



近地表臭氧浓度升高对不同东北品种大豆产量形成及品质的影响

王春雨^{1,2,3}, 谢志煌², 李彦生^{1,2}, 金 剑², 王光华², 房 蕊², 范国权⁴, 刘晓冰²

(1. 中国农业科学院 农业环境与可持续发展研究所/农业部农业环境重点实验室, 北京 100081; 2. 中国科学院 东北地理与农业生态研究所/黑土区农业生态重点实验室, 黑龙江 哈尔滨 150081; 3. 东北农业大学 资源与环境学院, 黑龙江 哈尔滨 150030; 4. 黑龙江省农业科学院 植物脱毒苗木研究所/农业部脱毒马铃薯种薯质量监督检验测试中心, 黑龙江 哈尔滨 150086)

摘 要:为明确大气臭氧浓度升高对不同东北大豆品种产量形成和品质的影响,本研究以环境大气臭氧浓度为对照,利用开顶式气室模拟大气臭氧浓度升高 $40 \text{ nL} \cdot \text{L}^{-1}$,选取 3 个推广面积较大的大豆品种绥农 4 号、绥农 8 号和东生 1 号,研究在高臭氧浓度下不同大豆品种产量形成和品质的差异。结果表明:臭氧浓度升高对大豆产量形成具有明显的负作用,3 个大豆品种的产量平均降低 33%。不同大豆品种产量对臭氧浓度升高的响应存在明显差异,产量降低幅度:绥农 4 号 (-41%) > 东生 1 号 (-36%) > 绥农 8 号 (-23%)。利用逐步回归法分析发现大气臭氧浓度升高条件下大豆籽粒大小(x_1)和单株总荚数(x_2)变化可以用于估计大豆产量变化,两者与大豆产量的回归方程: $y = -3.639 + 0.098x_1 - 0.285x_2$ 。此外,大气臭氧浓度升高对大豆品质产生明显影响,3 个大豆品种籽粒中蛋白质浓度均显著提高 $2.8\% \sim 4.6\%$ ($P < 0.05$),而脂肪含量则显著降低 $4.2\% \sim 7.8\%$ ($P < 0.05$)。

关键词:臭氧;大豆;产量;品质;气候变化

Effects of Elevated Surface O_3 on Soybean Yield Formation and Seed Quality in Different Northeast Cultivars

WANG Chun-yu^{1,2,3}, XIE Zhi-huang², LI Yan-sheng^{1,2}, JIN Jian², WANG Guang-hua², FANG Rui²,
FAN Guo-quan⁴, LIU Xiao-bing²

(1. Institute of Environment and Sustainable Development in Agriculture, Chinese Academy of Agricultural Sciences/Key Laboratory of Agricultural Environment, Ministry of Agriculture, Beijing 100081, China; 2. Key Laboratory of Mollisols Agroecology/Northeast Institute of Geography and Agroecology, Chinese Academy of Sciences, Harbin 150081, China; 3. College of Resource and Environment, Northeast Agricultural University, Harbin 150030, China; 4. Virus-free Seedling Research Institute, Heilongjiang Academy of Agricultural Sciences/Supervision and Testing Center for Virus-free Seed Potatoes Quality, Ministry of Agriculture of the People's Republic of China, Harbin 150086, China)

Abstract: The soybean yield formation and seed quality in response to the elevated atmospheric O_3 (eO_3) were analyzed in open top chamber (OTC) simulation systems using 3 soybean cultivars as Suinong 4, Suinong 8 and Dongsheng 1. The results showed that soybean yield decreased by 33% across 3 soybean cultivars when the concentrations of atmospheric O_3 increased $40 \text{ nL} \cdot \text{L}^{-1}$. The yield response to eO_3 varied in the 3 soybean cultivars. The minimum decrease of 23% was found in Suinong 4, while the maximum of 41% was found in Suinong 8. Compared with the control, the yield components of soybean were also changed under eO_3 . The stepwise regression analysis showed that the seed size(x_1) and seed number per plant (x_2) could be used for estimating soybean yield change under eO_3 by a model of $y = -3.639 + 0.098x_1 - 0.285x_2$ ($P < 0.05$). In addition, eO_3 had pronounced influence on soybean seed quality, which caused significant increase in soybean seed protein concentration (2.8% to 4.6% , $P < 0.05$) but significantly decrease in seed oil concentration (-4.2% to -7.8% , $P < 0.05$) in the three tested cultivars.

