

‘苯磺隆’对不同谷子品种叶片光合特性的影响

畅灼卓 王雅情 赵夏童 王彧瑶 马珂 原向阳* 董淑琦

(山西农业大学 农学院,山西 太谷 030800)

摘要 为探明除草剂‘苯磺隆’对不同谷子品种叶片光合特性的影响,以9个谷子品种为供试材料,10%‘苯磺隆’可湿性粉剂为供试药剂,分别设置112.5(T_1),225.0(T_2 ,推荐用量)和450.0 g/hm²(T_3)3个用量,以等量清水作为对照(CK),处理21 d后,测定谷子倒2叶的光合荧光参数。结果表明:1) T_1 处理未对供试谷子品种的光合系统造成显著影响。2) T_2 处理下,‘张杂谷10号’、‘张杂谷13号’、‘黄金谷’和‘龙谷39号’的净光合速率(P_n)与CK相比差异不显著;‘锦谷5号’、‘晋谷21号’、‘中谷9号’、‘豫谷18号’和‘冀谷35号’的 P_n 分别降低50.64%、60.91%、43.74%、49.62%和54.82%。3) T_3 处理下,‘张杂谷13号’和‘龙谷39号’的光合荧光参数与CK无显著差异。‘豫谷18号’和‘晋谷21号’的非调节性能量耗散的量子产量 $Y(NO)$ 分别高出CK 129.17%和60.87%。‘锦谷5号’、‘黄金谷’和‘张杂谷10号’的调节性能量耗散的量子产量 $Y(NPQ)$ 分别升高13.73%、10.00%和12.28%。‘晋谷21号’和‘中谷9号’的非光化学反应耗散的份额(E_x)分别高出CK 48.39%和113.33%。而PSII实际光合效率 $Y(II)$ 、绝对电子传递速率 $ETR(II)$ 、光化学淬灭系数(qP)、吸收光能用于光化学反应的份额(P)和 P_n 显著低于CK。‘冀谷35号’和‘龙谷39号’的PSI由于供体限制引起的非光化学能量耗散的量子产量 $Y(ND)$ 均高出CK 300.00%,‘晋谷21号’的PSI的实际光合效率 $Y(I)$ 和PSI的相对电子传递速率 $ETR(I)$ 分别比CK降低45.95%和45.26%,‘黄金谷’的 $Y(I)$ 和 $ETR(I)$ 分别比CK降低43.59%和43.13%。4)综上所述, T_1 处理对所有供试品种的光合系统影响较小。 T_2 处理,所有供试品种均可通过热耗散消耗多余的激发能。 T_3 处理,‘张杂谷13号’和‘龙谷39号’的光合系统基本正常;‘晋谷21号’和‘豫谷18号’的光合系统受损伤较严重;其余品种虽然受损伤相对较轻,但叶片的光合色素含量降低,电子传递受阻,能量分配失衡,影响谷子叶片的光合速率。

关键词 谷子; 苯磺隆; P_{700} ; 叶绿素荧光参数; 气体交换参数; 能量分配利用

中图分类号 S515 **文章编号** 1007-4333(2021)11-0036-14 **文献标志码** A

Effects of ‘Tribenuron-methyl’ on the photosynthetic characteristics of different foxtail millet varieties

CHANG Zhuozhuo, WANG Yaqing, ZHAO Xiatong, WANG Yuyao,

MA Ke, YUAN Xiangyang*, DONG Shuqi

(College of Agriculture, Shanxi Agricultural University, Taigu 030800, China)

Abstract To explore the effect of ‘Tribenuron-methyl’ on the photosynthetic characteristics of different varieties of foxtail millet leaves, nine foxtail millet varieties were used as the test materials, and 10% ‘tribenuron-methyl’ wattle powder was taken as the test drug. Three doses, 112.5 (T_1), 225.0 (T_2 , recommended dose) and 450.0 g/hm² (T_3), were respectively set, and the same amount of water was used as control (CK). At 21 d after treatment, the photosynthetic fluorescence parameters in the 2nd leaf from top of foxtail millet were measured. The results showed that: 1) T_1 treatment did not affect the photosynthetic system of various foxtail millet varieties.

收稿日期: 2020-11-16

基金项目: 国家现代农业产业技术体系专项(CARS-06-13.5-A28); 山西农业大学青年拔尖创新人才支持计划(TYIT201406); 山西省重点研发计划(201903D221030); 山西省1331工程重点创新团队(谷子)项目

第一作者: 畅灼卓, 硕士研究生, E-mail: 1220988152@qq.com

通讯作者: 原向阳, 教授, 主要从事现代杂粮生产研究, E-mail: yuanxiangyang200@163.com

2) Under T_2 treatment, The net photosynthetic rate (P_n) of ‘Zhangzagu 10’, ‘Zhangzagu 13’, ‘Huangjingu’ and ‘Longgu 39’ were not significantly different from the CK; The P_n ‘Jingu 5’, ‘Jingu 21’, ‘Zhonggu 9’, ‘Yugu 18’, and ‘Jigu 35’ decreased by 50.64%, 60.91%, 43.74%, 49.62% and 54.82%, respectively. 3) Under T_3 treatment, the photosynthetic fluorescence parameters of ‘Zhangzagu 13’ and ‘Longgu 39’ were not significantly different from those of CK. The quantum yields of non-regulated energy dissipation ($Y(NO)$) of ‘Yugu 18’ and ‘Jingu 21’ were significantly increased than CK by 129.17% and 60.87%, respectively. The quantum yields of regulated energy dissipation ($Y(NPQ)$) of ‘Jingu 5’, ‘Huangjingu’ and ‘Zhangzagu 10’ increased by 13.73%, 10.00% and 12.28% respectively. The proportions of non-photochemical reaction dissipation (E_x) of ‘Jingu 21’ and ‘Zhonggu 9’ were increased 48.39% and 113.33%, while the PSII actual photochemical efficiency ($Y(II)$), the relative electron transfer rate of PSII ($ETR(II)$), the photochemical quenching coefficient (qP), the share of light energy absorbed for photochemical reactions (P) and P_n were significantly decreased than CK. The non-photochemical quantum yield due to PSI donor side limitation ($Y(ND)$) of ‘Jigu 35’ and ‘Longgu 39’ were significantly higher than that of CK by 300.00%. The PSI actual photochemical efficiency ($Y(I)$) and the relative electron transfer rate of PSI ($ETR(I)$) of ‘Jingu 21’ were reduced than CK by 45.95% and 45.26%, respectively. The $Y(I)$ and $ETR(I)$ of ‘Huangjingu’ were reduced by than CK 43.59% and 43.13%, respectively. In summary, T_1 treatment had little effect on the photosynthetic system of all tested varieties. Under T_2 treatment, all tested varieties could dissipate excess excitation energy through heat dissipation. Under T_3 treatment, the photosynthetic system of ‘Zhangzagu 13’ and ‘Longgu 39’ were basically normal; the photosynthetic system of ‘Jingu 21’ and ‘Yugu 18’ were more severely damaged. Although the other varieties were relatively lightly damaged, the photosynthetic pigment content of their leaves decreased, electron transfer was blocked, energy distribution was unbalanced, which affected the photosynthetic rate of foxtail millet leaves.

Keywords foxtail millet; tribenuron-methyl; P_{700} parameters; chlorophyll fluorescence parameters; gas exchange parameters; energy distribution and utilization

谷子(*Setaria italica* Beauv.)被誉为中华民族的哺育作物^[1],由于不同的生态区气候和栽培制度造就了丰富的谷子资源,是我国干旱半干旱地区重要的粮食作物。但田间杂草会对谷子造成严重减产。采用除草剂仍是当前乃至今后相当长的一段时间内的主要方式,但谷子对除草剂敏感,在谷田中可用的除草剂种类很少,目前登记可用于谷子生产的除草剂有4个:‘扑草净’、‘烯禾啶’(部分谷子品种安全性较差)、‘单嘧磺隆’和‘2,4-滴丁酯’^[2]。抗除草剂谷子品种的应用,如抗‘烯禾啶’品种‘张杂谷16’、‘冀谷43’和‘冀谷45’,抗‘阿特拉津’品种‘冀谷34’等^[3-5],改变了农民防除杂草的方式^[6],故筛选安全的除草剂、发现并培育抗除草剂谷子品种成为当前谷子生产重要的研究任务。‘苯磺隆’是应用于小麦田中的磺酰脲类除草剂,但不同的禾本科作物如小麦^[7]、玉米^[8]、水稻^[9]和谷子^[10]等对其敏感性存在差异。

虽然‘苯磺隆’是乙酰乳酸合成酶抑制剂类除草剂,但是有研究显示,该类除草剂会影响光合作用的关键步骤,包括阻断光合电子传递链,从而阻止光合作用的顺利进行^[11-12],因此这可能是该类除草剂防除杂草的机理。光合色素在植物光合作用过程中参

