

杨万红. 模拟雾霾对三角梅光合特性的影响[J]. 江苏农业科学, 2017, 45(8): 129–132.

doi:10.15889/j.issn.1002-1302.2017.08.036

模拟雾霾对三角梅光合特性的影响

杨万红

(厦门东海职业技术学院工程技术学院, 福建厦门 361000)

摘要:为了探讨雾霾浓度对园林植物生长代谢的影响,以三角梅为试验材料,研究 75、150、300 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 3 种不同浓度梯度的模拟雾霾胁迫对三角梅光合特性的影响。结果表明:75 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 浓度的模拟雾霾处理对三角梅叶片日均净光合速率(P_n)、气孔导度(G_s)、蒸腾速率(T_r)和胞间 CO_2 浓度(C_i)的影响不明显;150、300 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 浓度的模拟雾霾胁迫下,三角梅叶片光合“午休”现象加重,日均净光合速率(P_n)、蒸腾速率(T_r)和气孔导度(G_s)均明显降低,而细胞间隙 CO_2 浓度(C_i)明显增大。

关键词:模拟雾霾;三角梅;光合特性

中图分类号: S685.990.1 **文献标志码:** A **文章编号:** 1002-1302(2017)08-0129-04

雾,属于常见的自然现象,是一种相对湿度大于 90% 的气溶胶系统,蕴含着大量悬浮在空气中的微小水滴;霾,别称灰霾,属于近年来常见的天气现象,是一种相对湿度小于 80% 的气溶胶系统,蕴含灰尘、氮氧化物、有机碳化物等大量细微的干尘粒子^[1-3]。这些细微的颗粒物直径多在 0.001 ~ 10 μm 之间,也是近来我国各大城市频发灰霾天气的主要元

凶^[4]。霾与雾的最本质区别是出现霾的时候,空气中的相对湿度较低,而出现雾的时候,空气中的相对湿度却是饱和的^[5]。目前,我国把阴霾天气现象与雾统称为雾霾天气。

近年来,随着我国经济的持续增长,工业及交通运输业等方面也呈现快速发展的态势。与此同时,经济的快速发展与大气污染现象的矛盾也日益凸显。尤其是 2014 年入冬以来,雾霾天气污染日益严重,特别是广东西部、广西东北部、河南北部、陕西中部以及华北地区的一些重工业高度发达的城市污染最为严重^[6],年度重霾污染时间高值达到 25 ~ 40 d,有些城市如江苏南京、河南新乡、陕西西安、山西临汾年均霾时间甚至高达 80 d 以上^[7-11]。雾霾天气造成了大气环境质量严

收稿日期:2016-05-16

基金项目:福建省中青年教育科研项目(编号:JA15897)。

作者简介:杨万红(1982—),女,安徽东至人,硕士,讲师,主要从事生物学研究。Tel: (0592) 7269217; E-mail: yangwanhong666@tom.com。

台、凉棚等,常常是光少、保水难,甚至伴有高温,了解与把握观赏藤本植物的生态适应性,有助于因地植树和科学管理,以确保树体长势良好。

5.2 开展良种繁育

要高度重视观赏藤本植物乡土树种的研究,进一步熟悉其生长习性,在园林绿化中加大本土树种的应用比例;同时,切实加强观赏藤本植物的引种、驯化及栽培研究,特别是景观性能的研究与挖掘,努力培育满足各地区城镇绿化需要的观赏藤本新品种。

5.3 重视造景设计

观赏藤本植物具有与乔、灌木不一般的优美树姿,而且景观的可塑性大,因设计理念而变,是园林景观建设的重要资源,应加大观赏藤本植物的开发与应用力度,不断提升设计和造景水平。在园林生产中,乔-灌-草是最常见的组合方式,未能考虑观赏藤本的应用与构景,不妨试选乔-藤-灌-草、乔-藤-地被等组景方式,建成多层次景观,满足园林城市建设需要。

5.4 加强养护管理

观赏藤本植物虽在垂直绿化中叶色美艳,可观花赏果,且造型多变,养护粗放,景观价值较高。但优美的外婆需要细致的管理^[4],应结合凉廊式、棚架式、附壁式等架体造景方式的不同,并考虑树种的生育特点、设计要求等,进行综合分析

