

除草剂对小麦光合特性及叶绿素荧光参数的影响

王正贵, 周立云, 郭文善, 朱新开, 李春燕, 彭永欣, 封超年*

(扬州大学 江苏省作物遗传生理重点实验室 农业部长江中下游作物生理生态与栽培重点开放实验室, 江苏 扬州 225009)

摘要:为了探讨除草剂对小麦叶片气体交换及叶绿素荧光参数的影响,在大田条件下以弱筋小麦扬麦 13、强筋小麦烟农 19 两种冬小麦为材料,研究了苯磺隆、使它隆、异丙隆、骠马、绿麦隆 5 种除草剂对其光合特性的影响。结果表明,供试 5 种除草剂处理后,小麦叶片内光合色素含量显著降低,净光合速率(P_n)、蒸腾速率(T_r)及气孔导度(G_s)也均不同程度降低,说明除草剂显著影响了小麦的光合特性,且表现出一定的剂量-效应关系。叶绿素荧光分析表明,除草剂显著降低了原初光能转换效率(F_v/F_m)、PS II 的实际光化学效率(Φ)及光化学荧光淬灭系数(qP),非光化学淬灭(qN)则呈一定的上升趋势。表明在除草剂胁迫下小麦叶片发生了光抑制,PS II 复合体受到损伤伴随着光合电子传递受阻。小麦叶片自身具有一定的光合保护机制,用以减轻或消除除草剂胁迫。

关键词:除草剂;气体交换参数;叶绿素荧光参数;小麦

中图分类号:X503.231 **文献标志码:**A **文章编号:**1672-2043(2011)06-1037-07

Effects of Herbicides on Photosynthesis and Chlorophyll Fluorescence Parameters in Wheat Leaves

WANG Zheng-gui, ZHOU Li-yun, GUO Wen-shan, ZHU Xin-kai, LI Chun-yan, PENG Yong-xin, FENG Chao-nian*

(Key Laboratory of Crop Genetics and Physiology of Jiangsu Province, Key Laboratory of Crop Physiology, Ecology and Cultivation in Middle and Lower Reaches of Yangtse River of Ministry of Agriculture, Yangzhou University, Yangzhou 225009, China)

Abstract: Effects of five kinds of herbicides (i.e. tribenuron-methyl, fluroxypyr, isoproturon, puma super, chlorotoluron) on photosynthetic characteristics and chlorophyll fluorescence parameters in 2 winter wheat cultivars (weak-gluten wheat Yangmai 13, strong gluten wheat Yan-nong 19) were studied under field conditions. The results showed that all of tested herbicides caused the decline of photosynthetic pigment content in leaves of 2 wheat varieties. Photosynthetic rate (P_n), transpiration rate (T_r) and stomatal conductance (G_s) were also declined at different degrees, but chlorophyll a/b value, intercellular CO_2 concentration (C_i) increased gradually. All of these indexes showed a dose-response relationship to herbicide. Chlorophyll fluorescence analysis showed that herbicide could significantly reduce the primary light energy conversion efficiency (F_v/F_m), PS II potential activity (F_v/F_o), PS II actual photochemical efficiency (Φ) and photochemical quenching (qP), but increase non-photochemical quenching (qN) as the herbicide dosages raised, indicating that wheat leaves might have photosynthetic protection in some degree under herbicide stress, and there was a certain difference between the 2 wheat varieties in tolerating to herbicides stress.

Keywords: herbicide; gas exchange parameters; chlorophyll fluorescence parameters; wheat

麦田草害是影响小麦高产稳产的限制性因子,其发生严重时引起的减产幅度能达总产的 3~5 成。国内外在麦田杂草防除技术上已有大量研究,提出了针对

不同杂草群落的农业防治、人工除草和化学防草技术,还探索了光化学除草、电流除草等高新技术。基于我国国情,化学除草仍将是我国当前最切实可行的除草方法^[1-4]。除草剂的使用面积在逐年增加,年产量和使用量也在逐渐加大,也会带来一系列的问题。首先除草剂的使用对目的作物本身也是一种胁迫因子,已有研究表明一些除草剂的使用显著地降低了作物叶片的光合作用,使叶片同化物输出受阻、抗性下降^[5-8],说明除草剂对作物的光合特性有显著的负效应。当前农业生产还不能完全脱离使用除草剂,因此研究除

收稿日期:2010-11-30

基金项目:江苏省“六大人才高峰”项目(07-G-008);国家自然科学基金项目(30671224,30971729);江苏省农业支撑计划项目(BE2008366-1, BE2009426);江苏省高校自然科学基金重大基础研究项目(07KJAZ1022)

作者简介:王正贵(1982—),男,博士研究生,从事农产品安全与环境研究。E-mail:zhgwang08@foxmail.com

* 通讯作者:封超年 E-mail:fengcn@yzu.edu.cn

除草剂的负效应显得尤为必要。

叶绿素荧光动力学参数能够灵敏反映光合作用的变化情况,为植物抗逆生理、作物增产潜力预测等方面的研究提供了极大方便,因而被视为揭示植物光合作用与环境关系的内在探针,成为研究作物光合生理的有力工具^[9-10]。近年来,叶绿素荧光动力学参数已经受到广泛关注,但研究内容多数集中在干旱、水涝、高温、低温、重金属、盐渍等逆境胁迫上^[11-16],有关除草剂胁迫对叶绿素荧光参数的影响国内鲜见报道^[17-18]。基于此,本试验在大田条件下,以弱筋小麦扬麦 13 及强筋小麦烟农 19 两种冬小麦为材料,研究苯磺隆、使它隆、异丙隆、骠马、绿麦隆施用后小麦叶片气体交换和叶绿素荧光参数的变化,探讨除草剂对小麦的负效应,以期进一步为科学施用除草剂,建立小麦的优质高效安全生产技术体系提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 供试材料

