

牛林飞,田义新,马 静,等. 干旱胁迫对菘蓝光合特性的影响[J]. 江苏农业科学,2019,47(23):155-158.  
doi:10.15889/j.issn.1002-1302.2019.23.037

# 干旱胁迫对菘蓝光合特性的影响

牛林飞,田义新,马 静,张芳芳,孟千琪

(吉林农业大学中药材学院,吉林长春 130118)

**摘要:**为了解干旱胁迫对菘蓝光合特性的影响,采用盆栽法,利用大型移动防雨棚开展了菘蓝干旱胁迫试验,研究干旱胁迫对菘蓝净光合速率( $P_n$ )、气孔导度( $G_s$ )、胞间  $CO_2$  浓度( $C_i$ )、蒸腾速率( $T_r$ )、气孔限制值( $L_s$ )和水分利用率(WUE)日变化的影响。结果表明,在适宜水分和轻度干旱胁迫下,气孔限制是菘蓝  $P_n$  降低的主要因素;中度和重度干旱胁迫下,非气孔限制是菘蓝  $P_n$  降低的主要因素。干旱胁迫会导致菘蓝的  $T_r$  降低和  $T_r$  峰值的前移。随着干旱胁迫程度的加剧,菘蓝为适应干旱缺水的条件会使叶片的  $P_n$ 、 $T_r$  和  $G_s$  均显著下降,从而提高干旱情况下的 WUE,缩小与充足供水情况下的差距。

**关键词:**菘蓝;干旱胁迫;光合特性;水分利用效率

**中图分类号:** S567.2<sup>+</sup>39.01 **文献标志码:** A **文章编号:** 1002-1302(2019)23-0155-03

近年来,随着温室效应的增加,世界各国干旱频发且日益严重,绝大部分国家和地区都遭受不同程度的干旱威胁<sup>[1]</sup>,合理利用水资源已成为一个世界性难题,而水资源短缺已成为干旱地区限制植物正常生长发育的关键因素,因此研究干旱胁迫对植物栽培的影响意义重大。

菘蓝(*Isatis indigotica* Fortune)为十字花科菘蓝属 2 年生草本植物,是我国传统的大宗药材,其根部入药为板蓝根,叶入药为大青叶,主要功效为清热解毒,凉血利咽<sup>[2]</sup>。菘蓝原产于中国,在全国各地均有栽培,是一种适应性较强,喜温暖怕水涝的药材。

目前对菘蓝的研究多见于对其的化学成分和药理作用分析<sup>[3-4]</sup>,而与栽培密切相关的水分生理与光合生理研究较少。根据前人的报道,干旱胁迫对植物的光合作用影响较大。于文颖等研究表明,干旱胁迫导致了玉米叶片整体净光合速率、蒸腾速率和气孔导度下降<sup>[5]</sup>。张金政等发现,东北玉簪和紫萼玉簪干物质质量、光合参数、叶绿素含量随着干旱胁迫程度加深对其抑制作用变大<sup>[6]</sup>。杨娟娟等研究发现,钾肥能显著缓解干旱胁迫对菘蓝幼苗的伤害<sup>[7]</sup>。笔者首次通过盆栽试验研究了干旱胁迫对菘蓝的光合参数的影响,分析干旱胁迫下菘蓝的光合生理与水分利用效率二者之间的关系以及菘蓝对干旱胁迫的响应机制,以期对菘蓝的栽培与管理提供科学依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 试验材料

试验地设在吉林农业大学药用植物科技示范园。试验材

料菘蓝种子由吉林同仁堂提供,经吉林农业大学田义新教授鉴定为十字花科植物菘蓝的种子。

主要设备为便携式光合作用仪(上海泽泉科技股份有限公司);土壤水分含量测定仪(浙江托普仪器有限公司)。

### 1.2 试验设计

采用盆栽模拟控水法进行试验。2018 年 5 月 10 日将菘蓝种子播种在高 24 cm、内径 21 cm 的塑料花盆中,每盆装土 7 kg,盆栽土为混合均匀的 1/3 沙子、1/3 当地土和 1/3 腐殖土。用环刀法和水分含量测定仪测得土壤最大含水量为 31.5%。试验设计了 4 个供水处理,即土壤的田间相对持水量 85% (适宜水分,  $W_1$ )、65% (轻度干旱,  $W_2$ )、45% (中度干旱,  $W_3$ )、25% (重度干旱,  $W_4$ )。每个处理 15 盆,共计 60 盆。当菘蓝苗高 5 cm 后进行间苗,每盆保留 3 株,2018 年 6 月 1 日开始进行水分处理试验,9 月 30 日结束。试验每天下午使用土壤水分含量测定仪测量土壤含水量并进行计算补充所缺水分,试验在可移动透明挡雨棚内进行,晴天打开棚布,阴雨天和晚上把棚布盖好,防止自然降水对试验的影响。