与光能的吸收和传递^[13];叶绿素荧光参数和气体交换参数可反映植物的光合能力^[14-15];激发能的均衡分配保证了光合电子的高效运转和协调传递^[16]。Sh等^[17]采用烟嘧磺隆处理苍耳后, F_v/F_m 降低。氯磺隆处理使玉米幼苗叶片的叶绿素含量、 $Y(II)$ 和 qP 等叶绿素荧光参数均降低^[18]。已有研究认为,PSII是植物受胁迫后光抑制作用的主要位点,却对PSI的光抑制作用研究较少,而PSI的光抑制一样能威胁到植物的生长发育^[19], P_{700} 参数可反映PSI的活性^[20], $Y(ND)$ 和 $Y(NA)$ 可作为检测除草剂对PSI影响的重要参数^[21]。虽然高剂量的‘苯磺隆’可降低‘晋谷21号’和‘张杂谷10号’的光合色素含量、 P_n 、 $Y(II)$ 和 qP ,升高 NPQ ^[10,22],但有关‘苯磺隆’对谷子叶片PSI功能影响的研究鲜有报道。本研究采用在山西省种植面积较大的9个谷子品种,设置‘苯磺隆’3个剂量,测定分析‘苯磺隆’对不同谷子品种叶片光合色素含量、 P_{700} 、叶绿素荧光参数、能量的分配利用和气体交换参数的影响,旨在探明除草剂‘苯磺隆’对不同谷子品种叶片光合特性的影响,以期在谷子田间生产中科学地施用‘苯磺隆’提供参考。

1 材料与方法

1.1 供试材料

供试品种: ‘锦谷 5 号’, ‘龙谷 39 号’, ‘冀谷 35 号’, ‘晋谷 21 号’, ‘中谷 9 号’, ‘黄金谷’, ‘张杂谷 10 号’, ‘张杂谷 13 号’和‘豫谷 18 号’。

供试药剂: 10% ‘苯磺隆’可湿性粉剂(山东胜邦绿野有限公司)。

1.2 试验设计

试验于 2020 年 5 月在山西农业大学作物化学调控实验室进行。采用完全随机设计, 将 9 个谷子品种的种子均匀播种于 13 cm × 15 cm 装有基质的营养钵中, 每个处理(3 盆)定苗 4 株。待幼苗长至 5 叶期时, 选取健康整齐一致的幼苗喷施‘苯磺隆’。分别设置 112.5 (T_1 , 推荐用量的 1/2), 225.0 (T_2 , 推荐用量) 和 450.0 g/hm² (T_3 , 推荐用量的 2 倍) 3 个处理, 兑水至 450.0 kg/hm², 并以等量清水作为对照(CK)。每个处理重复 3 次。待 21 d 后, 选取倒 2 叶进行指标测定。

1.3 指标测定

1.3.1 光合色素含量的测定

采用乙醇浸提法^[23]测定叶绿素 a(Chl a) 含量, 叶绿素 b(Chl b) 含量和类胡萝卜素(Car) 含量。

1.3.2 光合生理指标的测定

于晴天 9:00—11:00, 用美国思爱迪公司生产的 CI-340 光合测定仪测定叶片净光合速率(P_n)、气孔导度(G_s)、蒸腾速率(T_r)和胞间 CO₂ 浓度(C_i), 测定时光照强度为(900 ± 50) μmol/(m² · s), 大气 CO₂ 浓度为(380 ± 5) μmol/mol。

1.3.3 P_{700} 和叶绿素荧光参数的测定

选用便携式光纤型双通道 PAM-100 荧光测量系统 Dual-PAM-100(德国, Walz), 测定谷子幼苗倒二叶的 P_{700} 参数包括光系统 I 的实际光合效率($Y(I)$), PSI 由于供体的限制引起的非光化学能量耗散的量子产量($Y(ND)$), PSI 由于受体的限制引起的非光化学能量耗散的量子产量($Y(NA)$), PSI 的相对电子传递速率(ETR(I))和叶绿素荧光参数包括非调节性能量耗散的量子产量($Y(NO)$), 调节性能量耗散的量子产量($Y(NPQ)$), 非光化学淬灭系数(NPQ), 光化学淬灭系数(qP), PSII 实际光合效率($Y(II)$), 绝对电子传递速率(ETR(II))。

1.3.4 光能分配的计算

按 Demmig 等^[24]的方法计算吸收光能用于光化学反应的份额 P , 天线热耗散的份额 D 和非光化学反应耗散的份额 E_x 。

1.4 数据分析

采用 Excel 2010 软件进行数据统计, 使用 DPS 6.5 软件处理试验结果。运用 LSD 法进行不同处理间的多重比较($\alpha=0.05$)。表中数据为平均值 ± 标准差。

2 结果与分析

2.1 ‘苯磺隆’对不同谷子品种叶片光合色素含量的影响

由表 1 可知, 经‘苯磺隆’处理后, ‘锦谷 5 号’、‘张杂谷 10 号’、‘晋谷 21 号’、‘中谷 9 号’、‘豫谷 18 号’和‘冀谷 35 号’等品种叶片的光合色素含量均有不同程度地降低。‘张杂谷 13 号’、‘黄金谷’和‘龙谷 39 号’与 CK 差异不显著。 T_1 处理, ‘晋谷 21 号’的叶绿素 a(Chl a) 和叶绿素 b(Chl b) 含量分别比 CK 降低 44.60% 和 48.89%, 其余品种与 CK 均无显著差异。 T_2 处理, ‘锦谷 5 号’、‘张杂谷 10 号’、‘晋谷 21 号’、‘中谷 9 号’和‘冀谷 35 号’的 Chl a 含量分别比 CK 降低 36.55%、35.38%、31.65%、32.30% 和 30.30%; ‘锦谷 5 号’、‘晋谷 21 号’和‘中谷 9 号’的 Chl b 含量分别比 CK 降低 46.15%、24.44% 和 52.31%; 在此处理下, 各品种的类胡萝卜素(Car) 含量与 CK 相比均无显著差异。 T_3 处理, ‘锦谷 5 号’、‘张杂谷 10 号’、‘中谷 9 号’、‘豫谷 18 号’和‘冀谷 35 号’的 Chl a、Chl b 和 Car 含量均显著低于 CK。

2.2 ‘苯磺隆’对不同谷子品种叶片 P_{700} 的影响

由表 2 可知, 经不同剂量的‘苯磺隆’处理后, ‘锦谷 5 号’、‘张杂谷 10 号’、‘张杂谷 13 号’、‘中谷 9 号’和‘豫谷 18 号’的 $Y(NA)$ 、 $Y(D)$ 、 $Y(ND)$ 和 ETR(D) 均与 CK 差异不显著。与 CK 相比, T_3 处理下, ‘晋谷 21 号’和‘黄金谷’的 $Y(NA)$ 、 $Y(D)$ 和 ETR(D) 差异显著, 2 个品种的 $Y(NA)$ 分别比 CK 升高 180.00% 和 178.95%, ‘晋谷 21 号’的 $Y(D)$ 和 ETR(D) 分别比 CK 降低 45.95% 和 45.26%, ‘黄金谷’的 $Y(D)$ 和 ETR(D) 分别比 CK 降低 43.59% 和 43.13%, ‘龙谷 39 号’和‘冀谷 35 号’的 $Y(ND)$ 均比 CK 升高 300.00%, $Y(NA)$ 、 $Y(D)$ 和 ETR(D) 与 CK 无显著差异。

表1 ‘苯磺隆’对不同谷子品种叶片光合色素含量的影响

Table 1 Effect of ‘Tribenuron-methyl’ on the photosynthetic pigment content in leaves of different foxtail millet varieties

