臭氧和增温对醉蝶花(*Cleome spinosa*)氧化伤害及抗氧化酶活的影响

秦子晴[1,2] 徐 胜[2,3,4*] 齐淑艳[1] 陈 玮[2,3,4,5] 何兴元[2,3,4,5] 王义婧[2,4]

([1]沈阳大学, 沈阳 110044; [2]中国科学院沈阳应用生态研究所, 沈阳 110016; [3]中国科学院森林生态与管理重点实验室, 沈阳 110016; [4]中国科学院大学, 北京 100049; [5]中国科学院沈阳树木园, 沈阳 110016)

摘 要 采用开顶箱气室(OTCs)研究不同臭氧浓度(80和160 nmol·mol^{-1})及增温(比对照的大气温度增加2 ℃)对园林观赏植物醉蝶花(*Cleome spinosa*)氧化及抗氧化特性的影响。结果表明:(1)经过160 nmol·mol^{-1}高浓度臭氧急性熏蒸7 d后,醉蝶花叶片出现了明显的伤害症状,叶片表面呈现较大面积的漂白褪绿斑块,其他处理下无明显可见伤害症状;(2)与对照相比,高浓度臭氧(160 nmol·mol^{-1})处理下醉蝶花叶片丙二醛(MDA)含量、相对电导率、过氧化物酶(POD)活性、超氧化物歧化酶(SOD)活性均分别显著升高175.7%、259.9%、111.4%、54.3%(P<0.05),而超氧自由基($O_2^{\cdot-}$)产生速率显著降低67%(P<0.05);臭氧浓度80 nmol·mol^{-1}处理下,MDA含量显著升高65.5%(P<0.05),CAT活性显著下降65.9%(P<0.05),说明醉蝶花在臭氧浓度80 nmol·mol^{-1}左右时具有较高的臭氧耐受性,而臭氧浓度160 nmol·mol^{-1}左右时植物叶片遭受臭氧胁迫,主要通过增强POD和SOD等抗氧化酶活性来抵御氧化伤害;(3)单独增温导致醉蝶花叶片的MDA含量和相对电导率显著升高62.1%和58.1%(P<0.05),但$O_2^{\cdot-}$产生速率和CAT活性显著低于对照(P<0.05),分别降低了28.8%和71.1%,POD和SOD活性与对照相比差别不大,可能是增温使植物自身代谢增强产生这种现象;(4)与单独臭氧处理相比(80 nmol·mol^{-1}),臭氧(80 nmol·mol^{-1})增温复合处理下植物叶片CAT、POD、SOD均分别显著升高141.7%、72.1%、107.9%(P<0.05);$O_2^{\cdot-}$产生速率显著下降51%(P<0.05),说明臭氧和增温复合处理使醉蝶花遭受的臭氧胁迫加剧。该研究结果可为我国应对高浓度臭氧污染的突发急性事件下的园林及城市绿化植物选择和栽培提供科学依据。

关键词 OTC模拟; 高浓度臭氧; 增温; 醉蝶花; 抗氧化酶活性

Effects of elevated O_3 concentration and warming on oxidative jury and antioxidant enzyme activities in leaves of *Cleome spinosa*.

QIN Zi-qing[1,2], XU Sheng[2,3,4*], QI Shu-yan[1], CHEN Wei[2,3,4,5], HE Xing-yuan[2,3,4,5], WANG Yi-jing[2,4] ([1]*Shenyang University*, *Shenyang* 110044, *China*; [2]*Institute of Applied Ecology*, *Chinese Academy of Sciences*, *Shenyang* 110016, *China*; [3]*Key Laboratory of Forest Ecology and Management*, *Chinese Academy of Sciences*, *Shenyang* 110016, *China*; [4]*University of Chinese Academy of Sciences*, *Beijing* 100049, *China*; [5]*Shengyang Arboretum*, *Chinese Academy of Sciences*, *Shenyang* 110016, *China*).

Abstract: An experiment was conducted to examine the oxidation and anti-oxidizing response in leaves of *Cleome spinosa*, a garden ornamental plant, exposed to different ozone concentrations (80 and 160 nmol·mol^{-1}) and increasing temperature treatments (2 ℃ higher than control) in open-top chambers (OTCs). The results showed that: (1) A visible leaf injury was observed after seven days with gas fumigation by elevated O_3 (160 nmol·mol^{-1}), and a large number of bleaching and chlorotic patches appeared on the leaves, whereas no visible injury was observed

国家自然科学基金项目(41675153,31870458,31270518,31170573)和国家重点研发项目(2016YFC0500306)资助。
收稿日期: 2019-06-05 接受日期: 2019-11-25
*通讯作者 E-mail: shengxu703@126.com