### 1.3 指标测定

在 8 月中旬菘蓝根部快速生长期,选择晴朗无云的天气使用光合作用仪测定 4 种处理菘蓝叶片的光合参数。从 08:00—16:00,每隔 2 h 测定 1 次,每个处理测定已经标记好的 5 张叶片,选择长势良好、生长部位相同的叶片进行测定,5 次重复。测定的指标有:净光合速率  $P_n$ 、气孔导度  $G_s$ 、胞间  $CO_2$  浓度  $C_i$ 、蒸腾速率  $T_r$  等。计算出水分利用率  $WUE = P_n/T_r$  和气孔限制值( $L_s = 1 - C_i/C_a$ ),  $C_a$  为大气  $CO_2$  浓度。

### 1.4 统计方法

对所测得的数据采用 Excel 2003 和 SPSS 20.0 进行统计分析,采用 Origin 8.0 作图。

## 2 结果与分析

### 2.1 干旱胁迫对菘蓝净光合速率的影响

净光合速率是指植物的光合作用速率减去呼吸作用速

收稿日期:2018-09-18

基金项目:吉林省重点科技攻关项目(编号:20160204001YY)。

作者简介:牛林飞(1993—),男,山西运城人,硕士研究生,从事药用植物规范化生产与质量控制研究。E-mail:niu18243011623@163.com。

通信作者:田义新,博士,教授,从事药用植物种植研究。E-mail:y.x.tian2003@163.com。

率,能体现植物有机物的积累速度。由图 1 可以看出 4 种干旱处理的菘蓝  $P_n$  曲线均呈现双峰型曲线,在 12:00 的时候具有明显的“光合午休”现象。 $W_1$ 、 $W_2$  和  $W_3$  处理的  $P_n$  在 14:00 时达到峰值;而  $W_4$  处理的  $P_n$  峰值在 08:00。这是因为随着胁迫程度的升高,菘蓝体内的叶绿素含量逐渐减少,从而导致 08:00 光照度对于  $W_4$  处理已经达到饱和光照。 $W_1$ 、 $W_2$ 、 $W_3$ 、 $W_4$  处理的日平均  $P_n$  值分别为 7.666、6.408、4.342、2.801  $\mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ ,处理间差异显著( $P < 0.05$ ),表明干旱胁迫对菘蓝的  $P_n$  的影响比较明显,由此可以推测干旱胁迫在很大程度上会抑制菘蓝干物质的积累,进而影响菘蓝的产量。

