

多效唑和乙烯利对‘张杂谷 10 号’光合特性及产量的影响

鱼冰星 王宏富* 原向阳 杨净 段宏凯 王钰云 李智

(山西农业大学 农学院,山西 太谷 030801)

摘要 为研究多效唑和乙烯利对谷子光合特性及产量的影响,以‘张杂谷 10 号’品种为试验材料,采用随机区组设计,在谷子不同生育时期分别叶面喷施多效唑和乙烯利,对谷子主要农艺性状、叶片 SPAD 值、光合参数及产量进行测定,并比较 2 种植物生长调节剂单施和互作的效应。结果表明:多效唑和乙烯利单施处理下,谷子株高显著降低,在 A_1 处理下达到最小值,较对照降低 4.61%,茎粗显著增加,基部第一、第二和第三节间粗度均在 A_1 处理时最大,比对照分别增加 11.30%、13.26%和 14.44%,叶面积同样在 A_1 处理时最大,较对照显著增加 11.76%;谷子叶片 SPAD 值、净光合速率、蒸腾速率和气孔导度显著增加,均在 A_2 处理下达到最大值,比对照分别增加 6.81%、22.85%、18.78%和 3.48%,而胞间 CO_2 浓度较对照显著降低 6.84%;除穗长、穗码数外,穗粗、穗重、穗粒重及产量与对照相比达到显著性差异,其中穗粗在 A_1 处理下最好,穗重、穗粒重和产量则在 B_2 处理下达到最大,比对照显著增加 14.10%、11.75%和 11.09%。多效唑、乙烯利互作处理下,谷子株高在 A_1B_2 处理下达到最小值,与对照相比显著降低 6.05%,茎粗在 A_1B_2 处理下达到最大值,基部第一、第二和第三节间粗度较对照显著增加 11.96%、15.88%和 14.00%,叶面积同样在 A_1B_2 处理时最大,较对照显著增加 13.11%;谷子叶片 SPAD 值、净光合速率、蒸腾速率和气孔导度均在 A_1B_2 处理下达到最大值,比对照分别增加 8.37%、49.41%、22.64%和 10.75%,而胞间 CO_2 浓度较对照显著降低 8.14%;除穗长、穗码数外,穗粗、穗重、穗粒重及产量与对照相比均有显著变化,其中穗粗在 A_1B_2 处理下最好,穗重、穗粒重、产量则在 A_1B_2 和 A_2B_2 处理时效果最好,分别比对照增加 20.87%、18.72%、20.73%和 15.60%、16.11%、16.82%。而在 A_3B_3 和 A_3B_1 处理时谷子穗粒重、产量显著低于对照,分别减少 5.54%、6.58%和 7.73%、8.81%。试验表明,与单施相比,2 种调节剂互作效应更显著,在谷子拔节期前或拔节期喷施 300 mg/L 多效唑后,在抽穗期追施 400 mg/L 乙烯利最适宜,而在孕穗期喷施多效唑后,孕穗期或灌浆期追施乙烯利会降低穗粒重,造成产量下降。

关键词 谷子; 多效唑; 乙烯利; SPAD 值; 光合参数; 产量

中图分类号 S515

文章编号 1007-4333(2019)09-0017-10

文献标志码 A

Effects of paclobutrazol and ethephon on photosynthetic characteristics and yield of ‘Zhangza Gu 10’

YU Bingxing, WANG Hongfu*, YANG Jing, DUAN Hongkai, WANG Yuyun, LI Zhi

(College of Agronomy, Shanxi Agricultural University, Taigu 030801, China)

Abstract In order to study the effects of paclobutrazol and ethephon on photosynthetic characteristics and yield of foxtail millet. Millet cultivar ‘Zhangza Gu 10’ was taken as the research object. Paclobutrazol and ethephon were sprayed on the leaves of millet at different growth stages under random block design. Main agronomic traits including the SPAD value, photosynthetic parameters and yield of millet were measured, and the effects of single application and interaction of two plant growth regulators were compared. The results showed that the plant height of foxtail millet decreased significantly under the single application of paclobutrazol and ethephon. It reached the minimum value under A_1 treatment; The plant height decreased by 4.61%; Stem diameter increased significantly; The thicknesses of first,

收稿日期: 2018-11-06

基金项目: 山西省农业综合开发项目(201617); 现代谷子高粱产业技术体系项目(CARS-06-13.5-A28); 黄土高原特色作物优质高效生产山西省协同创新中心项目(J241643D30); 山西省现代农业杂粮产业技术体系项目(2018)

第一作者: 鱼冰星, 硕士研究生, E-mail: 253429068@qq.com

通讯作者: 王宏富, 教授, 主要从事作物栽培学与耕作学研究, E-mail: ndwhf@126.com

second and third section of the base respectively increased by 11.30%, 13.26% and 14.44%; Leaf area also increased by 11.76%. The SPAD value, net photosynthetic rate, transpiration rate and stomatal conductance of foxtail millet leaves increased significantly, and reached the maximum under the treatment of A_2 , which increased respectively by 6.81%, 22.85%, 18.78% and 3.48%, while the intercellular CO_2 concentration decreased by 6.84% compared with the control. Except the panicle length and panicle code number, panicle diameter, panicle weight, panicle grain weight and yield were significantly different to those of the control. Among which, the panicle diameter was the best under A_1 treatment, the panicle weight, panicle grain weight and yield were the largest under B_2 treatment, which increased respectively by 14.10%, 11.75% and 11.09% compared with the control. The plant height of foxtail millet under the interaction of paclobutrazol and ethephon reached the minimum value under A_1B_2 treatment, which was significantly reduced by 6.05% compared with the control. The stem diameter reached the maximum value under A_1B_2 treatment. The internode diameter of first, second and third section of the base increased by 11.96%, 15.88% and 14.00% compared with the control. The leaf area was also the largest under A_1B_2 treatment, which increased by 13.11%. The SPAD value, net photosynthetic rate, transpiration rate and stomatal conductance of foxtail millet leaves reached the maximum under the treatment of A_1B_2 , which increased by 8.37%, 49.41%, 22.64% and 10.75% respectively. The intercellular CO_2 concentration was significantly lower than that of the control group by 8.14%. Except the panicle length and panicle number, the panicle diameter, panicle weight, panicle grain weight and yield had significant changes compared with the control. Among which, the panicle diameter was the best under A_1B_2 treatment, panicle weight, panicle grain weight and yield were the best under A_1B_2 and A_2B_2 treatment, which increased 20.87%, 18.72% and 20.73% and 15.60%, 16.11% and 16.82% respectively. The panicle grain weight and yield of millet treated with A_3B_3 and A_3B_1 were significantly lower than those of the control, which decreased by 5.54%, 6.58%, 7.73% and 8.81% respectively. The results showed that the interaction effect of the two regulators was more significant than that of single application. It was most suitable to spray 400 mg/L ethephon at heading stage after spraying 300 mg/L paclobutrazol before jointing stage or at jointing stage of millet. However, after spraying paclobutrazol at booting stage, topdressing ethephon at booting stage or filling stage would decrease panicle grain weight and yield.