under 80 nmol · mol^{-1}. (2) Under high O_3 concentration (160 nmol · mol^{-1}), malondialdehyde content (MDA), relative conductivity, peroxidase (POD) activity and superoxide dismutase (SOD) activity of *C. spinosa* leaves significantly increased by 175.7%, 259.9%, 111.4%, 54.3%, respectively (P<0.05), while superoxide radical ($O_2^{\cdot-}$) production rate was significantly reduced by 67% (P<0.05). Under the treatment of ozone concentration of 80 nmol · mol^{-1}, MDA content increased significantly by 65.5% (P<0.05), catalase (CAT) activity decreased significantly by 65.9% (P<0.05), indicating that *C. spinosa* had high O_3 tolerance ability at the concentration of 80 nmol · mol^{-1} O_3. Under the O_3 concentration of 160 nmol · mol^{-1} O_3, plant leaves suffered O_3 stress, and they resisted oxidative damage mainly by increasing antioxidant activity (POD and SOD). (3) Under single increasing temperature (IT), MDA content and relative conductivity of *C. spinosa* leaves increased significantly by 62.1% and 58.1% (P<0.05) respectively, but the $O_2^{\cdot-}$ production rate and CAT activity were 28.8% and 71.1% lower than the control respectively (both P<0.05), POD and SOD activities were not significantly different from the control, which may be attributed to enhanced plant metabolism due to higher temperature. (4) Compared with 80 nmol · mol^{-1} O_3 alone, CAT, POD and SOD activities under the combination of increasing temperature and elevated O_3 (80 nmol · mol^{-1}) significantly increased by 141.7%, 72.1% and 107.9%, respectively (P < 0.05); $O_2^{\cdot-}$ production rate significantly decreased by 51.0% (P<0.05), indicating that the combined treatment of O_3 and increasing temperature exacerbated the O_3 stress suffered by *C. spinosa*. These findings will provide a scientific basis for the selection and cultivation of plant species in gardens and urban greening in China under the sudden acute events of high-concentration ozone pollution.

Key words: OTC simulation; elevated O_3 concentration; increasing temperature; *Cleome spinosa*; antioxidant enzyme activity.

近年来,随着工业化进程的加快,全球气候变化早已成为国际社会广泛关注的环境问题之一(葛全胜等,2014),其中影响最大的是全球气候变暖以及光化学污染(王兆夺等,2017; Andersen *et al.*, 2017)。由温室气体引发的全球气候变暖威胁到动植物物种的生存,使生物多样性不断降低(IPCC, 2013)。IPCC 的《报告》认为,如果不对当下的气候变化速度加以遏制,未来升温 1.5 ℃将在 2030 年达到,等不到 2100 年(蔡金鑫,2018; He *et al.*, 2019),这也意味着未来全球变暖会加速(Roberts *et al.*, 2015),升温趋势也会更明显(Marotzke *et al.*, 2015)。由光化学污染引发的臭氧污染带来的危害也愈渐突出(Xue *et al.*, 2019),全球臭氧浓度以每年 0.5%~2.0%的速度持续增加,年平均值已经达到 35~40 nmol · mol^{-1},臭氧浓度在 2015—2050 年可能提高 20%~25%(IPCC, 2013)。

气候变化的发展趋势日益突出,全球气候变暖所产生的一系列潜在影响已逐渐显现(徐胜等,2017; Nadal *et al.*, 2018)。有研究表明,温度是最重要的气候因素之一(Silvaa *et al.*, 2019),能够调节生态系统能量流动和物质循环,会对几乎所有的生物学过程产生影响(沈振西等,2015),增温一方面会直接影响植物的光合作用和生长周期,进而对其物候期产生影响(Klanderud *et al.*, 2005);另一方面增温会导致土壤理化性质的改变,间接影响土壤微生物的种群结构,使植物生长、生物量以及产能发生变化(Walther *et al.*, 2005; 陈翔等,2016)。作为近地层最主要的大气二次污染物之一,臭氧污染会对人类健康、森林生态以及作物产量和质量产生极大的危害(徐胜等,2009; 黄益宗等,2013; 冯兆忠等,2018)。臭氧影响植物的途径有两个,一是臭氧与植物组织直接接触作用;二是通过气孔进入植物体内诱导产生过氧化氢(H_2O_2)、超氧自由基($O_2^{\cdot-}$)、羟基(· OH)等活性氧物质(AOS)(列淦文等,2014)。这些活性氧物质会使植物膜脂发生过氧化反应,导致膜系统被破坏,进而影响植物的正常生理功能。因此,通过增温臭氧模拟研究全球气候变化对植物的影响,对研究其生长发育和未来的开发与利用具有重要意义。

目前,关于大气增温和臭氧单独作用对植物影响的研究大多集中在农作物和木本植物(Dong *et al.*, 2011; 熊冬兰等,2017; 杨喜盟等,2018),增温和臭氧处理对草本植物影响的研究主要集中在生长发育以及物候等方面(潘莹,2014),对生理生态响应方面研究较少,对气温升高和臭氧污染两种气候因素的复合影响也多集中于树木和农作物,对草本

植物研究较少(赵天宏等,2003; De Boeck *et al.*, 2007; Rinnan *et al.*, 2007)。

醉蝶花(*Cleome spinosa*)是近年来我国普遍培育种植的芳香类草本植物(肖宜安,2001),其叶片为掌状复叶,花瓣轻盈飘逸,盛开时似蝴蝶飞舞,花色艳丽,具有较高的观赏价值,耐干旱贫瘠,适应性强,易于种植(中国植物志,2017)。但是,这类具有挥发性功能的芳香类植物极易受到环境的影响(王义婧等,2018),特别是北方对气温的影响更为敏感。这类植物对气温升高和臭氧污染日益严重的双重因素的影响下其逆境适应性及其规律或机理我们还不清楚。因此,本研究采用开顶式气箱模拟大气增温和臭氧熏蒸的方法来测定该处理下醉蝶花叶片的抗逆生理指标,从而揭示其对增温和臭氧,尤其是二者复合作用的生理生态响应,为该植物的引种、栽培特别是在气候暖化及大气臭氧污染情景下植物的栽培利用方面提供科学依据。

1 试验材料与方法

1.1 材料与种植

试验采用健康一致的当年生醉蝶花小苗,平均株高30 cm,统一移栽到高25 cm、直径20 cm的花盆中,于温室内培养,土壤基质比例为山皮土∶草炭土∶沙=2∶1∶1,植株培养60天后选取长势一致的盆栽醉蝶花苗置于开顶箱,适应3天后开始臭氧和增温试验。