Keywords: Ozone; Soybean; Yield; Seed quality; Climate change

近地表臭氧(O_3)对农作物生长发育具有较强的危害作用^[1-2]。随着各国工业化进程的不断进展,臭氧(O_3)已经成为主要的近地表空气污染物,近年来呈逐渐增加的趋势。地表臭氧浓度目前大约是 $40 \text{ nL} \cdot \text{L}^{-1}$,预计到 2050 年将增加 25%,而到 2100 年则会增加 60%^[3]。研究表明,臭氧浓度的持续增加将危害作物的生长,降低地上部生物量和产量,严重危害农业生产^[4-6]。东北地区作为我国主

要的粮食生产区,粮食生产过程中也受到臭氧浓度不断升高的危害,监测数据证实,东北地区部分城市作物生长季节臭氧浓度已经超过敏感作物的伤害阈值,对作物产量形成造成负面影响^[7]。

大豆是较易受到臭氧浓度升高影响作物之一^[2,8],Feng 等^[9]利用 Meta 方法分析 53 个相关臭氧浓度升高和作物产量变化研究表明,当前臭氧浓度为 $31 \sim 50 \text{ nL} \cdot \text{L}^{-1}$ 时导致大豆产量比理论值低

收稿日期:2018-12-27

基金项目:农业部农业环境重点实验室开放基金项目(20160412);国家自然科学基金(31501259)。

第一作者简介:王春雨(1994-),男,硕士,主要从事作物生理研究。E-mail:568336060@qq.com。

通讯作者:刘晓冰(1963-),男,博士,研究员,主要从事作物生理生态研究。E-mail:liuxb@iga.ac.cn。

7.7%,如果大气臭氧浓度升高到 51 ~ 75 nL·L⁻¹,大豆产量将比目前产量还要低 10%。这种结果在不同试验条件下得到证实,例如在大田条件下模拟大气臭氧浓度升高(free-air gas concentration enrichment, FACE)的研究表明,近地表大气臭氧浓度升高 23% 虽然不影响地上部营养器官 C 分配比例,但是初级净生产能力降低 17%,最终导致产量降低 20%^[10]。以开顶式气室(open top chamber, OTC)方法开展的模拟研究也得到类似结果,其中大豆减产最多可接近 60%^[11]。例如,近地表大气臭氧浓度升高到 80 nL·L⁻¹时我国黄淮海地区大豆产量可显著降低 47%^[5],大气臭氧浓度升高 40 nL·L⁻¹时东北春大豆品种东生 1 号产量则显著降低 34%^[2]。

除了引起大豆减产,臭氧浓度升高对大豆籽粒的蛋白质和脂肪含量也产生影响。例如,较极端的模拟研究结果表明,臭氧浓度升高到 490 nL·L⁻¹时大豆籽粒中蛋白质含量显著提高 21%,而脂肪含量则降低 4%^[12]。在 FACE^[13]和 OTC 模拟条件下,均有研究报道大豆籽粒脂肪含量下降,而蛋白质含量则呈升高的趋势^[5,14-16]。由于大豆品种对臭氧浓度升高的响应存在着品种差异,也有研究表明大豆籽粒中脂肪含量随着臭氧浓度的增加而增加^[15],蛋白质含量不变^[17],或者变化幅度很小^[18]。目前关于臭氧浓度升高对大豆产量和品种影响的研究较少关注不同品种差异,特别是在东北地区大豆品种都是气孔导度较高品种,更易受到臭氧浓度升高的危害^[2,19]。因此,急需分析不同大豆品种关键产量构成要素对大气臭氧浓度升高的响应差异,解析品种与臭氧互作对大豆关键品质的影响,研究结果可为选育适宜东北种植的臭氧不敏感大豆提供理论参考,对保证未来全球气候变化条件下的粮食安全有实际意义。