10%苯磺隆可湿性粉剂(沈阳化工研究院试验厂生产);20%使它隆乳油(美国陶氏益农公司,通用名:氯氟吡氧乙酸);50%异丙隆可湿性粉剂(苏州市宝带农药有限公司);69 g·L⁻¹升骠马水乳剂(拜耳作物科学公司,通用名:精噁唑禾草灵);25%绿麦隆可湿性粉剂(江苏快达农化股份有限公司)。弱筋小麦扬麦 13、强筋小麦烟农 19(江苏里下河地区农科所提供)。

1.2 试验设计

试验于 2009—2010 年在扬州大学江苏省作物遗传生理重点实验室试验场进行,试验地前茬为水稻,土壤质地为粘土,0~20 cm 土壤 pH 值 6.85,有机质含量 2.6%,全氮 75.01 mg·kg⁻¹,速效氮 12.35 mg·kg⁻¹,速效钾 21.41 mg·kg⁻¹,速效磷 79.01 mg·kg⁻¹。5 种除草剂的喷药浓度分别为商品制剂的 1/2 推荐剂量、推荐剂量、2 倍推荐剂量,以喷清水为对照。试验共设 30 个处理,重复 3 次,每小区面积为 30 m²,小麦种植密度为 240×10⁴ 株·hm⁻²。于 2010 年 3 月 9 日用手持式喷雾器喷药,用液量为 600 kg·hm⁻²。施药后所有小区进行全生育期人工除草。

1.3 测定项目与方法

1.3.1 叶片光合色素含量测定

药后 10 d 采取新鲜小麦叶片,采用 80%酒精提取叶绿素和类胡萝卜素,其含量采用分光光度法测定,参照 Arnon^[19]方法。

1.3.2 光合作用测定

用 LI-6400 型光合作用测定仪(美国 LI-COR 公司)测定,每处理选取 8 片生长一致且受光方向相近的功能叶,于施药后第 10 d 上午 9:00—11:00 测定。

气孔限制值(L_s)按照吴克宁等^[20]的方法计算:

$$L_s = 1 - C_i/C_a$$

式中 C_i 为胞间 CO₂ 浓度, C_a 为大气 CO₂ 浓度。

1.3.3 叶绿素荧光动力学参数测定

叶绿素荧光动力学参数用 FMS-2 型便携脉冲调制式荧光仪(英国 Hansatech 公司)。在自然条件下,与光合作用测定同步进行。测定前暗处理 15~20 min,荧光动力学各参数按下式计算:

$$\text{原初光能转换效率: } F_v/F_m = (F_m - F_o)/F_m$$

$$\text{PS II 潜在活性: } F_v/F_o = (F_m - F_o)/F_o$$

$$\text{PS II 的实际光化学效率: } \Phi = (F_m' - F_t)/F_m'$$

$$\text{光化学荧光淬灭系数: } q_P = (F_m' - F_t)/(F_m' - F_o')$$

$$\text{非光化学荧光淬灭系数: } q_N = 1 - (F_m' - F_o')/(F_m - F_o)$$

1.4 数据分析与方法

采用 Excel、DPS、SPSS 等软件进行数据的计算、统计分析及绘图。

2 结果与分析

2.1 除草剂对小麦叶片光合色素含量的影响

2.1.1 扬麦 13 叶片光合色素含量

从表 1 可以看出,除草剂处理后扬麦 13 叶片内的各种光合色素含量均有不同程度的降低。苯磺隆、异丙隆倍量处理极显著降低了叶绿素 a、叶绿素 b 及总叶绿素的含量,说明扬麦 13 对这 2 种药剂比较敏感。使它隆和骠马处理影响相对较小,与对照差异不显著。叶绿素 a/b 的比值随着除草剂浓度的升高有所增加,说明捕光色素中叶绿素 b 的降低幅度大于叶绿素 a。几种色素中以类胡萝卜素含量的变化幅度相对较小,除异丙隆倍量处理显著降低外,其余与对照差异不显著。

2.1.2 烟农 19 光合叶片色素含量

烟农 19 叶片色素含量随着除草剂浓度的升高呈不同程度的下降趋势(表 1),整体趋势与扬麦 13 基本一致。几乎所有除草剂倍量处理色素减少达显著或极显著水平,其中苯磺隆和异丙隆 2 种除草剂常量处理也显著或极显著降低了烟农 19 叶片色素含量。方差分析表明,品种间、药剂间的差异均达显著水平,且烟农 19 色素含量受除草剂的影响幅度要大于扬麦 13,说明 2 个小麦品种中,烟农 19 对除草剂相对较为