Keywords foxtail millet; paclobutrazol; ethephon; SPAD value; photosynthetic parameters; yield

近几年随着农业产业结构调整 and 人们饮食习惯的改变,有“小杂粮之首”美称的谷子因其营养丰富多样的特色而成为功能农业的热门作物,其需求量在逐年上升^[1]。在农业生产活动中,谷子的品种与种植密度逐渐上升为影响产量的主要因素。而随着产区区内播种密度的增加,谷子茎秆易发生弯折并造成倒伏,使植株群体内部结构被破坏,植株之间互相遮阴蔽护从而影响了作物的光合效率;同时,谷子茎秆内输导组织也被破坏,阻碍了同化物质的输送,导致产量下降。然而传统的栽培管理方式未能进一步降低倒伏对作物产量和质量的危害。因此,在传统栽培措施的基础上,采用化学调控技术控制作物生长有重要的研究意义^[2-3]。

多效唑是现今作物生产实践上广泛应用的植物生长调节剂之一,在作物生长发育前期施用多效唑可抑制茎秆基部节间伸长并降低植株高度,增加茎秆粗度,增大叶片面积,改善光合条件,进而间接地促进光照强度和 CO_2 流通量,加速叶片中光合产物的输送和转化,同时提高植株体内保护酶活性,延缓

作物的衰老,促进作物增产^[4-5]。而多效唑处理防倒伏能否增产,除受浓度因素影响外,还受其施用时期的影响。在实际生产活动中,多效唑因外界因素变化施用时期过早或过晚会对产量造成影响,因为该时期施用多效唑,可能会影响植株正常生长发育,降低叶片光合效率,影响光合同化物质的产生和运转,抑制幼穗发育,造成营养缺失,空壳和半秕粒增加,从而影响增产效果甚至造成减产^[6]。许多研究发现,复配型植物生长调节剂用于作物生产,可明显促进地下节根形成,增加根系层数,协调产量组成要素,促进籽粒发育,有效预防秃尖,提高穗的粒数和千粒重,从而有效促进作物增产,同时增强植株的抗寒、抗旱和耐涝等综合抵抗逆境的能力^[7-8]。李汉忠等^[9]研究表明与对照相比,在玉米的9叶期喷施乙烯利和矮壮素复配剂,玉米穗位高、株高适中,产量最高。杨可攀等^[10]通过在玉米9叶期喷施 DCPTA 和 ETH 复配剂发现可显著提高玉米光合特性、茎秆强度及籽粒产量。近年来,植物生长调节剂的混施在促根、矮化、干燥、落叶、坐果和催熟等很多方面

都有一定的影响,且发展势头迅猛,原因在于调节剂复配施用相比单施应用效果增大,可减少施用量,同时也拓宽了应用范围,不仅可以互作取长补短,克服单独施用的不足,而且还能提高增产幅度。

植物生长调节剂在玉米上复配应用研究较多且影响较大,而在谷子上多为调节剂的单施应用,复施互作研究鲜少报道。本试验通过在‘张杂谷10号’的不同生育时期分别叶面喷施多效唑和乙烯利,并比2种植物生长调节剂单施和互作的效应,旨在发现既能降低谷子植株改善光合生理,又能不影响产量的施用方法应用到谷子生产中,达到矮化抗倒伏又稳产高产的目的。

1 材料与方法

1.1 试验材料

供试药剂为四川国光农化股份有限公司生产的15%多效唑粉剂和40%乙烯利水剂。供试品种‘张杂谷10号’,由张家口市农科院提供。

1.2 试验设计

试验于2017年5月在山西农业大学申奉村实验站进行。土壤有机质含量17.8 g/kg,全氮0.94 g/kg,碱解氮71.1 mg/kg、速效磷47 mg/kg,速效钾93 mg/kg^[11]。采用随机区组设计,小区面积4 m×4 m=16 m²,留苗密度为218 460株/hm²,多效唑(300 mg/L)于拔节期前(A₁)、拔节期(A₂)以及孕穗期(A₃)喷施,乙烯利(400 mg/L)于孕穗期(B₁)、抽穗期(B₂)以及灌浆期(B₃)喷施,单施共6个处理,互作(A₁B₁, A₁B₂, A₁B₃, A₂B₁, A₂B₂, A₂B₃, A₃B₁, A₃B₂, A₃B₃)共9个处理,以清水为对照(CK)。多效唑和乙烯利所选浓度均经过山西农业大学化控实验室筛选,喷施时为防止雾滴飘落到相邻小区,小区间分别覆盖塑料布相间隔,田间管理同大田常规管理。

1.3 测定项目和测定方法

1.3.1 叶绿素含量(SPAD值)的测定

在谷子灌浆期内,从各个小区选取3组,每组3株具有代表性的植株,用SPAD-502便携式叶绿素测定仪对谷子倒2叶叶绿素含量(SPAD)进行测定,重复3次,每片叶子测定叶基部、中部和叶尖SPAD值,然后取其平均值。