1 材料与方法

1.1 材料

试验选取黑龙江省推广面积较大的大豆品种 3 个,分别为东生 1 号、绥农 4 号和绥农 8 号。

1.2 试验设计

试验于中国科学院东北地理与农业生态研究所哈尔滨试验场内进行(N 45°73', E 126°61', 海拔 128 m),通过开顶式气室(open top chamber, OTC)模拟大气臭氧浓度升高。开顶式气候箱主体高 2.0 m,直径为 3.5 m,横截面为面积 10.6 m²,正八边形,正八面柱体顶端增加 45°收缩口,收缩口高为 1.0 m,用于减少外部气体对气候箱内气体的干扰,整个气候箱的体积约为 25.0 m³。气候箱框架由方形钢管与聚乙烯薄膜(透光率≥90%)构建^[2]。气室内臭氧浓度通过紫外臭氧分析仪(Model 49i-Thermo,美

国)进行实时监测,利用臭氧发生器产生臭氧并通向 OTC 内,同时利用气体流量计调节并维持 OTC 内部臭氧浓度于目标浓度范围内。在 OTC 外部架设轴流鼓风机(750 W),通过通风管道系统向 OTC 内部输入自然空气。整个通风系统可以保证 OTC 内部气体每分钟与外界交换一次从而保证气室内温度、CO₂ 浓度等指标基本与自然环境一致。

试验设置 2 个处理:自然空气(aO₃)和自然空气添加 40 nL·L⁻¹臭氧(eO₃),每个处理设置 4 个 OTC 重复。2016 年 6 月 17 日(大豆始花期)开始进行臭氧处理,9 月 17 日停止臭氧处理直到大豆成熟。臭氧处理控制在 8 h(北京时间 9:00 - 17:00),阴雨天则不进行臭氧处理。

供试土壤为典型的黑土,试验采取盆栽方式,黑土与洗净的河沙按 2:3 比例均匀混合 4 kg,装入高 40 cm,直径 11 cm 的 PVC 桶,每盆施入基础肥料:0.87 g CO(NH₂)₂、0.75 g KH₂PO₄、0.60 g CaCl₂·2H₂O 和 0.20 g MgSO₄·7H₂O。于 2016 年 5 月 10 日播种,每盆播种 6 粒,出苗 7 d 后每盆保留长势一致幼苗 2 株。整个生育期内对所有盆栽试验进行精细一致的管理方式。

1.3 测定项目与方法

1.3.1 产量及产量组成指标测定 待大豆成熟后,对所有处理进行取样、测产。分别测定不同处理下大豆一粒荚数、二粒荚数、三粒荚数、四粒荚数和单株粒数。大豆成熟后植株置于鼓风干燥箱中,105℃ 杀青 30 min,再 70℃ 烘干 80 h,脱粒称重计算籽粒产量和单个籽粒大小等指标。运用二因素方差分析(Two-way ANOVA)计算 P = 0.05 下最小显著性差异 LSD_{0.05}值,并分析相同处理下不同大豆品种间产量构成要素的差异。运用相关分析的方法(bivariate correlations)确定在大气臭氧浓度升高条件下,与大豆产量增加显著相关的关键产量构成要素。以大气臭氧浓度升高后大豆产量增加值为因变量,关键产量构成要素的增加值为自变量,利用逐步回归法(stepwise regression)建立大气臭氧浓度升高后大豆产量增加与关键产量构成要素改变的回归关系。

1.3.2 蛋白质含量的测定 大豆籽粒烘干样品用球磨仪磨细,放到密封袋中保存,用于测定总蛋白质和脂肪浓度。蛋白质浓度采用杜马斯燃烧定氮法,使用元素分析仪 Elementar Vario(elementar analysensysteme GmbH E-III, Germany)确定 N 浓度,再乘以转换系数 6.25 即可得到大豆籽粒中粗蛋白浓度。

