a	295.7 bc	11,138 b
	N3 P2	65,449 abc	486.4 bc	295.4 bc	10,936 bc
	N4 P2	66,283 abc	473.1 d	285.1 d	10,396 ef
F 值	年份 Year (Y)	0.87 ^{ns}	336.19 ^{**}	7368.11 ^{**}	824.96 ^{**}
F-value	施氮水平 Nitrogen (N)	3.57 ^{**}	428.39 ^{**}	269.17 ^{**}	1155.26 ^{**}
	施磷水平 Phosphorus (P)	2.62 ^{ns}	25.10 ^{**}	23.21 ^{**}	66.97 ^{**}
	Y×N	0.42 ^{ns}	15.14 ^{**}	65.29 ^{**}	102.32 ^{**}
	Y×P	0.03 ^{ns}	51.72 ^{**}	26.01 ^{**}	16.26 ^{**}
	N×P	1.03 ^{ns}	20.87 ^{**}	33.24 ^{**}	24.87 ^{**}

N0: 不施氮; N1: 施氮量为 60 kg hm^{-2} ; N2: 施氮量为 120 kg hm^{-2} ; N3: 施氮量为 180 kg hm^{-2} ; N4: 施氮量为 240 kg hm^{-2} ; P0: 不施磷; P1: 施磷量为 60 kg hm^{-2} ; P2: 施磷量为 120 kg hm^{-2} ; P3: 施磷量为 180 kg hm^{-2} ; 表中数据后 ns、* 和 ** 分别表示无相关性、相关性在 5% 和 1% 概率水平差异显著; 同一列中不同小写字母的值在 5% 概率水平差异显著。

N0: no nitrogen application; N1: N application rate of 60 kg hm^{-2} ; N2: N application rate of 120 kg hm^{-2} ; N3: N application rate of 180 kg hm^{-2} ; N4: N application rate of 240 kg hm^{-2} ; P0: no phosphorus application; P1: P application rate of 60 kg hm^{-2} ; P2: P application rate of 120 kg hm^{-2} ; P3: P application rate of 180 kg hm^{-2} . ns: no correlation. * and ** indicate significant difference in the correlation at the 5% and 1% probability levels, respectively. Different lowercase letters in the same column are significantly different at the 5% probability level.

表 2 氮磷配施对夏玉米叶面积指数影响的方差分析

Table 2 Analysis of variances on effects of combined application of nitrogen and phosphorus on leaf area index of summer maize

变异来源 Variance source	抽雄期 Tassel stage	乳熟期 Milk stage	成熟期 Maturity stage
年份 Year (Y)	4.14 [*]	8.94 ^{**}	403.71 ^{**}
施氮水平 Nitrogen (N)	81.40 ^{**}	128.95 ^{**}	75.18 ^{**}
施磷水平 Phosphorus (P)	1.63 ^{ns}	4.29 ^{**}	2.56 ^{ns}
Y×N	3.40 [*]	15.21 ^{**}	4.27 ^{**}
N×P	1.46 ^{ns}	3.70 ^{**}	3.64 ^{**}

表中数据后 ns、* 和 ** 分别表示无相关性、相关性在 5% 和 1% 概率水平差异显著。

ns: no correlation. * and ** indicate significant difference in the correlation at the 5% and 1% probability levels, respectively.

2.3 氮磷配施对夏玉米 SPAD 值的影响

由图 2 和表 3 可知, 氮磷配施对 SPAD 值影响显著。相同施磷量条件, 夏玉米 SPAD 值随着施氮量的增加基本呈现先增后减的趋势。不施磷和低磷条件下, SPAD 值在 VT 到 R6 时期于 N3 达到最高, 在 VT 到 R3 时期 N3 与 N4 没有显著性差异。N3 P1 处理

在 2021 年相较于 N3 P0 处理的 SPAD 值在 VT、R3、R6 时期分别提高 5.14%、2.31%、10.81%。高磷条件下, SPAD 值相较于低磷条件在 VT 到 R6 时期并没有显著增加, 在 R3 到 R6 时期的 N3 与 N4 呈现降低趋势, VT 时期于 N3 达到最高, N2 与 N3 不存在显著性差异, R3 到 R6 时期于 N2 达到最高, 2 年结果基本

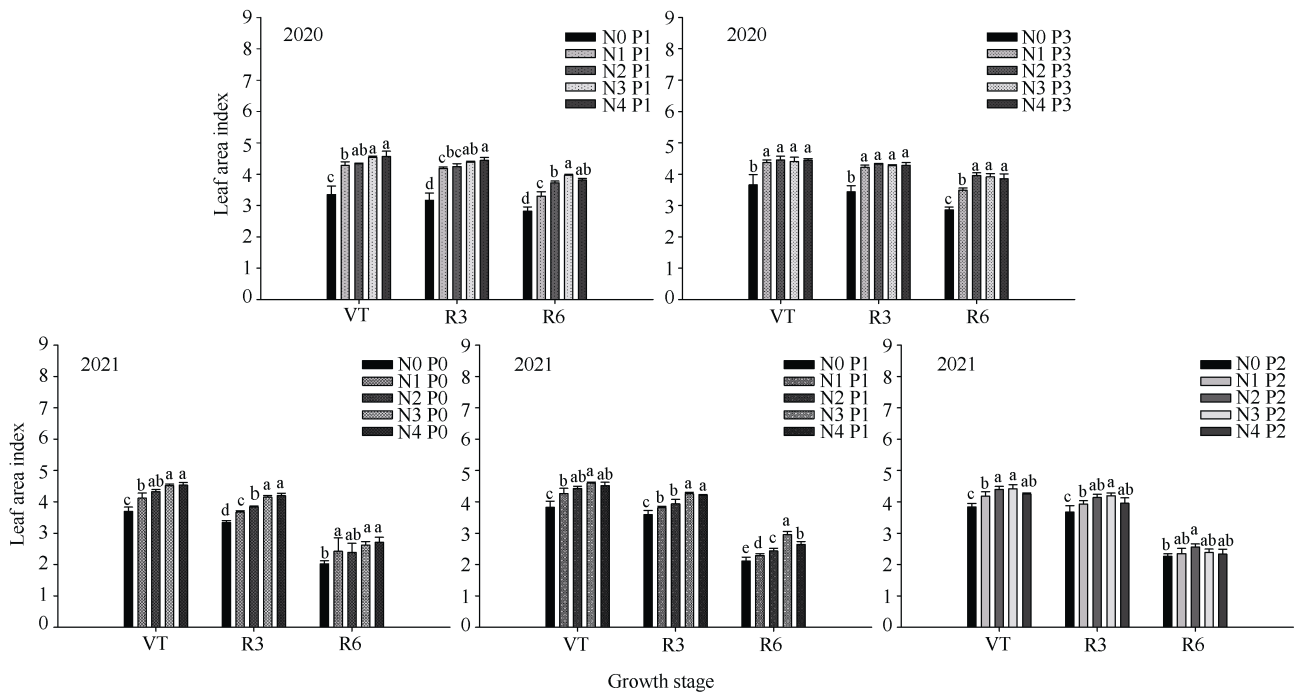


图 1 氮磷配施对夏玉米叶面积指数的影响(2020–2021)

Fig. 1 Effects of combined application of nitrogen and phosphorus on leaf area index of summer maize in 2020 and 2021

N0: 不施氮; N1: 施氮量为 60 kg hm^{-2} ; N2: 施氮量为 120 kg hm^{-2} ; N3: 施氮量为 180 kg hm^{-2} ; N4: 施氮量为 240 kg hm^{-2} ; P0: 不施磷; P1: 施磷量为 60 kg hm^{-2} ; P2: 施磷量为 120 kg hm^{-2} ; P3: 施磷量为 180 kg hm^{-2} ; VT、R3 和 R6 分别代表抽雄期、乳熟期和成熟期; 不同小写字母的值在 5% 概率水平差异显著。

N0: no nitrogen application; N1: N application rate of 60 kg hm^{-2} ; N2: N application rate of 120 kg hm^{-2} ; N3: N application rate of 180 kg hm^{-2} ; N4: N application rate of 240 kg hm^{-2} ; P0: no phosphorus application; P1: P application rate of 60 kg hm^{-2} ; P2: P application rate of 120 kg hm^{-2} ; P3: P application rate of 180 kg hm^{-2} ; VT, R3, and R6 represent tassel stage, milk stage, and maturity stages, respectively. Different lowercase letters indicate significant difference at the 5% probability level.

