

李 晶,赵丽娜. 城市典型绿化植物对二氧化硫的抗性生理研究[J]. 江苏农业科学,2018,46(9):156-160.
doi:10.15889/j.issn.1002-1302.2018.09.036

城市典型绿化植物对二氧化硫的抗性生理研究

李 晶,赵丽娜

(河北工程技术学院,河北石家庄 050091)

摘要:以典型绿化植物(木槿、连翘、紫叶李、白景天、紫穗槐)为试材,以正常生长为对照,连续 3 年研究和比较不同绿化植物对二氧化硫的抗性生理特性。结果表明,二氧化硫时间处理和浓度处理的植株株高增长量比值均大于 80%,植株冠径增长量比值均大于 50%。二氧化硫时间处理和浓度处理对绿化植物的冠幅具有明显的影响。二氧化硫能够引起叶片叶绿素含量、可溶性蛋白含量和可溶性糖含量的下降;与正常生长条件下的植株相比,二氧化硫处理下的叶片过氧化氢酶活性、超氧化物歧化酶活性和过氧化物酶活性低于正常生长,而二氧化硫处理下的叶片丙二醛含量高于正常生长。由此说明,二氧化硫影响了植物叶片的生理特性。主成分分析结果显示,植株高度、叶绿素 a 含量和叶绿素 b 含量(在 3 个主成分中具有较高的载荷值)可作为二氧化硫污染的敏感性指标。综合生长比值法表明,不同绿化植物对二氧化硫的抗性由大到小依次为紫穗槐、木槿、白景天、连翘、紫叶李。

关键词:二氧化硫;绿化植物;抗性;生理特性;二氧化硫污染;指示植物;敏感指标;绿植科学配植

中图分类号: S688 **文献标志码:** A **文章编号:** 1002-1302(2018)09-0156-05

工业化和城市化的发展加剧了石油、天然气等能源消耗,同时城镇化带来的大批建筑工程建设也在大量消耗着钢铁、水泥等能源,这些能源在制造过程中会产生很大污染,尤其是以煤炭为主要能源的时期。另外,农村秸秆焚烧及烧火做饭等产生的大量烟雾也是重要的污染源之一,目前的大气污染已经相当严重^[1-2]。近年来,随着机动车辆的不断增多,二氧化硫(主要为二氧化硫)排放量日益增多,带来的环境污染问题越来越严重,就全球大气污染而言,最为严重的 20 座城市中约有 1/2 位于我国^[3-5]。根据相关统计,大气污染最主要的污染源之一是二氧化硫排放,二氧化硫污染物使得空气质量下降、空气中可悬浮颗粒增多,直接损害人体的呼吸系统,加剧冬季天气的雾霾现象^[6];除了给人体健康带来损害之外,二氧化硫污染更是直接给植物的正常生长带来了不利影响^[7-9],二氧化硫可直接附着在植物的叶片表层,损害叶片的气体交换功能,导致其光合作用明显降低,进而导致植物生长所需的能量大大降低,影响植物的正常生长甚至会导致其逐渐枯萎死亡^[10-11]。

城市绿植不仅能为城市增加了绿色的美感,也能够吸收污染物和粉尘等悬浮颗粒,对降低城市的阳光辐射、净化大气等具有显著效果^[12-14]。城市绿植利用其粗糙湿润的叶面表层、微小的气孔及毛被对大气污染物中的悬浮颗粒进行过滤、吸附等处理,素有粉尘过滤器的美称^[15-16]。当然不同植物对大气污染物中悬浮颗粒等的吸附作用不同,因此为保障城市绿植切实发挥降尘、吸附悬浮颗粒的良好效果,必须选择适合当地生态特征且具有明显降尘及颗粒吸附效应的绿植作为城市植物,并作好绿植设计,从而建立良好的城市生态。因此,

须对植物生长特征与二氧化硫污染物间的相互关系进行深入研究,从而确定如何选择相应的城市绿植来降低粉尘及悬浮颗粒物含量。为此,本研究针对河南省郑州市的气候特点,选择木槿、连翘、紫叶李、白景天、紫穗槐作为研究对象,并进行连续 3 年的数据跟踪,对不同城市绿植的生长特性及相应的生理、生化特性进行分析对比,以期对不同绿植的错配提供参考。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