合理修剪,剪去病虫枝、枯枝、重生枝,及时调节与平衡枝条生长势,并对藤蔓适当绑扎、疏理,按景观需要有序分布,确保植株造型优美。

6 结论

城镇建设快速发展,绿地空间日益受限,环境质量亟待改善,而观赏藤本植物不仅养护粗放易造景,而且占地少、生长快,可借助建筑物及花架等设施进行垂直绿化,构建多层次立体景观,实现环境质量与园林造景同步提高的目的,因而发展前景十分广阔。同时,应看到观赏藤本植物发展中的不足,要大力开展品种培育、景观设计、栽培技术等方面深层次探讨,提高观赏藤本植物的应用水平,推进城镇园林建设再上新台阶。

参考文献:

- [1]何秋华,石东扬,黎兆海,等. 广西园林藤本植物的筛选研究[J]. 广西植物, 2010, 30(2): 237-241.
- [2]程金祥. 浅谈藤本植物在园林中的运用[J]. 科技风, 2010(6): 35.
- [3]谢风云,赵同贵,吴彤林. 黔西南州观赏藤本植物资源及园林应用研究[J]. 林业实用技术, 2011(8): 51-52.
- [4]齐海鹰. 园林树木与花卉[M]. 北京:机械工业出版社, 2008: 92-103.

重污染,其影响之大、范围之广也令国人为之震惊。众所周知,大气质量问题关系到每个人的生存发展,近年来,国内外学者研究显示,大气中 PM_{10} 、 $\text{PM}_{2.5}$ 的浓度变化对呼吸系统疾病和心血管系统疾病、住院人数及人群死亡率等有极大的影响^[12]。有研究表明,仅京津冀地区,2013 年 1 月份因严重空气污染导致 2 725 人死亡^[13]。一些病菌类微生物在大气中经过不断地扩散、传播会引起人群呼吸系统等疾病的频发及动植物病害的发生^[14-15]。同时,雾霾天气大大降低了大气能见度,不但直接影响航班起飞,而且容易引起交通阻塞,甚至引发交通事故。因此,雾霾污染已成为我国当前面临的重大生态环境问题之一,而防治雾霾污染也已成为全国当前一项重要的民生工程。

三角梅 (*Bougainvillea spectabilis* Willa) 为紫茉莉科三角梅属的常绿灌木,别称宝巾花、叶子花。因其适应性强、耐修剪、花期长、颜色鲜艳等特点,深受人们的喜爱,是我国重要的园林绿化兼观赏花卉类植物。三角梅不耐寒,耐高温,因而在我国温暖湿润气候地区如广东、福建、台湾、云南等地均是露地种植,也是深圳市、厦门市的市花。在我国北方地区,三角梅是作为温室的花卉加以栽培以供观赏的^[16]。目前有关逆境对三角梅光合作用影响的研究大多都集中在水分、遮光、温度和盐胁迫上^[17-20],而有关雾霾对三角梅光合特性的影响尚未见报道。作为雾霾天气频发区的城市群,常见园林绿化植物为城市大气污染环境的改善作出了重要贡献,为此,进行模拟雾霾对三角梅生长过程中光合特性的影响效应研究,将有利于了解三角梅对不同雾霾浓度的反应敏感性;同时,初步探索雾霾污染下三角梅光合作用过程中的变化机制,以期为今后雾霾污染下三角梅生长、新陈代谢方面的影响研究及三角梅在未来城市绿化工程中的栽培、管理和应用等提供一定指导依据。

1 材料与方法

1.1 试验材料

试验于 2015 年 10 月在厦门东海职业技术学院环境生态监测试验区进行,选用生长健壮一致的三角梅大红宝巾品种 2 年生幼苗为试验材料。试验材料栽植于盆口直径 45 cm、高 30 cm 的种植盆中,自移植栽培后,所有三角梅的施肥、水分等方面的管理措施一致,平时均用自来水浇灌。

1.2 处理方法

1.2.1 均匀雾霾的模拟处理 参照王黎明等模拟雾霾的方法^[21-22],采用超声波加湿器喷出的雾气来模拟雾。

1.2.2 模拟雾霾浓度的设定 在光照度等条件一致的试验区设置 4 块独立且空间大小相同的试验小区。试验设置 $0 \mu\text{g}/\text{m}^3$ (T_0)、 $75 \mu\text{g}/\text{m}^3$ (T_1)、 $150 \mu\text{g}/\text{m}^3$ (T_2)、 $300 \mu\text{g}/\text{m}^3$ (T_3) 4 种雾霾浓度处理。于 2015 年 10 月 6 日至 12 日连续 7 d 对 T_0 、 T_1 、 T_2 、 T_3 区的三角梅进行不同浓度的雾霾处理。采用鼓风机将草木灰吹入试验区,并通过控制吹入的灰量来改变霾浓度。每种处理设置 6 个重复,随机区组排列,每盆选取充分伸展且生长良好的叶片进行定位标记,用于各项指标的测定。