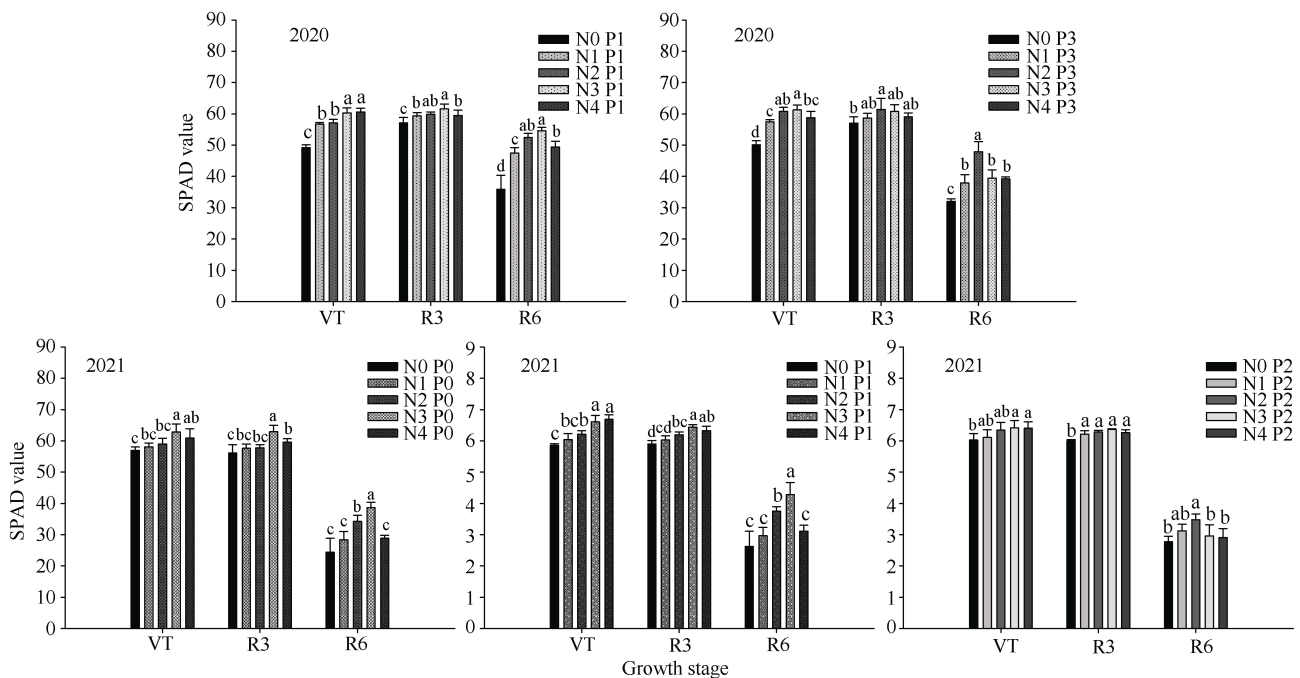


图 2 氮磷配施对夏玉米 SPAD 值的影响(2020–2021)

Fig. 2 Effects of combined application of nitrogen and phosphorus on SPAD values of summer maize in 2020 and 2021

处理同图 1; SPAD 代表叶绿素相对含量。Treatments are the same as those given in Fig. 1; SPAD: the relative chlorophyll content.

表 3 氮磷配施对夏玉米 SPAD 值影响的方差分析

Table 3 Analysis of variances on effects of combined application of nitrogen and phosphorus on SPAD values of summer maize

变异来源 Variance source	抽雄期 Tassel stage	乳熟期 Milk stage	成熟期 Maturity stage
年份 Year (Y)	130.09**	21.97**	220.01**
施氮水平 Nitrogen (N)	71.82**	18.03**	46.29**
施磷水平 Phosphorus (P)	17.42**	16.75**	29.22 ^{ns}
Y×N	3.75**	1.20 ^{ns}	3.05*
N×P	2.28**	0.97 ^{ns}	4.25**

处理同表 2。表中数据后^{ns}、*和**分别表示无相关性、相关性在 5%和 1%概率水平差异显著。

Treatments are the same as those given in Table 2. ^{ns}: no correlation. * and ** indicate significant difference in the correlation at the 5% and 1% probability levels, respectively.

一致。N3 P1 处理在 2020 年相较于 N2 P3 处理的 SPAD 值除在 VT 时期降低 0.78%外, 在 R3、R6 时期分别提高 0.29%、14.05%; 在 2021 年相较于 N2 P2 处理的 SPAD 值在 VT、R3、R6 时期分别提高 4.14%、2.39%、22.92%。

2.4 氮磷配施对夏玉米叶片衰老特性的影响

2.4.1 氮磷配施对夏玉米 SOD 活性的影响 由图 3 和表 4 可知, 氮磷配施对 SOD 活性影响显著。相同施磷量条件, 夏玉米 SOD 活性随着施氮量的增加基本呈现先增后减的趋势。不施磷条件下, N3 的 SOD 活性在 VT 到 R6 时期显著高于 N0; 低磷条件下, SOD 活性在 VT 到 R6 时期于 N3 达到最高, VT

与 R3 时期的 N3 与 N4 不存在显著性差异。N3 P1 处理在 2021 年相较于 N3 P0 处理的 SOD 活性在 VT、R3、R6 时期分别提高 7.43%、10.70%、9.32%。高磷条件下, SOD 活性相较于低磷在 VT 到 R6 时期并没有显著增加, 在 R3 到 R6 时期的 N3 与 N4 呈现降低趋势, VT 到 R3 时期于 N3 达到最高, R3 时期 N2 与 N3 不存在显著性差异, R6 时期于 N2 达到最高, 2 年结果基本一致。N3 P1 处理在 2020 年相较于 N2 P3 处理的 SOD 活性在 VT、R3、R6 时期分别提高 3.97%、6.64%、4.08%; 在 2021 年相较于 N2 P2 处理的 SOD 活性在 VT、R3、R6 时期分别提高 9.70%、8.52%、2.16%。

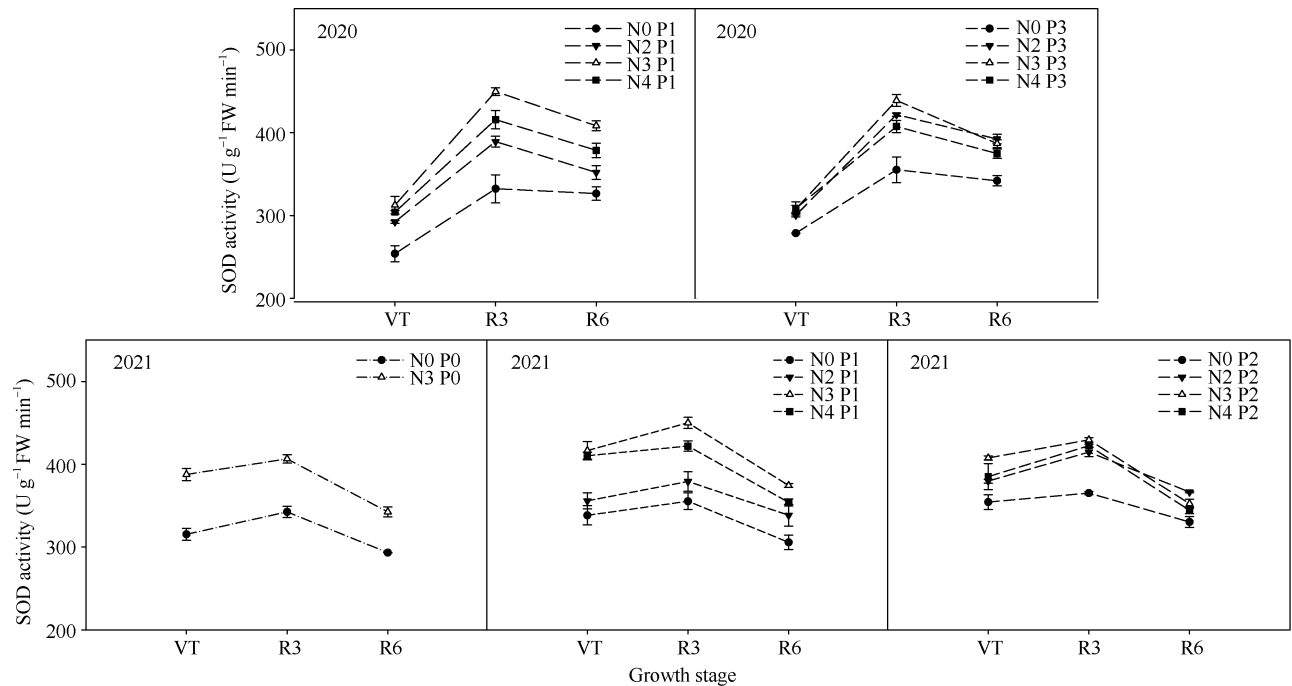


图 3 氮磷配施对夏玉米 SOD 活性的影响(2020–2021)

Fig. 3 Effects of combined application of nitrogen and phosphorus on SOD activities of summer maize in 2020 and 2021

处理同图 1; SOD 代表超氧化物歧化酶。Treatments are the same as those given in Fig. 1. SOD: superoxide dismutase

表 4 氮磷配施对夏玉米 SOD 活性影响的方差分析

Table 4 Analysis of variances on effects of combined application of nitrogen and phosphorus on SOD activities of summer maize

变异来源 Variance source	抽雄期 Tassel stage	乳熟期 Milk stage	成熟期 Maturity stage
年份 Year (Y)	515.52**	1.27 ^{ns}	50.68**
施氮水平 Nitrogen (N)	85.85**	165.75**	103.20**
施磷水平 Phosphorus (P)	12.43**	10.43**	12.19**
Y×N	6.41**	2.75 ^{ns}	1.70 ^{ns}
N×P	4.63**	6.54**	13.28**

处理同表 2。表中数据后 ^{ns}、* 和 ** 分别表示无相关性、相关性在 5% 和 1% 概率水平差异显著。
Treatments are the same as those given in Table 2. ^{ns}: no correlation. * and ** indicate significant difference in the correlation at the 5% and 1% probability levels, respectively.