郑州市作为河南省的人口大市和经济较为发达的省会城市,位于河南省中部偏北,地处黄河中游的南岸,形成了西临嵩山、北靠黄河、东南为广阔黄淮平原的地理特点。该地理特性形成了暖温带的大陆性季风气候,呈现出夏季高温多雨、冬季寒冷多风的鲜明气候特点,年均气温为 14.4℃,夏季最高气温达 45℃左右,冬季最低温度达 -10℃左右,其中气温最高的月份为 7 月,月平均气温达 27.3℃;气温最低的月份一般为 1 月,月平均气温低至 0.2℃。超过 1/2 的降水量在夏季 6—8 月份,年降水量可达 652.9 mm。该地区土壤具有多样性,自西向东不仅有棕壤土、红黏土,还有褐土、潮褐土、潮土等,其中褐土的分布面积最大,达 64% 左右;其次是潮土,其分布面积达总土壤面积的 30%。早在 20 世纪 80 年代中期,郑州市就提出扩大城市绿化面积,打造绿色郑州,并于 2006 年被评为“国家园林城市”,目前因大面积的工程建设,其绿化面积有待进一步增加,以缓解二氧化硫排放等导致的大气污染问题。

1.2 研究方法

2016 年 8 月,为了以对比效果展现绿植对二氧化硫的作用效果,对郑州市主要街道的植物生长特性进行对比,以确定绿植对二氧化硫污染的耐受程度。将二氧化硫浓度设为 0.3、0.5、0.8、1.2、1.5、2.0 mg/m³,对选取的 5 种绿化植物进

收稿日期:2017-08-28

基金项目:河北省高等学校科学技术研究项目(编号:Z2017164)。

作者简介:李 晶(1986—),女,河北石家庄人,硕士,讲师,主要从事园林植物研究与应用。E-mail:Leejing68@163.com。

行 5 d 的二氧化硫处理,为提升绿植的适应性,在进行处理前 1 d 将绿植放入气室,对照在相同条件无污染物的环境中进行(正常生长),培养试验在 08:00 开始,直至第 6 天的 08:00 结束,同时记录试验初始和结束后的植株高度。二氧化硫处理完毕之后,从每种植物上选取 3 个新梢,每个新梢自中部采集成熟叶片 10 片作为 1 个混合样,进行指标测定,将 3 个小区的平均值作为最终数据进行分析。采样完毕后,将之取出,然后放入清洁环境中,此阶段的测试时间为 15 d,每天取 1 次样,测定植被生理指标。

1.3 测量指标

利用样品叶片测定其多种生理指标,为提升试验数据的准确性,对各项试验进行 3 次重复测定。首先将叶片洗净,烘干,烘箱温度要求达到 65 ℃,烘干后进行粉碎处理,并用 1.5 mm 筛进行叶脉去除,最后进行研磨混合处理。叶片叶绿素 a、b 含量的测定采用丙酮溶液浸提比色分析法进行,其中丙酮溶液的浓度为 80%;可溶性蛋白利用考马斯亮蓝染色法予以测定;丙二醛(malondialdehyde,简称 MDA)含量的测定采取硫代巴比妥酸法;超氧化物歧化酶(superoxide dismutase,简称 SOD)活性的测定采用氮蓝四唑(nitroblue tetrazolium, NBT)光化还原法进行;过氧化物酶活性(peroxidase,简称 POD)的测定采用愈创木酚法进行^[17]。

1.4 数据分析

采用 Excel 2010 对数据进行统计,采取 SPSS 21.0 对数据进行方差分析及相应的统计学检验,同时在 0.05 显著性水平下进行 LSD 多重比较分析,并在单因素方差分析下对差异是否显著进行判定。

2 结果与分析

2.1 二氧化硫对试验植物生长的影响

2.1.1 二氧化硫对株高增长量的影响 为直观观察植物在二氧化硫环境下的生长差异,本研究采用生长计量法测量植株的冠幅、株高以及冠径。由表 1 可知,时间处理和浓度处理的植株株高增长量比值都大于 80%。在时间处理的物种中木槿的植株增长量比值大于 90%,紫叶李、白景天、连翘和紫穗槐增长量比值小于 90%。在浓度处理中,紫叶李、白景天、连翘和紫穗槐增长量比值均大于 100%,只有木槿植株增长量小于 100%。结果表明,在 2 种二氧化硫环境下木槿最不敏感,抗性最强,之后依次是连翘、紫叶李、白景天、紫穗槐。