1.3.3 脂肪含量的测定 采用索氏提取法测定大豆籽粒脂肪含量,精确称取粉碎干样 0.500 g 放入滤纸斗中密封后称重,再将包有样品的滤纸包放入

装有乙醚的索氏提取器中提取 24 h,借蒸发除去溶剂后称量滤纸包重量,通过差重法计算样品中脂肪的浓度。

1.4 数据分析

利用 Excel 2010 和 SPSS 16.0 进行数据统计分析,获得平均值、方差和标准误等描述性统计数据。

2 结果与分析

2.1 对大豆单株产量、籽粒大小和单株粒数的影响

臭氧浓度升高显著降低大豆产量($P < 0.05$),3 个品种大豆产量平均降低 33% (表 1)。同时,在高

臭氧浓度条件下大豆产量的形成受到品种与臭氧浓度互作的影响($P < 0.05$),不同大豆品种产量降低幅度存在差异:绥农 4 号(−41%) > 东生 1 号(−36%) > 绥农 8 号(−23%)。臭氧浓度升高将降低大豆单株粒数和籽粒大小。与对照相比,臭氧浓度升高条件下绥农 4 号、东生 1 号和绥农 8 号单株籽粒数分别显著降低 24%、22% 和 14%。同时,绥农 4 号籽粒大小显著降低 41%,东生 1 号大豆籽粒大小显著降低 37%,绥农 8 号大豆籽粒大小显著降低 23%。

表 1 臭氧浓度升高对大豆单株产量、籽粒大小和单株粒数的影响

Table 1 The effect of elevated atmospheric O₃ concentration on soybean seed yield, seed size and the numbers of seed per plant

品种 Variety	单株产量 Seed yield per plant/g		百粒重 100-seed weight/g		单株粒数 Seed numbers per plant	
	aO ₃	eO ₃	aO ₃	eO ₃	aO ₃	eO ₃
东生 1 号 (Dongsheng 1)	13.14 ± 0.68	8.34 ± 0.37 *	165.55 ± 4.87	134.48 ± 4.07 *	79.33 ± 2.49	62.00 ± 2.02 *
绥农 4 号 (Suinong 4)	13.17 ± 0.61	7.74 ± 0.10 *	170.12 ± 6.64	133.09 ± 5.17 *	77.50 ± 1.61	58.33 ± 2.13 *
绥农 8 号 (Suinong 8)	12.82 ± 0.40	9.93 ± 0.18 *	154.57 ± 1.94	139.92 ± 3.37 *	83.00 ± 2.52	71.00 ± 1.04 *
臭氧 O ₃	<0.001		<0.001		<0.001	
品种 Cultivar	0.088		0.641		0.002	
互作 O ₃ × Cultivar	0.017		0.077		0.228	

* 代表同列数值间差异显著($P = 0.05$)。下同。
* indicates significant difference (t-test) between the same column($P = 0.05$). The same below.

2.2 对大豆产量构成要素的影响

臭氧浓度升高造成大豆总荚数下降,其中东生 1 号总荚数降低 21%,绥农 8 号总荚数降低 20%,绥农 4 号总荚数降低 16% (表 2)。臭氧浓度升高条件下不同级别荚数变化有差异:大豆一粒荚数和四粒荚数对大气臭氧浓度升高响应不敏感,不同品种大豆一粒荚数在两种大气臭氧浓度下无差异($P > 0.05$),而二粒荚数和三粒荚数则表现出明显降低

趋势。其中,东生 1 号二粒荚数和三粒荚数在高臭氧浓度条件下分别降低 21% 和 23%;绥农 4 号二粒荚数和三粒荚数在高臭氧浓度条件下分别降低 19% 和 30%;绥农 8 号二粒荚数和三粒荚数在臭氧浓度升高条件下均显著降低 21%。此外,臭氧浓度升高会增加大豆瘪荚数,不同品种间存在差异。绥农 4 号和绥农 8 号在高臭氧浓度条件下瘪荚数增加 200% ~ 300%,而东生 1 号瘪荚数没有显著变化。

表 2 臭氧浓度升高对不同大豆品种产量构成要素的影响

Table 2 The influence of elevated atmospheric O₃ concentration on soybean yield components of different cultivars