敏感。

2.2 除草剂对小麦叶片光合特性的影响

2.2.1 扬麦 13 叶片光合特性

从表 2 可以看出小麦叶片光合特性各参数不同除草剂处理间差异性显著。扬麦 13 净光合速率(P_n)随着除草剂浓度的升高呈现下降趋势,其中苯磺隆和异丙隆倍量处理 P_n 极显著降低,使它隆、骠马、绿麦隆处理与对照差异不显著。蒸腾速率(Tr)、气孔导度(G_s)及气孔限制值(L_s)也随着除草剂浓度增大呈下

降趋势,几乎所有除草剂常量和倍量处理 Tr 、 G_s 及 L_s 下降都达到显著或极显著水平。而胞间 CO_2 浓度(C_i)随除草剂浓度增加呈上升趋势,且倍量处理 C_i 上升都达到极显著水平。

2.2.2 烟农 19 叶片光合特性

除草剂显著影响烟农 19 的净光合速率(表 2),几乎所有除草剂倍量处理 P_n 下降均达极显著水平。 G_s 、 Tr 、 L_s 等指标也均有不同程度降低,其中 G_s 受除草剂影响最大,常量和倍量处理均显著或极显著降低

表 1 除草剂对小麦叶片光合色素含量的影响

Table 1 Effect of herbicides on photosynthetic pigment contents of wheat leaves

品种 Varieties	除草剂 Herbicide	施药浓度 Application rate/ mL·hm ⁻²	叶绿素 a Chlorophyll a/ mg·g ⁻¹	叶绿素 b Chlorophyll b/ mg·g ⁻¹	总叶绿素 Chlorophyll/ mg·g ⁻¹	叶绿素 a/b Chlorophyll a/b	类胡萝卜素 Carotenoid/ mg·g ⁻¹	
扬麦 13	苯磺隆	75	2.780±0.099	0.990±0.056	3.770±0.042	2.819±0.275	0.955±0.007	
Yangmai 13	Tribenuron-methyl	150	2.675±0.530	0.775±0.021	3.450±0.509*	3.461±0.777	0.820±0.056	
		300	2.380±0.467*	0.910±0.028	3.290±0.438*	2.624±0.589	0.765±0.162	
		使它隆	375	3.020±0.099	0.790±0.198	3.810±0.099	3.961±1.115	1.045±0.035
	Fluroxypyr	750	2.805±0.219	0.955±0.091	3.755±0.304	2.933±0.040	0.840±0.156	
		1 500	2.605±0.035	0.905±0.021	3.510±0.057	2.879±0.028	0.720±0.268	
	异丙隆	1 125	2.870±0.169	0.850±0.367	3.715±0.205*	3.782±1.856	0.795±0.275	
		Isoproturon	2 250	2.510±0.113*	0.840±0.212	3.350±0.325**	3.055±0.634	0.695±0.063
		4 500	2.230±0.156**	0.575±0.049**	2.805±0.205	3.885±0.098	0.595±0.063**	
		骠马	375	2.945±0.077	0.935±0.247	3.875±0.332	3.255±0.787	0.900±0.028
	Fenoxaprop-ethyl	750	2.750±0.127	0.910±0.014	3.665±0.149	3.005±0.099	0.860±0.169	
		1 500	2.575±0.148	0.870±0.028	3.445±0.177*	2.958±0.074	0.685±0.007	
	绿麦隆	3 750	3.240±0.113	0.805±0.346	4.045±0.460	4.396±1.762	0.975±0.035	
		Chlortoluron	7 500	2.865±0.148	1.245±0.106	4.110±0.255	2.307±0.083	0.800±0.028
			15 000	2.625±0.487	0.675±0.120*	3.300±0.368*	4.020±1.441	0.735±0.063
		对照 CK	0	3.035±0.149	1.065±0.063	4.095±0.219	2.852±0.026	0.905±0.063
烟农 19	苯磺隆	75	2.645±0.064	1.025±0.035	3.670±0.028	2.571±0.151	0.920±0.071	
Yannong 19	Tribenuron-methyl	150	2.490±0.071**	0.865±0.035**	3.360±0.113**	2.880±0.038	0.795±0.050*	
		300	2.470±0.042**	0.795±0.050**	3.265±0.092**	3.113±0.142	0.770±0.028**	
		使它隆	375	3.030±0.085	1.110±0.071	4.140±0.156	2.730±0.111	1.000±0.028
	Fluroxypyr	750	2.905±0.149	0.940±0.085	3.840±0.240	3.097±0.139	0.920±0.014	
		1 500	2.620±0.001*	0.920±0.099*	3.535±0.092*	2.863±0.293	0.820±0.042	
	异丙隆	1 125	2.805±0.050	0.940±0.057	3.745±0.106	2.982±0.113	0.830±0.001	
		Isoproturon	2 250	2.540±0.141**	0.865±0.021**	3.405±0.120**	2.939±0.221	0.790±0.014**
		4 500	2.435±0.120**	0.835±0.035**	3.270±0.156**	2.923±0.011	0.760±0.014**	
		骠马	375	2.965±0.035	1.080±0.099	4.040±0.071	2.766±0.286	0.980±0.001
	Fenoxaprop-ethyl	750	2.915±0.092	1.090±0.028	4.000±0.113	2.682±0.013	0.900±0.028	
		1 500	2.625±0.163*	0.850±0.057**	3.475±0.106**	3.097±0.383	0.830±0.042	
	绿麦隆	3 750	2.745±0.205	0.995±0.035	3.740±0.170	2.774±0.303	0.920±0.085	
		Chlortoluron	7 500	2.690±0.269	0.920±0.014*	3.605±0.248*	2.933±0.341	0.820±0.085
			15 000	2.475±0.078**	0.865±0.007**	3.335±0.078**	2.859±0.097	0.770±0.028**
		对照 CK	0	2.910±0.170	1.062±0.106	3.980±0.269	2.733±0.124	0.920±0.057

注:数值为平均数±标准差(SD);*、** 分别表示差异达 0.05 和 0.01 显著水平。下同。

Note: The values mean average ± standard deviation(SD); *, ** mean difference significant at the 0.05 and 0.01 levels, respectively. The same below.