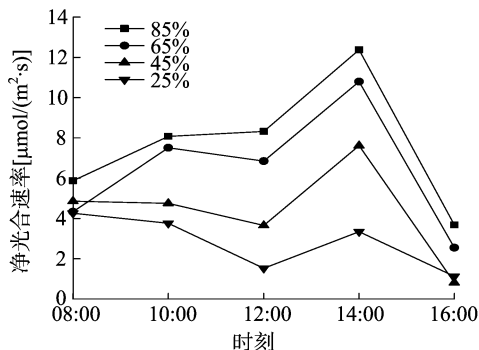


图1 不同处理对菘蓝净光合速率日变化的影响

## 2.2 干旱胁迫对菘蓝气孔导度日变化的影响

气孔是植物叶片与外界进行气体交换的主要通道,气孔导度代表了气孔的张开程度,是影响植物光合作用、呼吸作用及蒸腾作用的主要因素。植物会通过改变气孔的张开程度进而来控制与外界  $\text{CO}_2$  和水汽的交换,从而调节植物的  $P_n$  和  $T_r$ ,以适应不同的环境条件<sup>[9]</sup>。由图 2 可见, $W_1$  处理下菘蓝的  $G_s$  在白天光照强烈下明显高于其他干旱处理组,呈单峰型曲线,14:00 达到最高,14:00 以后呈下降趋势。可能是因为  $W_1$  处理下菘蓝的水分充足,从而缓解了高温对气孔的抑制作用。而  $W_2$ 、 $W_3$  和  $W_4$  处理下菘蓝的  $G_s$  曲线呈双峰型曲线,峰值分别在 10:00 和 14:00。可能是因为中午气温升高,植物为降低蒸腾作用而使  $G_s$  降低。 $W_1$ 、 $W_2$ 、 $W_3$  和  $W_4$  处理的日平均  $G_s$  值分别为 0.114、0.073、0.064、0.043  $\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ ,各处理间差异性显著( $P < 0.05$ ),表明干旱胁迫对菘蓝的  $G_s$  影响较明显。由此可以看出随着胁迫程度加深,会导致植物  $G_s$  逐渐降低,从而使植物可以适应干旱的环境条件。

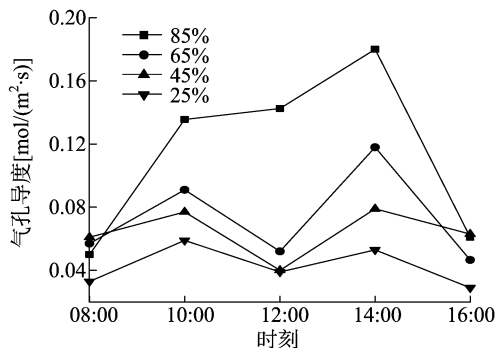


图2 不同处理对菘蓝气孔导度日变化的影响

## 2.3 干旱胁迫对菘蓝胞间 $\text{CO}_2$ 浓度日变化的影响

胞间  $\text{CO}_2$  浓度是植物光合生理研究中非常重要的参数,

特别是在光合作用的气孔限制分析中,它是判断光合速率变化的主要原因和是否为气孔因素必不可少的依据<sup>[10]</sup>。由图 3 看出, $W_1$  和  $W_2$  处理下  $C_i$  值在 08:00—12:00 时间段快速下降,这是由于光照增强, $P_n$  升高, $C_i$  浓度降低<sup>[11-12]</sup>。 $W_3$  和  $W_4$  处理下  $C_i$  值在 08:00—10:00 时间段呈下降趋势,随后呈上升趋势。这是由于  $C_i$  值在 08:00—10:00 之间随着植物光合作用的消耗而降低,在 10:00—16:00 之间随着  $P_n$  的降低和  $G_s$  的增大呈上升趋势。 $W_1$ 、 $W_2$ 、 $W_3$  和  $W_4$  处理的日平均  $C_i$  值分别为 270.2、252.0、232.2、244.6  $\mu\text{mol}/\text{mol}$ ,各处理间差异不显著( $P > 0.05$ )。表明干旱对菘蓝的  $C_i$  影响不显著。

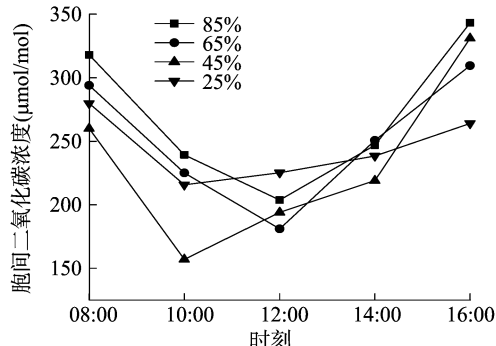


图3 不同处理对菘蓝胞间二氧化碳浓度日变化的影响

## 2.4 干旱胁迫对菘蓝蒸腾速率日变化的影响

蒸腾作用是植物体内重要的一种生理过程,植物可以通过蒸腾作用来调节叶面温度,运输体内所需的矿物质和光合作用所需的水分<sup>[13]</sup>。由图 4 看出,4 种干旱处理下菘蓝的  $T_r$  变化趋势都显现出单峰型趋势, $W_1$ 、 $W_2$  处理下菘蓝的  $T_r$  峰值出现在 12:00,分别是 1.675、1.483  $\text{mmol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ ;  $W_3$ 、 $W_4$  干旱处理下菘蓝的  $T_r$  峰值出现在 10:00,分别是 1.258、0.929  $\text{mmol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ 。这是由于温度的升高导致植物须要加强蒸腾作用,以维持植物体的温度。 $W_1$ 、 $W_2$ 、 $W_3$ 、 $W_4$  处理的日平均  $T_r$  分别为 1.290、1.153、1.046、0.756  $\text{mmol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ ,分析得  $W_1$  适宜水分和  $W_4$  重度干旱间有显著性差异( $P < 0.05$ ),说明干旱胁迫对菘蓝的  $T_r$  影响显著。