1.3.2 光合参数的测定

在谷子的灌浆期内,从各个小区选取3组,每组3株具有代表性的植株,用CI-340便携式光合仪测

定谷子倒2叶的净光合速率(P_n)、蒸腾速率(T_r)、气孔导度(G_s)及胞间CO₂浓度(C_i)等光合参数,重复3次,取其平均值。

1.3.3 农艺性状及产量的测定

在谷子的灌浆期内,每个小区选取3组,每组3株具有代表性的植株进行农艺性状测定,测量株高、茎粗和叶面积,在成熟期测定穗长、穗粗、穗重、穗码数、穗粒重和小区实际产量,重复3次,取其平均值^[12-13]。

1.4 数据处理

试验数据采用Excel 2010和DPS 9.50软件统计分析,并用Duncan新复极差法进行方差分析。

2 结果与分析

2.1 多效唑、乙烯利对谷子株高、茎粗和叶面积的影响

谷子的抗倒伏性受其株高的直接影响,降低谷子植株的高度有利于抗倒伏,使谷子获得稳产和高产。与对照相比,2种调节剂在单施处理下,除B₃处理外,其他处理的谷子株高均有所降低,其中,A₁和A₂处理较对照显著降低4.61%和3.53%,其他处理无显著性差异,表1。植株茎粗除B₃处理外,其他处理均有所增加,在A₁处理时达到最大值,进一步分析发现,N1、N2和N3节间的粗度均呈N1>N2>N3的趋势,与对照相比,A₁处理下的N1、N2和N3节间的粗度分别增加11.30%、13.26%和14.44%。谷子叶面积与茎粗趋势相一致,同样在A₁处理时达到最大值,较对照显著增加11.76%。

2种调节剂互作处理下,与对照相比,除A₃B₃和A₃B₁处理外,其他各处理的谷子株高均有所降低,表2。其中,在A₁B₂处理下株高达到最小值,较对照显著降低6.05%,A₂B₁和A₂B₂处理次之,其他处理未达显著差异。茎粗除A₃B₃和A₃B₁处理外,其他各处理均有所增加,在A₁B₂处理时达到最大值,进一步分析发现,N1、N2和N3节间的粗度均呈N1>N2>N3的趋势,A₁B₂处理下的N1、N2和N3节间的粗度较对照分别增加11.96%、15.88%和14.00%。谷子叶面积与茎粗趋势相一致,同样在A₁B₂处理时达到最大值,较对照显著增加13.11%。

2.2 多效唑、乙烯利对谷子叶片SPAD值的影响

与对照相比,2种调节剂在单施处理下,除B₁

表1 多效唑、乙烯利单施对谷子株高、茎粗、叶面积的影响

Table 1 Effects of paclobutrazol and ethephon alone on plant height, stem diameter and leaf area of millet

处理 Treatment	株高/cm Plant height	茎粗/cm Stem diameter			叶面积/cm ² Leaf area
		N1	N2	N3	
CK	164.83±11.93 ab	1.15±0.01 d	0.98±0.04 d	0.90±0.08 d	109.02±11.35 c
A ₁	157.22±7.33 c	1.28±0.01 a	1.11±0.01 a	1.03±0.07 a	121.85±14.05 a
A ₂	159.00±5.58 c	1.25±0.16 ab	1.09±0.05 ab	0.99±0.06 b	120.77±8.84 a
A ₃	162.33±10.43 b	1.19±0.02 c	1.02±0.03 c	0.91±0.04 d	113.23±1.17 b
B ₁	160.47±1.33 bc	1.24±0.02 b	1.07±0.10 b	0.98±0.12 bc	116.48±2.29 b
B ₂	162.23±8.25 b	1.22±0.05 bc	1.06±0.06 b	0.95±0.20 c	115.44±3.80 b
B ₃	165.65±3.23 a	1.15±0.10 d	0.96±0.01 d	0.88±0.07 d	107.23±11.43 c

注: A₁, 拔节期前(多效唑); A₂, 拔节期; A₃, 孕穗期; B₁, 孕穗期(乙烯利); B₂, 抽穗期; B₃, 灌浆期。N1, 基部第一节; N2, 基部第二节; N3, 基部第三节。表中的不同小写字母表示在不同喷施时期下各处理间有显著性差异($P < 0.05$), 下同。

Note: A₁, before jointing stage (paclobutrazol); A₂, jointing stage; A₃, booting stage; B₁, booting stage (Ethephon); B₂, heading stage; B₃, grain filling stage. N1, base first section; N2, base second section; N3, base third section. The different lowercase letters in the table indicate significant differences between treatments at different spraying periods ($P < 0.05$). The same below.

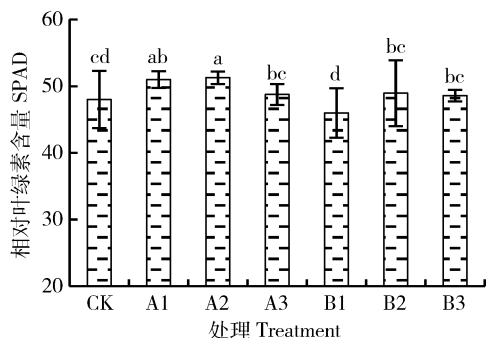
表2 多效唑、乙烯利互作对谷子株高、茎粗、叶面积的影响

Table 2 Effects of paclobutrazol and ethephon interaction on plant height, stem diameter and leaf area of millet

处理 Treatment	株高/cm Plant height	茎粗/cm Stem diameter			叶面积/cm ² Leaf area
		N1	N2	N3	
CK	163.93±1.86 ab	1.17±0.03 cd	1.07±0.03 cd	1.00±0.02 bcd	109.40±1.09 e
A ₁ B ₁	160.33±2.85 abcd	1.23±0.02 b	1.16±0.05 b	1.06±0.02 bc	117.12±1.60 cd
A ₁ B ₂	154.00±3.46 d	1.31±0.03 a	1.24±0.03 a	1.14±0.03 a	123.75±1.27 a
A ₁ B ₃	155.67±1.45 bcd	1.24±0.01 ab	1.17±0.01 ab	1.07±0.07 ab	118.83±5.91 bc
A ₂ B ₁	154.33±2.91 cd	1.27±0.01 ab	1.20±0.07 ab	1.10±0.01 ab	123.49±0.96 a
A ₂ B ₂	154.50±2.75 cd	1.26±0.02 ab	1.19±0.02 ab	1.09±0.02 ab	120.57±3.63 ab
A ₂ B ₃	160.67±2.60 abcd	1.23±0.03 bc	1.16±0.03 bc	1.06±0.00 bc	116.92±1.44 cd
A ₃ B ₁	165.33±2.91 a	1.15±0.02 d	1.08±0.02 d	0.99±0.01 d	109.02±7.43 e
A ₃ B ₂	163.00±3.46 abc	1.21±0.02 bcd	1.14±0.02 bcd	1.05±0.04 bcd	114.30±0.76 de
A ₃ B ₃	164.67±0.67 a	1.16±0.01 d	1.09±0.08 d	1.00±0.03 cd	109.43±0.77 e