1.3 光合作用日变化的测定方法

连续 7 d 对三角梅进行不同浓度的雾霾处理后,于 2015

年 10 月 13 日(晴)选择健硕的叶片进行标记,参照谢寅峰等测定光合作用日变化的方法^[23],在自然条件下,采用美国进口的 LI-6400R 型号的光合作用测量系统的标准叶室测定三角梅叶片的净光合速率(P_n)、气孔导度(G_s)、蒸腾速率(T_r)、细胞间隙 CO_2 浓度(C_i)等光合指标。测定时间为 6:00—18:00,每 2 h 测定 1 次。

1.4 数据统计分析

用 Excel 及 SPSS 分析软件进行试验数据的分析。

2 结果与分析

2.1 光合有效辐射(PAR)和叶片温度(T)日变化

由图 1 可以看出:在试验测定期间,光合有效辐射和叶片温度日变化曲线都呈单峰型;大气温度全天在 $18 \sim 27^\circ\text{C}$ 之间变化,日间最高温出现在 12:00 左右;光合有效辐射日变化曲线在 12:00 左右达到最高值,为 $1\ 115 \mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$,12:00 以后开始有所下降,14:00 之后开始迅速下降。

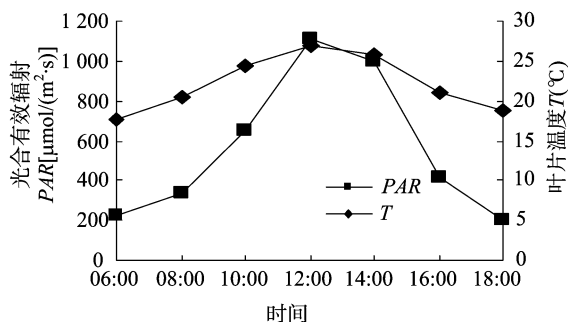


图1 光合有效辐射和叶片温度的日变化

2.2 模拟雾霾胁迫对三角梅叶片净光合速率的影响

净光合速率是植物光合作用强弱的直接体现,也是影响植物光合作用的重要因子,净光合速率的正常与否直接反映植物体光合系统的功能是否正常。由图 2 可知:8:00—10:00,三角梅各处理(T_0 、 T_1 、 T_2 、 T_3)的 P_n 均有明显上升的趋势,在 10:00 左右 P_n 增长到 1 d 中的最高值; T_0 、 T_1 处理的 P_n 日变化曲线呈不明显双峰型(近似单峰型),10:00 以后 P_n 开始持续下降;而 T_2 、 T_3 处理的 P_n 日变化曲线表现出明显的双峰型,10:00—12:00 下降较快,在 12:00 左右具有明显的“光合午休”现象,12:00 以后又缓慢回升,直至 16:00 左右达到 1 d 中第 2 个峰值;此外, P_n 随着雾霾处理浓度的升高,整体上具有明显的下降趋势; T_2 、 T_3 处理与对照 T_0 之间的 P_n 差异明显,其中 T_3 处理的 P_n 最低, T_2 处理的 P_n 次之,10:00 最高值时,经过 T_2 、 T_3 处理的三角梅 P_n 分别为 5.798 、 $4.960 \mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$,分别较 T_0 处理 $6.340 \mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ 下降了 8.55% 、 21.77% ,但是 T_1 处理的 P_n 为 $6.356 \mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$,与对照 T_0 差异不明显,反而比 T_0 处理上升了 0.25% ;从净光合速率日均值看, T_0 、 T_1 、 T_2 、 T_3 处理的日均值分别为 4.071 、 4.064 、 3.762 、 $3.068 \mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$, T_1 、 T_2 、 T_3 处理的 P_n 日均值较 T_0 处理分别降低了 0.18% 、 7.60% 、 24.63% 。