	东生 1 号 Dongsheng 1		绥农 4 号 Suinong 4		绥农 8 号 Suinong 8		双因素方差分析 (Two-way ANOVA)		
	aO ₃	eO ₃	aO ₃	eO ₃	aO ₃	eO ₃	臭氧 O ₃	品种 Cultivar	互作 O ₃ × Cultivar
一粒荚数 One-seed pods	4.33 ± 0.17	3.67 ± 0.33	5.33 ± 0.73	7.67 ± 1.42	3.17 ± 1.17	1.17 ± 0.33	0.873	<0.001	0.062
二粒荚数 Two-seed pods	12.50 ± 0.58	9.83 ± 0.67 *	13.67 ± 0.67	11.00 ± 0.58 *	14.17 ± 0.60	11.17 ± 0.44 *	<0.001	0.062	0.949
三粒荚数 Three-seed pods	14.67 ± 0.33	11.33 ± 0.60 *	13.17 ± 0.60	9.33 ± 0.33 *	15.83 ± 0.44 *	12.50 ± 0.76 *	<0.001	<0.001	0.866
四粒荚数 Four-seed pods	1.50 ± 0.76	1.17 ± 0.60	1.33 ± 0.44	0.17 ± 0.17	1.00 ± 0.00	2.50 ± 1.04	1.000	0.297	0.125
瘪荚数 Shrunken pods	3.33 ± 1.20	4.00 ± 1.26	1.50 ± 0.29	5.33 ± 0.67 *	0.33 ± 0.33	3.67 ± 0.83 *	0.003	0.151	0.179
总荚数 Total pods	33.00 ± 1.73	26.00 ± 2.08	33.50 ± 2.31	28.17 ± 2.46	34.17 ± 2.05	27.33 ± 2.32	0.004	0.793	0.915

2.3 大豆产量构成要素与产量增加相关分析

利用相关分析发现,不同大豆品种产量与二粒荚数、三粒荚数、瘪荚数、总荚数、单株粒数和籽粒大小显著相关(表3),同时把这些指标定义为主要产量构成要素。再利用逐步回归分析方法,分析臭氧浓度升高条件下不同大豆产量变化与主要产量

构成要素变化之间的回归关系。结果表明:大气臭氧浓度升高后大豆产量变化(y)与大豆籽粒大小(x_1)和单株总荚数(x_2)变化可以建立最优回归关系,回归方程 $y = -3.639 + 0.098x_1 - 0.285x_2$,其中 $R^2 = 0.979$ (表4)。

表3 大豆产量形成与产量构成要素相关系数
Table 3 The correlation between soybean yield and yield components

	一粒荚数 One-seed pods	二粒荚数 Two-seed pods	三粒荚 Three-seed pods	四粒荚数 Four-seed pods	瘪荚 Shrunken pods	总荚数 Total pods	单株粒数 Numbers of seed per plant	籽粒大小 Seed size
单株产量 Seed yield per plant	-0.142	0.74**	0.824**	0.267	-0.63**	0.637**	0.933**	0.907**
一粒荚数 One-seed pods		-0.021	-0.364	-0.459	0.229	0.001	-0.244	-0.028
二粒荚数 Two-seed pods			0.582*	-0.222	-0.767**	0.532*	0.689**	0.678**
三粒荚 Three-seed pods				0.217	-0.560*	0.58*	0.914**	0.587*
四粒荚数 Four-seed pods					-0.058	-0.225	0.376	0.100
瘪荚 Shrunken pods						-0.439	-0.654**	-0.502*
总荚数 Total pods							0.53*	0.657**
单株粒数 Seed number per plant								0.696**

表4 O ₃ 浓度升高时大豆关键产量性状变化与产量变化逐步回归分析 Table 4 Stepwise regression between the change of major yield components and the change of soybean yield under elevated O ₃				
	标准化系数 Beta value	t 检验 t test	P 值 P value	R ²
方程常数 Regression efficiency	-3.639	-4.336	0.005	-
单粒大小 Seed size	0.098	9.281	<0.001	0.979
总荚数 Pod number per plant	-0.285	-2.833	0.030	-