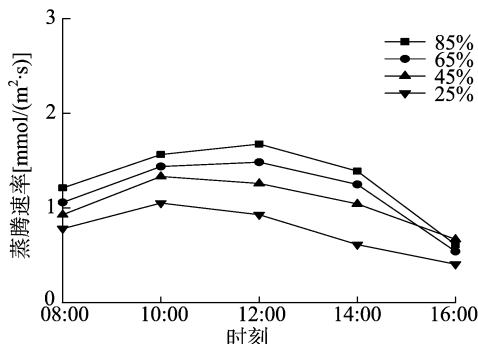


图4 不同处理对菘蓝蒸腾速率日变化的影响

## 2.5 干旱胁迫对菘蓝气孔限制值日变化的影响

气孔限制是指随着植物的气孔导度降低,进入气孔的  $\text{CO}_2$  减少,不能满足植物光合作用的要求。由图 5 看出,4 种处理菘蓝  $L_s$  日变化曲线均呈单峰型曲线。 $W_1$  和  $W_2$  处理  $L_s$  峰值出现在 12:00,  $W_3$ 、 $W_4$  处理  $L_s$  峰值出现在 10:00。 $W_1$ 、 $W_2$ 、 $W_3$  和  $W_4$  处理的日平均气孔限制值分别为 0.328、0.373、0.421、0.376,分析得各处理间差异不显著( $P > 0.05$ )。

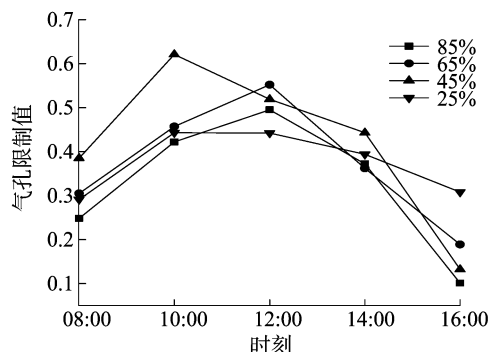


图5 不同处理对菘蓝气孔限制值日变化的影响

## 2.6 干旱胁迫对菘蓝水分利用效率日变化的影响

气孔限制影响叶片的蒸腾速率和光合速率,必将影响叶片的水分利用效率<sup>[14]</sup>。由图 6 看出, $W_3$ 、 $W_4$  处理的 WUE 在 12:00 前呈下降趋势, $W_1$ 、 $W_2$  处理在 12:00 前变化不明显, $W_1$ 、 $W_2$ 、 $W_3$  处理在 14:00 均上升到最大值, $W_4$  处理 WUE 率日变化曲线呈“V”形,在 16:00 达到最高值。 $W_3$  和  $W_4$  处理开始降低,是因为随着气孔导度的开放,植物蒸腾速率增加较快,而净光合速率反而呈略微下降的趋势从而导致 WUE 呈下降趋势,“光合午休”结束以后,植物的  $P_n$  增长迅速,WUE 得到提高<sup>[15]</sup>。 $W_1$ 、 $W_2$ 、 $W_3$ 、 $W_4$  处理的日平均 WUE 分别为 6.305、5.205、5.047、4.192  $\mu\text{mol}/\text{mmol}$ ,在不同干旱胁迫下,菘蓝的 WUE 差异不显著,说明菘蓝在干旱环境下自身的水分利用率虽然受到一定的影响,但未达到显著差异。