1.2 试验设计

试验在OTCs(直径4 m,高3 m,玻璃室壁的正八边形)内进行,OTCs内设有臭氧发生器、臭氧传感器、陶瓷加热器、温湿度传感器以及数据分析和自动控制系统。本试验共设置5个处理,分别为:OTC对照(CK,臭氧浓度约40 nmol · mol^{-1}),EO-1(臭氧浓度80 nmol · mol^{-1}),EO-2(臭氧浓度160 nmol · mol^{-1}),IT(增温,较外界温度高2 ℃),IT+EO-1(臭氧增温复合)。每个处理3盆,分别放入OTC内进行持续臭氧和增温熏蒸,期间正常供水,保持土壤含水率在75%~80%,处理7 d(时间为08:00—17:00)后进行取样:随机取同一叶位的叶子数片,避开叶脉取叶子中部做试验测定用,每个处理每盆植物做3次重复。

1.3 测定指标与方法

可见伤害症状:臭氧熏蒸结束时,根据臭氧伤害评估标准来鉴定(赵福庚等,2004);丙二醛(MDA)含量采用硫代巴比妥酸法(Hodges *et al.*, 1999)进行测定;相对电导率:采用DDS-11A数显相对电导率仪进行测定;超氧自由基($O_2^{\cdot-}$)产生速率采用盐酸羟胺法测定(高俊凤,2006);过氧化氢酶(CAT)活性采用紫外分光光度法(西北农业大学,1986)进行测定;过氧化物酶(POD)活性采用愈创木酚法(李合生等,2005)进行测定;超氧化物歧化酶(SOD)活性采用氮蓝四唑法测定(Bortolin *et al.*, 2014)。

1.4 数据处理与分析

采用Excel 2007和SPSS 18.0软件进行数据统计分析,利用单因素方差分析法(one-way ANOVA)的LSD法进行差异显著性检验(显著性水平设为0.05),用Origin 9.0软件作图,文中数据为平均值±标准差。

2 结果与分析

2.1 高浓度臭氧对醉蝶花叶片可见伤害的影响

臭氧浓度80 nmol · mol^{-1}处理下醉蝶花叶片未出现明显的伤害症状;臭氧浓度160 nmol · mol^{-1}处理下的醉蝶花在第3天时出现明显的伤害症状,叶片局部出现漂白褪色斑点,随着处理时间的增长,这种伤害症状不断扩展,到处理第7天时,伤害症状已扩展至整个叶片,受害的叶片多集中在植物上部,有些老叶已枯萎凋落。从图1可见,与对照相比,高浓度臭氧(160 nmol · mol^{-1})处理下新叶生长较少,并且叶片大小也较对照小的多。结果表明高浓度臭氧(160 nmol · mol^{-1})不仅使植物叶片伤害加剧,也加速了叶片的衰老和脱落,抑制了植物的正常生长。

2.2 高浓度臭氧和增温对醉蝶花氧化胁迫的影响

如图2A所示,处理7 d后,臭氧浓度80和160 nmol · mol^{-1}处理后的醉蝶花叶片,其MDA含量较对照均显著升高了65.5%($P<0.05$)和175.7%($P<0.05$);与对照相比,增温处理组的MDA含量显著升高62.1%($P<0.05$);与臭氧浓80 nmol · mol^{-1}单因子处理相比,增温臭氧复合处理也显著升高了47.8%($P<0.05$)。

如图2B所示,处理7 d后,臭氧浓度80和160 nmol · mol^{-1}的相对电导率与对照相比均升高,且160 nmol · mol^{-1}显著升高了259.9%($P<0.05$);增温处理组与对照相比显著升高58.1%($P<0.05$);与臭氧浓度80 nmol · mol^{-1}单因子处理相比,增温臭氧复合处理的相对电导率下降,但差异不显著。

由图2C可知,与对照相比,臭氧浓度为80和



图 1 高浓度臭氧处理 7 d 时醉蝶花叶片的可见伤害症状
Fig.1 Visible injury symptoms in *Cleome spinosa* leaves exposed to elevated O_3 for 7 days

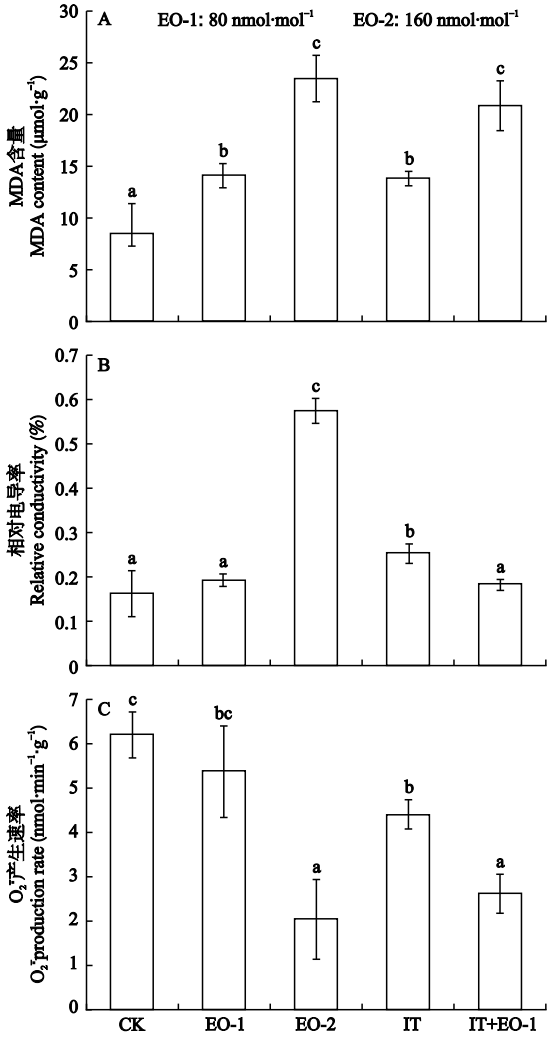


图 2 臭氧以及增温处理对醉蝶花 MDA 含量、相对电导率、$O_2^{\cdot-}$ 产生速率的影响
Fig. 2 Effects of ozone and increasing temperature on MDA content, relative conductivity, $O_2^{\cdot-}$ production rate of *Cleome spinosa*
注:图中不同小写字母代表各指标差异显著(P<0.05),下同。
Note: The different lowercase letters in the figure represent significant differences (P<0.05), the same below.