处理外,其他处理的谷子叶片 SPAD 值均有所增加。其中, A₂ 处理下的 SPAD 值高于其他处理,与对照相比增加 6.81%,且达到显著水平,其次为 A₁ 处理较好,其他处理与对照相比无显著差异,图 1。

与对照相比,2 种调节剂互作处理下,除 A₃B₃ 和 A₃B₁ 处理外,其他处理的谷子叶片 SPAD 值均有所增加,图 2。其中,在 A₁B₂ 处理下叶片 SPAD 值达到最大值,较对照相比显著增加 20.32%。说明在适宜时期,2 种调节剂互作能使谷子叶片的叶绿素含量显著增加,而当互作时期不适宜时,对谷子叶片叶绿素合成则会产生胁迫作用,抑制谷子叶片正常的生长发育。



不同字母表示处理间差异显著($P < 0.05$), 下同。

Different letters indicate significant differences between treatments ($P < 0.05$). The same below.

图1 多效唑、乙烯利单施对谷子叶片 SPAD 值的影响

Fig. 1 Effect of paclobutrazol and ethephon alone on SPAD value of millet leaves

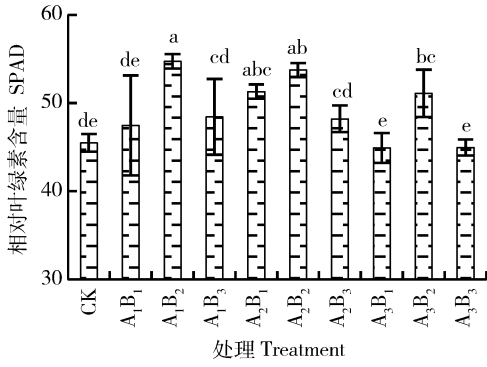


图 2 多效唑、乙烯利互作对谷子叶片 SPAD 值的影响
Fig. 2 Effects of paclobutrazol and ethephon interaction on the SPAD value of millet leaves

2.3 多效唑、乙烯利对谷子叶片光合参数的影响

由表 3 可见, 2 种调节剂在单施处理下, 谷子叶

片的 P_n 、 T_r 、 G_s 和 C_i 均会受到影响, 且变化显著。其中, 谷子叶片中 P_n 、 T_r 和 G_s 均在 A_2 处理下达到最大值, 与对照相比分别增加 22.85%、18.78% 和 3.48%, 且达到显著差异。 C_i 的变化与其他指标趋势相反, 除 B_1 处理外, 其他各处理的 C_i 值均有所下降, 在 A_2 处理下达到最小值, 较对照显著降低 6.84%。

2 种调节剂互作处理对谷子叶片的 P_n 、 T_r 、 G_s 和 C_i 有明显的调控作用。由表 4 可知, 不同处理间谷子叶片的 P_n 、 T_r 、 G_s 有显著性差异, 其中以 A_1B_2 处理最好, 与对照相比分别增加 49.41%、22.64% 和 9.51%。不同处理下 C_i 的变化趋势相反, 在 A_1B_2 处理时达到最小值, 较对照显著降低 8.14%, 而 A_3B_3 和 A_3B_1 处理下叶片的 C_i 较高, 与对照相比显著上升 2.49% 和 3.37%。

表 3 多效唑、乙烯利单施对谷子光合参数的影响

Table 3 Effects of paclobutrazol and ethephon alone on photosynthetic parameters of millet

处理 Treatment	净光合速率/ ($\mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$) P_n	蒸腾速率/ ($\text{mmol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$) T_r	气孔导度/ ($\text{mmol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$) G_s	胞间 CO_2 浓度/ ($\mu\text{mol}/\text{mol}$) C_i
CK	18.88±1.20 c	3.67±0.33 bc	131.71±2.23 d	158.85±1.20 b
A ₁	20.44±1.20 b	4.05±0.05 ab	133.95±5.17 bc	153.65±2.63 d
A ₂	22.31±2.58 a	4.30±0.52 a	136.30±7.81 a	149.63±4.75 e
A ₃	19.38±2.60 bc	3.77±0.30 bc	133.21±1.40 bcd	156.07±7.24 c
B ₁	18.16±1.73 c	3.62±0.43 c	131.64±1.65 d	160.63±5.18 a
B ₂	20.22±0.95 b	3.79±0.20 bc	134.63±4.65 b	153.63±3.38 d
B ₃	19.29±0.62 bc	3.68±0.09 bc	132.61±3.42 cd	157.20±2.40 c

表 4 多效唑、乙烯利互作对谷子光合参数的影响

Table 4 Effects of paclobutrazol and ethephon interaction on photosynthetic parameters of millet

处理 Treatment	净光合速率/ ($\mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$) P_n	蒸腾速率/ ($\text{mmol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$) T_r	气孔导度/ ($\text{mmol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$) G_s	胞间 CO_2 浓度/ ($\mu\text{mol}/\text{mol}$) C_i
CK	17.06±1.26 de	3.71±0.05 c	131.72±3.26 d	160.09±2.36 b
A ₁ B ₁	19.87±0.58 cde	4.08±0.12 b	131.31±5.78 d	160.74±4.15 b
A ₁ B ₂	25.49±0.96 a	4.55±0.10 a	144.25±0.98 a	147.06±3.33 c
A ₁ B ₃	20.39±1.17 cd	4.16±0.36 b	132.90±2.86 d	158.05±6.35 b
A ₂ B ₁	22.09±2.22 bc	4.21±0.09 b	137.44±7.15 bc	149.38±4.26 c
A ₂ B ₂	23.74±0.69 ab	4.41±0.22 a	139.23±1.63 b	148.24±1.10 c
A ₂ B ₃	20.09±0.32 cde	4.11±0.03 b	132.81±6.23 d	158.64±1.15 b
A ₃ B ₁	16.91±1.42 e	3.68±0.42 c	130.22±1.11 d	165.49±0.98 a
A ₃ B ₂	20.64±0.24 bc	4.17±0.09 b	133.94±1.39 cd	157.75±4.48 b
A ₃ B ₃	17.05±0.99 de	3.70±0.05 c	130.38±2.20 d	164.07±1.16 a