2.4.2 氮磷配施对夏玉米 POD 活性的影响 由图 4 和表 5 可知, 氮磷配施对 POD 活性影响显著。相同施磷量条件, 夏玉米 POD 活性随着施氮量的增加基本呈现先增后减的趋势。不施磷条件下, N3 的 POD 活性在 VT 到 R6 时期显著高于 N0; 低磷条件下, POD 活性在 VT 到 R6 时期于 N3 达到最高, N3 与 N4 不存在显著性差异。N3 P1 处理在 2021 年相较于 N3 P0 处理的 POD 活性在 VT、R3、R6 时期分别提高 12.25%、8.73%、20.64%。高磷条件下, POD 活性相较于低磷在 VT 到 R6 时期并没有显著增加, 在 R3 时期的 N3 与 N4 呈现降低趋势, VT 时期于 N4 达到最高, N3 与 N4 不存在显著性差异, 2020 年 R3 到 R6 时期于 N3 达到最高, 2021 年 R3 到 R6 时期于 N2 达到

最高, R6 时期的 N2 与 N3 不存在显著性差异。N3 P1 处理在 2020 年相较于 N2 P3 处理的 POD 活性在 VT、R6 时期分别降低 1.78%、0.64%, 在 R3 时期提高 13.24%; 在 2021 年相较于 N2 P2 处理的 POD 活性在 VT、R3、R6 时期分别提高 12.66%、7.90%、0.69%。
2.4.3 氮磷配施对夏玉米 CAT 活性的影响 由图 5 和表 6 可知, 氮磷配施对 CAT 活性影响显著。相同施磷量条件, 夏玉米 CAT 活性随着施氮量的增加基本呈现先增后减的趋势。不施磷条件下, N3 的 CAT 活性在 VT 到 R6 时期显著高于 N0; 低磷条件下, CAT 活性在 VT 到 R6 时期于 N3 达到最高, VT 时期的 N3 与 N4 不存在显著性差异。N3 P1 处理在 2021 年相较于 N3 P0 处理的 CAT 活性在 VT、

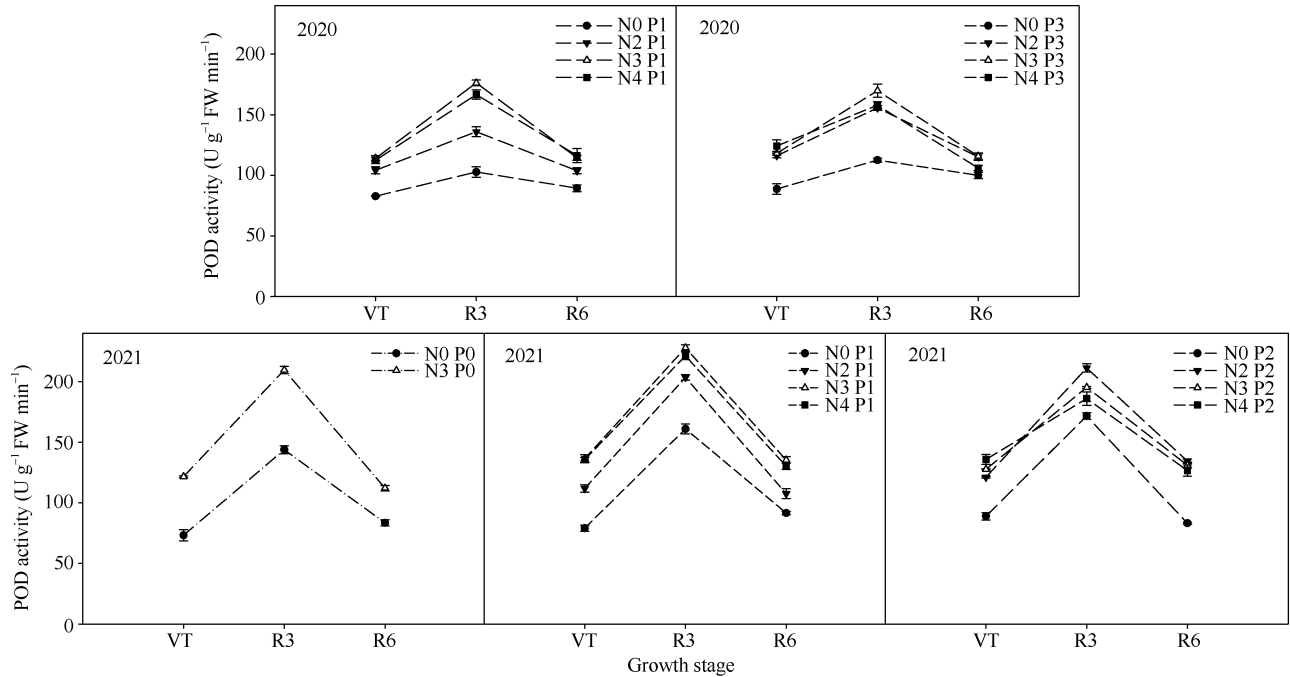


图 4 氮磷配施对夏玉米 POD 活性的影响(2020–2021)

Fig. 4 Effects of combined application of nitrogen and phosphorus on POD activities of summer maize in 2020 and 2021
处理同图 1; POD 代表过氧化物酶。Treatments are the same as those given in Fig. 1; POD: peroxidase.

表 5 氮磷配施对夏玉米 POD 活性影响的方差分析

Table 5 Analysis of variances on effects of combined application of nitrogen and phosphorus on POD activities of summer maize

变异来源	抽雄期	乳熟期	成熟期
Variance source	Tassel stage	Milk stage	Maturity stage
年份 Year (Y)	74.66**	1159.05**	49.30**
施氮水平 Nitrogen (N)	396.41**	480.10**	204.84**
施磷水平 Phosphorus (P)	23.56**	29.81**	20.43**
Y×N	19.88**	4.10*	9.04**
N×P	4.82**	33.11**	21.53**

处理同表 2。表中数据后^{ns}、*和**分别表示无相关性、相关性在 5%和 1%概率水平差异显著。
Treatments are the same as those given in Table 2. ^{ns}: no correlation. * and ** indicate significant difference in the correlation at the 5% and 1% probability levels, respectively.