G_s 。 C_i 随除草剂浓度增加有一定的升高趋势, 倍量除草剂处理 C_i 升高可达极显著水平。除草剂对烟农 19 光合特性的影响幅度也要大于扬麦 13, 说明扬麦 13 比烟农 19 对除草剂胁迫具有更强的耐受性。

2.3 除草剂对小麦叶片叶绿素荧光参数的影响

2.3.1 扬麦 13 叶片叶绿素荧光参数

从表 3 可以看出除草剂处理后扬麦 13 叶片叶绿素荧光参数均受到不同程度的影响。原初光能转换效率(F_v/F_m)、PS II 的实际光化学效率(Φ), 光化学荧光

淬灭系数(qP)均有不同程度的降低, 而非光化学荧光淬灭系数(qN)则有升高的趋势。5 种除草剂中以异丙隆对叶绿素荧光参数影响较大, 其倍量处理均显著或极显著地降低了 F_v/F_m 、 F_v/F_o 、 Φ 及 qP 。其余除草剂处理对扬麦 13 叶绿素荧光参数影响不显著。

2.3.2 烟农 19 叶片叶绿素荧光参数

除草剂对烟农 19 叶绿素荧光参数的影响相对较大(表 3), 异丙隆和绿麦隆倍量处理显著降低了 F_v/F_m 、 F_v/F_o 、 Φ 及 qP , 其次为苯磺隆, 其倍量处理显著

表 2 除草剂对小麦气体交换参数的影响

Table 2 Effect of herbicides on gas exchange characteristics of wheat

品种 Varieties	除草剂 Herbicide	施药浓度 Application rate/ mL·hm ⁻²	净光合速率 Photosynthesis rate/ μmolCO ₂ ·m ⁻² ·s ⁻¹	胞间 CO ₂ 浓度 Intercellular CO ₂ concentration/ μmol CO ₂ ·mol ⁻¹	气孔导度 Stomatal conductance/ mmol·m ⁻² ·s ⁻¹	蒸腾速率 Transpiration rate/ mmol·m ⁻² ·s ⁻¹	气孔限制值 Stomatal limitation value
扬麦 13	苯磺隆	75	23.55±2.080	258.5±3.873	0.518±0.040	8.190±0.272	0.353±0.015
Yangmai 13	Tribenuron-methly	150	21.62±1.352	291.5±4.509**	0.381±0.077**	6.475±0.440**	0.317±0.020**
		300	20.32±1.547**	296.0±4.690**	0.293±0.016**	6.135±0.031**	0.274±0.011**
		使它隆	375	24.10±0.955	250.0±8.129	0.545±0.055	9.482±0.528
	Fluroxypyr	750	22.77±2.753	270.7±7.762	0.487±0.078*	9.105±1.211	0.339±0.015
		1 500	21.80±1.110	291.5±5.686**	0.436±0.062**	7.885±0.482*	0.298±0.010**
	异丙隆	1 125	23.77±1.627	285.0±9.360*	0.393±0.032**	7.855±0.983*	0.309±0.022**
		Isoproturon	2 250	21.15±1.782*	294.0±3.266**	0.329±0.073**	6.325±1.322**
	4 500		19.92±2.362**	304.5±5.507**	0.270±0.087**	5.790±0.198**	0.262±0.014**
	骠马		375	24.60±1.805	254.7±7.858	0.643±0.035	9.667±0.321
		Fenoxaprop-ethyl	750	23.72±0.590	273.0±6.377	0.486±0.082*	9.355±0.904
	1 500		21.42±2.634	290.0±9.556**	0.452±0.094**	7.887±0.636**	0.280±0.015**
	绿麦隆		3 750	23.80±0.941	277.7±9.105	0.525±0.104	8.637±0.704
		Chlortoluron	7 500	22.80±2.122	282.0±8.286	0.385±0.036**	7.687±1.040**
	15 000		21.77±0.801	292.2±6.184**	0.322±0.006**	6.842±0.988**	0.295±0.026**
	对照 CK		0	23.60±0.605	270.2±6.448	0.597±0.072	9.007±0.588
烟农 19	苯磺隆	75	23.12±1.808	253.0±9.615	0.421±0.092**	8.107±1.469	0.357±0.034
Yannong 19	Tribenuron-methly	150	21.42±2.634	277.5±8.103	0.315±0.034**	7.887±0.636	0.317±0.036**
		300	19.95±1.524**	304.5±5.507**	0.287±0.079**	6.555±1.274**	0.270±0.020**
		使它隆	375	23.77±1.627	248.0±6.950	0.526±0.103	9.355±0.904
	Fluroxypyr	750	22.80±2.122	260.0±3.140	0.485±0.083*	7.795±1.558	0.342±0.017*
		1 500	19.62±2.641**	293.7±8.501**	0.370±0.055**	7.537±0.749**	0.305±0.031**
	异丙隆	1 125	21.15±1.782	278.2±6.918	0.395±0.031**	7.855±0.983	0.320±0.029**
		Isoproturon	2 250	20.70±3.069*	285.0±9.360**	0.330±0.075**	6.325±1.322**
	4 500		19.60±1.257**	294.0±3.266**	0.271±0.087**	5.790±0.198**	0.252±0.015**
	骠马		375	24.60±1.805	254.7±7.858	0.642±0.035	9.667±0.321
		Fenoxaprop-ethyl	750	23.72±0.590	270.2±6.448	0.451±0.093**	8.877±0.913
	1 500		19.92±2.362**	290.0±9.556**	0.382±0.143**	7.077±0.560**	0.287±0.022**
	绿麦隆		3 750	23.80±0.941	277.7±9.105	0.523±0.062	8.637±0.704
		Chlortoluron	7 500	21.77±0.801	282.0±8.286	0.385±0.035**	7.687±1.040
	15 000		19.77±2.666**	292.2±6.184**	0.322±0.006**	6.842±0.988**	0.280±0.016**
	对照 CK		0	23.50±0.606	273.0±6.377	0.599±0.063	9.107±0.565