2.4 多效唑、乙烯利对谷子产量性状的影响

2种调节剂在单施处理时,6个处理水平中,A₂和B₂处理的产量显著高于对照,其中,在B₂处理下产量最大,较对照增产11.09%。产量性状中除穗长、穗码

数外,穗粗、穗重及穗粒重与对照相比达到显著性差异。从穗粗方面来看,除A₁外,其他处理的穗粗与对照相比无显著性差异。穗重、穗粒重均表现为B₂处理最好,与对照相比分别增加14.10%和11.75%,表5。

表5 多效唑和乙烯利单施对谷子主要农艺性状及产量的影响

Table 5 Effect of paclobutrazol and ethephon alone on the main agronomic traits related to yield of millet

处理 Treatment	穗长/cm Panicle length	穗粗/mm Panicle diameter	穗重/g Panicle weight	穗码数 Panicle code number	穗粒重/g Grain weight of panicle	产量/(kg/hm ²) Yield
CK	29.03±1.70 ab	32.86±0.30 bc	36.54±0.39 c	116±5.68 a	29.34±0.39 c	4 522.67±59.99 c
A ₁	26.46±0.17 b	34.57±0.85 a	36.66±0.23 c	109±5.18 a	29.46±0.23 c	4 532.13±35.38 c
A ₂	26.52±0.36 b	33.10±0.56 b	38.84±0.32 b	112±2.28 a	31.31±0.52 b	4 816.73±79.99 b
A ₃	28.65±1.54 ab	32.77±0.50 bc	36.45±0.21 c	115±2.56 a	29.25±0.21 c	4 499.82±32.31 c
B ₁	30.71±0.64 a	31.52±0.40 c	36.12±0.53 c	116±4.71 a	28.91±0.53 c	4 447.51±81.54 c
B ₂	27.30±0.22 b	33.04±0.42 b	40.99±0.34 a	114±2.54 a	32.79±0.34 a	5 024.41±52.31 a
B ₃	29.48±1.26 ab	31.57±0.70 c	37.33±0.54 c	116±2.20 a	30.13±0.54 c	4 635.19±83.07 c

2种调节剂互作处理下对谷子产量有促进作用,A₁B₂和A₂B₂处理后的产量较对照显著增加,增幅分别为20.73%和16.82%,其他处理与对照相比差异不显著,但A₃B₃和A₃B₁处理下谷子产量显著低于对照,分别减少5.54%和7.73%,表6。产量性状中除穗码数外,穗长、穗粗、穗重及穗粒重与对照相比均有显著变化。从穗长来看,除A₃B₃和A₃B₁外,其他处理的穗长均低于对照,但未达显著

水平;穗粗方面,除A₃B₂、A₃B₃和A₃B₁外,其他处理的谷子穗粗均有所提高,其中以A₁B₂处理最好,与对照相比显著增加13.89%。随着谷子穗粗的增加,谷子穗重也有一定的变化,其中以A₁B₂和A₂B₂处理下谷子穗重最好,与对照相比分别增加20.87%和15.60%。穗粒重是影响谷子产量的重要构成,与穗重趋势一致,A₁B₂和A₂B₂处理下谷子穗粒重最好,显著高于对照,与对照相比增加

表6 多效唑和乙烯利互作对谷子主要农艺性状及产量的影响

Table 6 Effect of paclobutrazol and ethephon interaction on the main agronomic traits related to yield of millet

处理 Treatment	穗长/cm Panicle length	穗粗/mm Panicle diameter	穗重/g Panicle weight	穗码数 Panicle code number	穗粒重/g Grain weight of panicle	产量/(kg/hm ²) Yield
CK	28.89±0.57 bc	32.10±0.32 de	36.76±0.42 cde	114±1.75 ab	29.16±0.06 b	4 552.97±82.35 b
A ₁ B ₁	27.12±1.26 bc	32.85±0.99 d	37.07±1.69 cde	113±2.33 ab	29.75±0.75 b	4 686.74±23.63 b
A ₁ B ₂	25.88±0.87 c	36.56±0.23 a	43.18±0.25 a	118±1.32 a	34.62±0.56 a	5 496.94±64.25 a
A ₁ B ₃	26.97±1.16 bc	33.25±0.23 cd	38.09±0.26 cd	115±2.35 a	30.55±0.23 b	4 809.81±48.25 b
A ₂ B ₁	26.46±0.29 bc	35.59±0.25 ab	39.75±0.13 bc	117±4.74 a	31.05±0.19 b	4 886.73±36.52 b
A ₂ B ₂	26.75±0.86 bc	34.36±0.64 bc	41.56±0.42 ab	115±3.23 a	33.86±0.16 a	5 319.02±65.23 a
A ₂ B ₃	27.23±2.46 bc	32.66±0.46 de	37.68±1.36 cde	111±1.91 ab	30.00±0.96 b	4 725.20±23.63 b
A ₃ B ₁	31.85±0.85 a	31.01±0.16 e	34.60±1.99 e	109±5.34 b	26.59±0.52 c	4 200.61±46.59 c
A ₃ B ₂	27.91±1.59 bc	32.02±0.75 de	38.53±1.03 bc	111±4.63 ab	30.85±0.99 b	4 855.96±86.53 b
A ₃ B ₃	29.32±0.76 b	31.06±0.02 e	35.66±0.65 de	110±2.99 ab	27.24±0.99 c	4 300.60±86.26 c