160 nmol · mol^{-1} 的 $O_2^{\cdot-}$ 产生速率均下降,且 160 nmol · mol^{-1}浓度时显著下降 67.0%(P<0.05),这说明臭氧熏蒸 7 d 时已经对醉蝶花叶片形成伤害,在较低浓度时不显著,160 nmol · mol^{-1}时已经触发了醉蝶花叶片的抗氧化防御系统,使 $O_2^{\cdot-}$ 的产生速率显著下降;与对照相比,增温处理组的 $O_2^{\cdot-}$ 产生速率显著下降 28.8%(P<0.05);与臭氧浓度 80 nmol · mol^{-1}单因子处理相比,增温臭氧复合处理组的 $O_2^{\cdot-}$ 产生速率显著降低 51.0%(P<0.05),这说明增温使醉蝶花叶片气孔张开,导致增温臭氧复合处理产生的伤害比单纯臭氧处理要严重,所以触发了醉蝶花叶片的抗氧化防御机制,抑制 $O_2^{\cdot-}$ 的产生速率。

2.3 高浓度臭氧和增温对醉蝶花抗氧化酶活性的影响

如图 3A 所示,与对照相比,臭氧浓度 80 nmol · mol^{-1}时 CAT 酶活性显著降低 65.9%(P<0.05),臭氧浓度 160 nmol · mol^{-1}时也有所降低,但差异不显著;与对照相比,增温处理组的 CAT 酶活性显著低于对照组 71.1%(P<0.05);与臭氧浓度 80 nmol · mol^{-1}单因子处理相比,增温臭氧复合处理组的 CAT 酶活性显著升高 141.7%(P<0.05)。

由图 3B 可知,当臭氧浓度为 80 nmol · mol^{-1}时,POD 酶活性较对照略有降低,但差异不显著,当臭氧浓度为 160 nmol · mol^{-1}时,POD 酶活性较对照显著升高 111.4%(P<0.05),这说明醉蝶花叶片通过迅速提高 POD 活性来抵御臭氧伤害;增温处理组的 POD 酶活性较对照组升高,但差异不显著;与臭氧浓度 80 nmol · mol^{-1}单因子处理相比,增温臭氧复合处理组的 POD 酶活性显著升高 72.1%(P<0.05),这说明增温使醉蝶花叶片气孔张开,增加臭氧对叶片的伤害,其通过迅速提高 POD 活性来抵御伤害。

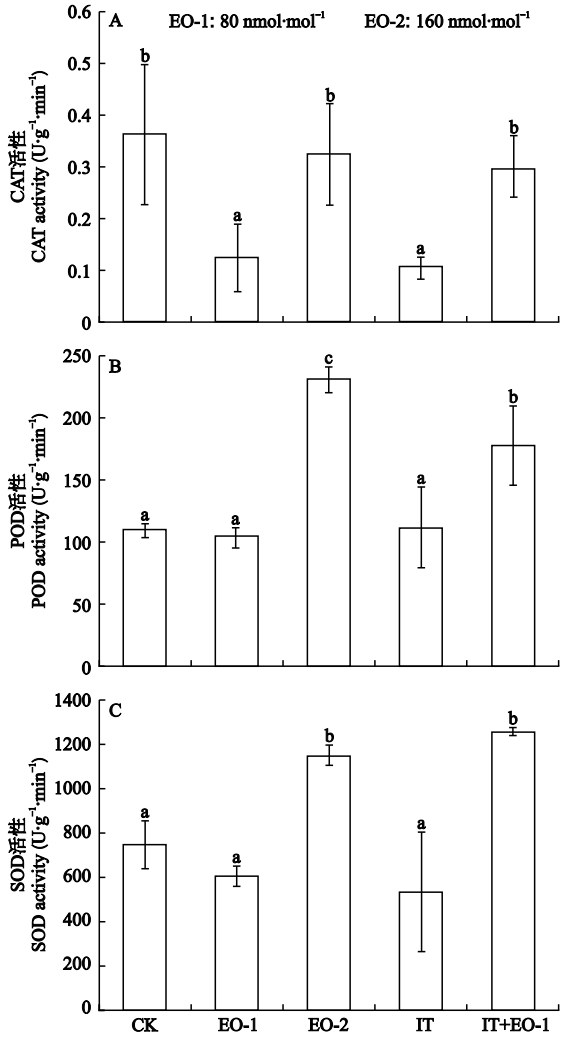


图 3 臭氧以及增温处理对醉蝶花 CAT 活性、POD 活性、SOD 活性的影响

Fig.3 Effects of ozone and increasing temperature on activities of CAT, POD, SOD in leaves of *Cleome spinosa*

如图 3C 所示,当臭氧浓度为 80 nmol · mol^{-1} 时,SOD 酶活性较对照略有降低,但差异不显著,当臭氧浓度为 160 nmol · mol^{-1} 时,SOD 酶活性较对照显著升高 54.3%($P<0.05$);增温处理组与对照组相比略有降低,但差异不显著;与臭氧浓度 80 nmol · mol^{-1} 单因子处理相比,增温臭氧复合处理组的 SOD 酶活性显著升高 107.9%($P<0.05$)。