降低了 Fv/Fm 、 Fv/Fo ,而对其他参数没有显著影响,驃马与使它隆处理对荧光参数影响相对较小, Fv/Fm 、 Fv/Fo 、 Φ 及 qP 虽有不同程度降低,但与对照差异不显著。此结果与除草剂对色素含量及光合速率的影响结果基本一致,进一步说明扬麦 13 比烟农 19 对于除草剂胁迫具有更强的耐受性。

3 讨论

植物体内的光合色素具有吸收光能并将其用于光合作用的功能,叶绿素含量直接关系到光合作用的

光能转化。前人的一些研究认为,农药能显著降低植物叶片中的色素含量^[21-23],本试验结果进一步验证前人结论,供试 5 种除草剂处理后小麦叶片内叶绿素a、叶绿素 b、总叶绿素及类胡萝卜素含量均有不同程度降低,且光合色素含量与净光合速率下降的趋势基本一致,说明光合色素的减少是引起 Pn 降低的重要原因之一。导致光合作用降低的因子包括气孔限制和非气孔限制,胞间 CO_2 浓度(Ci)和气孔限制值(Ls)是两个评判气孔限制和非气孔限制的指标,其中 Ci 是关键指标, Ci 降低和 Ls 升高表明是气孔限制, Ci 升高

表 3 除草剂对小麦叶绿素荧光特性的影响
Table 3 Effect of herbicides on chlorophyll fluorescence parameters of wheat

品种 Varieties	除草剂 Herbicide	施药浓度 Application rate/ mL·hm ⁻²	Fv/Fm Primary light energy conversion	Fv/Fo PS II potential activity	Φ Actual photochemical efficiency of PS II	qP Photochemical quenching	qN Non- photochemical quenching
扬麦 13 Yangmai 13	苯磺隆 Tribenuron-methyl	75	0.812±0.005	4.327±0.163	0.665±0.037	0.878±0.038	0.201±0.028
		150	0.809±0.016	4.270±0.463	0.662±0.016	0.872±0.034	0.229±0.045
		300	0.794±0.021	4.192±0.377	0.648±0.045	0.862±0.061	0.262±0.023
	使它隆 Fluroxypyr	375	0.810±0.007	4.272±0.201	0.659±0.022	0.887±0.020	0.212±0.130
		750	0.807±0.014	3.900±0.470	0.643±0.038	0.871±0.030	0.241±0.096
		1 500	0.797±0.011	3.925±0.281	0.652±0.032	0.861±0.015	0.238±0.026
	异丙隆 Isoproturon	1 125	0.803±0.023	4.000±0.517	0.676±0.031	0.899±0.014	0.216±0.011
		2 250	0.796±0.030	3.927±0.513	0.677±0.006	0.868±0.045	0.265±0.048
		4 500	0.783±0.027*	3.652±0.523*	0.627±0.048*	0.830±0.049*	0.286±0.075
	驃马 Fenoxaprop-ethyl	375	0.806±0.024	4.220±0.606	0.670±0.017	0.907±0.017	0.182±0.039
		750	0.799±0.016	4.142±0.547	0.664±0.031	0.884±0.041	0.203±0.049
		1 500	0.795±0.020	4.007±0.404	0.655±0.037	0.883±0.045	0.227±0.031
	绿麦隆 Chlortoluron	3 750	0.802±0.019	4.082±0.465	0.651±0.033	0.899±0.023	0.218±0.020
		7 500	0.798±0.022	3.930±0.610	0.647±0.055	0.882±0.079	0.229±0.055
		15 000	0.795±0.026	3.982±0.762	0.630±0.038	0.859±0.057	0.265±0.039
	对照 CK	0	0.812±0.021	4.385±0.585	0.678±0.020	0.901±0.011	0.195±0.021
烟农 19 Yannong 19	苯磺隆 Tribenuron-methyl	75	0.825±0.009	4.493±0.185	0.685±0.007	0.894±0.035	0.133±0.023
		150	0.813±0.010	4.399±0.263	0.666±0.032	0.887±0.058	0.229±0.059
		300	0.800±0.012*	4.005±0.445**	0.653±0.023	0.858±0.042	0.245±0.098
	使它隆 Fluroxypyr	375	0.823±0.013	4.654±0.381	0.694±0.013	0.916±0.010	0.112±0.076
		750	0.815±0.011	4.549±0.415	0.654±0.018	0.873±0.038	0.149±0.065
		1 500	0.814±0.002	4.431±0.337	0.655±0.018	0.864±0.038	0.177±0.008
	异丙隆 Isoproturon	1 125	0.814±0.009	4.370±0.275	0.679±0.023	0.902±0.059	0.185±0.092
		2 250	0.810±0.007	4.268±0.426*	0.687±0.011	0.877±0.027	0.201±0.088
		4 500	0.799±0.018*	4.013±0.302**	0.635±0.036*	0.819±0.096**	0.255±0.094*
	驃马 Fenoxaprop-ethyl	375	0.826±0.005	5.135±0.321	0.693±0.007	0.924±0.017	0.122±0.022
		750	0.821±0.009	4.613±0.266	0.671±0.023	0.901±0.031	0.158±0.029
		1 500	0.813±0.006	4.351±0.163	0.662±0.012	0.895±0.027	0.185±0.049
	绿麦隆 Chlortoluron	3 750	0.821±0.004	4.619±0.140	0.677±0.022	0.863±0.061	0.153±0.027
		7 500	0.821±0.009	4.613±0.283	0.664±0.031	0.859±0.112	0.192±0.047
		15 000	0.809±0.016*	4.261±0.206*	0.635±0.026*	0.853±0.037*	0.237±0.110
	对照 CK	0	0.819±0.014	4.759±0.167	0.671±0.029	0.924±0.006	0.152±0.067

