



臭氧浓度升高条件下秸秆还田对大豆光合荧光特性及产量的影响

张 铭, 王 岩, 赵天宏, 武红艳, 孙铭禹, 牟 琳

(沈阳农业大学 农学院, 辽宁 沈阳 110161)

摘 要:为了探究臭氧浓度升高条件下秸秆还田对大豆叶片光合荧光特性及产量的影响,以铁丰 29 为试验材料,研究秸秆还田和臭氧浓度升高条件下大豆光合荧光特性及产量的变化规律。结果表明:随着 O_3 浓度升高,大豆净光合速率(P_n)、蒸腾速率(Tr)、气孔导度(G_s)、水分利用效率(WUE)下降,胞间 CO_2 浓度(C_i)呈先降后升的趋势;在结荚期 T1 处理下, S0 与 S1 相比, P_n 显著降低 48.59% ($P < 0.05$);在分枝期 T2 处理下, S1 与 S0 相比, Tr 、 G_s 显著上升 51.26% 和 50.41% ($P < 0.05$);PS II 原初光化学效率(F_v/F_m)、PS II 的潜在活性(F_v/F_o)和 PS II 的实际光化学效率($\Phi PS II$)呈先升后降的趋势,光合电子传递速率(ETR)、光化学淬灭系数(qP)降低而非光化学淬灭系数(NPQ)升高。 F_v/F_o 在结荚期 T1 处理下 S1 与 S0 相比显著降低 30.13% ($P < 0.05$)。产量与 ETR 、 P_n 呈显著正相关($P < 0.05$),试验表明:高浓度 O_3 通过抑制大豆植株的光合作用、降低电子传递速率使大豆产量降低,秸秆还田在一定程度上可缓解但不能从根本上消除臭氧胁迫所带来的负面效应。

关键词: 臭氧; 大豆; 秸秆还田; 光合特性; 叶绿素荧光; 产量

Effects of Straw Returning on Photosynthetic Fluorescence Characteristics and Yield of Soybean Under Elevated Ozone Concentration

ZHANG Ming, WANG Yan, ZHAO Tian-hong, WU Hong-yan, SUN Ming-yu, MU Lin

(School of Agriculture, Shenyang Agricultural University, Shenyang 110161, China)

Abstract: In order to investigate the effects of straw returning on photosynthetic fluorescence characteristics and yield of soybean under elevated ozone concentration, Tiefeng 29 was used as test material to study the changes of photosynthetic fluorescence parameters and yield of soybean under the conditions of straw returning and ozone concentration. The results showed that with the increase of O_3 concentration, the net photosynthetic rate (P_n), transpiration rate (Tr), stomatal conductance (G_s) and water use efficiency (WUE) of soybean decreased, and the intercellular CO_2 concentration (C_i) decreased firstly and then increased. The trend of P_n was significantly decreased by 48.59% ($P < 0.05$) compared with S1 in T1 treatment. The Tr and G_s increased significantly by 51.26% and 50.41% compared with S0 in the T2 treatment ($P < 0.05$); The initial photochemical efficiency (F_v/F_m) of PS II, the potential activity of PS II (F_v/F_o) and the actual photochemical efficiency of PS II ($\Phi PS II$) increased firstly and then decreased, photosynthetic electron transport rate (ETR), photochemical quenching coefficient (qP) decreased rather than elevated photochemical quenching factor (NPQ). Compared with S0, F_v/F_o significantly decreased by 30.13% ($P < 0.05$). There was a significantly positive correlation between yield and ETR and P_n ($P < 0.05$). The experiment showed that high concentration of O_3 reduced soybean yield by inhibiting the photosynthesis of soybean plants and decreased the electron transfer rate. Straw returning to the field did alleviate to a certain extent but could not fundamentally eliminate the negative effects of ozone stress.

Keywords: Ozone; Soybean; Straw returning; Photosynthetic characteristics; Chlorophyll fluorescence; Yield

近年来由于人类大量使用化石燃料和化肥,大气之中 O_3 的浓度每年都在加速增长^[1-2]。目前,全球近四分之一地面上空的对流层臭氧浓度远远超过了敏感植物的臭氧损伤阈值 $40\text{ nL}\cdot\text{L}^{-1}$ ^[3-4]。臭氧浓度升高会对植物生长发育和营养吸收产生一定的影响,例如叶片损伤,叶绿素含量降低,光合速率下降,加速叶片衰老等^[5]。因此,在全球气候变化的背景下,许多国家都着重臭氧浓度升高对植物影响的研究。

大量试验表明, O_3 浓度升高对植物的光合作用

会产生不同程度的影响^[6-7]。高浓度 O_3 使银杏叶片净光合速率下降^[8],可显著降低小麦 (*Triticum aestivum*)^[9] 和 水稻 (*Oryzasativa*)^[10] 叶片叶绿素含量。也有研究表明臭氧浓度升高可增加植物气孔阻力,导致 PS II 天线色素吸收光能的分配结构产生改变,抑制其部分光合电子传递、降低其光合速率,导致作物经济产量和干物质积累下降^[11]。大豆作为我国的主要油料作物,很容易受到 O_3 污染的影响^[12]。因此,在全球变化臭氧 O_3 浓度不断升高情景下,如何提高大豆对 O_3 的适应性和抗性,使 O_3