3 讨论和结论

叶片可见伤害症状是植物对于氧化伤害最直观的反映,这种现象主要是由于臭氧通过叶片表皮开放气孔进入细胞组织,使细胞膜脂过氧化,从而破坏细胞结构,造成细胞大面积坏死所造成(Jyothsna *et al.*,2016)。杨宁等(2017)研究发现,臭氧浓度达到 120 nmol · mol^{-1} 处理第 5 天时万寿菊(*Tagetes erecta*)和矮牵牛(*Petunia hybrida*)出现可见伤害症状,这与本研究 160 nmol · mol^{-1} 处理第 3 天醉蝶花叶片出现可见伤害症状的研究结果一致,说明臭氧浓度越高不仅使植物叶片伤害加剧,也加速了叶片的衰老和脱落,抑制了植物的正常生长,这与李梅等(2014)对水腊的研究结果一致。

MDA 含量和相对电导率作为植物细胞膜受损程度的重要指标,其值越高说明植物细胞膜受损越严重,抗氧化能力就越弱(王爱国,1986;胡小英等,2018)。而超氧自由基($O_2^{\cdot-}$)是植物叶片遭受外界胁迫时产生的活性氧的一种重要形式,同时也是植物体内其他活性氧物质的来源(阮亚男等,2017)。本研究中,臭氧处理 7 d 后,与对照相比,在臭氧浓度 80 nmol · mol^{-1} 时未出现明显的伤害症状,MDA 含量显著升高,说明臭氧对它已经造成氧化伤害,相对电导率虽升高不显著,$O_2^{\cdot-}$ 产生速率低于对照,但不显著,说明处理初期醉蝶花叶片在较低浓度臭氧(80 nmol · mol^{-1})时受到了一定的氧化胁迫,但未伤及叶片机理,活性氧的形成未超过细胞组分的自我清除能力,抗氧化酶系统未启动,具有较强的抗氧化能力,这与公小君等(2017)在臭氧对矮化自根砧木的研究以及 Singh 等(2014)在臭氧对玉米的研究结果一致;在臭氧浓度 160 nmol · mol^{-1} 时 MDA 含量、相对电导率显著升高,$O_2^{\cdot-}$ 产生速率显著下降,说明醉蝶花叶片已经遭受极严重的氧化伤害;与对照相比,增温处理的 MDA 含量和相对电导率显著升高,但是 $O_2^{\cdot-}$ 产生速率显著降低,说明增温提高了植物的新陈代谢速度,导致 MDA 含量高于对照,这与列淦文等(2014)研究结果一致;与臭氧浓度 80 nmol · mol^{-1} 相比,增温和臭氧复合处理组的 MDA 含量显著升高,$O_2^{\cdot-}$ 产生速率显著下降,说明增温提高了植物的新陈代谢速度的同时臭氧进入植物细胞内的量增多,加速了植物的膜脂过氧化,这与颜坤等(2010)对 CO_2 和 O_3 复合对蒙古栎的研究结果一致。

SOD 是植物抵御活性氧攻击的第一道防线,能够专清超氧自由基($O_2^{\cdot-}$),可以将 $O_2^{\cdot-}$ 分解成 H_2O_2(Alscher *et al.*,2002),再由 POD、CAT 将 H_2O_2 进一步催化分解成 H_2O 和 O_2,随着外界胁迫的不断加剧,活性氧的持续增加,POD、CAT 等抗氧化酶活性也会明显升高(杨舒贻等,2016)。本试验结果表明,在低浓度臭氧(80 nmol · mol^{-1})处理下 CAT、

POD、SOD 酶活与对照相比差别不大,说明在此臭氧浓度下醉蝶花虽遭受一定程度的氧化胁迫,但未超过其细胞自我清除能力,因此,抗氧化机制未启动(许宏等,2007);在高浓度臭氧(160 nmol · mol^{-1})处理下醉蝶花叶片已经遭受极严重的氧化伤害,POD、SOD 酶活均显著高于对照,说明醉蝶花在高浓度臭氧(160 nmol · mol^{-1})胁迫下叶片膜脂过氧化程度加剧,激发了 POD、SOD 抗氧化酶来清除 $O_2^{\cdot-}$ 产物抵御氧化伤害,这与胡小英等(2018)对一年生草本植物意大利苍耳(*Xanthium italicum*)的研究以及郭雄飞等(2015)在臭氧对秋枫(*Bischofia javanica*)和木棉(*Bombax malabaricum*)的研究中结果一致。与对照相比,增温处理的抗氧化酶活性变化不显著,说明其 MDA 含量的升高是增温促进其生长的结果,这与杨春勐等(2018)在增温对颠杨(*Populus yunnanensis*)生长及生理特性中的研究结果一致。与臭氧浓度 80 nmol · mol^{-1} 处理相比,增温和臭氧复合处理组 SOD、POD、CAT 三种抗氧化酶活性均显著升高,说明在环境温度较低时,增温处理使植物气孔打开,增加了臭氧对植物的伤害程度,这与 Watanabe 等(2005)在增温和干旱复合对日本山毛榉(*Fagus crenata*)抗氧化系统影响的研究结果一致。