品种 Varieties	处理 Treatment	叶绿素 <i>a</i> 含量 Chlorophyll <i>a</i> content	叶绿素 <i>b</i> 含量 Chlorophyll <i>b</i> content	类胡萝卜素含量 Carotenoid content
锦谷 5 号 Jingu 5	CK	1.45±0.27 a	0.52±0.14 a	0.25±0.02 a
	<i>T</i> ₁	1.04±0.34 ab	0.36±0.14 ab	0.21±0.04 ab
	<i>T</i> ₂	0.92±0.24 b	0.28±0.07 b	0.21±0.03 ab
	<i>T</i> ₃	0.92±0.23 b	0.29±0.08 b	0.18±0.03 b
张杂谷 10 号 Zhangzagu 10	CK	1.30±0.29 a	0.46±0.14 a	0.22±0.03 a
	<i>T</i> ₁	0.98±0.26 ab	0.29±0.10 ab	0.20±0.04 a
	<i>T</i> ₂	0.84±0.22 b	0.28±0.07 ab	0.20±0.03 a
	<i>T</i> ₃	0.37±0.14 c	0.14±0.07 b	0.10±0.02 b
张杂谷 13 号 Zhangzagu 13	CK	0.72±0.08 a	0.23±0.03 a	0.15±0.01 a
	<i>T</i> ₁	0.84±0.45 a	0.27±0.17 a	0.17±0.06 a
	<i>T</i> ₂	0.94±0.37 a	0.26±0.17 a	0.21±0.04 a
	<i>T</i> ₃	0.78±0.25 a	0.26±0.09 a	0.16±0.05 a
晋谷 21 号 Jingu 21	CK	1.39±0.15 a	0.45±0.06 a	0.23±0.02 a
	<i>T</i> ₁	0.77±0.09 b	0.23±0.03 b	0.17±0.01 a
	<i>T</i> ₂	0.95±0.02 b	0.34±0.06 b	0.18±0.04 a
	<i>T</i> ₃	0.73±0.24 b	0.23±0.07 b	0.17±0.05 a
中谷 9 号 Zhonggu 9	CK	1.61±0.17 a	0.65±0.15 a	0.25±0.02 a
	<i>T</i> ₁	1.67±0.15 a	0.70±0.13 a	0.25±0.01 a
	<i>T</i> ₂	1.09±0.13 b	0.31±0.06 b	0.22±0.01 ab
	<i>T</i> ₃	0.98±0.20 b	0.29±0.07 b	0.21±0.03 b
豫谷 18 号 Yugu 18	CK	1.44±0.22 a	0.47±0.11 a	0.25±0.03 a
	<i>T</i> ₁	1.06±0.48 ab	0.34±0.19 ab	0.20±0.06 ab
	<i>T</i> ₂	1.08±0.55 ab	0.34±0.23 ab	0.20±0.07 ab
	<i>T</i> ₃	0.57±0.12 b	0.16±0.05 b	0.15±0.02 b
黄金谷 Huangjingu	CK	0.69±0.16 a	0.22±0.06 a	0.15±0.02 a
	<i>T</i> ₁	0.71±0.26 a	0.25±0.05 a	0.14±0.06 a
	<i>T</i> ₂	0.71±0.15 a	0.20±0.05 a	0.16±0.02 a
	<i>T</i> ₃	1.09±0.30 a	0.28±0.09 a	0.21±0.06 a
冀谷 35 号 Jigu 35	CK	1.32±0.29 a	0.48±0.17 a	0.25±0.03 ab
	<i>T</i> ₁	1.28±0.19 ab	0.45±0.09 a	0.27±0.02 a
	<i>T</i> ₂	0.92±0.07 b	0.30±0.03 ab	0.20±0.03 b
	<i>T</i> ₃	0.30±0.19 c	0.13±0.08 b	0.05±0.03 c
龙谷 39 号 Longgu 39	CK	1.72±0.10 a	0.68±0.10 a	0.27±0.01 a
	<i>T</i> ₁	1.71±0.02 a	0.68±0.00 a	0.26±0.01 a
	<i>T</i> ₂	1.79±0.03 a	0.75±0.05 a	0.26±0.02 a
	<i>T</i> ₃	1.75±0.02 a	0.75±0.02 a	0.27±0.00 a

注: *T*₁、*T*₂ 和 *T*₃ 分别为‘苯磺隆’的剂量 112.5、225.0 和 450.0 g/hm², CK 为清水对照。不同小写字母表示同一品种不同剂量处理间在 0.05 水平差异显著 ($P < 0.05$)。下同。

Note: *T*₁, *T*₂ and *T*₃ represent the doses of ‘Tribenuron-methyl’ 112.5, 225.0 and 450.0 g/hm², CK is the water control. Different letters indicate significant between treatments of the same variety and different doses ($P < 0.05$). The same below.

表 2 ‘苯磺隆’对不同谷子品种叶片 P_{700} 参数的影响Table 2 Effect of ‘Tribenuron-methyl’ on P_{700} parameters in leaves of different foxtail millet varieties

品种 Varieties	处理 Treatment	Y(NA)	Y(I)	Y(ND)	ETR(I)
锦谷 5 号 Jingu 5	CK	0.58±0.04 a	0.37±0.04 a	0.05±0.01 a	80.37±8.95 a
	T ₁	0.48±0.04 a	0.51±0.05 a	0.02±0.01 a	109.97±11.18 a
	T ₂	0.36±0.36 a	0.63±0.37 a	0.01±0.01 a	137.33±79.71 a
	T ₃	0.43±0.09 a	0.53±0.10 a	0.04±0.05 a	115.17±22.66 a
张杂谷 10 号 Zhangzagu 10	CK	0.54±0.18 a	0.43±0.14 a	0.03±0.04 a	92.77±30.52 a
	T ₁	0.42±0.06 a	0.53±0.05 a	0.05±0.04 a	115.2±10.57 a
	T ₂	0.59±0.07 a	0.39±0.07 a	0.03±0.00 a	84.27±14.61 a
	T ₃	0.36±0.18 a	0.59±0.17 a	0.05±0.03 a	127.53±37.26 a
张杂谷 13 号 Zhangzagu 13	CK	0.07±0.13 a	0.91±0.16 a	0.02±0.03 a	197.47±34.87 a
	T ₁	0.31±0.29 a	0.59±0.37 a	0.10±0.08 a	129.30±80.10 a
	T ₂	0.35±0.06 a	0.59±0.04 a	0.06±0.03 a	128.50±8.00 a
	T ₃	0.21±0.08 a	0.74±0.05 a	0.05±0.04 a	161.00±10.78 a
晋谷 21 号 Jingu 21	CK	0.20±0.12 b	0.74±0.11 a	0.06±0.01 a	160.03±23.43 a
	T ₁	0.31±0.09 b	0.64±0.09 a	0.04±0.02 a	140.00±19.15 a
	T ₂	0.29±0.18 b	0.58±0.19 ab	0.13±0.12 a	125.37±40.30 ab
	T ₃	0.56±0.05 a	0.40±0.04 b	0.04±0.01 a	87.60±8.45 b
中谷 9 号 Zhonggu 9	CK	0.47±0.18 a	0.47±0.20 a	0.06±0.10 a	102.63±42.51 a
	T ₁	0.42±0.38 a	0.56±0.39 a	0.02±0.02 a	122.87±84.52 a
	T ₂	0.46±0.40 a	0.52±0.42 a	0.02±0.03 a	112.80±90.78 a
	T ₃	0.35±0.30 a	0.63±0.32 a	0.02±0.02 a	137.97±70.01 a
豫谷 18 号 Yugu 18	CK	0.39±0.28 a	0.57±0.25 a	0.04±0.03 a	124.33±53.90 a
	T ₁	0.41±0.23 a	0.53±0.18 a	0.06±0.06 a	114.33±39.29 a
	T ₂	0.20±0.18 a	0.67±0.29 a	0.12±0.12 a	146.03±62.27 a
	T ₃	0.34±0.09 a	0.62±0.06 a	0.04±0.03 a	135.40±12.74 a
黄金谷 Huangjingu	CK	0.19±0.13 b	0.78±0.15 a	0.02±0.02 a	170.17±32.71 a
	T ₁	0.39±0.11 ab	0.58±0.11 ab	0.03±0.01 a	126.40±23.98 ab
	T ₂	0.45±0.19 a	0.53±0.20 ab	0.02±0.01 a	116.17±42.87 ab
	T ₃	0.53±0.07 a	0.44±0.07 b	0.03±0.02 a	96.77±14.42 b
冀谷 35 号 Jigu 35	CK	0.39±0.34 a	0.60±0.35 a	0.01±0.01 b	151.70±87.92 a
	T ₁	0.54±0.11 a	0.42±0.09 a	0.03±0.02 ab	106.27±23.66 a
	T ₂	0.54±0.04 a	0.44±0.04 a	0.02±0.01 ab	111.07±10.47 a
	T ₃	0.59±0.11 a	0.37±0.10 a	0.04±0.01 a	93.60±25.06 a
龙谷 39 号 Longgu 39	CK	0.40±0.20 a	0.59±0.19 a	0.01±0.02 b	135.25±29.77 a
	T ₁	0.49±0.04 a	0.48±0.05 a	0.03±0.01 ab	120.83±12.12 a
	T ₂	0.52 ± 0.06 a	0.47±0.06 a	0.01±0.00 ab	116.73±13.99 a
	T ₃	0.38±0.22 a	0.58±0.20 a	0.04±0.02 a	126.00±44.36 a