表 1 二氧化硫对植株高度增长量的影响

种类	正常生长		时间处理		浓度处理	
	增长量 (mm)	增长量 (mm)	增长量比值 (%)	增长量 (mm)	增长量比值 (%)	增长量 (mm)
紫叶李	4.1	3.5	85.37	4.6	112.20	
白景天	4.3	3.8	88.37	4.8	111.63	
连翘	5.6	4.7	83.93	5.7	101.79	
木槿	5.4	5.0	92.59	5.2	96.30	
紫穗槐	4.7	3.8	80.85	5.8	123.40	

2.1.2 二氧化硫对植株冠径增长量的影响 从表 2 可以看出,时间处理和浓度处理的植株冠径增长量比值都大于 50%。在时间处理中,二氧化硫对紫穗槐的影响最小,其次是木槿,对紫叶李和连翘的影响最大。在浓度处理中,二氧化硫

浓度对紫穗槐的冠径增长量影响最大,对连翘的影响最小,而对紫叶李、白景天和木槿的影响处于二者之间。

表 2 二氧化硫对植株冠径增长量的影响

种类	正常生长		时间处理		浓度处理	
	增长量 (mm)	增长量 (mm)	增长量比值 (%)	增长量 (mm)	增长量比值 (%)	增长量 (mm)
紫叶李	0.16	0.14	87.50	0.11	68.75	
白景天	0.15	0.12	80.00	0.09	60.00	
连翘	0.24	0.21	87.50	0.14	58.33	
木槿	0.29	0.22	75.86	0.23	79.31	
紫穗槐	0.21	0.13	61.90	0.19	94.76	

2.1.3 二氧化硫对植株冠幅增长量的影响 从表 3 可以看出,在时间处理中,二氧化硫对紫叶李的冠幅增长量影响最大,对其他植物冠幅的影响相对较小;而在浓度处理中,二氧化硫对紫穗槐的冠幅增长量影响最大,对木槿的影响最小。

表 3 二氧化硫对植株冠幅增长量的影响

种类	正常生长		时间处理		浓度处理	
	增长量 (cm)	增长量 (cm)	增长量比值 (%)	增长量 (cm)	增长量比值 (%)	增长量 (cm)
紫叶李	523.1	513.0	98.07	435.2	83.20	
白景天	495.6	456.2	92.05	412.7	83.27	
连翘	483.7	457.8	94.65	402.8	83.27	
木槿	514.9	485.6	94.31	421.3	81.82	
紫穗槐	456.8	423.1	92.62	389.4	85.25	