收稿日期:2019-04-25

基金项目:国家自然科学基金(31570404)。

第一作者简介:张铭(1995-),女,硕士,主要从事全球变化生态学研究。E-mail: 295038363@qq.com。

通讯作者:赵天宏(1972-),男,教授,博导,主要从事全球气候变化和植物生理生态研究。E-mail: zth1999@163.com。

危害降低,探索缓解臭氧胁迫技术措施是今后迫切需要深入研究的主要内容之一。

秸秆本身作为一种重要的有机物料,含有丰富的有机碳和大量的氮、磷、钾等矿质营养元素。秸秆还田能有效增加土壤有机质含量,改善土壤结构和肥力状况^[13],而且能促进土壤微生物的生长繁殖,改善土壤微环境^[14]。由此,基于现代可持续农业——秸秆还田的种种优势,在现有利用可持续农业方式来缓解逆境胁迫方面的相关研究较匮乏的情况下,本研究开展了臭氧与秸秆还田对大豆叶片光合荧光特性及产量的影响研究。探索秸秆还田的合理应用是否可以直接或间接调控 O₃ 对植物的危害,缓解臭氧浓度升高对植物所造成的负面影响,为研究秸秆还田用于缓解臭氧胁迫的应用研究提供理论基础。

1 材料与方法

1.1 材料

以大豆品种铁丰 29 为试验材料,品种生育期为 130 ~ 133 d,适宜在中等或中等以上肥力的土壤种植。

1.2 试验地概况

试验于中国科学院沈阳农田生态系统国家野外科学观测研究站进行。研究站地处于沈阳市苏家屯区十里河镇(41°31'N,123°24'E),年平均气温是 7 ~ 8 ℃, > 10 ℃ 的年活动积温为 3 100 ~ 3 400 ℃。

1.3 试验设计

本研究使用开顶室气室(OTCs)对大豆进行熏蒸,其设备主要包括 OTCs(横截面是正八边形,边长 1.15 m,高度 2.4 m,表面为玻璃室壁),与 OTCs 气室相配套的还有通气及通风的控制设备。其内包括 O₃ 发生器(北理国科,BGY-Q8,中国)用于产生 O₃, O₃ 传感器(艾尔科,S-900)用于监控开顶箱内的 O₃ 浓度,及数据分析与自动控制充气系统。整个试验期间,内部气体浓度基本可控制稳定^[15]。

本试验研究了 2 种还田方式,秸秆全量还田(S1)和秸秆不还田(S0)对不同臭氧浓度下大豆叶片光合荧光特性及产量的变化,CK: O₃ 为环境浓度;T1: O₃ 浓度为(80 ± 10) nmol · mol⁻¹; T2: O₃ 浓度为(110 ± 10) nmol · mol⁻¹,其中 2 因素各水平交叉设置,分别为 CKS1、CKS0、T1S1、T1S0、T2S1、T2S0。2016 年采用开顶室气室(OTCs)对大豆进行臭氧熏蒸处理,秋季收获后将秸秆粉碎全量还田,按大豆平均秸秆产量及盆钵面积,大豆秸秆的施入量为 20 g · 盆⁻¹,常规秸秆还田,置入土表 0 ~ 20 cm 深

度。采用盆栽试验,PVC 桶高 30 cm,长 25 cm,宽 17 cm。2017 年 5 月初进行播种,每桶播 6 粒种子,待出苗后每桶保留 4 株。在大豆出苗 20 d 后开始进行熏蒸试验,每天熏蒸 9 h(8:00 - 17:00),试验期间无其它影响因素(水分、肥料、病虫害及杂草),分别于大豆分枝期(6 月 29 日)、开花期(7 月 23 日)和结荚期(8 月 13 日)取样,待大豆成熟后停止熏蒸。气室内 3 次重复。

1.4 测定项目与方法

1.4.1 光合参数测定 分别于大豆分枝期(6 月 29 日)和结荚期(8 月 13 日)使用 CIRAS-3 便携式光合作用测定系统测定光合参数,每处理选择生长一致且有代表性大豆 3 株,选择晴朗无云的天气,上午 9:00 - 12:00 测定光合指标,包括净光合速率(*Pn*)、气孔导度(*Gs*)、蒸腾速率(*Tr*)、细胞间 CO₂ 浓度(*Ci*)。并利用公式 $WUE = Pn/Tr$,计算出水分利用效率(*WUE*)。设定叶室内光强恒定为 1 200 μmol · m⁻² · s⁻¹, CO₂ 浓度设定为 400 μmol · mol⁻¹,室内温度设为 25 ℃。

1.4.2 叶绿素荧光参数测定 每处理选择生长一致且有代表性大豆 3 株,在晴朗无云的天气,于上午 9:00 - 12:00 用 FMS-2 便携脉冲调制式荧光仪测定相同叶片光反应及暗适应 20 min 后的叶绿素初始荧光(*Fo*)、最大荧光(*Fm*)、PS II 的潜在活性(*Fv/Fo*)、电子传递速率(*ETR*)、并计算 PS II 的实际光化学效率 $\Phi_{PS II} = (Fm - Fs)/Fm$ 、PS II 原初光能转化效率 $Fv/Fm = (Fm - Fo)/Fm$ 、光化学淬灭系数 $qP = (Fm' - Ft)/(Fm' - Fo)$ 、非光化学淬灭系数 $NPQ = (Fm - Fm')/Fm'$ 。

1.4.3 产量构成因素测定 成熟期,每个处理选取有代表性的大豆植株 10 株置于通风袋中,在室外自然风干、考种,调查单株荚重、单株荚数、单株粒数及百粒重等产量构成因素^[16]。

1.5 数据分析

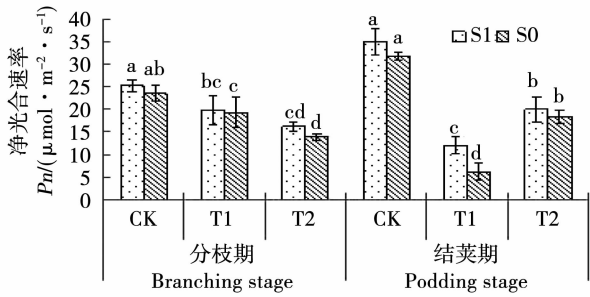
采用 Excel 2003 进行数据处理和作图,采用 SPSS 17.0 软件进行双因素方差分析,对光合荧光指标及产量进行 Pearson 相关性分析,通过单因素方差分析法分析大豆光合荧光指标的差异,用最小显著差异法进行显著性分析。试验数据为平均值 ± 标准差,每个数据 3 次重复。