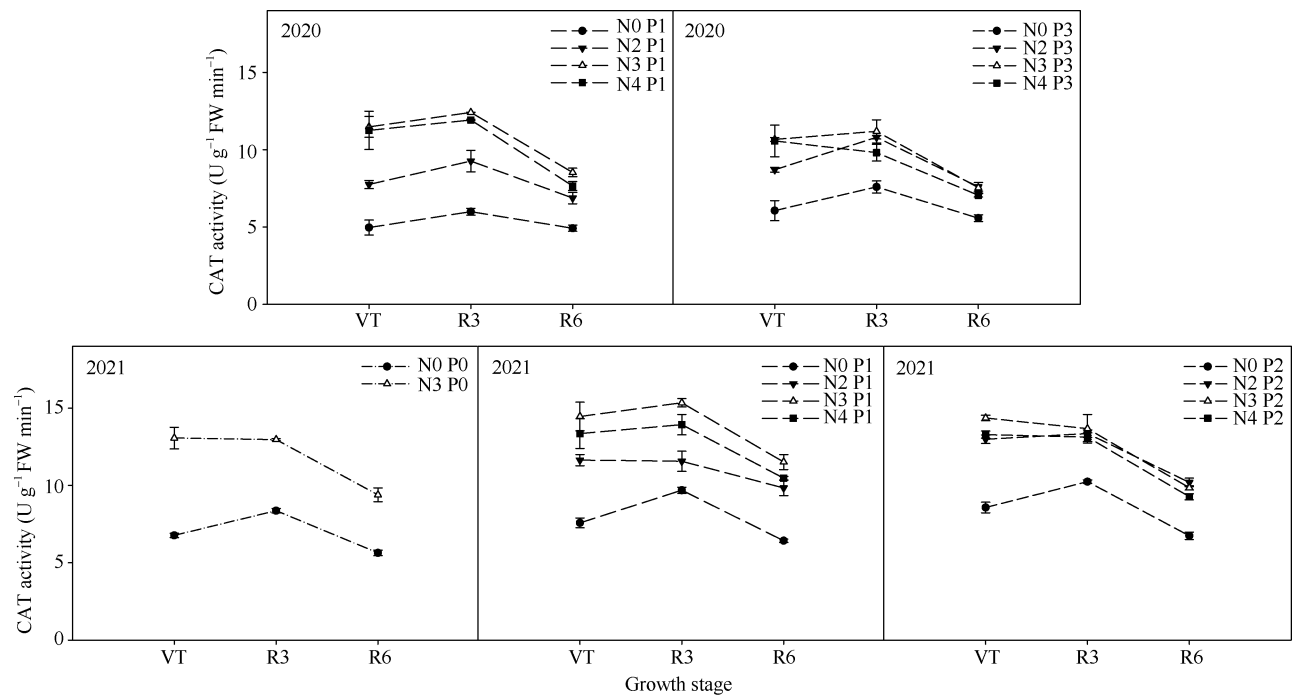


图 5 氮磷配施对夏玉米 CAT 活性的影响(2020–2021)

Fig. 5 Effects of combined application of nitrogen and phosphorus on CAT activities of summer maize in 2020 and 2021

处理同图 1; CAT 代表过氧化氢酶。Treatments are the same as those given in Fig. 1; CAT: catalase.

表 6 氮磷配施对夏玉米 CAT 活性影响的方差分析

Table 6 Analysis of variances on effects of combined application of nitrogen and phosphorus on CAT activities of summer maize

变异来源	抽雄期	乳熟期	成熟期
Variance source	Tassel stage	Milk stage	Maturity stage
年份 Year (Y)	0.01 ^{ns}	5.93*	1.04 ^{ns}
施氮水平 Nitrogen (N)	139.81**	155.78**	185.45**
施磷水平 Phosphorus (P)	12.95**	7.40**	13.62**
Y×N	2.04 ^{ns}	1.64 ^{ns}	1.06 ^{ns}
N×P	2.71*	7.44**	8.35**

处理同表 2。表中数据后^{ns}、*和**分别表示无相关性、相关性在 5%和 1%概率水平差异显著。
Treatments are the same as those given in Table 2. ^{ns}: no correlation. * and ** indicate significant difference in the correlation at the 5% and 1% probability levels, respectively.

R3、R6 时期分别提高 26.59%、22.89%、16.86%。
高磷条件下，CAT 活性相较于低磷在 VT 到 R6 时

期并没有显著增加，在 R3 时期的 N3 与 N4 呈现降
低趋势，VT 到 R3 时期于 N3 达到最高，R6 时期于

N2 达到最高, N2 与 N3 不存在显著性差异, 2 年结果基本一致。N3 P1 处理在 2020 年相较于 N2 P3 处理的 CAT 活性在 VT、R3、R6 时期分别提高 5.96%、10.79%、8.43%; 在 2021 年相较于 N2 P2 处理的 CAT 活性在 VT、R3、R6 时期分别提高 31.87%、14.94%、12.17%。

2.4.4 氮磷配施对夏玉米 MDA 含量的影响 由图 6 和表 7 可知, 氮磷配施对 MDA 含量影响显著。相同施磷量条件, 夏玉米 MDA 含量随着施氮量的增加基本呈现先减后增的趋势。不施磷条件下, N3 的 MDA 含量在 VT 到 R6 时期显著低于 N0; 低磷条件下, MDA 含量在 VT 到 R6 时期于 N3 达到最低, VT

时期的 N3 与 N4 不存在显著性差异。N3 P1 处理在 2021 年相较于 N3 P0 处理的 MDA 含量在 VT、R3、R6 时期分别降低 18.13%、23.59%、18.75%。高磷条件下, MDA 含量相较于低磷在 VT 到 R6 时期并没有显著减少, 在 R3 到 R6 时期的 N3 与 N4 呈现增加趋势, VT 时期于 N3 达到最低, R3 到 R6 时期于 N2 达到最低, N2 与 N3 不存在显著性差异, 2 年结果基本一致。N3 P1 处理在 2020 年相较于 N2 P3 处理的 MDA 含量在 VT、R3、R6 时期分别降低 41.06%、9.34%、6.27%; 在 2021 年相较于 N2 P2 处理的 MDA 含量在 VT、R3、R6 时期分别降低 30.34%、9.47%、9.01%。

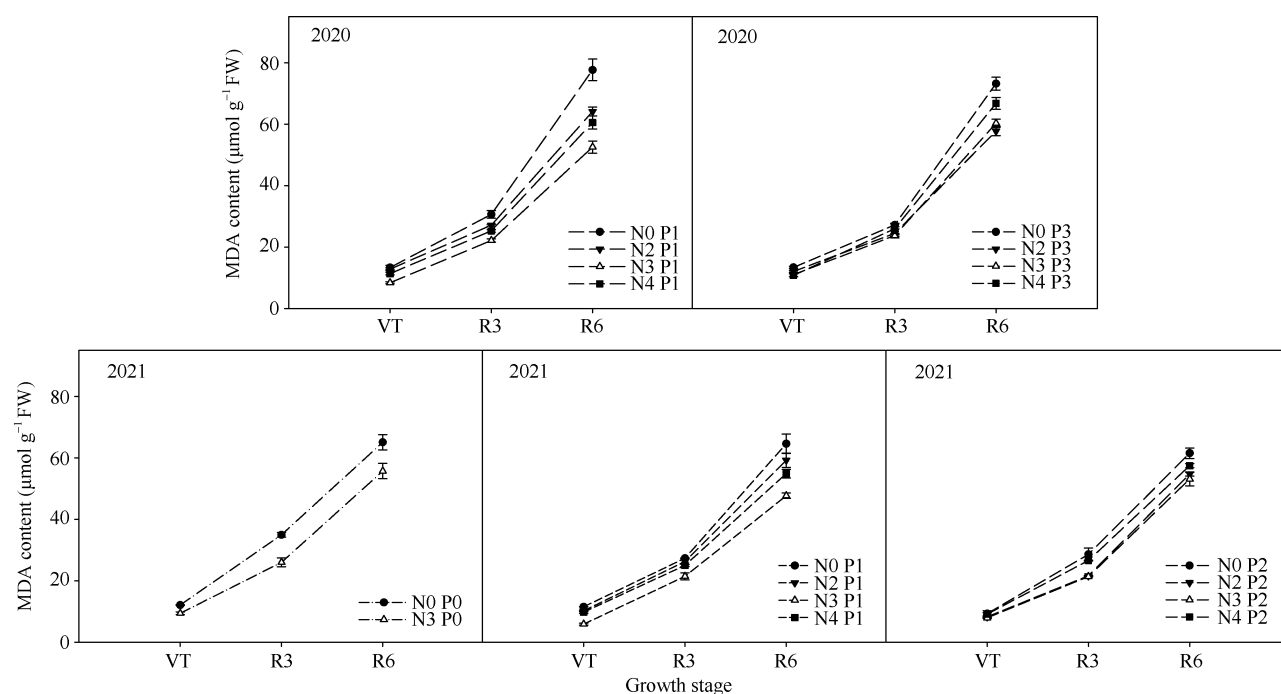


图 6 氮磷配施对夏玉米 MDA 含量的影响(2020–2021)

Fig. 6 Effects of combined application of nitrogen and phosphorus on MDA contents of summer maize in 2020 and 2021
处理同图 1; MDA 代表丙二醛。Treatments are the same as those given in Fig. 1; MDA: malondialdehyde.

表 7 氮磷配施对夏玉米 MDA 含量影响的方差分析

Table 7 Analysis of variances on effects of combined application of nitrogen and phosphorus on MDA contents of summer maize

变异来源 Variance source	抽雄期 Tassel stage	乳熟期 Milk stage	成熟期 Maturity stage
年份 Year (Y)	10.90**	11.86**	120.18**
施氮水平 Nitrogen (N)	93.17**	31.29**	146.00**
施磷水平 Phosphorus (P)	36.60**	33.95**	16.72**
Y×N	7.30**	0.31 ^{ns}	0.19 ^{ns}
N×P	8.83**	5.33**	11.61**

处理同表 2。表中数据后^{ns}、*和**分别表示无相关性、相关性在 5%和 1%概率水平差异显著。

Treatments are the same as those given in Table 2. ^{ns}: no correlation. * and ** indicate significant difference in the correlation at the 5% and 1% probability levels, respectively.