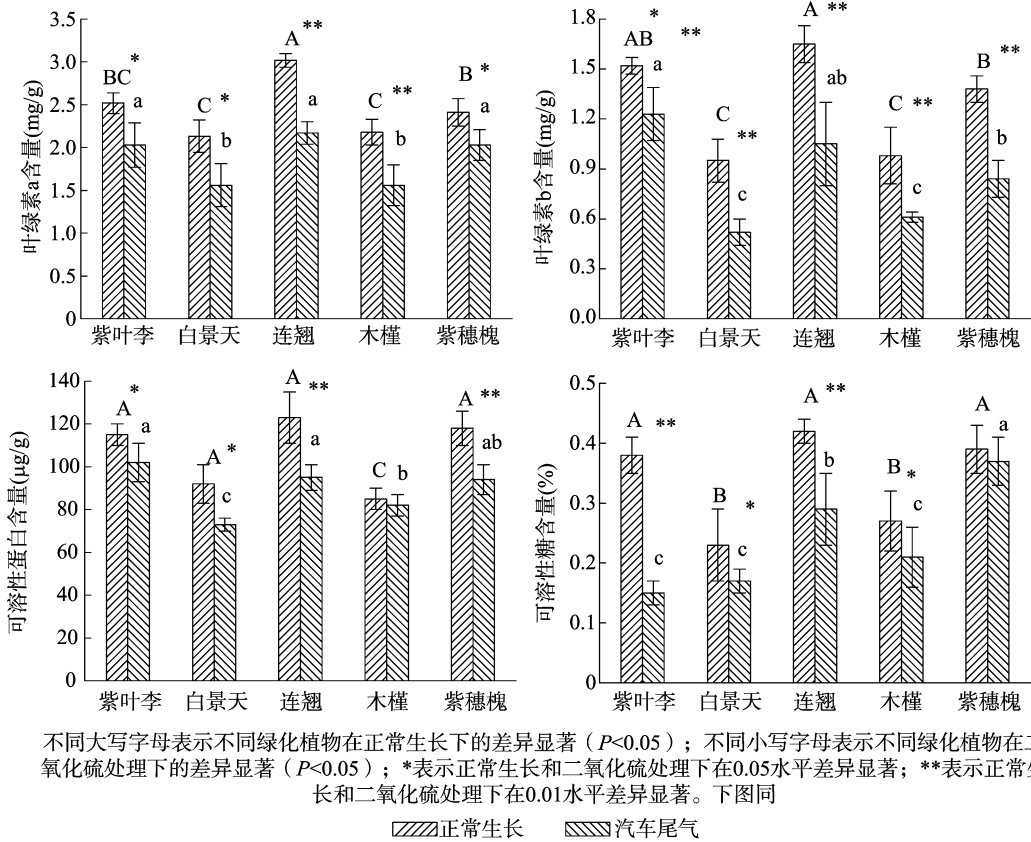
2.2 二氧化硫对植物生理指标的影响

生理指标作为衡量植物抵抗大气污染能力大小的标准,在植物的抗性评价及抗性物种的选择中具有重要的作用。由图 1 可知,在正常生长条件下,5 种植物叶片叶绿素 a 含量、叶绿素 b 含量、可溶性蛋白含量和可溶性糖含量大致表现为连翘>紫叶李>紫穗槐>木槿>白景天;在二氧化硫处理下,5 种植物叶片叶绿素 a 含量、叶绿素 b 含量、可溶性蛋白含量和可溶性糖含量呈现出不一致的变化规律,以紫叶李和紫穗槐较高,且二氧化硫处理下 5 种植物叶片叶绿素 a 含量、叶绿素 b 含量、可溶性蛋白含量和可溶性糖含量均低于正常生长,由此说明二氧化硫可降低试验植被叶片的生理特性。

由图 2 可知,在正常生长条件下,5 种植物叶片过氧化氢酶活性、超氧化物歧化酶活性均以连翘较高,紫叶李和紫穗槐次之,白景天和木槿较小;丙二醛含量则表现为木槿和白景天较高,紫叶李、连翘和紫穗槐较低;过氧化物酶活性表现为紫叶李含量较高,连翘和紫穗槐次之,白景天和木槿较低。在二氧化硫处理下,叶片的过氧化氢酶活性、超氧化物歧化酶活性、丙二醛含量、过氧化物酶活性表现出与正常生长整体一致的趋势,且二氧化硫处理下的叶片过氧化氢酶活性、超氧化物歧化酶活性和过氧化物酶活性均低于正常生长,而二氧化硫处理下的叶片丙二醛含量高于正常生长。

2.3 试验植物综合生长的主成分分析

主成分分析是处理数据降维的一种方法,能够通过线性变换从多个变量中选出较少个数重要变量。主成分个数的提取原则是相对应特征值大于 1 的前 m 个主成分,且一般要求累计方差贡献率达到 85%。因此,通过方差分解主成分分析,共提取出 3 个主成分(表 3),在正常生长条件下,不同植



不同大写字母表示不同绿化植物在正常生长下的差异显著 ($P<0.05$)；不同小写字母表示不同绿化植物在二氧化硫处理下的差异显著 ($P<0.05$)；*表示正常生长和二氧化硫处理下在0.05水平差异显著；**表示正常生长和二氧化硫处理下在0.01水平差异显著。下图同