和 L_s 降低则为非气孔限制^[24]。本试验结果表明,随着除草剂浓度的升高,小麦叶片 P_n 下降, C_i 升高伴随着 L_s 降低,说明除草剂导致光合作用降低应是属于非气孔限制因子造成的,光合作用过程受到除草剂的抑制和损伤。

F_v/F_m 代表 PS II 原初光能转化效率,前人研究认为 F_v/F_m 是逆境胁迫条件下植物发生光抑制的敏感指标,是衡量原初光能捕获的最大能力的指标,反映了植物的潜在最大光合能力,一般植物处于逆境时 F_v/F_m 下降。 F_v/F_o 代表 PS II 的潜在活性, F_v/F_o 更能敏感地反映出叶片衰老过程中光子转换效率的变化^[25-27]。本试验中 F_v/F_m 值随着除草剂浓度的升高显著降低,说明在除草剂胁迫下,小麦叶片发生了光抑制或 PS II 复合体受到损害。 Φ 反映光合电子传递的量子转化效率,是 PS II 反应中心关闭情况下 PS II 光能捕获的效率。本试验结果表明,随着除草剂浓度的升高, Φ 在逐渐降低,说明 PS II 光合反应中心的实际量子产量也在逐渐下降。光化学淬灭(qP)反映的是 PS II 天线色素吸收的光能用于光化学电子传递的份额,是对原初电子受体(QA)氧化态的一种度量,代表 PS II 反应中心开放部分的比例,可以反映电子光合链的电子传递速率及其参与 CO_2 固定的效率^[28-30]。在本试验条件下, qP 不同程度降低,说明 PS II 反应中心开放部分减少,光合电子传递受阻。非光化学淬灭(qN)反映的是 PS II 天线色素吸收的光能不能用于光合电子传递而以热的形式耗散掉的光能部分。当 PS II 反应中心天线色素吸收了过量的光能时,如不能及时地耗散将对光合机构造成失活或破坏,所以非光化学淬灭是一种自我保护机制,对光合机构起一定的保护作用。本试验结果表明,除草剂处理后 qN 不同程度升高,说明小麦叶片本身会对除草剂胁迫做出一定的保护作用,这可能是小麦自身的生理适应性,反映小麦对除草剂的耐受性。

4 结论

除草剂处理会引起小麦叶片光合色素含量降低、光合作用受阻以及电子传递速率下降等。净光合速率下降的原因是非气孔限制因素,说明除草剂影响了小麦的光合机制,即使是常规剂量对小麦而言也是一种逆境胁迫。小麦对除草剂胁迫具有一定的自我保护机制,且对除草剂的耐受性品种间存在一定的差异。在本试验条件下,扬麦 13 表现出比烟农 19 对除草剂胁迫具有更强的耐受性。异丙隆与苯磺隆是生产上使用

非常广泛的两种除草剂,目前被认为是安全、无副作用的,而在本试验中其对小麦表现出明显的负效应,对此应该引起重视。保证小麦功能叶具有较高的光合速率是小麦高产的物质基础,因此小麦生产中,当草害发生时,应根据小麦品种的耐受性及草害发生的程度,选择适用的除草剂。

参考文献:

- [1] 张泽溥. 我国农田杂草治理技术的发展[J]. 植物保护, 2004, 30(2): 28-33.
ZHANG Ze-bo. Advances in cropland weed management in China[J]. *Plant Protection*, 2004, 30(2): 28-33.
- [2] 刘井兰, 于建飞, 印建莉, 等. 化学农药对植物生理生化影响的研究进展[J]. 农药, 2006, 45(8): 511-514.
LIU Jing-lan, YU Jian-fei, YIN Jian-li, et al. Research progress on the effect of chemical pesticides on plant physiology and biochemistry[J]. *Agrochemicals*, 2006, 45(8): 511-514.
- [3] Nader Soltani, Christy Shropshire, Peter H Sikkema. Responses of winter wheat (*Triticum aestivum* L.) to autumn applied post-emergence herbicides[J]. *Crop Protection*, 2006, 25: 346-349.
- [4] Peter H Sikkema, Lynette Brown, Christy Shropshire, et al. Responses of three types of winter wheat (*Triticum aestivum* L.) to spring-applied post-emergence herbicides[J]. *Crop Protection*, 2007, 26: 715-720.
- [5] Song Ning Hui, Yin Xiao Le, Chen Guo Feng, et al. Biological responses of wheat (*Triticum aestivum*) plants to the herbicide chlorotoluron in soils[J]. *Chemosphere*, 2007, 68: 1779-1787.
- [6] Wang Mei E, Zhou Qi Xing. Effects of herbicide chlorimuron-ethyl on physiological mechanisms in wheat (*Triticum aestivum*) [J]. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 2006, 64: 190-197.
- [7] Enrique Mateos Naranjo, Susana Redondo Gomez, Jesus Cambrolle, et al. Growth and photosynthetic responses to copper stress of an invasive cordgrass, *Spartina densiflora* [J]. *Marine Environmental Research*, 2008, 66: 459-465.
- [8] 梁文斌, 薛生国, 沈吉红, 等. 锰胁迫对垂序商陆光合特性及叶绿素荧光参数的影响[J]. 生态学报, 2010, 30(3): 619-625.
LIANG Wen-bin, XUE Sheng-guo, SHEN Ji-hong, et al. Effects of manganese stress on photosynthesis and chlorophyll fluorescence parameters of *Phytolacca Americana* [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2010, 30(3): 619-625.
- [9] 陈建明, 俞晓平, 程家女. 叶绿素荧光动力学及其在植物抗逆生理研究中的应用[J]. 浙江农业学报, 2006, 18(1): 51-55.
CHEN Jian-ming, YU Xiao-ping, CHENG Jia-nv. The application of chlorophyll fluorescence kinetics in the study of physiological responses of plants to environmental stresses[J]. *Acta Agriculturae Zhejiangensis*, 2006, 18(1): 51-55.
- [10] 张守仁. 叶绿素荧光动力学参数的意义及讨论[J]. 植物学通报, 1999, 16(4): 444-448.
ZHANG Shou-ren. A discussion on chlorophyll fluorescence kinetics parameters and their significance[J]. *Chinese Bulletin of Botany*, 1999, 16(4): 444-448.