2.3 模拟雾霾胁迫对三角梅叶片气孔导度的影响

气孔是植物体对外进行气体交换的窗口,植物通过调节气孔开度的大小来控制其光合作用中 CO_2 的吸收量和蒸腾

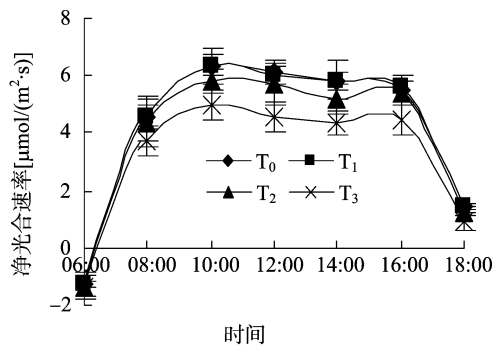


图2 模拟雾霾对三角梅净光合速率日变化的影响

作用中水分的散失量,因此气孔导度直接反映了植物体生理活性的强弱。从图 3 可以看出,6:00—10:00, G_s 逐渐上升, T_0 、 T_1 处理较 T_2 、 T_3 处理上升速度较快,且在 10:00 上升到 1 d 的最大值, $T_0 \sim T_3$ 处理分别是 0.128 6、0.128 4、0.091 7、0.070 12 $\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$; 10:00—14:00,除 T_3 处理外,其他各处理均有明显下降趋势;14:00—16:00, G_s 又出现缓慢上升; 16:00—18:00, G_s 下降至最低值;三角梅的气孔导度随着雾霾处理浓度的升高而降低,同时随着雾霾处理浓度的升高, G_s 的下降幅度也增大, T_1 、 T_2 、 T_3 处理的 G_s 日均变化幅度分别较 T_0 处理降低了 0.80%、26.78%、36.92%。

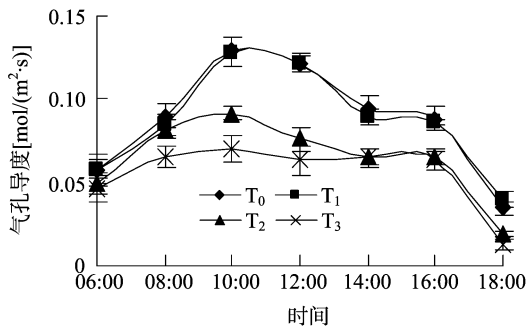


图3 模拟雾霾对三角梅气孔导度日变化的影响

2.4 模拟雾霾胁迫对三角梅叶片蒸腾速率的影响

蒸腾作用是水分从活的植物体表面以水蒸汽状态散失到大气中的过程,而在单位时间内植物体单位叶面积通过蒸腾作用所蒸腾的水量即蒸腾速率,是反映植物体生理活性的常用指标。由图 4 可以看出,蒸腾速率和图 3 气孔导度的曲线变化趋势基本一致。06:00—10:00, T_e 逐渐上升, T_0 、 T_1 处理较 T_2 、 T_3 处理上升速度较快,且在 10:00 上升到 1 d 的最大值, $T_0 \sim T_3$ 处理分别是 2.226、2.198、1.716、1.270 6 $\text{mmol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$; 10:00—14:00,除 T_3 处理外,其他各处理均呈明显下降趋势;14:00—16:00, T_e 又出现缓慢上升; 16:00—18:00, T_e 下降至最低值;三角梅的蒸腾速率随着雾霾处理浓度的升高而降低, T_e 的下降幅度也越大, T_1 、 T_2 、 T_3 处理的 T_e 日均变化幅度分别较 T_0 处理降低了 0.80%、33.69%、42.47%。

2.5 模拟雾霾胁迫对三角梅叶片胞间二氧化碳浓度的影响

从图 5 胞间 CO_2 浓度日变化曲线可以看出,6:00, T_0 、 T_1 、 T_2 、 T_3 处理的 C_i 最高;6:00—10:00, T_0 、 T_1 、 T_2 、 T_3 处理的 C_i 均呈下降趋势,且在 10:00 左右 C_i 降至最低点;10:00—18:00, T_0 、 T_1 处理的 C_i 又呈上升趋势,而 T_2 、 T_3 处理的 C_i 在

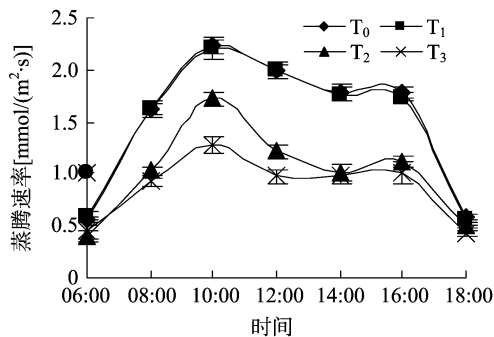


图4 模拟雾霾对三角梅蒸腾速率日变化的影响

10:00—14:00 呈上升趋势,14:00—16:00 呈下降趋势, C_i 在 10:00、16:00 出现了 2 个低谷值; T_0 、 T_1 处理的 C_i 最低且比较稳定, T_2 、 T_3 处理的 C_i 明显上升, T_1 、 T_2 、 T_3 处理相比, T_3 处理的 C_i 最高, T_2 处理的 C_i 次之, T_1 处理的 C_i 最低。