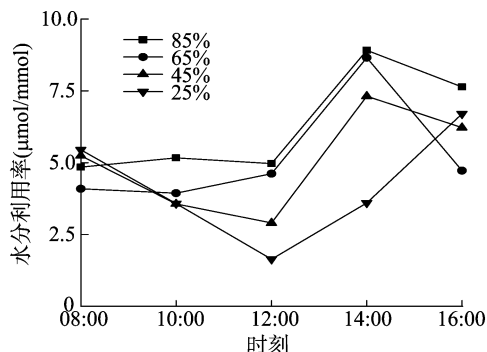


图6 不同处理对菘蓝水分利用率日变化的影响

## 3 结论与讨论

植物的光合作用会受多种因素的影响,如植物的蒸腾作用、气孔导度、光照度等,而这些因素又会受到干旱的环境条件影响。通常植物光合速率在干旱条件下降低,主要分为 2 个方面:第 1 种是由于环境温度的升高,导致植物叶片温度升高,细胞内的核酮糖二磷酸羧化酶、1,5-二磷酸核酮羧化酶/加氧酶和叶绿体的活性受到强烈影响,导致植物的光合速率显著降低,这被称为植物光合作用的非气孔限制<sup>[16]</sup>;另一种是因为植物在干旱胁迫的条件下,气孔导度降低,限制了  $\text{CO}_2$  的进出速度,不能满足植物光合作用对  $\text{CO}_2$  的需求,这被称为植物光合作用的气孔限制,用  $L_s$  来表示气孔限制值。在本研究中,不同水分处理下的菘蓝均出现“光合午休”现象, $W_3$  处理和  $W_4$  处理在  $G_s$  和  $P_n$  下降的情况下, $C_i$  出现了上升的现象,由此可知,菘蓝在中度和重度干旱胁迫情况下光合能力降低,是由非气孔因素引起的。随着温度的升高和干

旱的加剧,导致了叶片内酶活性受到抑制和叶绿体结构受到破坏,使得叶片的光合作用能力降低<sup>[14,17]</sup>。在适宜水分和轻度干旱胁迫下,菘蓝光合能力降低,气孔限制是其降低的主要因素。因此,通过调控土壤水分促使植物  $G_s$  和  $T_r$  向有利于提高植物光合速率的方向变化是提高菘蓝  $P_n$  的有效措施。

韩磊等认为,随着水分胁迫的加剧,植物的  $T_r$  会逐渐降低,且蒸腾速率的峰值前移<sup>[18]</sup>。本研究中不同处理间菘蓝的  $T_r$  随着干旱胁迫程度的加深,植物叶片的  $T_r$  逐渐降低, $W_1$  和  $W_2$  的  $T_r$  峰值出现在 12:00, $W_3$  和  $W_4$  的  $T_r$  峰值出现在 10:00, $W_1$  处理的日平均  $T_r$  最高,为 1.290  $\text{mmol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ , $W_4$  处理的日平均  $T_r$  最低,为 0.756  $\text{mmol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ ,且两者之间有显著性差异。说明干旱胁迫会导致菘蓝的  $T_r$  降低和蒸腾速率峰值前移。

本试验中各处理间菘蓝的  $P_n$ 、 $T_r$  和  $G_s$  日平均值表现为  $W_4 < W_3 < W_2 < W_1$ ,且各处理间呈显著性差异,不同于干旱胁迫下的菘蓝的 WUE 日变化均为上午和下午高、中午低的趋势,不同处理的 WUE 日均值随着胁迫程度的加深而降低, $W_1$  处理的 WUE 日均值最高,但在 08:00 较  $W_3$  和  $W_4$  处理值低,且各处理间差异不显著。说明随着干旱胁迫程度的加剧,菘蓝为适应干旱缺水的条件会使叶片的  $P_n$ 、 $T_r$  和  $G_s$  均显著下降,从而提高了干旱情况下的 WUE,缩小与充足供水情况下的差距;适度的干旱胁迫能提高菘蓝的 WUE,从而增强叶片对水分的充分利用能力,抵御干旱逆境对其造成的伤害。这与前人的研究基本一致,如于文颖等认为随着土壤含水量的降低,植物为提高叶片的 WUE,会使叶片整体净光合速率、 $T_r$  和  $G_s$  为适应干旱的条件而显著性降低<sup>[5,19]</sup>。因此,吉林省种植菘蓝可以进行适当的轻度干旱胁迫,从而达到节约水资源和提高菘蓝水分利用率的目的。