2.3 ‘苯磺隆’对不同谷子品种叶片叶绿素荧光参数的影响

由表3可知,经不同剂量的‘苯磺隆’处理后,‘张杂谷13号’、‘龙谷39号’和‘中谷9号’各个处理的 $Y(II)$ 、 $Y(NO)$ 和 $Y(NPQ)$ 与CK差异不显著。 T_1 处理,‘锦谷5号’和‘豫谷18号’的 $Y(II)$ 分别比CK低27.27%和28.57%;‘张杂谷10号’的 $Y(NO)$ 比CK低11.54%;其余品种的 $Y(II)$ 、 $Y(NPQ)$ 和 $Y(NO)$ 与CK差异均不显著。 T_2 处理,‘锦谷5号’、‘张杂谷10号’、‘豫谷18号’和‘黄金谷’的 $Y(II)$ 分别比CK降低18.18%、27.78%、28.57%和26.67%;‘张杂谷10号’的 $Y(NO)$ 比CK降低15.38%;‘张杂谷10号’和‘黄金谷’的 $Y(NPQ)$ 比CK升高15.79%和10.00%。 T_3 处理,‘锦谷5号’、‘张杂谷10号’、‘晋谷21号’、‘豫谷18号’、‘黄金谷’和‘冀谷35号’的 $Y(II)$ 分别比CK低22.73%、22.22%、30.77%、42.86%、33.33%和35.71%;‘张杂谷10号’的 $Y(NO)$ 比CK低15.38%,‘晋谷21号’和‘豫谷18号’的 $Y(NO)$ 比CK高60.87%和129.17%;‘锦谷5号’、‘黄金谷’和‘张杂谷10号’的 $Y(NPQ)$ 分别比CK高13.73%、10.00%和12.28%,‘晋谷21号’和‘豫谷18号’的 $Y(NPQ)$ 分别比CK低14.06%和40.32%。

由表4可知,各个处理,‘张杂谷13号’和‘龙谷39号’的 $ETR(II)$ 、 NPQ 和 qP 与CK差异均不显著。 T_1 处理,‘锦谷5号’和‘豫谷18号’的 $ETR(II)$ 分别比CK低28.62%和29.74%; qP 分别比CK低27.91%和25.00%;各个品种的 NPQ 差异均不显著。 T_2 处理,‘锦谷5号’、‘张杂谷10号’、‘豫谷18号’和‘黄金谷’的 $ETR(II)$ 分别比CK低17.39%、29.09%、24.43%和26.57%,‘张杂谷10号’的 NPQ 比CK高34.22%,‘锦谷5号’、‘张杂谷10号’和‘豫谷18号’的 qP 分别比CK低20.93%、25.00%和14.29%。 T_3 处理,‘锦谷5号’、‘张杂谷10号’、‘晋谷21号’、‘豫谷18号’、‘黄金谷’和‘冀谷35号’的 $ETR(II)$ 和 qP 均显著低于CK,‘晋谷21号’和‘豫谷18号’的 NPQ 分别比CK低42.96%和69.81%,‘张杂谷10号’的 NPQ 比CK高26.22%。

2.4 ‘苯磺隆’对不同谷子品种叶片光能分配的影响

由表5可知,不同剂量的‘苯磺隆’处理后,‘张杂谷13号’和‘龙谷39号’与CK相比, P 、 D 和 E_x 差异均不显著。 T_1 处理,‘锦谷5号’和‘豫谷18

号’的 P 分别比CK低27.27%和28.57%,‘张杂谷10号’的 D 比CK高5.88%,‘锦谷5号’的 E_x 比CK高24.14%。 T_2 处理下,‘锦谷5号’、‘张杂谷10号’和‘豫谷18号’的 P 分别比CK低18.18%、27.78%和28.57%;‘晋谷21号’、‘中谷9号’和‘黄金谷’的 D 分别比CK高9.09%、15.38%和10.00%;‘中谷9号’的 E_x 比CK高66.67%。 T_3 处理下,除‘张杂谷13号’、‘中谷9号’和‘龙谷39号’外,其余品种的 P 均显著降低;‘晋谷21号’和‘中谷9号’的 D 分别比CK低18.18%和25.64%,‘黄金谷’的 D 比CK高10.00%;‘晋谷21号’和‘中谷9号’的 E_x 分别比CK高48.39%和113.33%。

2.5 ‘苯磺隆’对不同谷子品种叶片光合生理指标的影响

由表6可知,各个处理的‘张杂谷13号’和‘龙谷39号’的 P_n 、 G_s 、 C_i 和 T_r 与CK相比差异均不显著。 T_1 处理,各个品种的 P_n 、 G_s 和 C_i 差异均不显著。 T_2 处理,‘锦谷5号’、‘晋谷21号’、‘中谷9号’、‘豫谷18号’和‘冀谷35号’的 P_n 分别比CK低50.64%、60.91%、43.74%、49.62%和54.82%,‘晋谷21号’的 C_i 显著高于CK,‘锦谷5号’和‘黄金谷’的 T_r 显著低于CK。 T_3 处理下,除‘张杂谷13号’和‘龙谷39号’外,其余品种的 P_n 均显著低于CK,‘锦谷5号’和‘晋谷21号’的 C_i 分别高于CK 89.48%和42.50%,‘锦谷5号’、‘张杂谷10号’、‘晋谷21号’、‘黄金谷’和‘冀谷35号’的 T_r 分别比CK低46.28%、36.52%、56.18%、46.49%和56.78%。

3 讨论

3.1 ‘苯磺隆’对不同谷子品种叶片光合色素含量和 P_{700} 参数的影响

光合色素的主要作用是吸收光能^[25]并进行光合电子传递光化学反应。刘阳等^[26]研究发现,经除草剂‘骠马’胁迫后,‘张杂谷10号’的叶绿素含量显著降低。本试验发现,经‘苯磺隆’处理后,除‘张杂谷13号’、‘黄金谷’和‘龙谷39号’的叶片光合色素含量与CK无显著差异外,其余谷子品种的Chl *a*、Chl *b*和Car含量均有不同程度地降低,且随着‘苯磺隆’剂量的增大,叶片光合色素含量显著降低。

PSI是植物光合作用的关键组分,有研究发现,低温强光下,敏感植物PSI比PSII对强光更加敏感,更容易发生光抑制现象^[27]。本试验结果显示,

表 3 ‘苯磺隆’对不同谷子品种叶片 Y(II)、Y(NPQ)和 Y(NO)的影响

Table 3 Effects of ‘Tribenuron-methyl’ on the Y(II), Y(NPQ) and Y(NO) in leaves of different foxtail millet varieties

品种 Varieties	处理 Treatment	Y(II)	Y(NO)	Y(NPQ)
锦谷 5 号 Jingu 5	CK	0.22±0.01 a	0.27±0.01 a	0.51±0.01 b
	T ₁	0.16±0.01 b	0.28±0.05 a	0.56±0.05 ab
	T ₂	0.18±0.02 b	0.26±0.06 a	0.55±0.05 ab
	T ₃	0.17±0.01 b	0.25±0.01 a	0.58±0.02 a
张杂谷 10 号 Zhangzagu 10	CK	0.18±0.02 a	0.26±0.03 a	0.57±0.05 b
	T ₁	0.15±0.01 ab	0.23±0.01 b	0.62±0.02 ab
	T ₂	0.13±0.02 b	0.22±0.01 b	0.66±0.03 a
	T ₃	0.14±0.02 b	0.22±0.01 b	0.64±0.03 a
张杂谷 13 号 Zhangzagu 13	CK	0.10±0.04 a	0.31±0.15 a	0.60±0.12 a
	T ₁	0.08±0.03 a	0.42±0.21 a	0.50±0.17 a
	T ₂	0.12±0.01 a	0.25±0.03 a	0.63±0.03 a
	T ₃	0.13±0.00 a	0.26±0.03 a	0.62±0.03 a
晋谷 21 号 Jingu 21	CK	0.13±0.02 a	0.23±0.00 b	0.64±0.02 a
	T ₁	0.13±0.01 a	0.22±0.00 b	0.65±0.01 a
	T ₂	0.14±0.01 a	0.24±0.01 b	0.62±0.01 a
	T ₃	0.09±0.03 b	0.37±0.10 a	0.55±0.07 b
中谷 9 号 Zhonggu 9	CK	0.08±0.03 a	0.34±0.20 a	0.59±0.18 a
	T ₁	0.09±0.02 a	0.43±0.15 a	0.47±0.15 a
	T ₂	0.09±0.01 a	0.34±0.17 a	0.56±0.17 a
	T ₃	0.10±0.02 a	0.29±0.04 a	0.61±0.03 a
豫谷 18 号 Yugu 18	CK	0.14±0.01 a	0.24±0.03 b	0.62±0.04 a
	T ₁	0.10±0.02 b	0.28±0.03 b	0.62±0.05 a
	T ₂	0.10±0.02 b	0.31±0.08 b	0.59±0.06 a
	T ₃	0.08±0.01 b	0.55±0.16 a	0.37±0.16 b
黄金谷 Huangjingu	CK	0.15±0.02 ab	0.24±0.01 a	0.60±0.01 b
	T ₁	0.15±0.03 a	0.24±0.00 a	0.62±0.03 ab
	T ₂	0.11±0.01 bc	0.23±0.03 a	0.66±0.03 a
	T ₃	0.10±0.01 c	0.24±0.00 a	0.66±0.01 a
冀谷 35 号 Jigu 35	CK	0.14±0.02 a	0.3±0.08 ab	0.57±0.10 a
	T ₁	0.15±0.00 a	0.24±0.03 ab	0.61±0.02 a
	T ₂	0.14±0.04 a	0.22±0.01 b	0.63±0.03 a
	T ₃	0.09±0.01 b	0.32±0.05 a	0.59±0.06 a
龙谷 39 号 Longgu 39	CK	0.13±0.01 a	0.25±0.02 a	0.62±0.01 a
	T ₁	0.11±0.02 a	0.24±0.03 a	0.64±0.05 a
	T ₂	0.12±0.07 a	0.35±0.23 a	0.53±0.32 a
	T ₃	0.13±0.00 a	0.27±0.03 a	0.60±0.03 a