2.5 相关性分析

由表 8 可知, 产量与公顷穗数、千粒重、叶面积指数、SPAD 值、SOD 活性、CAT 活性呈现极显著正相关, 与 MDA 含量呈现显著负相关; 公顷穗数与穗粒数、叶面积指数、SPAD 值、CAT 活性呈现极显著正相关, 与 SOD 活性、POD 活性呈现显著正相关, 与 MDA 含量呈现显著负相关; 穗粒数与 SPAD 值、SOD 活性、POD 活性、CAT 活性呈现极

显著正相关, 与 MDA 含量呈现极显著负相关, 与千粒重呈现显著负相关; 千粒重与叶面积指数呈现极显著正相关, 与 SPAD 值呈现显著正相关; 叶面积指数与 SPAD 值、SOD 活性、CAT 活性呈现显著正相关, 与 POD 活性呈现显著正相关, 与 MDA 含量呈现显著负相关; SPAD 值与 SOD 活性、POD 活性、CAT 活性呈现显著正相关, 与 MDA 含量呈现显著负相关。

表 8 产量及产量构成因素、叶面积指数、SPAD 值与衰老特性的相关性分析
Table 8 Correlation coefficients of yield and yield components, leaf area index, SPAD values, and senescence characteristics

相关性 Correlation	产量 Yield	公顷穗数 Harvest ear number	穗粒数 Grains per ear	千粒重 1000-grain weight	叶面积指数 Leaf area index	SPAD 值 SPAD value	SOD 活性 SOD activity	POD 活性 POD activity	CAT 活性 CAT activity	MDA 含量 MDA content
产量 Yield	1									
公顷穗数 Harvest ear number	0.56**	1								
穗粒数 Grains per ear	0.39	0.50**	1							
千粒重 1000-grain weight	0.68**	0.06	-0.40*	1						
叶面积指数 Leaf area index	0.97**	0.53**	0.30	0.72**	1					
SPAD 值 SPAD value	0.88**	0.51**	0.51**	0.49*	0.84**	1				
SOD 活性 SOD activity	0.59**	0.55*	0.87**	-0.05	0.61**	0.75**	1			
POD 活性 POD activity	0.43	0.51*	0.92**	-0.25	0.47*	0.66**	0.95**	1		
CAT 活性 CAT activity	0.84**	0.70**	0.67**	0.36	0.87**	0.88**	0.89**	0.79**	1	
MDA 含量 MDA content	-0.52*	-0.58*	-0.91**	0.16	-0.49*	-0.76**	-0.92**	-0.91**	-0.79**	1

SPAD、SOD、POD、CAT 和 MDA 分别代表叶绿素相对含量、超氧化物歧化酶、过氧化物酶、过氧化氢酶和丙二醛含量; 表中数据后*和**分别表示相关性在 1%和 5%概率水平差异显著。
SPAD, SOD, POD, CAT, and MDA represent the relative chlorophyll content, superoxide dismutase, peroxidase, catalase, and malondialdehyde, respectively. * and ** indicate significant correlation at the 5% and 1% probability levels, respectively.

3 讨论

3.1 氮磷施肥对夏玉米产量的影响

氮、磷作为玉米主要吸收的两大营养元素, 对玉米产量具有显著影响^[31-32]。不合理的氮肥或磷肥的用量均会降低玉米产量^[33-35], 合理的氮磷施肥可以显著提高玉米产量^[14]。但是关于氮磷施肥如何通过影响产量构成因素, 进而影响玉米产量的报道不一致。随氮、磷肥施入量的增加, 玉米的穗数、穗粒数与千粒重均呈现先增加后降低的趋势^[36-37], 也

有研究表明, 氮、磷肥施入量的增加仅对穗粒数影响显著, 对穗数、千粒重影响不显著^[38-39]。本试验表明, 随着氮磷施入量的增加, 玉米产量呈现先增加后降低的趋势。过高的氮磷施入相较于合理的氮磷施肥(N3 P1)处理并没有显著提高玉米产量。较高磷肥施入会出现氮峰偏移现象, N2 产量与 N3 产量差异不显著, 但产量低于合理氮磷施肥处理。相较于其他处理, 合理的氮磷施肥(N3 P1)处理主要是通过增加穗粒数与千粒重, 进而提高玉米产量。

3.2 氮磷配施对夏玉米叶面积指数与 SPAD 值的影响

玉米叶面积指数与叶绿素含量的变化可以作为玉米光合能力的高低的直接反映^[26,40]。对于禾本科作物而言,生育后期的光合作用直接影响着籽粒产量的形成^[41]。花粒期玉米叶面积指数与 SPAD 值的快速下降,光合能力降低,导致干物质积累量不足,干物质转移到籽粒中的量减少,粒重降低,玉米产量下降^[42-43]。在一定范围内,玉米叶面积指数和 SPAD 值随施氮量的增加而增加,而过量施氮会使生育后期叶面积指数和叶绿素含量迅速下降,叶片早衰^[44-45]。也有研究报道过量施氮,叶面积指数和净光合速率变化不显著^[46]。施磷相较于不施磷处理,会显著增加叶片后期的叶面积指数和 SPAD 值。缺磷条件下,植物叶肉细胞磷浓度降低,光合磷酸化水平下降,ATP 合成受阻,光合能力下降,叶面积指数与 SPAD 值大幅下降^[47-48]。合理的氮磷配施会提高作物叶面积指数和功能叶片 SPAD 值,延长灌浆后期单株光合面积,具有较高的光合生产能力^[15,37,49]。本试验表明,随着氮磷施入量的增加,玉米生育后期的叶面积指数和 SPAD 值呈现先增加后降低的趋势。过量的氮肥施入并没有显著提高玉米生育后期的叶面积指数与 SPAD 值;过量的磷肥投入会在低氮条件下提高生育后期的叶面积指数与 SPAD 值,高氮条件下降低生育后期的叶面积指数与 SPAD 值。但高磷条件下 N2 的叶面积指数与 SPAD 值低于合理的氮磷配施(N3 P1)处理。合理的氮磷配施(N3 P1)能够在玉米生育后期保持较高的叶面积指数与 SPAD 值,而产量与玉米生育后期叶面积指数、SPAD 值呈显著正相关。

3.3 氮磷配施对夏玉米叶片后期抗氧化酶活性和 MDA 含量的影响

花粒期,玉米由营养生长与生殖生长并进阶段转入生殖生长阶段,茎叶等营养器官基本停止生长,进入衰老阶段^[50]。玉米生育后期的叶片光合能力受叶片衰老快慢影响^[51]。当茎叶营养器官衰老过快,叶面积指数与 SPAD 值降低,光合能力快速下降,光合产物积累不足,光合产物转移到籽粒不足,产量将降低 20%~30%^[52]。植物进入衰老阶段,植物体内的超氧自由基、 H_2O_2 和 MDA 含量增加^[18,53]。SOD、POD、CAT 作为植物主要的抗氧化酶,其较高的活性可以保持超氧自由基和 H_2O_2 产生与清除机制的平衡,降低 MDA 的含量^[54]。SOD 作为清除活性氧

的第一道防线,催化超氧化物的歧化反应,产生 H_2O_2 和氧气^[22]。CAT 可以将迅速将 H_2O_2 分解为 H_2O 和氧气^[55]。而对于 POD 的作用的研究,前人认为 POD 在衰老前期可以清除 H_2O_2 ,防止衰老,而在生育后期可能会参与活性氧的产生^[56]。适宜的氮肥用量会增强植株抗氧化酶活性,增强对活性氧的清除能力,降低 MDA 含量,增加生育后期叶面积指数和 SPAD 值,延缓植株衰老^[57]。过量施磷会使植株保护性酶活性降低,MDA 含量增加,叶面积指数、SPAD 值下降,叶片早衰^[58-59]。不合理的施氮磷肥会打乱玉米植株体内活性氧代谢,叶片抗氧化酶含量降低,膜脂过氧化程度加剧,加速叶片衰老,降低生育后期光合速率,最终玉米产量降低^[60-61]。本试验表明,随着氮磷施入量的增加,抗氧化酶活性呈现先增加后降低的趋势,MDA 含量呈现先降低后增加的趋势。过量的氮磷施入处理在 VT 时期与合理氮磷配施处理差异不大,但随着生育期的推进,在 R3 到 R6 时期抗氧化酶活性显著下降,MDA 含量显著提高。相较于过量氮磷施入处理,在较高施磷量的 N2 处理的抗氧化酶活性在生育后期显著提高,但仍低于合理氮磷配施处理。合理的氮磷配施(N3 P1)处理可以维持玉米生育后期较高的抗氧化酶活性,降低 MDA 含量,延缓植株叶片后期衰老,促进粒重增加、增加玉米产量。

4 结论

本试验条件下,合理氮磷配施(氮 180 kg hm^{-2} 、磷 60 kg hm^{-2})通过提高玉米生育后期抗氧化酶活性,降低 MDA 含量,维持较高的叶面积指数与 SPAD 值,提高玉米穗粒数与千粒重,进而增加产量。

References

- [1] 乔远,杨欢,雒金麟,汪思娴,梁蓝月,陈新平,张务帅. 西北地区玉米生产投入及生态环境风险评价. 中国农业科学, 2022, 55: 962-976.
Qiao Y, Yang H, Luo J L, Wang S X, Liang L Y, Chen X P, Zhang W S. Inputs and ecological environment risks assessment of maize production in northwest China. *Sci Agric Sin*, 2022, 55: 962-976 (in Chinese with English abstract).
- [2] Tollenaar M, Lee E A. Yield potential, yield stability and stress tolerance in maize. *Field Crops Res*, 2002, 75: 161-169.
- [3] Tollenaar M, Lee E A. Dissection of physiological processes underlying grain yield in maize by examining genetic improvement and heterosis. *Maydica*, 2006, 51: 399-408.
- [4] 张福锁,王激清,张卫峰,崔振岭,马文奇,陈新平,江荣风. 中国主要粮食作物肥料利用率现状与提高途径. 土壤学报, 2008, 45: 915-924.