2.4 对大豆籽粒蛋白质浓度和脂肪浓度的影响

臭氧浓度升高显著影响大豆籽粒品质(表5),籽粒中蛋白质浓度有所增加,不同品种的升高幅度不同。与对照相比,臭氧浓度条件下东生1号大豆籽粒中蛋白质浓度升高4.6%,绥农4号大豆籽粒中蛋白质浓度升高3.9%,绥农8号大豆籽粒中蛋白质浓度则升高2.8%。而大豆籽粒中脂肪浓度对大气臭氧浓度升高的响应则与蛋白质相反,表现出下降趋势。不同品种间响应存在明显差异,在高臭氧浓度条件下,大豆籽粒中脂肪浓度降幅最小的是绥农4号,籽粒脂肪浓度降低了4.2%;其次是东生1号,降低了5.2%;降幅最大的是绥农8号,大豆籽粒中脂肪浓度降低了7.8%。

表 5 臭氧浓度升高对大豆籽粒中蛋白质和脂肪含量的影响

Table 5 The effect of elevated atmospheric O₃ concentration on soybean seed protein and oil concentrations

	蛋白质 Protein/%		脂肪 Fat/%	
	aO ₃	eO ₃	aO ₃	eO ₃
东生 1 号 Dongsheng 1	39.31 ± 0.15	41.13 ± 0.36 *	21.62 ± 0.30	20.50 ± 0.23 *
绥农 4 号 Suinong 4	39.64 ± 0.13	41.17 ± 0.19 *	21.48 ± 0.23	20.57 ± 0.90 *
绥农 8 号 Suinong 8	40.92 ± 0.13	42.08 ± 0.09 *	21.12 ± 0.18	19.47 ± 0.33 *
臭氧 O ₃	< 0.001		< 0.001	
品种 Cultivar	< 0.001		0.012	
互作 O ₃ × Cultivar	0.283		0.322	

3 讨 论

臭氧浓度升高会对大豆的生产带来危害,所以不同国家与地区的研究人员利用 OTC 和 FACE 试验模拟研究了臭氧浓度升高对大豆的产量和生理指标的影响^[20-22]。较早研究证明当臭氧浓度升高到 60 ~ 70 nL · L⁻¹ 后,大豆产量至少降低 16% 以上^[10, 20]。本研究中臭氧浓度升高到 58 nL · L⁻¹, 3 个不同大豆品种的产量平均下降 33%, 这种结果与较早研究发现臭氧浓度升高到 58 nL · L⁻¹ 后大豆产量显著降低 34% 的结果相吻合^[2]。本研究发现不同大豆品种对臭氧浓度升高响应的敏感程度具有差异,臭氧与品种互作对产量形成的影响达到显著水平($P < 0.05$),所以选择对臭氧浓度升高响应敏感度低的大豆品种是保证大豆产量的重要策略^[21],但相关的评价指标还需要细化研究。

本研究初步探讨了大豆产量构成要素对大气臭氧浓度升高的响应,结果表明臭氧浓度升高会显著降低大豆粒荚数和三粒荚数,引起单株粒数的下降(14% ~ 24%),最终导致产量的降低。同时 Jaoudé 等^[20]认为大气臭氧浓度升高条件下大豆产量的下降主要是因为结荚数量和籽粒大小的降低所引起的。而造成这种结果的主要原因是臭氧浓度升高后大豆对 C 的有效利用能力降低,导致大豆植株的结荚能力下降,同时也会导致籽粒大小的降低^[19]。虽然有研究表明当臭氧浓度升高 1.2 倍时,大豆的结荚数会升高,从而抵消籽粒变小引起的产量下降^[23],但是本研究发现臭氧浓度升高条件下,大豆单株荚数和籽粒大小之间呈正相关关系($r^2 = 0.657$)。综上,大豆单株总荚数与籽粒大小在预测大豆产量对大气臭氧浓度升高中起着重要的作用,但在未来研究过程中需要增加供试大豆品种数量,进一步确定其与产量变化之间的数量关系。