表4 ‘苯磺隆’对不同谷子品种叶片 ETR(II)、NPQ 和 qP 的影响
 Table 4 Effects of ‘Tribenuron-methyl’ on ETR(II), NPQ and qP in
 leaves of different foxtail millet varieties

品种 Varieties	处理 Treatment	ETR(II)	NPQ	qP
锦谷 5 号 Jingu 5	CK	47.73±1.36 a	1.86±0.13 a	0.43±0.00 a
	T_1	34.07±2.21 b	2.06±0.54 a	0.31±0.04 b
	T_2	39.43±4.87 b	2.18±0.60 a	0.34±0.05 b
	T_3	36.97±2.44 b	2.27±0.17 a	0.33±0.03 b
张杂谷 10 号 Zhangzagu 10	CK	38.50±5.30 a	2.25±0.44 b	0.36±0.04 a
	T_1	32.67±2.54 ab	2.78±0.21 ab	0.33±0.04 ab
	T_2	27.30±3.60 b	3.02±0.23 a	0.27±0.03 b
	T_3	30.50±4.96 b	2.84±0.28 a	0.29±0.04 b
张杂谷 13 号 Zhangzagu 13	CK	20.87±7.60 a	2.32±1.19 a	0.20±0.09 a
	T_1	18.43±7.54 a	1.51±0.91 a	0.16±0.08 a
	T_2	25.03±2.41 a	2.56±0.44 a	0.23±0.02 a
	T_3	27.90±0.87 a	2.44±0.39 a	0.26±0.01 a
晋谷 21 号 Jingu 21	CK	29.30±5.23 a	2.77±0.12 a	0.30±0.05 a
	T_1	28.47±2.32 a	2.92±0.08 a	0.27±0.02 a
	T_2	30.93±1.45 a	2.64±0.13 a	0.28±0.06 a
	T_3	19.00±7.30 b	1.58±0.55 b	0.16±0.02 b
中谷 9 号 Zhonggu 9	CK	16.37±5.70 a	2.29±1.41 a	0.33±0.04 a
	T_1	20.33±4.54 a	1.30±0.93 a	0.31±0.07 ab
	T_2	20.20±1.54 a	2.12±1.46 a	0.27±0.01 ab
	T_3	22.40±3.64 a	2.14±0.39 a	0.24±0.02 b
豫谷 18 号 Yugu 18	CK	30.13±2.90 a	2.65±0.54 a	0.28±0.01 a
	T_1	21.17±4.71 b	2.28±0.47 a	0.21±0.03 bc
	T_2	22.77±5.22 b	2.06±0.76 a	0.24±0.03 b
	T_3	18.23±1.19 b	0.80±0.62 b	0.19±0.02 c
黄金谷 Huangjingu	CK	33.37±3.45 a	2.49±0.10 a	0.30±0.03 a
	T_1	31.70±7.44 ab	2.63±0.14 a	0.30±0.06 a
	T_2	24.50±1.97 bc	2.89±0.43 a	0.25±0.02 ab
	T_3	21.63±1.72 c	2.77±0.07 a	0.22±0.02 b
冀谷 35 号 Jigu 35	CK	34.63±5.95 a	2.13±1.12 a	0.32±0.04 a
	T_1	37.03±0.90 a	2.56±0.36 a	0.32±0.01 a
	T_2	36.20±9.54 a	2.82±0.08 a	0.32±0.07 a
	T_3	22.23±3.19 b	1.90±0.52 a	0.21±0.05 b
龙谷 39 号 Longgu 39	CK	33.73±2.31 a	2.52±0.27 ab	0.33±0.04 a
	T_1	28.03±6.15 a	2.67±0.48 a	0.25±0.06 a
	T_2	18.70±16.99 a	1.17±1.30 b	0.19±0.17 a
	T_3	28.40±0.26 a	2.29±0.36 ab	0.27±0.03 a

表 5 ‘苯磺隆’对不同谷子品种叶片吸收光能分配的影响

Table 5 Effects of ‘Tribenuron-methyl’ on the distribution of absorbed light energy in leaves of different foxtail millet varieties

品种 Varieties	处理 Treatment	<i>P</i>	<i>D</i>	E_x
锦谷 5 号 Jingu 5	CK	0.22±0.01 a	0.49±0.01 a	0.29±0.01 b
	T_1	0.16±0.01 b	0.48±0.04 a	0.36±0.05 a
	T_2	0.18±0.02 b	0.47±0.03 a	0.35±0.04 ab
	T_3	0.17±0.01 b	0.49±0.02 a	0.34±0.03 ab
张杂谷 10 号 Zhangzagu 10	CK	0.18±0.02 a	0.51±0.01 b	0.32±0.02 ab
	T_1	0.15±0.01 ab	0.54±0.02 a	0.31±0.03 b
	T_2	0.13±0.02 b	0.53±0.02 ab	0.34±0.00 ab
	T_3	0.14±0.02 b	0.51±0.02 ab	0.35±0.01 a
张杂谷 13 号 Zhangzagu 13	CK	0.10±0.03 a	0.51±0.07 a	0.39±0.11 a
	T_1	0.08±0.03 a	0.46±0.06 a	0.45±0.10 a
	T_2	0.12±0.01 a	0.50±0.01 a	0.38±0.02 a
	T_3	0.13±0.00 a	0.51±0.01 a	0.36±0.01 a
晋谷 21 号 Jingu 21	CK	0.13±0.02 a	0.55±0.04 a	0.31±0.03 b
	T_1	0.13±0.01 a	0.52±0.01 ab	0.35±0.01 b
	T_2	0.14±0.01 a	0.50±0.01 b	0.36±0.02 b
	T_3	0.09±0.03 b	0.45±0.01 c	0.46±0.04 a
中谷 9 号 Zhonggu 9	CK	0.08±0.03 a	0.78±0.06 a	0.15±0.03 c
	T_1	0.09±0.02 a	0.70±0.08 ab	0.21±0.07 bc
	T_2	0.09±0.01 a	0.66±0.02 bc	0.25±0.01 ab
	T_3	0.10±0.02 a	0.58±0.05 c	0.32±0.03 a
豫谷 18 号 Yugu 18	CK	0.14±0.01 a	0.51±0.05 a	0.35±0.04 a
	T_1	0.10±0.02 b	0.53±0.05 a	0.37±0.02 a
	T_2	0.10±0.02 b	0.56±0.04 a	0.33±0.02 a
	T_3	0.08±0.01 b	0.56±0.04 a	0.35±0.04 a
黄金谷 Huangjingu	CK	0.15±0.02 ab	0.50±0.01 b	0.35±0.02 a
	T_1	0.15±0.03 a	0.51±0.02 b	0.35±0.02 a
	T_2	0.11±0.01 bc	0.55±0.01 a	0.33±0.01 a
	T_3	0.10±0.01 c	0.55±0.02 a	0.35±0.02 a
冀谷 35 号 Jigu 35	CK	0.14±0.02 a	0.57±0.08 a	0.29±0.06 a
	T_1	0.15±0.00 a	0.54±0.01 a	0.31±0.01 a
	T_2	0.14±0.04 a	0.55±0.03 a	0.31±0.02 a
	T_3	0.09±0.01 b	0.57±0.05 a	0.35±0.06 a
龙谷 39 号 Longgu 39	CK	0.13±0.01 a	0.59±0.07 a	0.28±0.06 a
	T_1	0.11±0.02 a	0.55±0.03 a	0.34±0.04 a
	T_2	0.12±0.02 a	0.58±0.01 a	0.30±0.01 a
	T_3	0.13±0.00 a	0.51±0.04 a	0.36±0.04 a