图1 二氧化硫对绿化植物叶片生理指标的影响

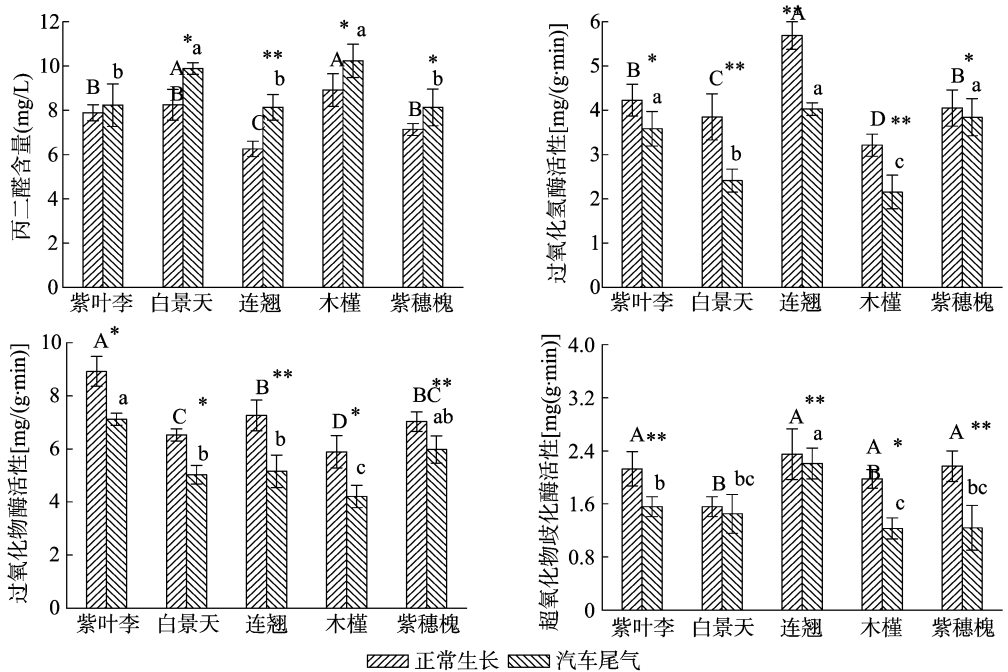


图2 二氧化硫对绿化植物叶片生化酶和丙二醛的影响

物生长指标提取的主成分1、主成分2 分别能解释变量方差的62.13%、81.15%，前3 个主成分累积方差贡献率达94.29%。在二氧化硫处理下，不同植物生长指标提取的主成分1、主成分2 分别能解释变量方差的63.25%、80.51%，前3 个主成分累积方差贡献率达94.54%，因此第1 主成分、第2

主成分和第3 主成分为本研究所要解释的主成分(表4)。主成分分析结果显示了不同生长指标在3 个主成分上的载荷值(表5)，初始载荷因子反映主成分与二氧化硫的相关系数，载荷因子越高表示二氧化硫对主成分的影响越大。由表5 可知，在正常生长条件下，与第1 主成分具有较高相关性

表 4 方差分解主成分提取分析

主成分	正常生长			二氧化硫		
	特征值	方差贡献率(%)	累积方差贡献率(%)	特征值	方差贡献率(%)	累积方差贡献率(%)
1	22.65	62.13	62.13	21.89	63.25	63.25
2	5.98	19.02	81.15	6.25	17.26	80.51
3	3.12	13.14	94.29	2.14	14.03	94.54
4	1.05	1.58	95.87	1.87	2.58	97.12

的生长指标有植株株高、叶绿素 a 含量和叶绿素 b 含量;与第

表 5 生长指标的主成分载荷因子

载荷因子	正常生长			二氧化硫		
	PC1	PC2	PC3	PC1	PC2	PC3
株高	0.812	0.562	0.096	0.826	0.369	0.362
冠径	0.058	0.351	0.125	0.753	0.210	0.256
冠幅	0.174	-0.058	-0.412	0.231	0.512	-0.156
叶绿素 a 含量	0.756	0.296	0.325	0.817	0.752	-0.238
叶绿素 b 含量	0.789	-0.526	-0.078	0.798	0.369	0.302
可溶性蛋白含量	0.320	0.862	0.356	0.203	0.620	0.698
可溶性糖含量	0.159	0.617	0.752	0.514	0.712	0.721
丙二醛含量	-0.471	-0.085	0.691	-0.621	-0.035	0.069
过氧化氢酶活性	0.236	0.163	0.035	-0.036	0.147	0.751
过氧化物酶活性	-0.152	0.524	-0.147	0.058	0.230	-0.423
超氧化物歧化酶活性	0.098	0.370	0.235	0.123	0.358	0.456