2 结果与分析

2.1 臭氧浓度升高条件下秸秆还田对大豆叶片光合特性的影响

2.1.1 净光合速率 由图 1 可知,分枝期,随着臭氧浓度升高,*Pn* 呈下降的趋势,各臭氧浓度下均表

现为 $S1 > S0$ 但未达到差异显著性水平;结荚期,随臭氧浓度升高,净光合速率先降低后升高,CK、T1、T2 处理下均表现为 $S1 > S0$,但仅有 T1 处理的 $S0$ 较 $S1$ 显著下降 48.59%。由两个时期各处理下 P_n 均表现为 $S1 > S0$,可见,秸秆还田条件下大豆叶片净光合速率均高于非秸秆还田条件,说明秸秆还田在一定程度上间接缓解了高浓度臭氧对光合作用的负面影响。



S1: 秸秆还田; S0: 秸秆未还田。图中不同小写字母分别表示不同处理间的差异达到 $P < 0.05$ 显著性水平。下同。
S1: Straw returning to the field; S0: Not yet returned. Different small letters in the rows show the significance of different treatments at $P < 0.05$ level, respectively. The same below.

图1 臭氧浓度升高条件下秸秆还田对大豆叶片净光合速率的影响

Fig. 1 Effects of straw returning on net photosynthetic rate of soybean leaves under elevated ozone concentration

2.1.2 蒸腾速率 由图2可知, T_r 随着臭氧浓度升高总体呈下降趋势,分枝期, T_r 随着臭氧浓度升高呈先升高后降低的趋势,CK、T2 处理表现为 $S1 > S0$,但仅有 T2 处理的 $S1$ 较 $S0$ 显著提高 51.26%, T1 处理却表现为 $S1 < S0$,且 $S1$ 较 $S0$ 显著下降 23.60%;结荚期,随着臭氧浓度升高蒸腾速率先降低后升高,CK、T1、T2 处理下均表现为 $S1 > S0$,但仅有 CK 处理的 $S0$ 较 $S1$ 显著下降 16.11%。

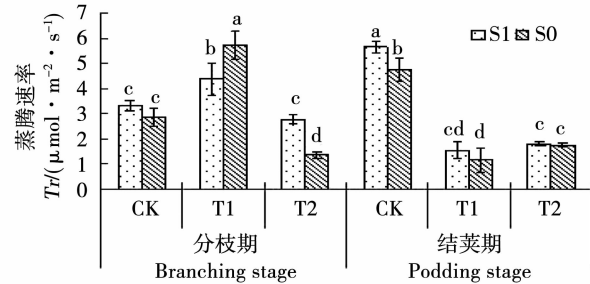


图2 臭氧浓度升高条件下秸秆还田对大豆叶片蒸腾速率的影响

Fig. 2 Effects of straw returning on transpiration rate of soybean leaves under elevated ozone concentration

2.1.3 气孔导度 如图3可知,大豆叶片的 G_s 与 P_n 变化趋势基本一致,分枝期,随着臭氧浓度升高 G_s 呈降低趋势,CK、T1、T2 处理下均表现为 $S1 > S0$,但仅有 T2 处理下 $S0$ 较 $S1$ 显著下降 50.41%;结荚期,随着臭氧浓度升高 G_s 先降低后升高,CK、T1、T2 处理下均表现为 $S1 > S0$,但差异不显著。可见臭氧和秸秆还田处理后期,高浓度臭氧抑制了大豆叶片的气孔导度。

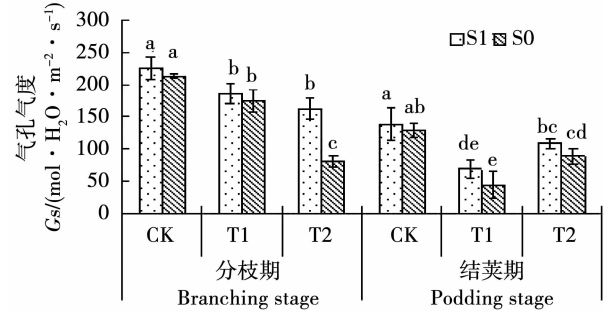


图3 臭氧浓度升高条件下秸秆还田对大豆叶片气孔导度的影响

Fig. 3 Effect of straw returning on stomatal conductance of soybean leaves under elevated ozone concentration

2.1.4 胞间 CO_2 浓度 O_3 浓度增加可诱导叶片气孔关闭,影响气体交换。分枝期,随着臭氧浓度升高 C_i 先降低后升高(图4),CK 处理下 $S1 < S0$, T1、T2 处理却表现为 $S1 > S0$,且均未达到显著水平;结荚期,随着臭氧浓度升高, C_i 影响波动不大,但总体趋势与分枝期相同,CK、T1 处理下 $S1 < S0$, T2 处理却表现为 $S1 > S0$,且均未达到显著水平。可见,臭氧和秸秆还田处理前期 P_n 下降主要受气孔因素的制约,后期是光合机构受损和细胞内 CO_2 积累过多等非气孔因素引起的 P_n 降低。