表6 ‘苯磺隆’对不同谷子品种叶片光合生理指标的影响

Table 6 Effects of ‘Tribenuron-methyl’ on photosynthetic physiological indexes in leaves of different foxtail millet varieties

品种 Varieties	处理 Treatment	$P_n/$ ($\mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s}))$	$C_i/$ ($\mu\text{mol}/\text{mol}$)	$G_s/$ ($\text{mmol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s}))$	$T_r/$ ($\text{mmol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s}))$
锦谷 5 号 Jingu 5	CK	15.60±5.60 a	160.37±23.91 b	66.73±26.09 a	3.63±0.90 a
	T_1	9.89±1.17 ab	216.03±91.89 ab	50.26±11.92 ab	2.93±0.42 ab
	T_2	7.70±0.22 b	222.57±62.96 ab	39.55±7.97 ab	2.42±0.33 b
	T_3	4.74±2.47 b	303.87±64.39 a	30.31±9.20 b	1.95±0.49 b
张杂谷 10 号 Zhangzagu 10	CK	31.66±6.39 a	236.67±19.91 a	169.57±27.20 a	6.49±0.72 a
	T_1	21.09±11.83 ab	240.80±15.47 a	116.85±75.27 a	4.57±1.34 b
	T_2	19.34±2.18 ab	261.30±84.58 a	115.30±23.84 a	4.89±0.68 ab
	T_3	17.27±5.37 b	253.83±56.53 a	93.63±18.29 a	4.12±0.64 b
张杂谷 13 号 Zhangzagu 13	CK	17.13±5.97 a	318.17±57.10 a	102.63±23.41 a	6.45±0.87 a
	T_1	17.59±6.29 a	324.37±65.68 a	120.72±78.32 a	6.67±2.39 a
	T_2	16.97±8.66 a	232.63±48.63 a	91.32±52.51 a	4.29±1.52 a
	T_3	18.27±6.59 a	224.73±101.89 a	94.50±53.48 a	5.58±2.72 a
晋谷 21 号 Jingu 21	CK	20.72±7.39 a	260.70±35.85 c	118.30±52.40 a	2.73±0.58 a
	T_1	14.81±0.66 ab	258.67±43.56 c	81.66±12.52 ab	2.00±0.48 ab
	T_2	8.10±1.24 bc	355.30±31.87 b	67.76±13.97 ab	1.95±0.30 ab
	T_3	4.05±2.54 c	453.43±42.72 a	60.58±13.53 b	1.78±0.23 b
中谷 9 号 Zhonggu 9	CK	12.07±1.43 a	268.70±31.05 a	67.81±4.70 a	2.82±0.76 a
	T_1	9.81±0.50 ab	332.30±47.73 a	70.32±16.26 a	2.58±0.51 a
	T_2	6.79±1.83 b	354.20±26.64 a	51.71±8.79 a	2.05±0.22 a
	T_3	7.71±2.86 b	319.67±68.71 a	53.43±8.87 a	2.55±0.93 a
豫谷 18 号 Yugu18	CK	18.46±3.55 a	228.23±76.65 a	93.80±26.42 a	3.38±0.99 a
	T_1	15.80±5.27 a	172.17±7.57 a	65.39±22.00 ab	2.80±0.81 a
	T_2	9.30±1.03 b	260.20±108.35 a	61.57±37.54 ab	2.48±0.76 a
	T_3	7.86±0.80 b	211.03±43.08 a	38.46±6.94 b	2.42±0.34 a
黄金谷 Huangjingu	CK	29.95±9.09 a	252.93±33.77 a	170.75±55.04 a	5.42±0.93 a
	T_1	24.66±4.76 ab	229.63±7.61 a	126.41±23.94 ab	4.38±0.39 ab
	T_2	18.19±12.17 ab	294.90±81.52 a	108.16±57.59 ab	3.45±1.35 b
	T_3	12.92±4.39 b	266.70±17.26 a	74.47±30.26 b	2.90±0.72 b
冀谷 35 号 Jigu 35	CK	26.16±8.05 a	238.03±61.71 a	154.26±83.47 a	5.83±1.56 a
	T_1	16.86±6.53 ab	203.57±74.61 a	78.43±15.86 ab	3.98±0.58 b
	T_2	11.82±2.64 b	243.53±23.15 a	79.99±2.23 ab	3.57±0.36 b
	T_3	11.65±2.61 b	174.83±8.28 a	49.54±13.04 b	2.52±0.88 b
龙谷 39 号 Longgu 39	CK	32.22±2.28 a	254.63±12.66 ab	185.04±24.06 a	6.67±0.37 a
	T_1	25.67±8.20 a	297.80±39.44 a	176.30±63.39 a	6.29±1.14 a
	T_2	28.16±6.83 a	223.40±34.02 b	148.37±53.76 a	5.45±0.82 a
	T_3	31.15±3.61 a	214.90±21.61 b	159.29±30.65 a	6.28±0.61 a

‘龙谷 39 号’的光合色素含量与 CK 无显著差异,而 $Y(ND)$ 升高,说明叶片光保护能力的提高, $Y(I)$ 、 $ETR(I)$ 和 $Y(NA)$ 均与 CK 差异不显著,同时 $Y(II)$ 、 $ETR(II)$ 和 qP 也并未降低,说明 PSI 和 PSII 并未受到损伤, P_n 未降低。而‘黄金谷’和‘晋谷 21 号’的 PSI 受损,表现为 $Y(I)$ 和 $ETR(I)$ 下降, $Y(NA)$ 升高,同时 PSII 的实际光合效率也降低($Y(II)$),导致 P_n 降低。与采用除草剂‘阔世玛’处理板蓝根后,叶片 $ETR(I)$ 、 $Y(I)$ 和 $Y(ND)$ 下降, $Y(NA)$ 升高的结果类似^[28]。

3.2 ‘苯磺隆’对不同谷子品种叶片叶绿素荧光参数的影响

当植物受到胁迫后,捕光色素吸收的光能以荧光、磷光和热的形式散发,以热的形式散发多余的能量对作物是一种调节性的保护作用,而以荧光的形式散发,对作物会造成一种光损伤,导致植物光合作用的降低^[29]。PSII 光化学活性的降低被认为是限制 P_n 提高的非气孔因素之一^[30]。郭美俊等^[31] 研究指出,经除草剂‘二甲四氯’胁迫后,‘晋谷 21 号’的 P_n 和 ETR 降低,而 NPQ 升高。本试验中,‘锦谷 5 号’和‘张杂谷 10 号’的光合色素含量降低, $Y(NPQ)$ 升高, $Y(NO)$ 下降,说明可通过热的形式散发多余的能量以保护 PSII 不受伤害,但 $ETR(II)$ 下降,说明电子传递受阻, P_n 降低。‘晋谷 21 号’和‘豫谷 18 号’的 $Y(NPQ)$ 降低和 $Y(NO)$ 升高,说明其光合体系已经受到了损伤,导致光合作用降低。

3.3 ‘苯磺隆’对不同谷子品种光能分配的影响

当植株无法利用过剩的光能时,会通过降低 P 的份额并增加 D 的份额来消耗过剩的光能^[32-15]。当 PSII 反应中心关闭或失活使激发能不能用于光化学反应时,只能增加反应中心耗散份额(E_x),这将诱发 PSII 产生过量的有害物质,对结构蛋白和反应中心色素造成损伤^[33-34]。有研究发现,当植物受到水分胁迫后, P 会降低, D 升高^[35]。本试验结果显示,经‘苯磺隆’胁迫后‘张杂谷 13 号’和‘龙谷 39 号’的 P 未发生显著变化,说明用于光化学反应的份额并未降低,也就是说光合作用未受到抑制。‘锦谷 5 号’、‘张杂谷 10 号’、‘晋谷 21 号’、‘黄金谷’的 P 均降低,其中‘张杂谷 10 号’、‘黄金谷’的 D 升高,说明这 2 个品种此时通过热耗散的形式消耗多余的激发能以保护 PSII 不受伤害。‘晋谷 21 号’的 D 降低、 E_x 升高,说明 PSII 已不能通过热耗散的形式散发过剩光能,导致植物通过荧光的形式耗散过