本研究通过 OTCs 模拟熏蒸和盆栽法,研究了臭氧胁迫和增温对醉蝶花叶片的氧化伤害作用以及抗氧化酶活的影响,得出以下结论:(1)醉蝶花在受到短期臭氧胁迫后表现出一定的适应性,臭氧浓度较低时(80 nmol · mol^{-1})植物具有较强的臭氧耐受性,当臭氧浓度较高时(160 nmol · mol^{-1})出现明显的伤害症状,说明臭氧已经影响醉蝶花的生理过程,并且积极调动抗氧化系统来抵御活性氧的伤害,主要通过提高 POD 和 SOD 活性来实现,这可能是醉蝶花在生长过程中遭受臭氧胁迫时的一种响应机制;(2)适当增温促进了醉蝶花的生长;(3)增温促进醉蝶花生长,生长代谢旺盛,呼吸作用增强,此时臭氧的叠加增加了其与植物膜脂的接触面积,植物过氧化程度加剧。说明在全球气候变暖和臭氧污染日益严重的当下,其对植物的双重伤害会愈加严重。

参考文献

蔡金鑫. 2018. 全球气温或提前升高 1.5 ℃. 生态经济, **34**(12): 2-5. [Cai JX. 2018. Global temperature may rise by 1.5 ℃ in advance. *Ecological Economy*, **34**(12): 2-5.]

陈 翔, 彭 飞, 尤全刚, 等. 2016. 高寒草甸植被特征对模拟增温的响应:以青藏高原多年冻土区为例. 草业科学, **33**(5): 825-834. [Chen X, Peng F, You QG, *et al*. 2016. Response of vegetation characteristics in the alpine meadow ecosystem to simulated temperature enhancement: A case study of permafrost regions on the Qinghai-Tibet Plateau, China. *Pratacultural Science*, **33**(5): 825-834.]

冯兆忠, 李 品, 袁相洋, 等. 2018. 我国地表臭氧生态环境效应研究进展. 生态学报, **38**(5): 1530-1541. [Feng ZZ, Li P, Yuan XY, *et al*. 2018. Progress in ecological and environmental effects of ground-level O_3 in China. *Acta Ecologica Sinica*, **38**(5): 1530-1541.]

葛全胜, 郑景云, 郝志新, 等. 2014. 过去 2000 年中国气候变化研究的新进展. 地理学报, **69**(9): 1248-1258. [Ge QS, Zheng JY, Hao ZX, *et al*. 2014. State-of-the-arts in the study of climate changes over China for the past 2000 years. *Acta Geographica Sinica*, **69**(9): 1248-1258.]

高俊凤. 2006. 植物生理学实验指导. 北京: 高等教育出版. [Gao JF. 2006. Experimental Guidance for Plant Physiology. Beijing: Higher Education Press.]

公小君, 陈学森, 冯守千, 等. 2017. 臭氧胁迫对矮化自根砧木 M9T337 生理生化特性的影响. 农业科学与技术, **18**(4): 579-582. [Giao XJ, Chen XS, Feng SQ, *et al*. 2017. Effects of ozone stress on physiological and biochemical characteristics dwarfing rootstock M9T337. *Agricultural Science & Technology* **18**(4): 579-582.]

郭雄飞, 黎华寿, 杨宝仪, 等. 2015. 秋枫和木棉对大气臭氧浓度升高的生理响应. 中南林业科技大学学报, **35**(2): 49-53. [Guo XF, Li HS, Yang BY, *et al*. 2015. Physiological responses of *Bischofifia javanica* and *Bombax malabaricum* to elevated atmospheric ozone concentration. *Journal of Central South University of Forestry & Technology*, **35**(2): 49-53.]

黄益宗, 隋立华. 2013. 臭氧污染胁迫下植物的抗氧化系统调节机制. 生态毒理学报, **8**(4): 456-464. [Huang YZ, Yan LH. 2013. Antioxidant mechanism of plants under ozone stress. *Asian Journal of Ecotoxicology*, **8**(4): 456-464.]

胡小英. 2018. 入侵植物意大利苍耳对干旱胁迫的形态及生理响应(硕士学位论文). 沈阳: 沈阳大学. [Hu XY. 2018. Morphology and Physiological Response of Invasive Plant *Xanthium italicum* to Drought Stress (Master Thesis). Shenyang: Shenyang University.]

李 梅, 徐 胜, 张恒庆, 等. 2014. 高浓度 O_3 对水蜡叶表皮气孔及其叶组织结构特征的影响. 生态学杂志, **33**(1): 53-58. [Li M, Xu S, Zhang HQ, *et al*. 2014. Effect of elevated O_3 concentration on epidermis stomata and tissue structure of leaves of *Ligustrum obtusifolium* Sieb. *Chinese Journal of Ecology*, **33**(1): 53-58.]

李合生. 2005. 植物生理生化实验原理和技术. 北京: 高等教育出版社. [Li HS. 2005. Principles and Techniques of Plant Physiological and Biochemical Experiments. Beijing: Higher Education Press.]

列淦文, 叶龙华, 薛 立. 2014. 臭氧胁迫对植物主要生理功能的影响. 生态学报, **34**(2): 294-306. [Lie GW, Ye LH, Xue L. 2014. Effects of ozone stress on major plant physiological functions. *Acta Ecologica Sinica*, **34**(2): 294-306.]

潘 莹. 2014. 增温和臭氧升高对冬小麦-大豆轮作农田 CO_2 排放的影响(硕士学位论文). 南京: 南京信息工程大学.[Pan Y. 2014. Effect of Warming and Elevated O_3 on CO_2 Emission from Winter Wheat-soybean Rotation System (Master Thesis). Nanjing: Nanjing University of Information Science and Technology.]