## 参考文献:

- [1] 王芳,王春乙,邬定荣,等. 近 30 年中美玉米带生长季干旱特征的差异及成因分析[J]. 中国农业气象,2018,39(6):398-410.
- [2] 国家药典委员会. 中华人民共和国药典(一部)[M]. 北京:化学工业出版社,2005.
- [3] Yang L G, Jiang H M, Wang G, et al. Phenylpropanoids and some nitrogen-containing constituents from the Roots of *Isatis indigotica* Fort. (Cruciferae)[J]. Biochemical Systematics and Ecology, 2014, 54:313-315.
- [4] Wang X E, Xue Y, Li Y L, et al. Effects of *isatis* root polysaccharide in mice infected with H3N2 swine influenza virus[J]. Research in Veterinary Science, 2018, 119:91-98.
- [5] 于文颖,纪瑞鹏,冯锐,等. 不同生育期玉米叶片光合特性及水分利用效率对水分胁迫的响应[J]. 生态学报, 2015, 35(9):2902-2909.
- [6] 张金政,张起源,孙国峰,等. 干旱胁迫及复水对玉簪生长和光合作用的影响[J]. 草业学报, 2014, 23(1):167-176.
- [7] 杨娟娟,郭巧生,陈苏丹,等. 钾肥和水分对菘蓝幼苗生长和生理特性的影响[J]. 中国中药杂志, 2014, 39(10):1772-1776.
- [8] 唐建昭,王靖,潘学标,等. 农牧交错带油葵光合作用日变化及午休现象的研究[J]. 中国农业大学学报, 2014, 19(6):81-87.
- [9] 刘婧,王宝山,谢先芝. 植物气孔发育及其调控研究[J]. 遗传, 2011, 33(2):131-137.

贾明云,李密密,周冬琴,等. 南京 5 种园林植物对大气污染物的综合净化能力[J]. 江苏农业科学,2019,47(23):158-163.  
doi:10.15889/j.issn.1002-1302.2019.23.038

# 南京 5 种园林植物对大气污染物的综合净化能力

贾明云<sup>1</sup>, 李密密<sup>1</sup>, 周冬琴<sup>1</sup>, 蒋逍逍<sup>2</sup>, 于金平<sup>1</sup>

(1. 江苏省中国科学院植物研究所, 江苏南京 210014; 2. 南京农业大学园艺学院, 江苏南京 210095)

**摘要:**采用人工烟雾箱模拟熏气法实时监测 5 种园林植物雪松、女贞、广玉兰、石楠和桂花作用下大气污染物的浓度变化。结果表明,5 种植物叶片单位面积对  $\text{SO}_2$ 、氮氧化物( $\text{NO}_x$ )和细颗粒物( $\text{PM}_{2.5}$ )的综合去除能力表现为广玉兰>雪松>女贞>桂花>石楠。动力学模型拟合结果表明,植物对大气中  $\text{SO}_2$  和  $\text{PM}_{2.5}$  的去除主要由叶表面吸附过程控制;而对  $\text{NO}_x$  的去除则受植物叶片内的吸收转化过程影响。对叶片微形态结构的环境扫描电镜观察发现,表皮沟状组织、叶面密被绒毛有利于植物吸附  $\text{SO}_2$  和  $\text{PM}_{2.5}$ ,而气孔大小和密度影响  $\text{NO}_x$  的吸收和转化。

**关键词:**大气污染;园林植物;人工烟雾箱;动力学;叶片微形态;净化能力

**中图分类号:** X51;X173 **文献标志码:** A **文章编号:** 1002-1302(2019)23-0158-06

随着社会经济的快速发展,工业化、城镇化的推进,能源资源消耗的持续增加,我国大气污染现状严峻,以可吸入颗粒物( $\text{PM}_{10}$ )、细颗粒物( $\text{PM}_{2.5}$ )为特征污染物的区域性大气环境问题日益突出<sup>[1-2]</sup>。我国大气污染以煤烟型污染为主,表现为总悬浮颗粒物(TSP)、 $\text{PM}_{10}$ 和 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度超标;二氧化硫( $\text{SO}_2$ )污染长期保持在较高的水平;机动车尾气污染物排放总量增加,致使大气氮氧化物( $\text{NO}_x$ )污染不断加重。大气污染直接影响生态环境,危害人体健康。前者主要体现在加重酸雨的形成、臭氧层破坏、影响气候等方面;后者主要是人体肺部吸入污染物,引起心血管、呼吸系统、肺部等疾病<sup>[3-6]</sup>。为改善大气质量,国务院发布了《大气污染防治行动计划》<sup>[1]</sup>,近 5 年来城市大气污染问题得到了一定的改善,但大气污染与修复工程仍是国家和民众关注的焦点问题<sup>[7]</sup>。