剩光能,可能对植物产生损伤。

3.4 ‘苯磺隆’对不同谷子品种叶片光合生理指标的影响

气体交换参数可反映植物光合作用的能力。而气孔因素和非气孔因素是影响植物光合作用的 2 个因素^[36]。判断 P_n 下降的原因是否为气孔因素,不但需要关注气孔导度的大小,而且需要分析胞间 CO_2 浓度的变化。若 P_n 、 G_s 和 C_i 均下降,则是由于气孔因素限制导致; P_n 、 G_s 降低,而 C_i 升高,则表明是非气孔因素限制导致^[37]。在本试验中,2 倍推荐剂量‘苯磺隆’处理后,‘锦谷 5 号’和‘晋谷 21 号’的 P_n 、 G_s 和 T_r 均显著降低, C_i 显著升高,说明引起 P_n 降低的主要因素为非气孔限制因素,此结果与高贞攀等^[19] 研究基本一致;而其余品种均呈现为 G_s 和 T_r 显著降低, C_i 无显著差异,说明引起 P_n 下降的主要原因可能是气孔因素和非气孔因素共同作用的结果^[38],与高贞攀等^[19] 研究发现‘苯磺隆’对‘张杂谷 10 号’ P_n 下降的主要原因是非气孔限制因素的结果稍有不同,可能与试验环境不同有关。但‘苯磺隆’对谷子的靶酶活性和代谢方面的影响还有待于进一步研究。

4 结 论

225.0 g/hm²(推荐用量)‘苯磺隆’处理后,‘张杂谷 10 号’、‘张杂谷 13 号’、‘黄金谷’和‘龙谷 39 号’的叶片 P_n 与 CK 相比差异不显著;‘锦谷 5 号’、‘晋谷 21 号’、‘中谷 9 号’、‘豫谷 18 号’和‘冀谷 35 号’的 P_n 分别降低 50.64%、60.91%、43.74%、49.62% 和 54.82%,量子产量($Y(NO)$)与 CK 相比差异不显著。450.0 g/hm²(2 倍推荐用量)的‘苯磺隆’处理后,‘张杂谷 13 号’和‘龙谷 39 号’的光合系统并未受到损伤,与 CK 相比, P_n 无显著差异;‘晋谷 21 号’和‘豫谷 18 号’光合系统受害均较严重,其中,‘晋谷 21 号’的 PSI 和 PSII 均受到严重破坏,表现为与 CK 相比 $Y(NA)$ 显著升高 180.00%, $Y(I)$ 和 $ETR(I)$ 分别下降 45.95% 和 45.26%; $Y(NPQ)$ 下降 14.06%、 $Y(NO)$ 升高 60.87%,‘豫谷 18 号’主要是由于 PSII 损伤严重,表现为与 CK 相比 $Y(NPQ)$ 下降 40.32%、 $Y(NO)$ 升高 129.17%,而其余品种的光合系统损伤较轻,但还是引发叶片的光合色素含量降低,PSI、PSII 的活性降低,导致电子传递受阻,实际光合效率降低,植物吸收的能量

用于光化学反应的份额减少,最终导致 P_n 降低。

参考文献 References

- [1] 刁现民. 中国谷子产业与产业技术体系[M]. 北京: 中国农业科学与技术出版社, 2011
Diao X M. *China Millet Industry and Industrial Technology System*[M]. Beijing: China Agricultural Science and Technology Press, 2011 (in Chinese)
- [2] 李志华, 景小兰, 李会霞, 田岗, 刘鑫, 穆婷婷. 谷子苗期除草剂的安全性及杂草防效研究[J]. 作物杂志, 2017(1): 150-154
Li Z H, Jing X L, Li H X, Tian G, Liu X, Mu T T. Safety and weed control efficiency of foxtail millet seedling stage herbicides[J]. *Crops*, 2017(1): 150-154 (in Chinese)
- [3] 师志刚, 孙立永. 谷子新品种: 冀谷 45、冀谷 43[N]. 河北科技报, 2019-11-26 (B04)
Shi Z G, Sun L Y. New foxtail millet varieties: Jigu 45 and Jigu 43[N]. *Hebei Science and Technology News*, 2019-11-26 (B04) (in Chinese)
- [4] 宋国亮, 赵治海. 优质谷子新杂交种张杂谷 16 号[J]. 种子, 2018, 37(5): 116-117
Song G L, Zhao Z H. The new high quality hybrid foxtail millet Zhangzagu No. 16 [J]. *Seed*, 2018, 37(5): 116-117 (in Chinese)
- [5] 张婷, 王根平, 师志刚, 程汝宏. 兼抗阿特拉津与拿捕净谷子新品种冀谷 34 的选育研究[J]. 中国农业信息, 2017(21): 51-52
Zhang T, Wang G P, Shi Z G, Cheng R H. Breeding of a new foxtail millet variety Jigu 34 that is resistant to atrazine and Natujing[J]. *China Agricultural Information*, 2017(21): 51-52 (in Chinese)
- [6] 陈海伟, 张鲁华, 陈德富, 陈喜文. 除草剂及抗除草剂作物的应用现状与展望[J]. 生物技术通报, 2012(10): 35-40
Chen H W, Zhang L H, Chen D F, Chen X W. Current utilization status and future prospect of herbicide and herbicide-resistant crops [J]. *Biotechnology Bulletin*, 2012(10): 35-40 (in Chinese)
- [7] 刘伟, 王金信, 杨广玲, 毕建杰, 隋标峰. 不同小麦品种对苯磺隆耐性差异及其机理[J]. 植物保护学报, 2005, 32(3): 300-304
Liu W, Wang J X, Yang G L, Bi J J, Sui B F. Difference of tolerance and mechanism of various wheat varieties to tribenuron-methyl[J]. *Journal of Plant Protection*, 2005, 32(3): 300-304 (in Chinese)
- [8] 刘才, 王作平, 杨梦婷, 张中保, 邹华文, 吴忠义. 玉米骨干自交系对除草剂苯磺隆和甲咪唑烟酸的敏感性差异[J]. 河南农业科学, 2019, 48(3): 77-82
Liu C, Wang Z P, Yang M T, Zhang Z B, Zou H W, Wu Z Y. The sensitivity differences of maize backbone inbred lines to the herbicides, tribenuron-methyl and imazapic[J]. *Journal of Henan Agricultural Sciences*, 2019, 48(3): 77-82 (in Chinese)
- [9] 张红. 苯磺隆对后茬水稻敏感性的影响研究[J]. 安徽农业科学, 2009, 37(3): 966-968
Zhang H. Study on the sensitivity of tribenuron-methyl to the subsequently planted rice[J]. *Journal of Anhui Agricultural Sciences*, 2009, 37(3): 966-968 (in Chinese)
- [10] 宁娜. 晒、除草剂及不同生态因子对谷子品质的影响[D]. 太谷: 山西农业大学, 2016
Ning N. Effects of Se, herbicide and ecological factors on grain quality of foxtail millet [D]. Taigu: Shanxi Agricultural University, 2016 (in Chinese)
- [11] 郭翔, 张帆, 金宗来, 邓香芹, 吴灵通, Warusawitharana Hasitha, 周伟军. 大麦对新除草剂丙酯草醚敏感反应的生理作用和细胞学特性[J]. 中国农业科学, 2011, 44(18): 3750-3758
Guo X, Zhang F, Jin Z L, Deng X Q, Wu L T, Warusawitharana H, Zhou W J. Physiological effect and cytological characterization regarding susceptible response of new herbicide ZJ0273 in barley [J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2011, 44(18): 3750-3758 (in Chinese)
- [12] Hajri H, Mhadhebi R, Ghorbel A, Armstrong J, Ben Salem-Fnayou A. Physiological and leaf ultrastructural characteristics of perennial ryegrass (*Lolium perenne* L) biotypes from Tunisia under sulfonylurea herbicide application[J]. *Scientia Horticulturae*, 2016, 207(5): 28-32
- [13] 左冰云, 解君, 韩清芳, 崔雯雯, 刘铁宁, 王兴义, 丁瑞霞. 赤霉素 GA_{1+7} 种子引发处理对玉米光合作用及产量的影响[J]. 农药学报, 2017, 19(3): 331-340
Zuo B Y, Xie J, Han Q F, Cui W W, Liu T N, Wang X Y, Ding R X. Effect of gibberellin (GA_{1+7}) priming treatment on photosynthesis and yield of maize [J]. *Chinese Journal of Pesticide Science*, 2017, 19(3): 331-340 (in Chinese)
- [14] Krause G H, Weis E. Chlorophyll fluorescence and photosynthesis: The basics [J]. *Annual Review of Plant Physiology and Plant Molecular Biology*, 1991, 42(1): 313-349
- [15] Cui Z H, Wang Y P, Zhang A, Zhang L J. Regulation of reversible dissociation of LHClI from PSII by phosphorylation in plants[J]. *American Journal of Plant Sciences*, 2014, 5(2): 241-249