18.72%和16.11%,其他处理与对照相比差异不显著,但A₃B₃和A₃B₁处理的穗粒重显著低于对照,分别减少6.58%和8.81%。

2.5 产量与SPAD值、光合参数的相关性分析

通过分析谷子叶片SPAD值、光合参数与产量的相关系数,得到相关系数矩阵,表7。观察表可知,谷子叶片SPAD值与产量呈现出显著的正相关,相关系数为0.73,谷子叶片的P_n、T_r、G_s均与产

量呈现极显著的正相关,相关系数高达0.92~0.96,同时谷子叶片的C_i与产量也呈极显著负相关,相关系数为-0.94。而谷子叶片SPAD值与P_n、T_r呈显著正相关性,与C_i呈显著负相关性,与G_s相关性不显著。说明在一定范围内,提高植物叶片叶绿素含量,增强叶片净光合速率、蒸腾速率和气孔导度,并降低谷子叶片胞间CO₂浓度,能有效提高植物光合作用从而促进产量增加。

表7 产量与SPAD值、光合参数的相关性分析

Table 7 Correlation analysis of yield and SPAD value and photosynthetic parameters

参数 Parameter	Y	X ₁	X ₂	X ₃	X ₄
X ₁	0.73*				
X ₂	0.96**	0.65*			
X ₃	0.95**	0.69*	0.98**		
X ₄	0.92**	0.55	0.94**	0.87**	
X ₅	-0.94**	-0.67*	-0.94**	-0.89**	-0.95**

注:Y,产量;X₁,SPAD值;X₂,净光合速率(P_n);X₃,蒸腾速率(T_r);X₄,气孔导度(G_s);X₅,胞间CO₂浓度(C_i)。*表示不同参数间在0.05水平上差异显著,**表示不同参数间在0.01水平上差异显著。

Note:Y, yield; X₁, SPAD value; X₂, net photosynthetic rate (P_n); X₃, transpiration rate (T_r); X₄, stomatal conductance (G_s); X₅, intercellular CO₂ concentration respectively (C_i). * indicates significant difference at 0.05 level. ** indicates significant difference at 0.01 level.

3 讨论

植株的抗倒伏性能与株高、茎粗、节长和茎秆形态等因素密切相关,是多种因素相互作用的结果。因此,前人多研究在谷子前期通过田间管理或化控方式来降低株高、增加节间粗度,防止谷子倒伏。本研究通过叶面喷施多效唑、乙烯利发现,2种调节剂均能有效降低谷子植株高度,增加茎秆节间粗度,同时叶面积随之增加。与单施相比,2种调节剂互作下谷子株高降低效果更显著,茎粗和叶面积增加最大,且均在A₁B₂处理表现最好。

叶绿素作为植物叶片进行光合作用的基础,植物光合效率的强弱受其含量高低的直接影响,反映其同化物质的效能,进而影响干物质积累和产量形成^[14]。谷子在进入灌浆期后易发生倒伏,随着地上与地下物质交换和光合产物向库的运输,籽粒逐渐充实,穗重增加,茎秆营养缺失衰老,谷子上部与下

部重量失衡,易造成根倒或茎倒,会导致植株间遮阴蔽护,植冠通风透光性下降,群体结构被破坏,叶片光合速率下降^[15-16]。因此在此基础上,本试验通过喷施多效唑、乙烯利来研究对谷子叶片SPAD值的影响,结果表明,前期喷施多效唑能有效控制植株伸长,且茎秆充实度显著提高,叶片叶绿素含量增加,光合效率提高,这与聂萌恩等^[17],史关燕等^[18]研究结论相一致,而后期喷施乙烯利主要促进叶片光合作用,同化物合成和输出能力加强,同时经茎、叶和穗吸收,传导到作用部位分解生成乙烯,加速叶和穗成熟,这与夏雪岩等^[19]结论相同。2种调节剂互作比单施处理显著地增加了谷子叶片叶绿素含量,其中A₁B₂处理效果最好。

光合作用是植物干物质积累的重要途径,二氧化碳是植物光合过程中的主要物质来源。施用生长调节剂是促进植株叶片光合的重要方法之一,通过提高植株体内光合产物的输送和转化,籽粒中有机

营养有效累积,从而降低秕谷率^[20-21]。陈新红等^[22]指出,喷施适宜浓度多效唑后的大豆植株与对照相比,其株高和结荚高度显著降低,茎秆缩短且粗度增加,植株群体间通风好,光合速率提高,同化物质积累增多,产量提高。杨可攀等^[10]发现在玉米9叶期喷施 DCPTA 和 ETH 复配剂可显著提高玉米光合特性,促进叶片光合产物的输出,提高光合效率,从而提高茎秆强度及籽粒产量。本试验结果表明,2种调节剂互作比单施处理显著地增加了谷子叶片的 P_n 、 T_r 和 G_s ,并有效降低叶片中 C_i ,均表现在 A_1B_2 处理时效果最好。

谷子在2种调节剂互作处理下,穗长、穗粗、穗重、穗粒重及产量均优于单施处理。其中除穗码数外,谷子穗长显著缩短,穗粗明显增加,表现为 A_1B_2 处理效果最好,穗重、穗粒重、产量同样在 A_1B_2 处理时达到最大值。主要是因为谷子在开花期后籽粒开始灌浆充实,这一阶段是植株营养生长和生殖生长并进且过渡的关键时期,干物质积累和籽粒发育都需要吸收大量营养,多效唑能调节株高,改善植株的通风透光性,增大叶面积,叶片功能期相对较长,较高的光合速率保证了谷子后期籽粒灌浆等对养分需要,同时乙烯利促进了同化物的合成和输出,加速了籽粒干物质积累和成熟,为经济产量的提高奠定了基础。但是在不适宜的时期喷施两种调节剂互作却起到相反的作用, A_3B_3 和 A_3B_1 处理下谷子穗粒重、产量显著低于对照,可能由于过晚施用多效唑,抑制了幼穗的正常生长发育,粒数减少,影响产量。同时,乙烯利喷施时期过早或过晚,供给籽粒灌浆的光合叶片较早进入衰老阶段,光合能力减弱,穗部发育不良,也会影响产量潜力的发挥。顾大路等^[23]研究表明在水稻中后期施用乙烯利对水稻的穗粒结构有一定作用,可显著增加水稻千粒重。但在前期施用会因水稻的穗发育还未完全,从而抑制水稻幼穗发育,进而影响水稻产量;在水稻的中后期应用乙烯利,此时穗发育已完全,不会对水稻穗的发育造成影响,这与 Ma 等^[24-25]、Caldwell 等^[26] 和梁金城等^[27] 研究结论相同。因此,要选择适宜的时期喷施多效唑和乙烯利来调控植株的衰老进程,保障有机物质的持续积累和运转,充实籽粒增加穗粒重,从而达到谷子稳产增产的目的。