阮亚男, 徐 胜, 郭 龙, 等. 2017. 大气臭氧浓度升高对银杏叶片活性氧代谢及相关基因表达的影响. 应用生态学报, **28**(11): 3479-3486. [Ruan YN, Xu S, Guo L, *et al*. 2017. Effects of elevated ozone concentrations on reactive oxygen metabolism and related gene expression in *Ginkgo biloba* leaves. *Chinese Journal of Applied Ecology*, **28**(11): 3479-3486.]

沈振西, 孙 维, 李少伟, 等. 2015. 藏北高原不同海拔高度高寒草甸植被指数与环境温湿度的关系. 生态环境学报, **24**(10): 1591-1598. [Shen ZX, Sun W, Li SW, *et al*. 2015. Relationships between vegetation indices and environmental temperature and moisture in an alpine meadow along an elevation gradient in the northern Tibet. *Ecology and Environmental Sciences*, **24**(10): 1591-1598.]

王爱国. 1986. 丙二醛作为脂质过氧化指标的探讨. 植物生理学通讯, **26**(2): 55-57. [Wang AG. 1986. Inquiry into malondialdehyde as index of peroxidation of plant lipids. *Plant Physiology Communications*, **26**(2): 55-57.]

王义婧, 徐 胜, 何兴元, 等. 2018. 美国薄荷(*Monarda didyma* L.)对大气增温的生理生态响应. 生态环境学报, **27**(12): 2217-2224. [Wang YZ, Xu S, He XY, *et al*. 2018. Ecophysiological responses of *Monarda didyma* L. to the increasing ambient temperature. *Ecology and Environmental Sciences*, **27**(12): 2217-2224.]

王兆夺, 祝超伟, 于东生. 2017. 全球气候变化背景下对"温室效应"的思考. 辽宁师范大学学报: 自然科学版, **40**(3): 408-414. [Wang ZD, Zhu CW, Yu DS. 2017. On "greenhouse effect" under the back ground of global climate change. *Journal of Liaoning Normal University: Natural Science Edition*, **40**(3): 408-414.]

西北农业大学. 1986. 基础生物化学实验指导. 宝鸡: 陕西科学技术出版社. [Northwest Agricultural University. 1986. Basic Biochemistry Experimental Guide. Baoji: Shanxi Science and Technology Press.]

肖宜安. 2001. 醉蝶花(*Cleome spinosa* L.)幼苗对水分胁迫的生理反应. 武汉植物学研究, **19**(6): 524-528. [Xiao YA. 2001. The physiological responses and adjective adaptability of water stress on *Cleome spinosa* L. Seedlings. *Journal of Wuhan Botanical Research*, **19**(6): 524-528.]

徐 胜, 付 伟, 平 琴, 等. 2017. 气候变化对树木凋落物分解的影响研究进展. 生态学杂志, **36**(11): 3266-3272. [Xu S, Fu W, Ping Q, *et al*. 2017. Advance in studies on the effects of climate change on decomposition of tree titters. *Chinese Journal of Ecology*, **36**(11): 3266-3272.]

徐 胜, 何兴元, 陈 玮, 等. 2009. 高浓度 O_3 对树木生理生态的影响. 生态学报, **29**(1): 368-377. [Xu S, He XY, Chen W, *et al*. 2009. Research advance in effect of elevated CO_2 on eco-physiology of trees. *Acta Ecologica Sinica*, **29**(1): 368-377.]

熊冬兰, 李 静, 徐 胜, 等. 2017. 臭氧胁迫对梓树光合生理特性的影响. 生态学杂志, **36**(4): 944-950. [Xiong DL, Li J, Xu S, *et al*. 2017. Effects of elevated O_3 concentration on photosynthetic physiological characteristics of *Catalpa ovata*. *Chinese Journal of Ecology*, **36**(4): 944-950.]

许 宏, 杨景成, 陈圣宾, 等. 2007. 植物的臭氧污染胁迫效应研究进展. 植物生态学报, **31**(6): 1205-1213. [Xu H, Yang JC, Chen SB, *et al*. 2007. Review of plant responses to ozone pollution. *Journal of Plant Ecology*, **31**(6): 1205-1213.]

颜 坤, 陈 玮, 张国友, 等. 2010. 高浓度二氧化碳和臭氧对蒙古栎叶片活性氧代谢的影响. 应用生态学报, **21**(3): 557-562. [Yan K, Chen W, Zhang GY, *et al*. 2010. Effects of elevated CO_2 and O_3 on active oxygen metabolism of *Quercus mongolica* leaves. *Chinese Journal of Applied Ecology*, **21**(3): 557-562.]

杨 宁, 王效科, 张玉龙, 等. 2017. 不同植物叶片臭氧伤害症状及其生理响应机制的差异. 生态毒理学报, **12**(6): 141-149. [Yang N, Wang XK, Zhang YL, *et al*. 2017. Ozone injury to marigold (*Tagetes erecta* Linn.), petunia (*Petunia hybrida* Vilm.) and morning glory (*Pharbitis purpurea* (L.) Voigt) and their different physiological responses. *Asian Journal of Ecotoxicology*, **12**(6): 141-149.]

杨春勐, 代微然, 索 默, 等. 2018. 增温对滇杨和川杨生长及生理特性的影响. 西南林业大学学报: 自然科学版, **38**(3):63-70. [Yang CM, Dai WR, Suo M, *et al*. 2018. Effects of temperature enhancement on the growth and physiological properties of *Populus yunnanensis* and *Populus szechuanica*. *Journal of Southwest Forestry University: Natural Science Edition*, **38**(3): 63-70.]

杨舒贻, 陈晓阳, 惠文凯, 等. 2016. 逆境胁迫下植物抗氧化酶系统响应研究进展. 福建农林大学学报: 自然科学版, **45**(5): 481-489. [Yang SY, Chen XY, Hui WK, *et al*. 2016. Progress in responses of antioxidant enzyme systems in plant to environmental stresses. *Journal of Fujian Agriculture and Forestry University: Natural Science Edition*, **45**(5): 481-489.]