- [16] 孙德智, 韩晓日, 彭靖, 范富, 杨恒山, 马玉露, 宋桂云. 外源水杨酸和一氧化氮对盐胁迫番茄幼苗光系统 II 功能及激发能分配利用的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2018, 24(1): 170-178
Sun D Z, Han X R, Peng J, Fan F, Yang H S, Ma Y L, Song G Y. Effects of exogenous salicylic acid and nitric oxide on PSII function and distribution and utilization of excitation energy in tomato seedlings under NaCl stress[J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizers*, 2018, 24(1): 170-178 (in Chinese)
- [17] Hassannejad S, Porheidar Ghafarbi S, Lotfi R. The effect of nicosulfuron and bentazon on photosynthetic performance of common cocklebur (*Xanthium strumarium* L.) [J]. *Environmental and Sustainability Indicators*, 2020, 6(6)
- [18] Zhao L J, Xie J F, Zhang H, Wang Z T, Jiang H J, Gao S L. Enzymatic activity and chlorophyll fluorescence imaging of maize seedlings (*Zea mays* L) after exposure to low doses of chlorsulfuron and cadmium [J]. *Journal of Integrative Agriculture*, 2018, 17(4): 826-836
- [19] Liu Y F, Qi M F, Li T L. Photosynthesis, photoinhibition, and antioxidant system in tomato leaves stressed by low night temperature and their subsequent recovery[J]. *Plant Science*, 2012, 196: 8-17
- [20] 肖飞, 杨延龙, 王娅婷, 马慧, 张旺锋. 棉花花铃期低温对叶片 PSI 和 PSII 光抑制的影响[J]. 作物学报, 2017, 43(9): 1401-1409
Xiao F, Yang Y L, Wang Y T, Ma H, Zhang W F. Effects of low temperature on PSI and PSII photoinhibition in cotton leaf at boll stage[J]. *Acta Agronomica Sinica*, 2017, 43(9): 1401-1409 (in Chinese)
- [21] Zhang T J, Feng L, Tian X S, Yang C H, Gao J D. Use of chlorophyll fluorescence and P700 absorbance to rapidly detect glyphosate resistance in goosegrass (*Eleusine indica*) [J]. *Journal of Integrative Agriculture*, 2015, 14(4): 714-723
- [22] 高贞攀, 郭平毅, 原向阳, 董淑琦, 刘阳, 高虹, 宁娜, 郭美俊, 解丽丽, 冯雷, 王斌强, 余凯凯. 苯磺隆和单嘧磺隆对张杂谷 10 号光合特性及产量构成的影响[J]. 中国农业大学学报, 2015, 20(6): 36-45
Gao Z P, Guo P Y, Yuan X Y, Dong S Q, Liu Y, Gao H, Ning N, Guo M J, Xie L L, Feng L, Wang B Q, Yu K K. Effects of Tribenuron-methyl and Monosulfuron application on photosynthetic characteristics and yield of Zhangza Gu 10[J]. *Journal of China Agricultural University*, 2015, 20(6): 36-45 (in Chinese)
- [23] 张宪政. 植物叶绿素含量测定方法比较研究[J]. 沈阳农学院学报, 1985(4): 81-84
Zhang X Z. A comparative study on determination methods of plant chlorophyll content[J]. *Journal of Shenyang Agricultural University*, 1985(4): 81-84 (in Chinese)
- [24] Demmig-Adams B, Adams W W, Barker D H, Logan B A, Bowling D R, Verhoeven A S. Using chlorophyll fluorescence to assess the fraction of absorbed light allocated to thermal dissipation of excess excitation[J]. *Physiologia Plantarum*, 1996, 98(2): 253-264
- [25] 孔维萍, 程鸿, 岳宏忠. 镉胁迫对甜瓜幼苗叶片叶绿体超微结构及光合色素质量分数的影响[J]. 西北农业学报, 2020, 29(6): 935-941
Kong W P, Cheng H, Yue H Z. Effects of cadmium stress on leaf chloroplast ultrastructure and chlorophyll mass fraction of three melon varieties [J]. *Acta Agriculturae Boreali-Occidentalis Sinica*, 2020, 29(6): 935-941 (in Chinese)
- [26] 刘阳, 郭平毅, 原向阳, 高贞攀, 王斌强, 宋惠洁, 黄蕾, 余凯凯. 叶面喷施骠马对张杂谷 10 号光合特性及产量构成的影响[J]. 山西农业大学学报: 自然科学版, 2015, 35(6): 608-613, 618
Liu Y, Guo P Y, Yuan X Y, Gao Z P, Wang B Q, Song H J, Huang L, Yu K K. Effects of foliar application of fenoxaprop-ethyl on photosynthetic characteristics and yield of ‘Zhangza 10’[J]. *Journal of Shanxi Agricultural University: Nature Science Edition*, 2015, 35(6): 608-613, 618 (in Chinese)
- [27] Sonoike K. Degradation of psaB gene product, the reaction center subunit of photosystem I, is caused during photoinhibition of photosystem I: possible involvement of active oxygen species[J]. *Plant Science*, 1996, 115(2): 157-164
- [28] Yuan X Y, Guo P Y, Qi X, Ning N, Wang H, Wang X, Yang Y J. Safety of herbicide Sigma Broad on Radix Isatidis (*Isatis indigotica* Fort) seedlings and their photosynthetic physiological responses [J]. *Pesticide Biochemistry and Physiology*, 2013, 106(1-2): 45-50
- [29] 杨志晓, 丁燕芳, 张小全, 薛刚, 王轶, 任学良, 任周营, 杨铁钊. 赤星病胁迫对不同抗性烟草品种光合作用和叶绿素荧光特性的影响[J]. 生态学报, 2015, 35(12): 4146-4154
Yang Z X, Ding Y F, Zhang X Q, Xue G, Wang Y, Ren X L, Ren Z Y, Yang T Z. Impacts of alternaria alternata stress on characteristics of photosynthesis and chlorophyll fluorescence in two tobacco cultivars with different resistances[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2015, 35(12): 4146-4154 (in Chinese)
- [30] Aroca R, Irigoyen J J, Sánchez-Díaz M. Drought enhances maize chilling tolerance II. photosynthetic traits and protective mechanisms against oxidative stress [J]. *Physiologia Plantarum*, 2003, 117(4): 540-549

- [31] 郭美俊, 白亚青, 高鹏, 申洁, 董淑琦, 原向阳, 郭平毅. 二甲四氯胁迫对谷子幼苗叶片衰老特性和内源激素含量的影响[J]. 中国农业科学, 2020, 53(3): 513-526
Guo M J, Bai Y Q, Gao P, Shen J, Dong S Q, Yuan X Y, Guo P Y. Effect of MCPA on leaf senescence and endogenous hormones content in leaves of foxtail millet seedlings [J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2020, 53 (3): 513-526 (in Chinese)
- [32] Rochaix J D. Regulation and dynamics of the light-harvesting system[J]. *Annual Review of Plant Biology*, 2014, 65: 287-309
- [33] Aranjuelo I, Molero G, Erice G, Avicé J C, Nogués S. Plant physiology and proteomics reveals the leaf response to drought in alfalfa (*Medicago sativa* L)[J]. *Journal of Experimental Botany*, 2011, 62(1): 111-123
- [34] Wilhelm C, Selmar D. Energy dissipation is an essential mechanism to sustain the viability of plants: the physiological limits of improved photosynthesis [J]. *Journal of Plant Physiology*, 2011, 168(2): 79-87
- [35] 高方胜, 王磊, 徐坤. 土壤相对含水量对不同茬口番茄叶片PSII光化学活性和光能分配影响[J]. 核农学报, 2017, 31(5): 1005-1013
Gao F S, Wang L, Xu K. Effect of soil relative water content on PSII photochemical activity and absorbed light allocation of tomato leaves in different cultivation seasons[J]. *Journal of Nuclear Agricultural Sciences*, 2017, 31(5): 1005-1013 (in Chinese)
- [36] Winter K, Schramm M J. Analysis of stomatal and nonstomatal components in the environmental control of CO₂ exchange in leaves of *welwitschia mirabilis* [J]. *Plant Physiology*, 1986, 82(1): 173-178
- [37] 季杨, 张新全, 彭燕, 梁小玉, 黄琳凯, 陈灵鸷, 李州, 马迎梅. 干旱胁迫对鸭茅幼苗根系生长及光合特性的影响[J]. 应用生态学报, 2013, 24(10): 2763-2769
Ji Y, Zhang X Q, Peng Y, Liang X Y, Huang L K, Chen L Z, Li Z, Ma Y M. Effects of drought stress on the root growth and photosynthetic characters of *Dactylis glomerata* seedlings[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2013, 24(10): 2763-2769 (in Chinese)
- [38] 李素, 万林, 李心昊, 马霓, 李俊, 张春雷. 3种类型油菜对干旱胁迫的生理响应[J]. 中国油料作物学报, 2020, 42(4): 563-572
Li S, Wan L, Li X H, Ma N, Li J, Zhang C L. Physiological response of 3 *Brassica* species to drought stress[J]. *Chinese Journal of Oil Crop Sciences*, 2020, 42(4): 563-572 (in Chinese)

责任编辑: 吕晓梅