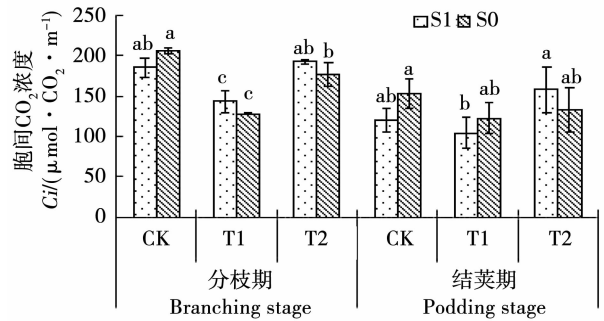


图4 臭氧浓度升高条件下秸秆还田对大豆叶片细胞间 CO_2 浓度的影响

Fig. 4 Effect of straw returning on the concentration of carbon dioxide in soybean leaves under the condition of elevated ozone concentration

2.1.5 水分利用效率 水分利用效率表明植物同化作用积累干物质的能力。由图5可知,臭氧浓度

升高和秸秆还田条件下,分枝期,随着臭氧浓度升高WUE呈逐渐降低趋势,CK、T1、T2处理下均表现为S1>S0,S0较S1分别显著下降20.20%、26.86%和26.87%;结荚期,随着臭氧浓度升高水分利用效率呈下降的趋势,各臭氧浓度下,水分利用效率均表现为S1>S0,S0较S1分别显著下降51.20%、27.70%和7.89%。

2.1.6 光合特性指标综合分析 由表1可知,臭氧处理、生育期各单因素对*Ci*、*Gs*、*Pn*、*Tr*和WUE均有极显著影响($P<0.01$),而还田处理仅对*Gs*、*Tr*和WUE影响显著;各因素的交互作用中,秸秆还田和生育期互作以及秸秆还田、生育期与臭氧处理三者的交互作用均对*Ci*、*Pn*影响不显著,其余交互作用对各光合指标均有显著或极显著影响。

表1 各因素及其交互作用对大豆光合性能的方差分析

Table 1 Analysis of variance of photosynthesis performance of soybean by various factors and their interactions						
因素	自由度	显著性 Significance				
Factors	Df	<i>Ci</i>	<i>Gs</i>	<i>Pn</i>	<i>Tr</i>	WUE
O ₃	2	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01
HC	1	>0.05	<0.01	>0.05	<0.01	<0.01
Stage	1	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01
O ₃ × HC	2	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01
O ₃ × Stage	2	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01
HC × Stage	1	>0.05	<0.05	>0.05	<0.05	<0.01
O ₃ × Stage × HC	2	>0.05	<0.01	>0.05	<0.01	<0.01

O₃:臭氧处理;HC:秸秆还田处理;Stage:生育期。下同。
O₃:Ozone treatment;HC:Straw returning treatment;Stage:Growth period. The same below.

2.2 臭氧浓度升高条件下秸秆还田对大豆叶片荧光特性的影响

2.2.1 PSⅡ的原初光化学效率和PSⅡ的实际光化学效率 由表2可知,PSⅡ的原初光化学效率(*Fv/Fm*)均表现为S1<S0,且均未达到显著水平。随着臭氧浓度升高*Fv/Fm*在分枝期先升高后降低,在结荚期,呈下降的趋势。*Fv/Fm*在正常条件下数值变化微小,但胁迫条件下数值会显著降低,说明臭氧浓度升高和秸秆还田两个处理单独和叠加均未对PSⅡ的原初光化学效率产生显著影响。

对比可发现,PSⅡ的实际光化学效率($\Phi PSⅡ$)显著低于原初光化学效率,且受臭氧浓度和秸秆还田影响不显著。分枝期CK、T1处理表现为S1>S0,T2处理却表现为S1<S0;结荚期,T1处理表现为S1<S0,CK、T2处理却表现为S1>S0。

2.2.2 $\Phi PSⅡ$ 的潜在活性 分枝期,随着臭氧浓度升高 $\Phi PSⅡ$ 的潜在活性(*Fv/Fo*)先升高后降低,CK处理下表现为S1>S0,差异不显著,T1与T2处理

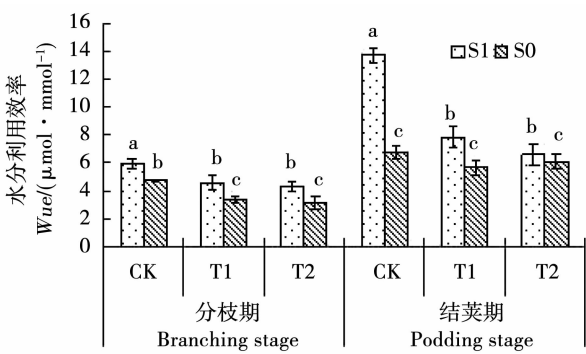


图5 臭氧浓度升高条件下秸秆还田对大豆叶片水分利用效率的影响

Fig.5 Effects of straw returning on water use efficiency of soybean leaves under elevated ozone concentration

下却表现为S1<S0,S1较S0降低12.37%和12.25%,差异不显著。结荚期,随着臭氧浓度升高*Fv/Fo*基本呈下降的趋势,各臭氧浓度下均表现为S1<S0,但只有T1处理下S1与S0相比显著下降30.13%。

2.2.3 光合电子传递速率 随着臭氧浓度升高,ETR基本呈下降的趋势,CK与T1处理下,均表现为S1>S0,T1处理下S1较S0显著上升21.47%,T2处理时呈相反趋势且未达到显著水平;结荚期,随着臭氧浓度升高ETR先升高后降低,T1与T2处理,均表现为S1<S0,T1处理下S1较S0显著下降31.99%,CK处理下呈相反趋势,未达到显著水平,说明臭氧胁迫降低了大豆叶片电子传递速率。

2.2.4 光化学淬灭和非光化学淬灭 臭氧浓度升高条件下*qP*呈降低趋势,各臭氧浓度下,*qP*均表现为S1>S0,但均未达到显著水平。*NPQ*与*qP*变化趋势相反,随着臭氧浓度升高*NPQ*呈升高趋势。分枝期,CK、T1处理下S1>S0,S1较S0分别上升