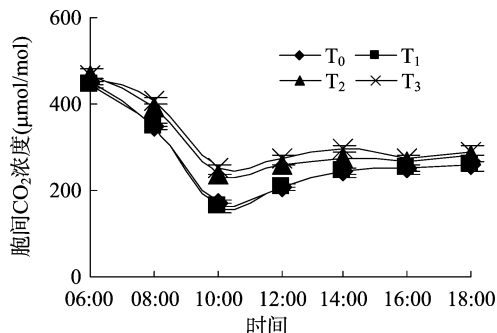


图5 模拟雾霾对三角梅胞间 CO₂ 浓度日变化的影响

3 结果与讨论

光合作用是通过植物体利用环境因子进行自身新陈代谢的活动,获得物质与能量的积累,从而促使植物体生长发育的重要过程,是分析各种环境因子对植物的生长发育产生影响的重要途径。而逆境环境会明显引起植物体叶片光合机能的损伤,从而降低叶片的光合能力。当外界环境发生变化时,与光合作用密切相关的指标如温度、光照度、蒸腾速率、气孔导度、胞间 CO_2 浓度等都会出现不同程度的变化,而这些指标的变化又与植物自身状况和新陈代谢水平关系密切^[24-25]。影响净光合速率的因素主要有气孔导度、蒸腾速率、胞间 CO_2 浓度等,这些因素又相互影响、相互制约,共同完成植物体的光合作用进程^[26]。

目前研究显示,三角梅等常见园林植物的光合作用日变化曲线通常呈双峰型或单峰型^[16-18]。在逆境胁迫下,三角梅叶片的光合速率一般都会出现下降的趋势,同时其下降幅度与逆境胁迫的类型、程度和植物体自身的敏感性能有着直接的关系。从雾霾胁迫下三角梅的净光合速率日变化曲线来看: T_0 与 T_1 处理的叶片净光合速率呈不明显的双峰型(近似单峰型),而 T_2 、 T_3 处理的叶片净光合速率明显呈典型的双峰型,12:00 过后表现出“午休”现象,这也正说明雾霾胁迫影响了三角梅对高温及强光等的适应力,降低了其对高温及强光等的抵抗力。 T_2 、 T_3 处理的三角梅的净光合速率、气孔导度、蒸腾速率的变化趋势大体上是一致的,都会随着雾霾处理浓度的升高而下降,而胞间 CO_2 浓度的变化趋势则相反,随雾

霾浓度的增大而升高。这与李永红等关于逆境胁迫对三角梅光合参数影响的变化趋势研究^[17-20]相一致。 T_1 处理的 P_n [$6.356 \mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$] 较 T_0 处理的 P_n [$6.340 \mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$] 反而上升了 0.25%, 说明轻度的雾霾浓度对三角梅的 P_n 影响不大, 甚至有可能由于轻度雾霾的刺激诱导三角梅净光合速率的提高, 从另外一个方面也反映三角梅对雾霾的抗性能力较强。

Farquhar 等认为: 净光合速率降低, 胞间 CO_2 浓度上升时, 非气孔因素是光合速率下降的主要原因; 而光合速率降低, 同时气孔导度、胞间 CO_2 浓度降低, 气孔限制因素是光合速率下降的主要原因^[27]。从净光合速率、气孔导度、蒸腾速率、胞间 CO_2 浓度日变化曲线来看, 中度、重度雾霾胁迫下三角梅叶片的净光合速率与胞间 CO_2 浓度呈负相关, 光合速率越低, 胞间 CO_2 浓度越高, 光合速率下降时, 胞间 CO_2 浓度较高。从总体上看, 三角梅叶片的日均净光合速率、气孔导度、蒸腾速率均明显降低, 而胞间 CO_2 浓度则相反, 明显出现上升趋势, 由此表明在模拟雾霾的胁迫下, 非气孔因素是导致三角梅光合能力下降的主要诱因, 同时也说明中高浓度的雾霾对三角梅光合能力的影响主要是由于雾霾对其叶肉细胞的影响, 从而导致三角梅光合能力的降低。此外, 三角梅植株较高的气孔导度说明其叶片具有较高的光合底物传导能力, 蒸腾速率的下降说明三角梅面对逆境时通过降低自身水分的丧失来抵抗逆境, 有利于三角梅植株提高自身抗雾霾能力。