植物作为现代化城市环境建设的主体,在美化城市景观、调节区域小气候等方面发挥着重要作用<sup>[8-10]</sup>。植物不仅对一定浓度范围内的环境污染有抵抗力,而且可以通过吸附、吸收、累积和转化等途径有效地持留和去除大气污染物,净化大气<sup>[11-14]</sup>。近年来,利用植物修复技术来治理大气污染成为新的研究热点和科技前沿。目前国内外关于城市园林植物净化大气污染物的研究主要集中于野外清洁区和污染区植物在一定时间段内叶片滞留颗粒物的质量、叶片内硫(S)和氮(N)元素含量来反映植物对大气中  $\text{PM}_{2.5}$ 、 $\text{SO}_2$ 、 $\text{NO}_x$  的吸收净化效果<sup>[11-15]</sup>。但是,这种方法受其生长自然环境条件如颗粒物浓度、大气运动、气候状况、风力等,以及车辆、人类活动的影响较大,很难客观评价绿化植物对各种污染物的综合修复能力<sup>[16]</sup>。人工熏气烟雾箱能够模拟自然界气候条件,对植物生长环境进行恒定控制,能够对不同植物的综合修复能力进行客观评价。然而,目前国内外采用人工烟雾箱开展不同植物净化大气中  $\text{PM}_{2.5}$ 、 $\text{SO}_2$  和  $\text{NO}_x$  的研究<sup>[17]</sup>甚少。因此,本研究拟采用人工熏气箱对大气中  $\text{PM}_{2.5}$ 、 $\text{SO}_2$  和  $\text{NO}_x$  进行实时监测,通过经典动力学方程探讨不同植物对大气污染物的累积动力学特征,结合植物叶片微形态特征,阐明不同植物叶片对大气污染物的净化机制,以期城市绿化植物选择和生态景观城市建设提供科学依据。

收稿日期:2019-06-04

基金项目:江苏省住房和城乡建设厅项目(编号:SJC2016010002);南京市园林局项目(编号:20140401);南京市绿化园林局项目(编号:YLKJ201705JH)。

作者简介:贾明云(1985—),女,河南南阳人,博士,助理研究员,主要研究方向为环境污染与控制技术。E-mail:jmy27@163.com。  
通信作者:于金平,硕士,高级实验师,主要研究方向为大气污染与植物修复。E-mail:yujinping@cnbg.net。

- [10]陈根云,陈娟,许大全. 关于净光合速率和胞间  $\text{CO}_2$  浓度关系的思考[J]. 植物生理学通讯,2010,46(1):64-66.  
[11]尹智宇,肖关丽. 干旱胁迫对冬马铃薯苗期生理指标及光合特性的影响[J]. 云南农业大学学报:(自然科学版),2017,32(6):1-6.  
[12]徐俊增,彭世彰,魏征,等. 节水灌溉水稻叶片胞间  $\text{CO}_2$  浓度及气孔与非气孔限制[J]. 农业工程学报,2010,26(7):76-80.  
[13]刘崑艳,周以飞,李清,等. 三叶青的蒸腾作用与气孔结构研究[J]. 中草药,2015,46(17):2610-2617.  
[14]韩梅,林春新,杨利民,等. 水因子对东北铁线莲光合特性的影响[J]. 西北农林科技大学学报(自然科学版),2012,40(10):213-217.

- [15]谭勇,梁宗锁,董娟娥,等. 水分胁迫对菘蓝生长发育和有效成分积累的影响[J]. 中国中药杂志,2008,33(1):19-22.  
[16]高冠龙,冯起,张小由,等. 植物叶片光合作用的气孔与非气孔限制研究综述[J]. 干旱区研究,2018,35(4):929-937.  
[17]韩瑞宏,卢欣石,高桂娟,等. 紫花苜蓿(*Medicago sativa*)对于干旱胁迫的光合生理响应[J]. 生态学报,2007,27(12):5229-5237.  
[18]韩磊,孙兆军,展秀丽,等. 宁夏河东沙区柠条植株叶片蒸腾对于干旱胁迫的响应[J]. 生态环境学报,2015,24(5):756-761.  
[19]陈平,孟平,张劲松,等. 2 种药用植物生长和水分利用效率对于干旱胁迫的响应[J]. 应用生态学报,2014,25(5):1300-1306.