11.49%、2.41%, T2 处理表现为 $S1 < S0$, $S1$ 较 $S0$ 下降 10.90%, 未达到显著水平; 结荚期, NPQ 均表现为 $S1 < S0$, 且均未达到显著水平。说明臭氧胁迫

改变了大豆叶片的 $PS\ II$ 的分配方式, 通过提高热耗散消耗过剩光能来适应胁迫环境。

表 2 臭氧浓度升高条件下秸秆还田对大豆叶片叶绿素荧光参数的影响

Table 2 Effects of straw returning on chlorophyll fluorescence parameters of soybean leaves under elevated ozone concentration

时期 Period	处理 Treatment	F_v/F_m	$\Phi PS\ II$	F_v/F_o	ETR	qP	NPQ
分枝期 Branching stage	CKS1	0.536 ± 0.078 c	0.424 ± 0.013 ab	1.450 ± 0.120 bc	5.707 ± 0.173 a	0.673 ± 0.068 a	0.661 ± 0.281 a
	CKS0	0.548 ± 0.073 bc	0.401 ± 0.041 ab	1.268 ± 0.368 c	5.470 ± 0.595 ab	0.619 ± 0.064 ab	0.585 ± 0.228 a
	T1S1	0.649 ± 0.047 a	0.453 ± 0.063 ab	1.885 ± 0.415 abc	4.947 ± 0.541 ab	0.607 ± 0.052 ab	1.034 ± 0.400 a
	T1S0	0.685 ± 0.033 a	0.377 ± 0.040 b	2.151 ± 0.389 a	3.885 ± 0.529 c	0.581 ± 0.019 ab	1.009 ± 0.095 a
	T2S1	0.642 ± 0.041 ab	0.443 ± 0.063 ab	1.833 ± 0.340 abc	4.520 ± 0.452 bc	0.586 ± 0.033 ab	1.055 ± 0.342 a
	T2S0	0.676 ± 0.015 a	0.486 ± 0.068 a	2.089 ± 0.134 ab	5.036 ± 0.613 ab	0.560 ± 0.043 b	1.184 ± 0.436 a
结荚期 Podding stage	CKS1	0.637 ± 0.005 ab	0.460 ± 0.044 b	1.759 ± 0.037 abc	2.534 ± 0.173 b	0.536 ± 0.036 a	0.637 ± 0.492 a
	CKS0	0.683 ± 0.033 a	0.487 ± 0.022 ab	2.173 ± 0.311 ab	2.494 ± 0.370 b	0.502 ± 0.030 a	0.810 ± 0.259 a
	T1S1	0.619 ± 0.012 ab	0.557 ± 0.009 a	1.623 ± 0.077 bc	3.323 ± 0.383 b	0.492 ± 0.092 a	0.964 ± 0.036 a
	T1S0	0.678 ± 0.094 a	0.469 ± 0.017 ab	2.323 ± 0.612 a	4.886 ± 0.435 a	0.461 ± 0.102 a	1.148 ± 0.146 a
	T2S1	0.556 ± 0.060 b	0.497 ± 0.096 ab	1.283 ± 0.332 a	3.232 ± 0.662 ab	0.460 ± 0.074 a	0.949 ± 0.201 a
	T2S0	0.586 ± 0.051 ab	0.461 ± 0.045 b	1.439 ± 0.328 a	3.304 ± 0.794 b	0.438 ± 0.079 a	1.189 ± 0.462 a

同列不同小写字母代表差异显著 ($P < 0.05$)。下同。

Different lowercase in the same line indicate significant different ($P < 0.05$). The same below.

2.2.5 叶片荧光特性的相关分析 由表 3 可知臭氧处理、还田处理以及生育期各单因素对 F_v/F_m 、 $\Phi PS\ II$ 、 ETR 均有显著或极显著影响, 臭氧处理、还田处理对 F_v/F_o 、 NPQ 有显著影响对其余各项荧光特性均无显著影响; 各因素的交互作用中, 只有臭

氧处理和生育期的交互作用对 F_v/F_m 、 F_v/F_o 、 ETR 有极显著影响, 臭氧处理、还田处理以及生育期的交互作用对 ETR 有极显著影响, 其余交互作用对 F_v/F_m 、 $\Phi PS\ II$ 、 F_v/F_o 、 ETR 、 qP 、 NPQ 均无显著影响。

表 3 各因素及其交互作用对大豆荧光参数的方差分析

Table 3 Analysis of variance of soybean fluorescence parameters by various factors and their interactions

因素 Factors	自由度 df	显著性 Significance					
		F_v/F_m	F_v/F_o	$\Phi PS\ II$	qP	NPQ	ETR
O_3	2	<0.05	<0.05	<0.01	>0.05	<0.05	>0.05
HC	1	>0.05	<0.05	<0.01	>0.05	<0.05	>0.05
Stage	1	>0.05	>0.05	<0.01	>0.05	>0.05	<0.01
$O_3 \times HC$	2	>0.05	>0.05	<0.01	>0.05	>0.05	>0.05
$O_3 \times Stage$	2	<0.01	<0.01	<0.01	>0.05	>0.05	<0.01
$HC \times Stage$	1	>0.05	>0.05	>0.05	>0.05	>0.05	>0.05
$O_3 \times Stage \times HC$	2	>0.05	>0.05	<0.01	>0.05	>0.05	<0.01

2.3 臭氧浓度升高条件下秸秆还田对大豆产量的影响

由表 4 可知, CK 与 O_3 浓度升高处理下 (T1、T2) 的大豆百粒重差异不显著, 而 T1、T2 处理下大豆单株粒数、单株荚数和单株粒重与 CK 差异显著, 说明臭氧浓度升高能够导致大豆籽粒产量下降。CK、T1、T2 处理下秸秆还田后单株粒数、单株荚数、