大气臭氧浓度升高对大豆 C 同化能力的负面作用^[10, 21, 24],不仅影响大豆产量的形成,还会对大

豆籽粒营养成分的积累产生影响。例如,大豆籽粒脂肪的合成主要涉及到大豆植株体内的 C 代谢,所以从理论上推断大气臭氧浓度升高条件下大豆籽粒中脂肪含量将会降低,本研究也证实了这种推断,这与黄辉等^[25]研究结果一致。另一方面,大豆在高臭氧浓度条件下籽粒中的蛋白质含量会显著增加。这可能是因植物主要靠蛋白质和游离氨基酸来抵抗臭氧胁迫,在高臭氧条件下作物籽粒中蛋白质含量升高的结果在小麦和水稻中也有类似报道^[4, 6]。然而,也有研究认为大豆籽粒中蛋白质含量对大气臭氧浓度升高的响应结果并不是一致的,这表明臭氧浓度升高对植物 N 代谢的影响非常复杂,很可能涉及到 N 库大小、营养生长期 N 的利用等决定最终籽粒灌浆过程中 N 有效性的关键过程^[24],但是相关内在机制还鲜有研究报道。

4 结 论

臭氧浓度升高(40 nL · L⁻¹)会导致大豆产量平均降低 33%,大豆产量的降低主要与大豆单株粒数和单粒重大小下降显著相关($P < 0.05$)。臭氧浓度升高会改变大豆籽粒营养品质,表现为蛋白质浓度升高 3.77%,而脂肪含量显著降低 5.73%。大豆单株产量对大气臭氧浓度升高的响应存在品种间差异,品种与臭氧互作用对单株产量影响达到显著水平($P < 0.05$)。

参考文献

[1] 杨连新,王余龙,石广跃,等. 近地层高臭氧浓度对水稻生长发育影响研究进展[J]. 应用生态学报,2008,19(4):901-910. (Yang L X, Wang Y L, Shi G Y, et al. Responses of rice growth and development to elevated near-surface layer ozoneconcentration: A review[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2008, 19(4): 901-910.)

[2] 张巍巍,王光华,王美玉,等. 东北春大豆品种东生 1 号对臭氧胁迫的响应[J]. 环境科学,2014,35(4):1473-1478. (Zhang W W, Wang G H, Wang M Y, et al. Responses of soybean cultivar