- Zhang F S, Wang J Q, Zhang W F, Cui Z L, Ma W Q, Chen X P, Jiang R F. Nutrient use efficiencies of major cereal crops in China and measures for improvement. *Acta Pedol Sin*, 2008, 45: 915–924 (in Chinese with English abstract).
- [5] Liu X J, Zhang Y, Han W X, Tang A, Shen J L, Cui Z L, Vitousek P, Erisman J W, Goulding K, Christie P, Fangmeier A, Zhang F S. Enhanced nitrogen deposition over China. *Nature*, 2013, 494: 459–462.
- [6] Zhang X, Davidson E A, Mauzerall D L, Searchinger T D, Dumas P, Shen Y. Managing nitrogen for sustainable development. *Nature*, 2015, 528: 51–59.
- [7] 苏文楠, 解君, 韩娟, 刘铁宁, 韩清芳. 夏玉米不同部位干物质临界氮浓度稀释曲线的构建及对产量的估计. *作物学报*, 2021, 47: 530–545.
- Su W N, Xie J, Han J, Liu T N, Han Q F. Construction of critical nitrogen dilution curve based on dry matter in different organs of summer maize and estimation of grain yield. *Acta Agron Sin*, 2021, 47: 530–545 (in Chinese with English abstract).
- [8] 金书秦, 张惠, 张哲晰, 刘洋. “十三五”化肥使用量零增长行动评估及政策展望. *环境保护*, 2022, 50(5): 31–36.
- Jin S Q, Zhang H, Zhang Z X, Liu Y. Evaluation and policy prospect of zero growth action of chemical fertilizer in the 13th five-year plan. *Environ Prot*, 2022, 50(5): 31–36 (in Chinese).
- [9] 中华人民共和国国家统计局. 年度数据. (2022-03-31) <https://data.stats.gov.cn/easyquery.htm?cn=C01>. National Bureau of Statistics of the People's Republic of China. Annual data. (2022-03-31) <https://data.stats.gov.cn/easyquery.htm?cn=C01> (in Chinese).
- [10] 薛晓辉, 郝明德. 小麦氮磷肥长期配施对土壤硝态氮淋溶的影响. *中国农业科学*, 2009, 42: 918–925.
- Xue X H, Hao M D. Nitrate-N leaching in 23-year winter wheat field combined with application of nitrogen and phosphorus. *Sci Agric Sin*, 2009, 42: 918–925 (in Chinese with English abstract).
- [11] 焦亚鹏, 齐鹏, 王晓娇, 姚一铭, 武均, 蔡立群, 张仁陟. 氮磷配施对黄土高原旱作农业区典型农田土壤无机磷形态的影响. *植物营养与肥料学报*, 2020, 26: 1459–1472.
- Jiao Y P, Qi P, Wang X J, Yao Y M, Wu J, Cai L Q, Zhang R Z. Effects of nitrogen and phosphorus fertilization on inorganic phosphorus forms of typical farmland soil in the dry farming area of the Loess Plateau. *J Plant Nutr Fert*, 2020, 26: 1459–1472 (in Chinese with English abstract).
- [12] 张鑫, 邢玥, 刘照霞, 吕明露, 朱占玲, 姜远茂, 葛顺峰. 氮磷配施对苹果幼苗生长、土壤无机磷形态和磷素利用的影响. *水土保持学报*, 2021, 35(4): 237–242.
- Zhang X, Xing Y, Liu Z X, Lyu M L, Zhu Z L, Jiang Y M, Ge S F. Effects of combined application of nitrogen and phosphorus fertilizer on apple rootstock seedling growth, soil inorganic phosphorus forms and phosphorus utilization. *Res Soil Water Conserv*, 2021, 35(4): 237–242 (in Chinese with English abstract).
- [13] Schleuss P M, Widdig M, Heintz-Buschart A, Kirkman K, Spohn M. Interactions of nitrogen and phosphorus cycling promote P acquisition and explain synergistic plant-growth responses. *Ecology*, 2020, 101: e03003.
- [14] 刘苗, 刘朋召, 师祖姣, 王小利, 王瑞, 李军. 氮磷配施下夏玉米临界氮浓度稀释曲线的构建与氮营养诊断. *中国农业科学*, 2022, 55: 932–947.
- Liu M, Liu P Z, Shi Z J, Wang X L, Wang R, Li J. Critical nitrogen dilution curve and nitrogen nutrition diagnosis of summer maize under different nitrogen and phosphorus application rates. *Sci Agric Sin*, 2022, 55: 932–947 (in Chinese with English abstract).
- [15] 李萍, 谢圣杰, 李明明, 贾亚涛, 冯万军, 邢国芳. 氮磷配施对玉米‘良玉 188’光合特性及产量的影响. *农学学报*, 2020, 10(4): 14–20.
- Li P, Xie S J, Li M M, Jia Y T, Feng W J, Xing G F. Effects of combined application of nitrogen and phosphorus on photosynthetic characteristics and yield of maize variety ‘Liangyu 188’. *J Agric*, 2020, 10(4): 14–20 (in Chinese with English abstract).
- [16] Daniel P, Gilles L. Relationships between dynamics of nitrogen uptake and dry matter accumulation in maize crops. Determination of critical N concentration. *Plant Soil*, 1999, 216: 65–82.
- [17] Tollenaar M, Daynard T B. Leaf senescence in short-season maize hybrids. *Can J Plant Sci*, 1978, 58: 869–874.
- [18] 朱昆仑, 靳立斌, 董树亭, 赵斌, 刘鹏, 张吉旺. 综合农艺管理对夏玉米叶片衰老特性的影响. *中国农业科学*, 2014, 47: 2949–2959.
- Zhu K L, Jin L B, Dong S T, Zhao B, Liu P, Zhang J W. Effects of integrated agronomic practices on leaf senescence physiological characteristics of summer maize. *Sci Agric Sin*, 2014, 47: 2949–2959 (in Chinese with English abstract).
- [19] Foyer C H, Noctor G. Stress-triggered redox signalling: what's in pROSpect? *Plant Cell Environ*, 2016, 39: 951–964.
- [20] 仇琳, 赵林妹, 谢永盾, 熊宏春, 古佳玉, 毕秀丽, 刘录祥, 郭会君. 植物早衰研究进展. *植物遗传资源学报*, 2022, 23: 346–357.
- Qiu L, Zhao L S, Xie Y D, Xiong H C, Gu J Y, Bi X L, Liu L X, Guo H J. Advances in research on premature senescence in plants. *J Plant Genet Resour*, 2022, 23: 346–357 (in Chinese with English abstract).
- [21] Yordanova R Y, Christov K N, Popova L P. Antioxidative enzymes in barley plants subjected to soil flooding. *Environ Exp Bot*, 2004, 51: 93–101.
- [22] 魏婧, 徐畅, 李可欣, 贺洪军, 徐启江. 超氧化物歧化酶的研究进展与植物抗逆性. *植物生理学报*, 2020, 56: 2571–2584.
- Wei J, Xu C, Li K X, He H J, Xu Q J. Progress on superoxide dismutase and plant stress resistance. *Acta Phytophys Sin*, 2020, 56: 2571–2584 (in Chinese with English abstract).
- [23] 魏海燕, 张洪程, 马群, 戴其根, 霍中洋, 许轲, 张庆, 黄丽芬. 不同氮肥吸收利用效率水稻基因型叶片衰老特性. *作物学报*, 2010, 36: 645–654.
- Wei H Y, Zhang H C, Ma Q, Dai Q G, Huo Z Y, Xu K, Zhang Q, Huang L F. Characteristics of leaf senescence in rice genotypes with different nitrogen use efficiencies. *Acta Agron Sin*, 2010, 36: 645–654 (in Chinese with English abstract).
- [24] 陈静, 任佰朝, 赵斌, 刘鹏, 张吉旺. 叶面喷施甜菜碱对不同播期夏玉米产量形成及抗氧化能力的调控. *作物学报*, 2022, 48: 1502–1515.
- Chen J, Ren B Z, Zhao B, Liu P, Zhang J W. Regulation of leaf-spraying glycine betaine on yield formation and antioxidation of summer maize sowed in different dates. *Acta Agron Sin*, 2022, 48: 1502–1515 (in Chinese with English abstract).
- [25] 侯鹏飞, 马俊青, 赵鹏飞, 张欢玲, 赵会杰, 刘华山, 赵一丹, 汪月霞. 外源甜菜碱对干旱胁迫下小麦幼苗叶绿体抗氧化酶