百粒重和单株粒重均高于非秸秆还田条件, 表现为 $S1 > S0$, 但仅 CK、T1 处理下单株粒数、T1 处理下单株荚数达到显著水平, $S0$ 较 $S1$ 相比分别下降 13.41%、30.68% 和 26.32%。说明秸秆还田确实一定程度上缓解了臭氧胁迫所引起的产量降低, 但总的来说产量总体依旧呈下降趋势, 证明秸秆还田不能完全抵消臭氧对大豆所带来的负面作用。

表 4 臭氧浓度升高条件下秸秆还田对大豆产量的影响

Table 4 Effect of straw returning on soybean yield under elevated ozone concentration

处理	单株粒数		单株荚数		百粒重		单株粒重	
	Seed number per plant		Pods number per plant		100-seed weight/g		Seed weight per plant/g	
	S1	S0	S1	S0	S1	S0	S1	S0
CK	120.875±2.003 a	104.667±5.033 b	72.250±4.012 a	68.625±3.798 ab	24.783±3.001 a	23.693±3.00 ab	28.700±3.00 a	23.713±3.00 a
T1	58.000±3.00 d	83.667±3.213 c	31.500±1.005 c	42.750±2.245 b	20.667±3.123 ab	18.067±3.00 b	11.950±3.00 b	15.367±3.00 b
T2	52.667±4.170 d	57.500±4.000 d	38.333±1.128 bc	38.012±1.122 bc	19.200±4.310 ab	21.323±4.00 ab	9.990±4.00 b	11.675±4.00 b

2.4 光合、荧光及产量的相关分析

由表 5 可知, F_v/F_m 与 F_v/F_o 、 NPQ 、 G_s 呈极显著正相关,相关系数分别为 0.931、0.436、0.330。 F_v/F_o 与 NPQ 之间呈极显著正相关, ETR 与 $\Phi PS II$ 、 P_n 、 WUE 均呈极显著负相关,而与 qP 极显著正相关, $\Phi PS II$ 与 C_i 、 G_s 、 Tr 均呈极显著负相关, C_i 与 G_s 、 Tr 均呈极显著正相关, G_s 与 P_n 、 Tr 呈极显著正相

关,相关系数分别为 0.610、0.968,且 P_n 、 Tr 二者呈极显著正相关,相关系数为 0.642, WUE 与 $\Phi PS II$ 呈极显著正相关、与 ETR 、 C_i 、 G_s 、 Tr 均呈极显著负相关,产量与 ETR 、 P_n 呈显著正相关,相关系数分别为 0.706 和 0.648。由此可知,大豆产量与光合电子传递速率和净光合速率呈显著正相关,即光合荧光特性与产量确实存在一定的相关性和内在联系。

表 5 臭氧浓度升高条件和秸秆还田处理下的大豆光合、荧光及产量的相关值

Table 5 Correlation of photosynthesis, fluorescence and yield of soybean with elevated ozone concentration and straw returning

项目	F_v/F_m	F_v/F_o	qP	NPQ	ETR	$\Phi PS II$	C_i	G_s	P_n	Tr	WUE	产量 Yield
F_v/F_m	1	0.931 **	0.078	0.436 **	-0.108	0.043	0.054	0.330 **	0.243	0.253	0.039	-0.190
F_v/F_o		1	0.067	0.355 **	0.016	-0.044	0.082	0.275	0.123	0.196	-0.042	-0.127
qP			1	-0.033	0.406 **	0.022	0.009	-0.217	-0.225	-0.221	-0.008	-0.133
NPQ				1	0.187	0.087	0.112	0.216	0.008	0.250	-0.213	-0.271
ETR					1	-0.404 **	0.320	-0.190	-0.635 **	-0.210	-0.406 **	0.706 *
$\Phi PS II$						1	-0.728 **	-0.473 **	0.026	-0.438 **	0.474 **	-0.237
C_i							1	0.716 **	0.056	0.680 **	-0.749 **	-0.008
G_s								1	0.610 **	0.968 **	-0.500 **	-0.076
P_n									1	0.642 **	0.159	0.648 *
Tr										1	-0.565 **	-0.070
WUE											1	0.207
产量 Yield												1

* :在 $P<0.05$ 水平(双侧)上显著相关; ** :在 $P<0.01$ 水平(双侧)上显著相关。
* :Significant correlation at the $P<0.05$ level (both sides); ** :Significantly correlated at $P<0.01$ level (both sides).

3 讨 论

赵天宏等^[17]研究表明高浓度 O_3 降低了大豆净光合速率抑制其光合作用,大豆叶片内的 O_3 浓度滞留会破坏大豆叶片细胞膜和叶绿体,还会诱导叶片气孔关闭及阻力增加。本研究表明随着 O_3 浓度升高,各处理 P_n 、 G_s 和 Tr 、 WUE 均出现总体下降而 C_i 表现出先降低后升高的变化的趋势,此结果与刘

馨等^[18]的研究结果一致。随着 O_3 通气时间延长,植物机体本身得不到足够 CO_2 供应,持续光照使光合器官被破坏,细胞内 CO_2 量增加导致外界 CO_2 难以进入叶肉细胞,这种恶性循环最终导致光合作用减弱^[19]。本研究发现臭氧浓度下秸秆还田处理后 G_s 、 P_n 、 Tr 、 WUE 均有降低趋势,但随着臭氧浓度升高,臭氧与秸秆还田的交互作用对 C_i 、 G_s 、 P_n 、 Tr 、 WUE 有极显著的正效应,但臭氧浓度升高条件下秸