- Dongsheng 1 to different O₃ concentrations in northeast China[J]. Environmental Science, 2014, 35(4): 1473-1478.)
- [3] Sitch S, Cox P M, Collins W J, et al. Indirect radiative forcing of climate change through ozone effects on the land-carbon sink[J]. Nature, 2007, 448: 791-794.
- [4] 郭建平, 王春乙, 温民, 等. 大气中 O₃ 浓度变化对水稻影响的试验研究[J]. 作物学报, 2001, 27(6): 822-826. (Guo J P, Wang C Y, Wen M, et al. The experimental study on the impact of atmospheric O₃ variation on rice[J]. Acta Agronomica Sinica, 2001, 27(6): 822-826.)
- [5] 李彩虹, 李勇, 乌云塔娜, 等. 高浓度臭氧对大豆生长发育及产量的影响[J]. 应用生态学报, 2010, 21(9): 2347-2352. (Li C H, Li Y, Wuyun T N, et al. Effects of high concentration ozone on soybean growth and grain yield[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2010, 21(9): 2347-2352.)
- [6] 郑飞翔, 王效科, 侯培强, 等. 臭氧胁迫对水稻生长以及 C、N、S 元素分配的影响[J]. 生态学报, 2011, 31(6): 1479-1486. (Zheng F X, Wang X K, Hou P Q, et al. Influences of elevated ozone on growth and C, N, S allocations of rice[J]. Acta Ecologica Sinica, 2011, 31(6): 1479-1486.)
- [7] 徐晓斌, 林伟立. 卫星观测的中国地区 1979-2005 年对流层臭氧变化趋势[J]. 气候变化研究进展, 2010, 6(2): 100-105. (Xu X B, L W L. 1979-2005 trends of tropospheric ozone over China based on the satellite data[J]. Advances in Climate Change Research, 2010, 6(2): 100-105.)
- [8] Morgan P B, Ainsworth E A, Long S P. How does elevated ozone impact soybean? A meta-analysis of photosynthesis, growth and yield[J]. Plant Cell and Environment, 2003, 26: 1317-1328.
- [9] Feng Z, Kobayashi K. Assessing the impacts of current and future concentrations of surface ozone on crop yield with meta-analysis[J]. Atmospheric Environment, 2009, 43(8): 1510-1519.
- [10] Morgan P B, Mies T A, Bollero G A, et al. Season-long elevation of ozone concentration to projected 2050 levels under fully open-air conditions substantially decreases the growth and production of soybean[J]. New Phytologist, 2006, 170(2): 333-343.
- [11] Wahid A, Milne E, Shamsi S R A, et al. Effects of oxidants on soybean growth and yield in the Pakistan Punjab[J]. Environmental Pollution, 2001, 113(3): 271-280.
- [12] Mills G, Harmens H. Ozone pollution: A hidden threat to food security[J]. NERC/Centre for Ecology & Hydrology, 2013: 16-17.
- [13] Howell R K, Rose L P, Leffell R C. Field testing soybeans for residual effects of air-pollution and seed size on crop yield[J]. Journal of Environmental Quality, 1980, 9(1): 66-68.
- [14] Kress L W, Miller J E. Impact of ozone on soybean yield[J]. Journal of Environmental Quality, 1983, 12(2): 276-281.
- [15] Grunwald C, Endress A G. Oil, fatty-acid, and protein-content of seeds harvested from soybeans exposed to O₃ and or SO₂[J]. Botanical Gazette, 1988, 149(3): 283-288.
- [16] 白月明, 王春乙, 温民. 大豆对臭氧、二氧化碳及其复合效应的响应[J]. 应用生态学报, 2005, 16(3): 545-549. (Bai M Y, Wang C Y, Wen M. Responses of soybean to O₃, CO₂ and their combination[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2005, 16(3): 545-549.)
- [17] Heagle A S, Miller J E, Pursley W A. Influence of ozone stress on soybean response to carbon dioxide enrichment: III. Yield and seed quality[J]. Crop Science, 1998, 38(1): 128-134.
- [18] Mulchi C L, Lee E, Tuthill K, et al. Influence of ozone stress on growth processes, yields and grain quality characteristics among soybean cultivars[J]. Environmental Pollution, 1988, 53(1-4): 151-169.
- [19] Zhang W, Feng Z, Wang X, et al. Quantification of ozone exposure- and stomatal uptake-yield response relationships for soybean in northeast China[J]. Science of the Total Environment, 2017, 599-600: 710-720.
- [20] Ashmore M R. Assessing the future global impacts of ozone on vegetation[J]. Plant Cell and Environment, 2005, 28(8): 949-964.
- [21] Singh E, Tiwari S, Agrawal M. Variability in antioxidant and metabolite levels, growth and yield of two soybean varieties: An assessment of anticipated yield losses under projected elevation of ozone[J]. Agriculture Ecosystems & Environment, 2010, 135(3): 168-177.
- [22] Jaoude M B, Katerji N, Mastrorilli M, et al. Analysis of the ozone effect on soybean in the Mediterranean region II. The consequences on growth, yield and water use efficiency[J]. European Journal of Agronomy, 2008, 28(4): 519-525.
- [23] Christ M M, Ainsworth E A, Nelson R, et al. Anticipated yield loss in field-grown soybean under elevated ozone can be avoided at the expense of leaf growth during early reproductive growth stages in favourable environmental conditions[J]. Journal of Experimental Botany, 2006, 57(10): 2267-2275.
- [24] Singh E, Tiwari S, Agrawal M. Effects of elevated ozone on photosynthesis and stomatal conductance of two soybean varieties: A case study to assess impacts of one component of predicted global climate change[J]. Plant Biology, 2009, 11(s1): 101-108.
- [25] 黄辉, 王春乙, 白月明, 等. 大气中 O₃ 和 CO₂ 增加对大豆复合影响的试验研究[J]. 大气科学, 2004, 28(4): 601-612. (Huang H, Wang C Y, Bai Y M, et al. A diagnostic experiment study of the composite influence of increasing O₃ and CO₂ concentration on soybean[J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences, 2004, 28(4): 601-612.)