杨喜盟, 秦 芳, 党娜娜, 等. 2018. 大气增温与干旱胁迫对灵武长枣生长与光合特性的影响. 北方园艺, (3): 65-70. [Yang XM, Qin F, Dang NN, *et al*. 2018. Effects of atmospheric warming and drought stress on growth and photosynthetic characteristics of Lingwulong jujube. *Northern Horticulture*, (3): 65-70.]

赵福庚, 何龙飞, 罗庆云. 2004. 植物逆境生理生态学. 北京: 化学工业出版社. [Zhao FG, He LF, Luo QY. 2004. Plant Stress Physiology and Ecology. Beijing: Chemical In-

dustry Press.]

赵天宏, 史 奕, 王春乙, 等. 2003. CO_2 和 O_3 浓度倍增及其复合作用对大豆叶绿素含量的影响. 生态学杂志, **22**(6): 117-120. [Zhao TH, Shi Y, Wang CY, *et al*. 2003. Effect of doubled CO_2, and O_3 on chlorophyll content of soybean. *Chinese Journal of Ecology*, **22**(6): 117-120.]

中国科学院中国植物志编辑委员会. 中国植物志. 北京: 科学出版社. [Chinese Flora Editorial Board of the Chinese Academy of Sciences. Chinese Flora. Beijing: Science Press.]

Alscher RG, Erturk N, Heath LS. 2002. Role of superoxide dismutases (SODs) in controlling oxidative stress in plants. *Journal of Experimental Botany*, **53**: 1331-1341.

Andersen UB, Kjaer KH, Erban A, *et al*. 2017. Impact of seasonal warming on overwintering and spring phenology of blackcurrant. *Environmental and Experimental Botany*, **140**: 96-109.

Bortolin RC, Caregnato FF, Armando MD, *et al*. 2014. Effects of chronic elevated ozone concentration on the redox state and fruit yield of red pepper plant *Capsicum baccatum*. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, **100**: 114-121.

De Boeck HJ, Lemmens C, Gielen B, *et al*. 2007. Combined effects of climate warming and plant diversity loss on above- and below-ground grassland productivity. *Environmental and Experimental Botany*, **60**: 95-104.

Dong WJ, Chen J, Zhang B, *et al*. 2011. Responses of biomass growth and grain yield of midseason rice to the anticipated warming with FATI facility in East China. *Field Crops Research*, **123**: 259-265.

He QJ, Zhou GS, Lü XM, *et al*. 2019. Climatic suitability and spatial distribution for summer maize cultivation in China at 1.5 and 2.0 ℃ global warming. *Science Bulletin*, **64**: 690-697.

Hodges DM, Delong JM, Forney CF, *et al*. 1999. Improving the thiobarbituric acid-substances assay for estimating lipid peroxidation in plant tissues containing anthocyanin and other interfering compounds. *Planta*, **207**: 604-611.

IPCC. 2013. Intergovernmental Panel on Climate Change Climate Change 2013 Fifth Assessment Report (AR5). Cambridge, UK: Cambridge University Press.

Jyothsna P, Murthy SDS. 2016. A review on effect of senescence in plants and role of phytohormones in delaying senescence. *International Journal of Plant, Animal and Environmental Sciences*, **6**: 152-161.

Klanderud K, Totland Q. 2005. Simulated climate change altered dominance hierarchies and diversity of an alpine biodiversity hotspot. *Ecology*, **86**: 2047-2054.

Marotzke J, Forster PM. 2015. Forcing, feedback and internal variability in global temperature trends. *Nature*, **517**: 565-570.

Nadal J, Ponz C, Margalida A. 2018. Synchronizing biological cycles as key to survival under a scenario of global change: The Common quail (*Coturnix coturnix*) strategy. *Science of the Total Environment*, **613-614**: 1295-1301.

Rinnan R, Michelsen A, Jonasson S, *et al*. 2007. Fifteen years of climate change manipulations alter soil microbial communities in a subarctic heath ecosystem. *Global Change Biology*, **13**: 28-39.

Roberts CD, Palmer MD, Mcneall D, *et al*. 2015. Quantifying the likelihood of a continued hiatus in global warming. *Nature Climate Change*, **5**: 337-342.

Silvaa P, Bastos A, Libonati R, *et al*. 2019. Impacts of the 1.5 ℃ global warming target on future burned area in the Brazilian Cerrado. *Forest Ecology and Management*, **446**: 193-203.

Singh AA, Agrawal S, Shahi J, *et al*. 2014. Investigating the response of tropical maize (*Zea mays* L.) cultivars against elevated levels of O_3 at two developmental stages. *Ecotoxicology*, **23**: 1447-1463.

Walther GR, Beissner S, Burga CA. 2005. Trends in the upward shift of alpine plants. *Journal of Vegetation Science*, **16**: 541-548.

Watanabe M, Yonekura T, Honda Y, *et al*. 2005. Effects of ozone and soil water stress, singly and in combination, on leaf antioxidative systems of *Fagus crenata* seedlings. *Journal of Agricultural Meteorology*, **60**: 1105-1108.

Xue WH, Zhang J, Zhou LH, *et al*. 2019. Heavy summer ozone pollution episode and related meteorological factors in North China. *Journal of Beijing Normal University: Natural Science*, **55**: 121-134.

作者简介 秦子晴,女,1993 年生,硕士研究生,主要从事植物逆境生理生态的研究。E-mail: 1417524397@qq.com

责任编辑 魏中青