秆还田的 G_s 、 P_n 、 WUE 均高于未还田条件。由此可见,气孔因素是处理前期大豆光合作用的主要限制因素,处理后期损伤了叶片的光合机构,非气孔因素成为主要限制因素。前人研究表明通过分析叶绿素荧光动力学参数可得到植物受逆境胁迫的程度^[20]。度量 $PS\ II$ 原初光能转换效率和潜在活性常用 F_v/F_m 和 F_v/F_o ^[21], F_v/F_m 下降表明植物受到光抑制、 $PS\ II$ 中心损伤^[22]。本研究结果表明, F_v/F_o 、 F_v/F_m 、 $\Phi PS\ II$ 变化趋势一致,均随着臭氧浓度升高,呈先升高后降低的趋势,各处理组的 ETR 均呈减小趋势。 qP 随着臭氧浓度升高呈下降趋势,而 NPQ 与之相反呈现出上升趋势,说明高浓度 O_3 降低了电子传递速率,改变了大豆叶片的 $PS\ II$ 内部分配方式,提高热耗散消耗过剩光能来适应臭氧胁迫环境,这可能是大豆对臭氧胁迫的一种保护机制。秸秆还田在一定程度上缓解了臭氧胁迫,减轻了臭氧胁迫对大豆叶片光合系统的伤害,增强大豆植株对臭氧的抵御能力。

白月明等^[23]研究表明,随着 O_3 浓度升高水稻穗数有所增加,但梗数量、穗粒数、穗粒重和千粒重均低于对照,与 CK 相比产量降低。本研究表明大豆百粒重受臭氧浓度升高变化不显著,而单株荚数、单株粒数和单株粒重显著下降,说明高浓度 O_3 对大豆开花期影响较显著,影响了花期的受精过程,导致开花数量变少,使得结荚期 T_1 、 T_2 处理下大豆荚数明显低于 CK 。综上所述,高浓度 O_3 通过抑制大豆植株的光合作用、降低电子传递速率,使大豆产量降低,这一结论与金东艳等^[24]的研究结果一致。

本研究探讨了秸秆还田条件下臭氧浓度升高对大豆光合荧光参数和产量的影响,但臭氧和秸秆还田复合因子共同作用下对大豆的具体影响机理仍然不清楚。同时在秸秆还田基础上,供试土壤的构成、理化性质等势必会有所改变,而土壤的这些改变又会对臭氧胁迫下的大豆产生怎样影响等问题都有待进一步的深入研究。

4 结 论

随着 O_3 浓度升高,大豆叶片的 P_n 、 Tr 、 G_s 、 WUE 下降, C_i 呈先降后升的趋势。说明在臭氧胁迫处理前期,气孔因素是限制大豆叶片光合作用的主要因素,到处理后期非气孔因素成为主要限制因素。 F_v/F_m 、 F_v/F_o 和 $\Phi PS\ II$ 呈先升后降的趋势, ETR 、 qP 降低而 NPQ 升高。说明高浓度 O_3 降低了电子传递速率,改变了大豆叶片的 $PS\ II$ 内部分配方式,提高热耗散消耗过剩光能来适应臭氧胁迫环境。

百粒重受臭氧浓度升高的影响下,大豆变化不显著,而单株荚数、单株粒数和单株粒重显著下降,且产量与 P_n 、 ETR 呈显著正相关,说明高浓度 O_3 通过抑制大豆植株的光合作用、降低电子传递速率使大豆产量降低。

综上所述,秸秆还田在一定程度上缓解了臭氧胁迫导致的光合荧光特性减弱及产量降低等问题,但不能从根本上消除臭氧胁迫所带来的负面效应。秸秆还田条件下,对照组臭氧浓度更有利于大豆的生长发育,综合各处理对大豆光合荧光特性及产量的影响,大气臭氧浓度下秸秆还田为最佳组合,控制一定的环境臭氧浓度和采用秸秆还田是促进大豆增产的有效方式。

参考文献

[1] Bytnerowicz A, Omasa K, Paoletti E. Integrated effects of air pollution and climate change on forests: Anorthern hemisphere perspective [J]. Environmental Pollution, 2007,147(3):438-445.

[2] Chameides W L, Kasibhatla P S, Yienger J, et al. Growth of continental-scale metroagropoles, regional ozone pollution, and world food production[J]. Science,1994,264:74-77.

[3] Prather M, Ehhalt D, Dentener F, et al. Atmospheric chemistry and greenhouse gases[C]. //Houghton J T, Ding Y, Griggs D J, et al. Climate change 2001: The scientific basis, contribution of working group I to the third assessment report of the intergovernmental panel on climate change. Cambridge :Cambridge University Press, 2001:239-287.

[4] Vingarzan R. A review of surface ozone background levels and trends [J]. Atmospheric Environment,2004, 38:3431-3442.

[5] 平琴,徐胜,李静,等. 坪用白三叶对高浓度臭氧的生理生态响应[J]. 生态学杂志,2017,36(5):1234-1242. (Ping Q, Xu S, Li J, et al. Physiological and ecological responses of *Trifolium repens* to high concentration ozone[J]. Journal of Ecology, 2017,36(5):1234-1242.)

[6] Farage P K, Long S P. The effect of O_3 fumigation during leaf development on photosynthesis of wheat and pea: An in vivo analysis[J]. Photosynthesis Research,1999,59:1-7.

[7] 白月明,王春乙,刘玲,等. O_3 对“五月蔓”白菜生长和产量的影响[J]. 园艺学报,1999,30(2):167-170. (Bai Y M, Wang C Y, Liu L, et al. Effects of ozone on growth and yield of Chinese cabbage[J]. Acta Horticulturae Sinica,1999,30(2):167-170.)