- 及 *psbA* 基因表达的调节. 作物学报, 2013, 39: 1319–1324.
- Hou P F, Ma J Q, Zhao P F, Zhang H L, Zhao H J, Liu H S, Zhao Y D, Wang Y X. Effects of betaine on chloroplast protective enzymes and *psbA* gene expression in wheat seedlings under drought stress. *Acta Agron Sin*, 2013, 39: 1319–1324 (in Chinese with English abstract).
- [26] 李广浩, 刘平平, 赵斌, 董树亭, 刘鹏, 张吉旺, 田翠霞, 何在菊. 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. 应用生态学报, 2017, 28: 571–580.
- Li G H, Liu P P, Zhao B, Dong S T, Liu P, Zhang J W, Tian C X, He Z J. Effects of water conditions and controlled release urea on yield and leaf senescence physiological characteristics in summer maize. *Chin J Appl Ecol*, 2017, 28: 571–580 (in Chinese with English abstract).
- [27] 刘光明, 赵灿, 蒋岩, 赵凌天, 廖平强, 王维领, 霍中洋. 施氮量对水稻源库协同衰老特征的影响. 植物生理学报, 2022, 58: 173–185.
- Liu G M, Zhao C, Jiang Y, Zhao L T, Liao P Q, Wang W L, Huo Z Y. Effects of nitrogen application on the synergistic senescence of rice source and sink. *Acta Phytophys Sin*, 2022, 58: 173–185 (in Chinese with English abstract).
- [28] Giannopolitis C N, Ries S K. Superoxide dismutases: I. Occurrence in higher plants. *Plant Physiol*, 1977, 59: 309–314.
- [29] Durner J, Klessing D F. Salicylic acid is a modulator of tobacco and mammalian catalases. *J Biol Chem*, 1996, 271: 28492–28502.
- [30] Hammerschmidt R, Nuckles E M, Kuc J. Association of enhanced peroxidase activity with induced systemic resistance of cucumber to *Colletotrichum lagenarium*. *Physiol Plant Pathol*, 1982, 20: 73–82.
- [31] Heuer S, Gaxiola R, Schilling R, Herrera-Estrella L, López-Arredondo D, Wissuwa M, Emmanuel D, Rouached H. Improving phosphorus use efficiency: a complex trait with emerging opportunities. *Plant J*, 2017, 90: 868–885.
- [32] Torres-Rodríguez J V, Salazar-Vidal M N, Montes R A C, Mas-sange-Sánchez J A, Sawers R J H. Low nitrogen availability inhibits the phosphorus starvation response in maize (*Zea mays* ssp. *mays* L.). *BMC Plant Biol*, 2021, 21: 259.
- [33] 刘朋召, 王旭敏, 宁芳, 雒文鹤, 张琦, 张元红, 李军. 减量施氮对渭北旱地春玉米产量、氮素利用及土壤硝态氮含量的影响. 应用生态学报, 2020, 31: 2621–2629.
- Liu P Z, Wang X M, Ning F, Luo W H, Zhang Q, Zhang Y H, Li J. Effects of reduced nitrogen application on yield, nitrogen utilization of spring maize and soil nitrate content in Weibei dryland, Northwest China. *Chin J Appl Ecol*, 2020, 31: 2621–2629 (in Chinese with English abstract).
- [34] 吉庆凯, 王栋, 杨文宝, 韩彦茹, 马文奇, 魏静. 长期施磷对玉米-小麦轮作系统作物产量和磷素吸收及土壤磷积累的影响. 应用生态学报, 2021, 32: 2469–2476.
- Ji Q K, Wang D, Yang W B, Han Y R, Ma W Q, Wei J. Effects of long-term phosphorus application on crop yield, phosphorus absorption, and soil phosphorus accumulation in maize-wheat rotation system. *Chin J Appl Ecol*, 2021, 32: 2469–2476 (in Chinese with English abstract).
- [35] 张建军, 党翼, 赵刚, 王磊, 樊廷录, 李尚中. 覆膜时期和施氮量对陇东旱塬玉米产量和水氮利用效率的影响. 中国农业科学, 2022, 55: 479–490.
- Zhang J J, Dang Y, Zhao G, Wang L, Fan T L, Li S Z. Influences of mulching periods and nitrogen application rates on maize yield as well as water and nitrogen use efficiencies in loess plateau of Eastern Gansu Province. *Sci Agric Sin*, 2022, 55: 479–490 (in Chinese with English abstract).
- [36] 刘德平, 杨树青, 史海滨, 杜晓峰, 孙玲玉, 常春龙, 李祯. 氮磷配施条件下作物产量及水肥利用效率. 生态学杂志, 2014, 33: 902–909.
- Liu D P, Yang S Q, Shi H B, Du X F, Sun L Y, Chang C L, Li Z. Crop yield and water-fertilizer utilization efficiency under combined application of nitrogen and phosphorous. *J Ecol*, 2014, 33: 902–909 (in Chinese with English abstract).
- [37] 谢圣杰, 邢国芳, 贾亚涛, 苑义川, 陈小雨. 氮磷配施对玉米叶片生长及光合特性的影响. 山西农业科学, 2018, 46: 387–391.
- Xie S J, Xing G F, Jia Y T, Yuan Y C, Chen X Y. Effects of nitrogen combined with phosphorus fertilizer application on the leaf growth and photosynthetic characteristics of maize. *J Shanxi Agric Sci*, 2018, 46: 387–391 (in Chinese with English abstract).
- [38] 柴颖, 赵麒, 黄婷, 毛家双, 张扬, 侯振安. 不同氮、磷配施对春玉米养分吸收和产量的影响. 新疆农业科学, 2015, 52: 444–449.
- Chai Y, Zhao J, Huang T, Mao J S, Zhang Y, Hou Z A. Effects of different combination ratios of N, P fertilizer on nutrient uptake of maize and yield. *J Xinjiang Agric Sci*, 2015, 52: 444–449 (in Chinese with English abstract).
- [39] 曾瑾汐, 文熙宸, Muhammad A R, 陈国鹏, 陈诚, 彭霄, 马艳玮, 李丽, 官思成, 杨文钰, 王小春. 氮磷配施对玉米-大豆套作模式种间作用、玉米产量及干物质积累与转运的影响. 草业学报, 2017, 26(7): 166–176.
- Zeng J X, Wen X C, Muhammad A R, Chen G P, Chen C, Peng X, Ma Y W, Li L, Guan S C, Yang W Y, Wang X C. Effects of combined applications of nitrogen and phosphorus on interspecies interaction, yield, and dry matter accumulation and translocation in maize in a maize-soybean relay intercropping system. *Acta Pratac Sin*, 2017, 26(7): 166–176 (in Chinese with English abstract).
- [40] 张丽光, 李丹, 刘磊, 王蕾, 孙志梅, 彭正萍, 薛世川. 不同施肥种植模式对玉米光合特性、养分效率及产量性状的影响. 水土保持学报, 2013, 27(2): 115–119.
- Zhang L G, Li D, Liu L, Wang L, Sun Z M, Peng Z P, Xue S C. Effects of different fertilization and planting patterns on photosynthetic characters, nutrients efficiency and yield traits of maize. *Res Soil Water Conserv*, 2013, 27(2): 115–119 (in Chinese with English abstract).
- [41] 孙雪芳, 丁在松, 侯海鹏, 葛均筑, 唐丽媛, 赵明. 不同春玉米品种花后光合物质生产特点及碳氮含量变化. 作物学报, 2013, 39: 1284–1292.
- Sun X F, Ding Z S, Hou H P, Ge J Z, Tang L Y, Zhao M. Post-Anthesis photosynthetic assimilation and the changes of carbon and nitrogen in different varieties of spring maize. *Acta Agron Sin*, 2013, 39: 1284–1292 (in Chinese with English abstract).
- [42] 赵伟, 徐铮, 高大鹏, 安振, 高辉远, 张子山, 宁堂原, 李耕. 定向种植对夏玉米群体内光环境及叶片光合性能的影响. 应用生态学报, 2019, 30: 2707–2716.
- Zhao W, Xu Z, Gao D P, An Z, Gao H Y, Zhang Z S, Ning T Y, Li G. Effects of directional planting on light environment and leaf photosynthesis of summer maize population. *Chin J Appl Ecol*, 2019, 30: 2707–2716 (in Chinese with English abstract).
- [43] 于宁宁, 张吉旺, 任佰朝, 赵斌, 刘鹏. 综合农艺管理对夏玉