4 结 论

综合多效唑、乙烯利对谷子农艺性状、叶片

SPAD 值、光合参数及产量的影响,相比单施处理,2种调节剂在谷子不同生育时期互作处理可以明显降低谷子植株高度,增加茎秆节间粗度,同时增大叶面积,叶片叶绿素含量增加效果显著,植株光合作用效率明显提高,加速了叶片光合产物的输送和运转,从而提高谷子产量。试验表明在谷子拔节期前或拔节期喷施 300 mg/L 多效唑后,在抽穗期追施 400 mg/L 乙烯利最适宜,而在孕穗期喷施多效唑后,孕穗期或灌浆期追施乙烯利会降低穗粒重,造成产量下降。

参考文献 References

- [1] 赵其国,尹学斌. 我们的未来农业-功能农业[J]. 山西农业大学:自然科学版,2017,37(7):457-468,486
Zhao Q G, Yin X B. Our future agriculture-functional agriculture[J]. *Shanxi Agricultural University: Natural Science Edition*, 2017,37(7):457-468,486 (in Chinese)
- [2] 王宇先,李清泉,赵蕾,李丽莉,王力,刘玉涛,杨慧莹,高盼,徐莹莹. 谷子矮化处理对倒伏性状及产量的影响[J]. 黑龙江农业科学,2016(11):23-25
Wang Y X, Li Q Q, Zhao L, Li L L, Wang L, Liu Y T, Yang H Y, Gao P, Xu Y Y. Effect of plant dwarfing on yield and lodging resistance in millet[J]. *Heilongjiang Agricultural Sciences*, 2016(11):23-25 (in Chinese)
- [3] 田伯红. 禾谷类作物抗倒伏性的研究方法与谷子抗倒性评价[J]. 植物遗传资源学报,2013,14(2):265-269
Tian B H. The methods of lodging resistance assessment in cereal crops and their application in foxtail millet[J]. *Journal of Plant Genetic Resources*, 2013,14(2):265-269 (in Chinese)
- [4] 杨利艳,杨武德. 多效唑对荞麦生长、生理及产量影响的研究[J]. 山西农业大学:自然科学版,2005,25(4):328-330
Yang L Y, Yang W D. Effects of MET on the growth, physiology and yield of buckwheat[J]. *Shanxi Agricultural University: Natural Science Edition*, 2005,25(4):328-330 (in Chinese)
- [5] 余凯凯,宋喜娥,高虹,黄蕾,宋惠洁,刘阳,李艳星,郭平毅,原向阳. 不同施肥水平下多效唑对马铃薯光合及叶绿素荧光参数的影响[J]. 核农学报,2016,30(1):154-163
Yu K K, Song X E, Gao H, Huang L, Song H J, Liu Y, Li Y X, Guo P Y, Yuan X Y. Effect of paclobutrazol on photosynthesis and chlorophyll fluorescence under different fertilization rates in potatoes[J]. *Journal of Nuclear Agricultural Sciences*, 2016,30(1):154-163 (in Chinese)
- [6] 禚维言,张涛,黄永禄,冯斗,胡蔚东. 喷施多效唑对甜高粱生长