[8] 张巍巍,赵天宏,王美玉,等. 臭氧浓度升高对银杏光合作用的影响[J]. 生态学杂志,2007,26(5):645-649. (Zhang W W, Zhao T H, Wang M Y, et al. Effects of elevated ozone concentration on Ginkgo biloba photosynthesis[J]. Chinese Journal of Ecology, 2007,26(5):645-649.)

[9] 金明红,冯宗炜. 臭氧对冬小麦叶片膜保护系统的影响[J]. 生态学报,2000,20(3):444-447. (Jin M H, Feng Z W. Effects of Ozone on membrane protective system of winter wheat leaves[J]. Acta Ecologica Sinica,2000,20(3):444-447.)

[10] 金明红,冯宗炜,张福珠,等. 臭氧对水稻叶片脂膜过氧化和抗

氧化系统的影响[J]. 环境科学,2000,21(3):1-5. (Jin M H, Feng Z W, Zhang F Z, et al. Effects of ozone on membrane lipid peroxidation and antioxidant system of rice leaves[J]. Journal of Environmental Sciences,2000,21(3):1-5.)

[11] Keller F, Bassin S, Ammann C, et al. High-resolution modelling of AOT40 and stomatal ozone uptake in wheat and grassland; A comparison between 2000 and the hot summer of 2003 in Switzerland [J]. Environmental Pollution,2007,146(3):671-677.

[12] 战丽杰. 臭氧胁迫下硅对大豆生理生态影响的研究[D]. 济南:山东农业大学,2012. (Zhan L J. Study on the effects of silicon on soybean physiology and ecology under ozone stress [D]. Jinan:Shandong Agricultural University,2012.)

[13] Turmel M S, Speratti A, Baudran F, et al. Crop residue management and soil health: A systems analysis [J]. Agricultural Systems,2014,134:6-16.

[14] 时鹏, 高强, 王淑平, 等. 玉米连作及其施肥对土壤微生物群落功能多样性的影响[J]. 生态学报, 2010, 30(22):6173-6182. (Shi P, Gao Q, Wang S P, et al. Effects of continuous cropping and fertilization on functional diversity of soil microbial communities[J]. Acta Ecologica Sinica,2010, 30(22):6173-6182.)

[15] 武红艳, 王岩, 赵天宏, 等. 臭氧浓度升高条件下秸秆还田对大豆叶片生态化学计量特征的影响[J]. 土壤通报,2019,50(2):355-364. (Wu H Y, Wang Y, Zhao T H, et al. Effects of straw returning on the ecological stoichiometry of soybean leaves under elevated ozone concentration[J]. Chinese Journal of Soil Science, 2019,50(2):355-364.)

[16] 张永强, 张娜, 王娜, 等. 种植密度对夏大豆光合特性及产量构成的影响[J]. 核农学报,2015,29(7):1386-1391. (Zhang Y Q, Zhang N, Wang N, et al. Effects of planting density on photosynthetic characteristics and yield components of summer soybean [J]. Journal of Nuclear Agricultural Sciences, 2015, 29(7):1386-1391.)

[17] 赵天宏, 史奕, 黄国宏. CO₂ 和 O₃ 浓度倍增及其交互作用对大豆叶绿体超微结构的影响[J]. 应用生态学报,2003(12):2229-2232. (Zhao T H, Shi Y, Huang G H. Effects of CO₂ and O₃ concentration and interaction on the ultrastructure of soybean chloroplasts [J]. The Journal of Applied Ecology, 2003(12):2229-2232.)

[18] 刘馨, 游诗尧, 周海霞, 等. 钙离子浓度对 NaCl 胁迫下嫁接黄瓜幼苗光合与荧光特性的影响[J]. 干旱地区农业研究,2018,36(4):193-199,206. (Liu X, You S Z, Zhou H X, et al. Effects of calcium concentration on photosynthesis and fluorescence characteristics of grafted cucumber seedlings under NaCl stress [J]. Agricultural Research in the Arid Areas,2018,36(4):193-199.)

[19] 王孟辉, 巴特尔·巴克, 萨吉旦·阿卜杜克日木, 等. 沙尘胁迫对山楂光合、荧光特性的影响[J]. 干旱区资源与环境,2019,33(3):189-194. Wang M H, Battle B, Sajidan A, et al. Effects of dust stress on photosynthesis and fluorescence characteristics of hawthorn[J]. Journal of Arid Land Resources and Environment, 2019, 33(3):189-194.

[20] 孙德智, 韩晓日, 彭靖, 等. 外源 NO 和水杨酸对盐胁迫下番茄幼苗光合机构的保护作用[J]. 应用与环境生物学报,2018,24(3):457-464. (Sun D Z, Han X R, Peng J, et al. Protective effects of exogenous NO and salicylic acid on photosynthetic apparatus of tomato seedlings under salt stress [J]. Journal of Applied and Environmental Biology, 2018, 24(3):457-464.)

[21] Lichtenthaler H K. Application of chlorophyll fluorescence in research stress physiology, hydrobiology and remote sensing [M]. Dordrecht:Kluwer Academic Publishers,1991:253-258.

[22] 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 S R. Significance and discussion of chlorophyll fluorescence kinetic parameters [J]. Bulletin of Botany,1999,16(4):444-448.)

[23] 白月明, 郭建平, 刘玲, 等. 臭氧对水稻叶片伤害、光合作用及产量的影响[J]. 气象,2001(6):17-22. (Bai Y M, Guo J P, Liu L, et al. Influences of O₃ on the leaf injury photosynthesis and yield of rice [J]. Meteorological,2001(6):17-22.)

[24] 金东艳, 赵天宏, 付宇, 等. 臭氧浓度升高对大豆光合作用及产量的影响[J]. 大豆科学,2009,28(4):632-635. (Jin D Y, Zhao T H, Fu Y, et al. Effects of elevated ozone concentration on photosynthesis and yield of soybean [J]. Soybean Science, 2009, 28(4):632-635.)