2.4 试验植物综合生长状况评价

由于植物对二氧化硫的反应非常复杂,单一生长指标难以准确评价植物的受影响程度,因此针对几个生长指标采用综合生长比值法对植物进行排序。综合增长比值越高,表示植物受二氧化硫的影响越小,生长较为正常;反之,则受二氧化硫的影响较大,生长受到较严重的抑制。从表 6 可以看出,在二氧化硫时间处理下,相对抗性由强到弱的排序为紫穗槐、木槿、白景天、连翘、紫叶李。在二氧化硫浓度处理下,抗性由强到弱的排序为紫穗槐、木槿、白景天、连翘、紫叶李。

表 6 综合生长指标

种类	综合生长比值	
	时间处理	浓度处理
紫叶李	0.82	0.71
白景天	0.96	0.86
连翘	0.86	0.74
木槿	0.98	0.89
紫穗槐	1.06	0.93

3 讨论与结论

二氧化硫能够通过绿植的气孔进入其体内,而微粒则附着在叶片表层,影响植物的光合作用,从而影响绿植的正常生长^[18-19]。绿植的受害程度一方面取决于自身的生长特性,另一方面取决于有害气体的种类、浓度及持续时间。二氧化硫中的有害成分可导致绿植体内自由基浓度上升^[20-21]。自由基积累能够诱发和加剧细胞膜脂过氧化,导致细胞膜破坏,叶绿素分解,严重时可导致植物细胞死亡^[22]。

叶绿素作为植物光合作用的物质基础和光敏化剂,在光合作用过程中起着接受和转换能量的作用;可溶性蛋白和可溶性糖包含一些代谢的酶,其含量的多少与植株体内的代谢

2 主成分具有较高相关性的生长指标有植株株高、可溶性蛋白含量和可溶性糖含量;与第 3 主成分具有较高相关性的生长指标有可溶性糖含量和丙二醛含量。在二氧化硫处理条件下,与第 1 主成分具有较高相关性的生长指标植株株高、冠径、叶绿素 a 含量和叶绿素 b 含量;与第 2 主成分具有较高相关性的生长指标有叶绿素 a 含量、可溶性蛋白含量和可溶性糖含量;与第 3 主成分具有较高相关性的生长指标有可溶性蛋白含量、可溶性糖含量、过氧化氢酶活性。

强度有关^[23]。有研究表明,植物叶片受到二氧化硫影响后,其叶片中的叶绿素 a、叶绿素 b 均会受到破坏而分解,致使叶绿素含量下降^[24]。研究表明,叶绿素含量受二氧化硫等污染气体影响严重,且受影响程度与二氧化硫浓度和持续时间存在正相关关系,一旦发现叶片出现了可见伤害症状,说明叶绿素含量已经发生了大幅下降^[25]。本研究发现,不同树种之间的叶绿素含量明显不同,其中叶绿素含量下降最大的是紫叶李,这直接取决于树种的耐受性,由此可知,二氧化硫对叶绿体具有明显的破坏作用。

最近有学者发现,叶绿素荧光特性对二氧化硫也非常敏感。二氧化硫对光合色素产生伤害的作用机制有两种观点。一种观点认为,二氧化硫进入叶片细胞后增加了氧自由基的形成,进而导致叶绿素分解。曹洪法等认为,二氧化硫可以在 3 个方面影响叶绿素,即漂白(如颜色的消失)、叶绿素脱镁(叶绿素分子降解为无光合活性的脱镁叶绿素)和色素光谱特性的变化^[26-27]。二氧化硫在水中溶解为亚硫酸,降解叶绿素分子的叶琳环,使 Mg⁺ 流失。另一种观点认为,二氧化硫对植物光合色素的伤害,一般不会导致脱镁叶绿素的形成和吸收光谱的移位,主要是亚硫酸离子在氧化为硫酸过程中产生大量自由基的作用^[20-21]。相比较可知,木槿和紫穗槐更能够利用光能和转化光能,为光合补偿生长提供物质和能量基础。