- 及生理特性的影响[J]. 作物杂志, 2011(5):73-76
- Xuan W Y, Zhang T, Huang Y L, Feng D, Hu W D. Effects of paclobutrazol on development and physiological properties of sweet sorghum[J]. *Crops*, 2011(5):73-76 (in Chinese)
- [7] 程晟, 刘娜. 乙烯利 多效唑吡啶乙酸复配对玉米生长生理及产量构成影响的研究[J]. 农业技术与装备, 2017(11):17-18, 21
- Cheng S, Liu N. Study on the effects of ethephon paclobutrazol and indoloacetic acid on the growth physiology and yield components of maize[J]. *Agricultural Technology & Equipment*, 2017(11):17-18, 21 (in Chinese)
- [8] 黄国弟. 乙烯利、多效唑在生产中的应用[J]. 广西热带农业, 2005(3):17
- Huang G D. Application of ethephon and paclobutrazol in production[J]. *Agricultural Research and Application*, 2005(3):17 (in Chinese)
- [9] 李汉忠, 张国英. 乙烯利、矮壮素复配剂在夏玉米不同生育时期的试验效果分析[J]. 种业导刊, 2010(1):28-29
- Li H Z, Zhang G Y. Effect analysis of ethephon and chlormequat in different growth stages of summer maize[J]. *Journal of Seed Industry Guide*, 2010(1):28-29 (in Chinese)
- [10] 杨可攀, 顾万荣, 李丽杰, 谢腾龙, 李晶, 魏湜. DCPTA 和 ETH 复配对玉米茎秆力学特性及籽粒产量的影响[J]. 核农学报, 2017, 31(4):809-820
- Yang K P, Gu W R, Li L J, Xie T L, Li J, Wei S. Effects of mixed compound of DCPTA and ETH on stalk mechanical characteristics and grain yield in maize[J]. *Journal of Nuclear Agricultural Sciences*, 2017, 31(4):809-820 (in Chinese)
- [11] 吕晓飞, 王宏富, 邢静嫒, 李卫明, 孙艺丹. 不均衡种植方式对谷子农艺性状及光合参数的影响[J]. 核农学报, 2016, 30(6):1196-1203
- Lv X F, Wang H F, Xing J Y, Li W M, Sun Y D. Effect of uneven planting on agronomic characters and photosynthetic characteristics of foxtail millet[J]. *Journal of Nuclear Agricultural Sciences*, 2016, 30(6):1196-1203 (in Chinese)
- [12] 祁宏英. 有机肥对谷子生育性状及产量影响的研究[D]. 吉林: 吉林农业大学, 2004
- Qi H Y. Study on the effects of organic fertilizers on millet growing characters and yield[D]. Jilin: Jilin Agricultural University, 2004 (in Chinese)
- [13] 贾小平, 董普辉, 张红晓, 全建章, 董志平. 谷子抗倒伏性和株高、穗部性状的相关性研究[J]. 植物遗传资源学报, 2015, 16(6):1188-1193
- Jia X P, Dong P H, Zhang H X, Quan J Z, Dong Z P. Correlation study of lodging resistance and plant height, panicle traits in foxtail millet[J]. *Journal of Plant Genetic Resources*, 2015, 16(6):1188-1193 (in Chinese)
- [14] Tian B H, Wang J G, Zhang L X, Li Y J, Wang S Y, Li H J. Assessment of resistance to lodging of landrace and improved cultivars in foxtail millet[J]. *Euphytica*, 2010, 172(3):295-302
- [15] Sreeja R, Balaji S, Arul L, Nirmala Kumari A, Kannan Babu J R, Subramanian A. Association of lignin and *Flexible Culm 1* (*FCI*) ortholog in imparting culm strength and lodging resistance in kodo millet (*Paspalum scrobiculatum* L.) [J]. *Molecular Breeding*, 2016, 36(11):425-433
- [16] Xue J, Xie R Z, Zhang W F, Wang K R, Hou P, Ming B, Gou L, Li S K. Research progress on reduced lodging of high-yield and-density maize [J]. *Journal of Integrative Agriculture*, 2017, 16(12):2717-2725
- [17] 聂萌恩. 喷施多效唑对谷子生理特性和产量的影响[D]. 山西: 山西农业大学, 2014
- Nie M E. Effect of spraying with PP333 on physiological characteristics and yield in millet[D]. Shanxi: Shanxi Agricultural University, 2014 (in Chinese)
- [18] 史关燕, 杨成元, 李会霞, 麻慧芳, 史根生. 多效唑喷施浓度及时对谷子性状及品质的影响[J]. 农学学报, 2015, 5(8):31-35
- Shi G Y, Yang C Y, Li H X, Ma H F, Shi G S. Effects of spraying paclobutrazol with different concentrations and time on millet's properties and quality[J]. *Journal of Agriculture*, 2015, 5(8):31-35 (in Chinese)
- [19] 夏雪岩, 程汝宏, 李顺国, 师志刚, 张婷, 相金英, 陈媛, 耿光涛. 不同剂量 40% 乙烯利对谷子催熟增产效应的研究[J]. 河北农业科学, 2012, 16(12):1-4
- Xia X Y, Cheng R H, Li S G, Shi Z G, Zhang T, Xiang J Y, Chen Y, Geng G T. Study on the effects of different dosages of 40% ethephon on ripening-promoting and increasing-yield of foxtail millet [J]. *Journal of Hebei Agricultural Sciences*, 2012, 16(12):1-4 (in Chinese)
- [20] 岳海旺, 陈淑萍, 彭海成, 宋聪敏, 谢俊良, 李洁, 郭安强, 魏建伟, 卜俊周. 玉米籽粒灌浆特性品种间比较[J]. 江苏农业学报, 2016, 32(5):1043-1048
- Yue H W, Chen S P, Peng H C, Song C M, Xie J L, Li J, Guo A Q, Wei J W, Bu J Z. Grain filling characteristics in maize materials[J]. *Jiangsu Journal of Agricultural Sciences*, 2016, 32(5):1043-1048 (in Chinese)
- [21] 刘晓双, 顾万荣, 朴琳, 张立国, 周颖, 李彩凤, 李晶, 魏湜. 噻苯隆-乙烯利复配对春玉米籽粒灌浆特性的影响及其激素调控机理[J]. 生态学报, 2017, 36(12):3526-3534
- Liu X S, Gu W R, Piao L, Zhang L G, Zhou Y, Li C F, Li J, Wei S. Effects of mixture of thidiazuron and ethephon on grainfilling characteristics and hormone regulation mechanism

- in spring maize[J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2017, 36(12): 3526-3534 (in Chinese)
- [22] 陈新红, 蔡吉凤, 董志新. 多效唑对大豆株型的调节作用及增产效果[J]. *新疆农业科学*, 1998(1): 36-38
Chen X H, Cai J F, Dong Z X. Regulation of paclobutrazol on soybean plant type and yield increasing effect[J]. *Xinjiang Agricultural Sciences*, 1998(1): 36-38 (in Chinese)
- [23] 顾大路, 王伟中, 王红军, 杨文飞, 朱云林, 钱新民. 乙烯利在水稻中后期应用的效果研究[J]. *江苏农业科学*, 2003, 5(3): 26-28
Gu D L, Wang W Z, Wang H J, Yang W F, Zhu Y L, Qian X M. Study on ethylene application in middle and late stage of rice[J]. *Jiangsu Agricultural Sciences*, 2003, 5(3): 26-28 (in Chinese)
- [24] Ma B L, 白朴. 花后期使用乙烯利对春大麦产量的影响[J]. *麦类作物学报*, 1993(5): 22-24
Ma B L, Bai P. Effect of ethephon on yield of spring barley at late flowering stage[J]. *Journal of Triticeae Crops*, 1993(5): 22-24 (in Chinese)
- [25] Ma B L, Smith D L. Chlormequat and ethephon timing and grain production of spring barley [J]. *Agronomy Journal*, 1992, 84(6): 934-939
- [26] Caldwell C D, Mellish D R, Norrie J. A comparison of ethephon alone and in combination with CCC or DPC applied to spring barley[J]. *Canadian Journal of Plant Science*, 1988, 68(4): 941-946
- [27] 梁金城, 王懿波, 王庆旺. 乙烯利在小麦上的增产效应[J]. *河南农业科学*, 1983(3): 3-5
Liang J C, Wang Y B, Wang Q W. Effect of ethephon on wheat yield increase[J]. *Journal of Henan Agricultural Sciences*, 1983(3): 3-5 (in Chinese)

责任编辑: 吕晓梅