- [11] 梁 晶, 曾 青, 朱建国, 等. 开放式臭氧浓度升高对水稻叶片气体交换和荧光特性的影响[J]. 光谱学与光谱分析, 2010, 30(4): 991-995.
- LIANG Jing, ZENG Qing, ZHU Jian-guo, et al. Effects of O₃-FACE (Ozone-Free Air Control Enrichment) on gas exchange and chlorophyll fluorescence of rice leaf[J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2010, 30(4): 991-995.
- [12] 李亚藏, 梁彦兰, 王庆成. 镉对茶条槭和五角槭光合作用和叶绿素荧光特性的影响[J]. 西北植物学报, 2009, 29(9): 1881-1886.
- LI Ya-cang, LIANG Yan-lan, WANG Qing-cheng. Influence of cadmium on photosynthesis and chlorophyll fluorescence characteristics in *Acer ginnala* and *Acer mono*[J]. *Acta Bot Boreal*, 2009, 29(9): 1881-1886.
- [13] 李 红, 冯永忠, 杨改河, 等. 铜胁迫对芥菜光合特性及叶绿素荧光参数的影响[J]. 农业环境科学学报, 2009, 28(8): 1630-1635.
- LI Hong, FENG Yong-zhong, YANG Gai-he, et al. Effects of copper stress on photosynthesis and chlorophyll fluorescence parameters of Chinese mustard[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2009, 28(8): 1630-1635.
- [14] 朱英华, 屠乃美, 肖汉乾, 等. 模拟酸雨对烤烟叶片光合特性和叶绿素荧光参数的影响[J]. 环境科学学报, 2010, 30(1): 217-223.
- ZHU Ying-hua, TU Nai-mei, XIAO Han-qian, et al. Effects of simulated acid rain on photosynthesis and chlorophyll fluorescence parameters of flue-cured tobacco leaves[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2010, 30(1): 217-223.
- [15] 吉春容, 李世清, 李生秀. 施肥与品种及其种子大小对冬小麦光合及叶绿素荧光特性的影响[J]. 西北植物学报, 2007, 27(12): 2522-2530.
- JI Chun-rong, LI Shi-qing, LI Sheng-xiu. Effects of fertilization, variety and seed size on photosynthesis and chlorophyll fluorescence of winter wheat[J]. *Acta Bot Boreal*, 2007, 27(12): 2522-2530.
- [16] 陈 锋, 田纪春, 孟庆伟, 等. 短期高温胁迫对高产小麦品系灌浆后期旗叶光系统 II 功能的影响[J]. 应用生态学报, 2006, 17(10): 1854-1858.
- CHEN Feng, TIAN Ji-chun, MENG Qing-wei, et al. Effects of short-term high temperature stress on flag leaf photosystem II functions of high-yielding wheat at late grain-filling stage[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2006, 17(10): 1854-1858.
- [17] Kana R, Spundova M, Ilik P, et al. Effect of herbicide clomazone on photosynthetic processes in primary barley (*Hordeum vulgare* L.) leaves[J]. *Pesticide Biochemistry and Physiology*, 2004, 78: 161-170.
- [18] Philippe Eullaffroy, Guy Vernet. The F684/F735 chlorophyll fluorescence ratio: A potential tool for rapid detection and determination of herbicide phytotoxicity in algae[J]. *Water Research*, 2003, 37: 1983-1990.
- [19] Arnon D I. Copper enzymes in isolated chloroplasts, polyphenoloxidase in *Beta vulgaris*[J]. *Plant Physiology*, 1949, (24): 1-15.
- [20] 吴克宁, 赵彦锋, 吕巧灵, 等. 潮土区灌浆水和施磷对冬小麦光合作用和产量的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2002, 8(4): 428-434.
- WU Ke-ning, ZHAO Yan-feng, LV Qiao-ling, et al. Effect of irrigation during grain filling stage and applying phosphate on the photosynthetic efficiency and yield of winter wheat in the fluvoaquic soil area[J]. *Plant Nutrition and Fertilizer Science*, 2002, 8(4): 428-434.
- [21] Peter J Ralph. Herbicide toxicity of *Halophila ovalis* assessed by chlorophyll fluorescence[J]. *Aquatic Botany*, 2000, 66: 141-152.
- [22] Renee Muller, Ulrich Schreiber, Beate I Escher, et al. Rapid exposure assessment of PSII herbicides in surface water using a novel chlorophyll a fluorescence imaging assay[J]. *Science of the Total Environment*, 2008, 401: 51-59.
- [23] 郭天财, 方保停, 王晨阳, 等. 水分调控对小麦旗叶叶绿素荧光动力学参数及其产量的影响[J]. 干旱地区农业研究, 2005, 23(2): 6-10.
- GUO Tian-cai, FANG Bao-ting, WANG Chen-yang, et al. Effects of water regulations on the kinetic parameters of chlorophyll fluorescence in wheat flag leaves as well as wheat yield[J]. *Agricultural Research in the Arid Areas*, 2005, 23(2): 6-10.
- [24] Farquhar G D, Sharkey T D. Stomatal conductance and photosynthesis[J]. *Annual Review Plant Physiology and Plant Molecular*, 1982(33): 317.
- [25] 朱 艳, 田永超, 马吉锋, 等. 小麦叶片叶绿素荧光参数与反射光谱特征的关系[J]. 作物学报, 2007, 33(8): 1286-1292.
- ZHU Yan, TIAN Yong-chao, MA Ji-feng, et al. Relationship between chlorophyll fluorescence parameters and spectral reflectance characteristics in wheat leaves[J]. *Acta Agronomica Sinica*, 2007, 33(8): 1286-1292.
- [26] 王正航, 武仙山, 昌小平, 等. 小麦旗叶叶绿素含量及荧光动力学参数与产量的灰色关联度分析[J]. 作物学报, 2010, 36(2): 217-227.
- WANG Zheng-hang, WU Xian-shan, CHANG Xiao-ping, et al. Chlorophyll content and chlorophyll fluorescence kinetics parameters of flag leaf and their gray relational grade with yield in wheat[J]. *Acta Agronomica Sinica*, 2010, 36(2): 217-227.
- [27] 董彩霞, 赵世杰, 田纪春, 等. 不同浓度的硝酸盐对高蛋白小麦幼苗叶片叶绿素荧光参数的影响[J]. 作物学报, 2002, 28(1): 59-64.
- DONG Cai-xia, ZHAO Shi-jie, TIAN Ji-chun, et al. Effects of different concentration of NO₃⁻ on the chlorophyll fluorescence parameters in seedling leaves of high protein wheat cultivars[J]. *Acta Agronomica Sinica*, 2002, 28(1): 59-64.
- [28] 邵瑞鑫, 上官周平. 外源 NO 调控小麦幼苗生长与生理的浓度效应[J]. 生态学报, 2008, 28(1): 302-309.
- SHAO Rui-xin, SHANGGUAN Zhou-ping. Effects of exogenous nitric oxide at different concentrations on the growth and physiology of winter wheat seedlings[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2008, 28(1): 302-309.
- [29] 王 静, 冯永忠, 杨改河, 等. 小麦光合特性对二氧化碳浓度升高的响应[J]. 干旱地区农业研究, 2009, 27(3): 179-183.
- WANG Jing, FENG Yong-zhong, YANG Gai-he, et al. Responses of wheat photosynthetic characteristics to the increase of CO₂ concentration[J]. *Agricultural Research in the Arid Areas*, 2009, 27(3): 179-183.
- [30] 杨华庚, 林位夫. 低温胁迫对油棕幼苗光合作用及叶绿素荧光特性的影响[J]. 中国农学通报, 2009, 25(24): 506-509.
- YANG Hua-geng, LIN Wei-fu. The effect of low temperature stress on photosynthesis and chlorophyll fluorescence characteristics in oil palm seedlings[J]. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2009, 25(24): 506-509.