细胞膜作为细胞的核心组成部分,在调控细胞内外能量交换方面起着不可忽视的屏障作用,能够保护细胞免受一般的侵害。但如果绿植长期处于污染的生长环境中,那么污染物容易导致膜脂过氧化,进而形成相应的丙二醛产物,其含量的高低表示膜脂过氧化发生的强弱,质膜透性的大小表示质膜受损的程度^[28]。当绿植处于正常生长环境中时,其体内活性氧会根据生长需要而产生并可进行及时的清除处理,活性

氧含量处于一种平衡状态;但二氧化硫污染物的入侵会打破这种平衡,绿植体内的活性氧不断产生,却不能及时去除,而活性氧的积累很容易导致膜脂过氧化,进而形成较多的丙二醛,从侧面说明当绿植受污染程度较为明显时,意味着二氧化硫污染问题较为明显^[29-30]。本研究发现,经过二氧化硫的处理,绿植叶片内的丙二醛含量上升,这与以往学者的研究结果^[26-27]一致。

植物体内存在过氧化氢酶和超氧化物歧化酶^[31-32]等 2 种重要保护酶,它们能够利用超氧化物歧化反应对氧自由基进行有效去除,从而对细胞膜进行保护,降低污染物对植物的伤害程度。一系列的试验发现,植物的耐受性与 SOD 活性存在正相关关系,说明能够将 SOD 作为植物的耐受性指标之一^[33]。韩阳等认为,植物对二氧化硫污染物的综合耐受性能够通过 SOD 活性氧代谢能力来体现,并由此进行植物耐受性的等级划分^[34]。

本研究中紫穗槐的 SOD 活性变化非常迅速,说明紫穗槐的 SOD 活性对二氧化硫非常敏感。在二氧化硫处理中,POD 活性各树种间存在很大差异,其中紫穗槐 POD 活性对二氧化硫的忍耐力最强,在最终的综合评定中也表现出强的抗性,这与前人的研究结果^[20-21]一致。本研究认为,高活性的 POD 仍然是植物抗污染能力的重要评价因子。因为超氧化物歧化酶在清除自由基同时生成过氧化氢,而叶绿体中参加卡尔文循环的一些酶(如 RuBp)非常敏感,会影响光合作用中碳的固定,因此产生的自由基必须立即被清除,且新产生的自由基能与 O₂ 反应而生成氧化性和破坏性更大的羟基自由基。因此说明 POD 活性依然能够作为植物污染耐受性的一个重要指标。

参考文献:

- [1] 王丛梅,杨永胜,李永占,等. 2013 年 1 月河北省中南部严重污染的气象条件及成因分析[J]. 环境科学研究,2013,26(7):695-702.
- [2] 吕效谱,成海容,王祖武,等. 中国大范围雾霾期间大气污染特征分析[J]. 湖南科技大学学报(自然科学版),2013,28(3):104-110.
- [3] 谢元博,陈娟,李巍. 雾霾重污染期间北京居民对高浓度 PM_{2.5} 持续暴露的健康风险及其损害价值评估[J]. 环境科学,2014,35(1):1-8.
- [4] 吴婕,徐影,周波涛. CMIP5 全球气候模式对中国上空空气静稳日数模拟能力评估[J]. 地球物理学报,2017,60(4):1293-1304.
- [5] 陈炸鑫,朱彬,尹聪,等. 基于卫星遥感和地面观测资料分析苏皖两省一次空气污染过程[J]. 中国环境科学,2014,34(4):827-836.
- [6] 夏民旋,王维,袁瑞,等. 超氧化物歧化酶与植物抗逆性[J]. 分子植物育种,2015,13(11):2633-2646.
- [7] 覃鹏,刘飞虎,梁雪妮. 超氧化物歧化酶与植物抗逆性[J]. 黑龙江农业科学,2002(1):31-34.
- [8] 黄蕾,肖文娟,王升,等. 欧洲花楸及其悬浮细胞在植物抗逆性研究中的应用[J]. 中国现代中药,2016,18(10):1359-1363,1380.
- [9] 徐凌霄,陈王杰,许海锦,等. 胁迫下的细胞程序性死亡鉴定有助于植物抗逆性[J]. 科学通报,2016,61(8):809-818.
- [10] 孙荣庆. 我国二氧化硫污染现状与控制对策[J]. 中国能源,2003,25(7):25-28.
- [11] 郑淑颖. 二氧化硫污染对植物影响的研究进展[J]. 生态科学,2000,19(1):59-64.
- [12] 廖莉团,苏欣,李小龙,等. 城市绿化植物滞尘效益及滞尘影响因素研究概述[J]. 森林工程,2014,30(2):21-24.
- [13] 温瑀,穆立蕾. 土壤铅、镉胁迫对 4 种绿化植物生长、生理及积累特性的影响[J]. 水土保持学报,2013,27(5):234-239.
- [14] 熊向艳,韩永伟,高馨婷,等. 北京市城乡结合部 17 种常用绿化植物固碳释氧功能研究[J]. 环境工程技术学报,2014,4(3):248-255.
- [15] 刘颖,李朝炜,邢文岳,等. 城市交通道路绿化植物滞尘效应研究[J]. 北方园艺,2015(3):77-81.
- [16] 汤聪,刘念,郭微,等. 广州地区 8 种草坪式屋顶绿化植物的抗旱性[J]. 草业科学,2014,31(10):1867-1876.
- [17] 郝再彬,苍晶,徐仲. 植物生理实验[M]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学出版社,2004.
- [18] 石元值,马立峰,韩文炎,等. 二氧化硫对茶园土壤和茶叶中铅、铜、镉元素含量的影响[J]. 茶叶,2001,27(4):21-24.
- [19] 王小林,余敏灵,陈文秋,等. 离子色谱-直接提取法测定山药中二氧化硫的含量[J]. 中国药师,2015,18(1):166-168.
- [20] 李彦慧,孟庆瑞,李向应,等. 紫叶李叶片色素含量及叶绿素荧光动力学参数对 SO₂ 胁迫的响应[J]. 环境科学学报,2008,28(11):2236-2242.
- [21] 陈建明,俞晓平,程家安. 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.
- [22] 彭长连,温达志,孙梓健,等. 城市绿化植物对大气污染的响应[J]. 热带亚热带植物学报,2002,10(4):321-327.
- [23] 徐旭,孙振元,潘远智,等. 园林植物对重金属胁迫的响应研究现状[J]. 世界林业研究,2007,20(6):36-41.
- [24] 廖凌娟,曹洪麟,吴林芳,等. 交通二氧化硫污染对城市绿化乡土树种的影响:气孔、光合生理的响应[J]. 热带亚热带植物学报,2011,19(5):446-452.
- [25] 苗娟,魏学锋,蔡青青,等. 城市道路交通机动车二氧化硫污染研究进展[J]. 环境科学导刊,2009,28(3):76-78.
- [26] 曹洪法,刘厚田,舒俭民,等. 植物对 SO₂ 污染的反应[J]. 环境科学,1985,6(6):59-66.
- [27] 刘厚田,田仁生. 重庆南山马尾松衰亡与土壤铝活化的关系[J]. 环境科学学报,1992,12(3):297-305.
- [28] 陈良华,曹艺,杨万勤,等. 三种园林植物对夜间光照的响应与适应特征[J]. 生态学报,2017,37(2):549-556.
- [29] 宋晓梅,曹向阳. 模拟酸雨对不同园林植物叶片生理生态特性的影响[J]. 水土保持研究,2017,24(2):365-370.
- [30] 张文瑾,张宇清,余维维,等. 氮添加对油蒿群落植物叶片生态化学计量特征的影响[J]. 环境科学研究,2016,29(1):52-58.
- [31] 王辉,植爽,吴钰祥,等. NO 供体硝普钠对干旱胁迫下玉米幼苗抗性生理的影响[J]. 江苏农业科学,2016,44(7):151-154.
- [32] 曹雪妮,屈凡,马名立,等. 镉胁迫对 2 个宁夏主栽水稻品种幼苗期抗氧化同工酶亚基及其活性的影响[J]. 江苏农业科学,2016,44(7):107-112.
- [33] 吴婷婷,刘国锋,韩士群,等. 蓝藻水华聚集对水葫芦生理生态的影响[J]. 环境科学,2015,36(1):114-120.
- [34] 韩阳,李雪梅,朱延姝. 环境污染与植物功能[M]. 北京:化学工业出版社,2005:70-90.