- 米叶片生长发育及内源激素含量的影响. 作物学报, 2020, 46: 960–967.
- Yu N N, Zhang J W, Ren B Z, Zhao B, Liu P. Effect of integrated agronomic managements on leaf growth and endogenous hormone content of summer maize. *Acta Agron Sin*, 2020, 46: 960–967 (in Chinese with English abstract).
- [44] 靳立斌, 张吉旺, 李波, 崔海岩, 董树亭, 刘鹏, 赵斌. 高产高效夏玉米的冠层结构及其光合特性. 中国农业科学, 2013, 46: 2430–2439.
- Jin L B, Zhang J W, Li B, Cui H Y, Dong S T, Liu P, Zhao B. Canopy structure and photosynthetic characteristics of high yield and high nitrogen efficiency summer maize. *Sci Agric Sin*, 2013, 46: 2430–2439 (in Chinese with English abstract).
- [45] 王进斌, 谢军红, 李玲玲, Eunice E, 彭正凯, 邓超超, 沈吉成, 颜健辉. 氮肥运筹对陇中旱农区玉米光合特性及产量的影响. 草业学报, 2019, 28(1): 60–69.
- Wang J B, Xie J H, Li L L, Eunice E, Peng Z K, Deng C C, Shen J C, Xie J H. Effects of nitrogen management on photosynthetic characteristics and yield of maize in arid areas of central Gansu, China. *Acta Pratac Sin*, 2019, 28(1): 60–69 (in Chinese with English abstract).
- [46] 楚光红, 章建新. 施氮量对滴灌超高产春玉米光合特性、产量及氮肥利用效率的影响. 玉米科学, 2016, 24(1): 130–136.
- Chu G H, Zhang J X. Effects of nitrogen application on photosynthetic characteristics, yield and nitrogen use efficiency in drip irrigation of super high-yield spring maize. *J Maize Sci*, 2016, 24(1): 130–136 (in Chinese with English abstract).
- [47] 潘晓华, 石庆华, 郭进耀, 王永锐. 无机磷对植物叶片光合作用的影响及其机理的研究进展. 植物营养与肥料学报, 1997, 3: 201–208.
- Pan X H, Shi Q H, Guo J Y, Wang Y R. Advance in the study of effects of inorganic phosphate on plant leaf photosynthesis and its mechanism. *Plant Nutr Fert Sci*, 1997, 3: 201–208 (in Chinese with English abstract).
- [48] 刘冲, 贾永红, 张金汕, 孙鹏, 罗四维, 王欢, 李鹏, 石书兵. 播种方式和施磷对冬小麦群体结构、光合特性和产量的影响. 应用生态学报, 2020, 31: 919–928.
- Liu C, Jia Y H, Zhang J S, Sun P, Luo S W, Wang H, Li P, Shi S B. Effects of seeding pattern and phosphorus application on population structure, photosynthetic characteristics and yield of winter wheat. *Chin J Appl Ecol*, 2020, 31: 919–928 (in Chinese with English abstract).
- [49] 杨乔乔, 康建宏, 王佳. 氮磷钾肥配施对春玉米迪卡 517 光合特性的影响. 浙江农业科学, 2021, 62: 1057–1062.
- Yang Q Q, Kang J H, Wang J. Different ratios of nitrogen, phosphorus and potassium fertilizer influenced photosynthetic characteristics of spring maize Deca 517. *J Zhejiang Agric Sci*, 2021, 62: 1057–1062 (in Chinese).
- [50] 麻雪艳, 周广胜. 基于光合产物动态分配的玉米生物量模拟. 应用生态学报, 2016, 27: 2292–2300.
- Ma X Y, Zhou G S. Maize biomass simulation based on dynamic photosynthate allocation. *Chin J Appl Ecol*, 2016, 27: 2292–2300 (in Chinese with English abstract).
- [51] 黄鑫慧, 任佰朝, 赵斌, 刘鹏, 张吉旺. 植酶 Q9 对大田遮阴夏玉米产量和衰老特性的调控作用. 应用生态学报, 2020, 31: 3433–3444.
- Huang X H, Ren B Z, Zhao B, Liu P, Zhang J W. Effects of phy-tase Q9 on the yield and senescence characteristics of summer maize shaded in the field. *Chin J Appl Ecol*, 2020, 31: 3433–3444 (in Chinese with English abstract).
- [52] 蒯本科. 植物衰老关系器官发育和作物产量与品质性状的形成. 植物生理学报, 2014, 50: 1265–1266.
- Kuai B K. Associations of green organ senescence with nascent organ development in plants and yield and quality component formations in crops. *Acta Phytophys Sin*, 2014, 50: 1265–1266 (in Chinese with English abstract).
- [53] Dhindsa R S, Dhindsa P P, Reid D M. Leaf senescence and lipid peroxidation: Effects of some phytohormones, and scavengers of free radicals and singlet oxygen. *Physiol Plant*, 1982, 56: 453–457.
- [54] 尹永强, 胡建斌, 邓明军. 植物叶片抗氧化系统及其对逆境胁迫的响应研究进展. 中国农学通报, 2007, 23(1): 105–110.
- Yin Y Q, Hu J B, Deng M J. Latest development of antioxidant system and responses to stress in plant leaves. *Chin Agric Sci Bull*, 2007, 23(1): 105–110 (in Chinese with English abstract).
- [55] 吕艳艳, 金岩, 付三雄, 戚存扣. 不同耐淹油菜品种的耐淹性生理差异. 植物生理学报, 2013, 49: 959–967.
- Lyu Y Y, Jin Y, Fu S X, Qi C K. Physiological differences of different waterlogging-resistant *Brassica napus* L. under waterlogging stress. *Acta Phytophys Sin*, 2013, 49: 959–967 (in Chinese with English abstract).
- [56] 左进华, 陈安均, 孙爱东, 罗云波, 朱本忠. 番茄果实成熟衰老相关因子研究进展. 中国农业科学, 2010, 43: 2724–2734.
- Zuo J H, Chen A J, Sun A D, Luo Y B, Zhu B Z. Research progress on the factors related to tomato fruit ripening and senescence. *Sci Agric Sin*, 2010, 43: 2724–2734 (in Chinese with English abstract).
- [57] 刘艳, 汪仁, 华利民, 解占军. 施氮量对玉米生育后期叶片衰老与保护酶系统的影响. 玉米科学, 2012, 20(2): 124–127.
- Liu Y, Wang R, Hua L M, Xie Z J. Effect of N application rates on leaf senescence and protective enzyme system at later stage of maize. *J Maize Sci*, 2012, 20(2): 124–127 (in Chinese with English abstract).
- [58] Low P S, Merida J R. The oxidative burst in plant defense: Function and signal transduction. *Physiol Plant*, 2006, 96: 533–542.
- [59] 曹高巍, 王晶, 杜锦, 牛巧龙, 苏东伟, 田秀平. 施磷量对玉米产量及叶片部分酶活性的影响. 玉米科学, 2017, 25(3): 117–122.
- Cao G Y, Wang J, Du J, Niu Q L, Su D W, Tian X P. Effects of phosphate fertilizer on yield and enzyme efficiency of leaves in spring maize. *J Maize Sci*, 2017, 25(3): 117–122 (in Chinese with English abstract).
- [60] 战秀梅, 韩晓日, 杨劲峰, 王帅, 高鸣, 赵立勇. 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. 玉米科学, 2007, 15(1): 123–127.
- Zhan X M, Han X R, Yang J F, Wang S, Gao M, Zhao L Y. Effect of different fertilizer supply of maize on protective enzyme activities and lipid peroxidation of leaves in latter stage. *J Maize Sci*, 2007, 15(1): 123–127 (in Chinese with English abstract).
- [61] 王帅. 长期不同施肥对玉米叶片光合作用及光系统功能的影响. 沈阳农业大学博士学位论文, 辽宁沈阳, 2014.
- Wang S. Effects of Long-Term Different Fertilization on Photosynthesis and Photosystem Function in Maize Leaves. PhD Dissertation of Shenyang Agricultural University, Shenyang, Liaoning, China, 2014 (in Chinese with English abstract).