目前, 国内外有关模拟雾霾胁迫对三角梅光合特性影响的研究尚未见报道, 本研究根据国内空气质量标准分别设立了 75、150、300 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 3 种不同浓度梯度的模拟雾霾胁迫, 初步研究 3 种不同浓度梯度的模拟雾霾胁迫对三角梅光合特性的影响。结果表明, 中度、重度雾霾胁迫对光合特性具有显著的影响, 但研究程度还有待进一步深入。在今后的研究中, 应将雾霾的成分模拟得更全面更精细, 同时把扩大研究植物的种类对雾霾胁迫的响应作用和如何调控雾霾胁迫对园林植物的影响作为主要研究方向, 力争达到调控模拟雾霾胁迫对园林绿化植物的综合生态效益, 实现培育雾霾净化能力强的植物种类, 为园林绿化工作中选择净化雾霾的树种提供参考, 从而全面发挥城市绿植系统防霾治霾的生态功能。

参考文献:

- [1] 王 静, 牛生杰, 许 丹, 等. 南京一次典型雾霾天气气溶胶光学特性[J]. 中国环境科学, 2013, 33(2): 201–208.
- [2] Mamakos A, Bonnel P, Perujo A, et al. Assessment of portable emission measurement systems (PEMS) for heavy-duty diesel engines with respect to particulate matter[J]. Journal of Aerosol Science, 2013, 57(11): 54–70.
- [3] 于兴娜, 李新妹, 登增然登, 等. 北京雾霾天气期间气溶胶光学特性[J]. 环境科学, 2012, 33(4): 1057–1062.
- [4] 侯美伶, 王杨君. 灰霾期间气溶胶的污染特征[J]. 环境监测管理与技术, 2012, 24(2): 6–11.
- [5] 李东海, 何彩霞. 浅谈雾霾天气的识别及预警策略[J]. 安徽农

- 学通报, 2011, 17(18): 165–166.
- [6] Han L, Zhou W, Li W. City as a major source area of fine particulate ($\text{PM}_{2.5}$) in China[J]. Environmental Pollution, 2015, 206: 183–187.
- [7] 孙 彧, 马振峰, 牛 涛, 等. 最近 40 年中国雾日数和霾日数的气候变化特征[J]. 气候与环境研究, 2013, 18(3): 397–406.
- [8] 王 珊, 修天阳, 孙 扬, 等. 1960—2012 年西安地区雾霾日数与气象因素变化规律分析[J]. 环境科学学报, 2014, 34(1): 19–26.
- [9] 韩 婧, 代志光, 李文韬. 西安灰霾天气下 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度与气象条件分析[J]. 环境污染与防治, 2014, 36(2): 52–56.
- [10] Liang Z M, Gao S T, Sun J S. A numerical study of the urban intensity effect on fog evolution in the Beijing–Tianjin–Hebei region[J]. Atmospheric and Oceanic Science Letters, 2012, 5(3): 240–245.
- [11] 刘 梅, 严文莲, 张 备, 等. 2013 年 1 月江苏雾霾天气持续和增强机制分析[J]. 气象, 2014, 40(7): 835–843.
- [12] 王志磊, 赵红霞, 翟付顺. 园林植物防治雾霾的应用研究[J]. 北方园艺, 2015(4): 196–199.
- [13] 张淑平, 韩立建, 周伟奇, 等. 冬季 $\text{PM}_{2.5}$ 的气象影响因素解析[J]. 生态学报, 2016, 36(24): 7897–7907.
- [14] 赵秀娟, 蒲维维, 孟 伟, 等. 北京地区秋季雾霾天 $\text{PM}_{2.5}$ 污染与气溶胶光学特征分析[J]. 环境科学, 2013, 34(2): 416–423.
- [15] 廖 旭, 胡安谊, 杨晓水, 等. 厦门冬季 $\text{PM}_{2.5}$ 颗粒物中细菌和真核微型生物群落组成及其来源分析[J]. 生态环境学报, 2013, 22(8): 1395–1400.
- [16] 唐源江, 武小燕. 几个三角梅品种光合作用日变化的比较研究[J]. 北方园艺, 2011(12): 74–77.
- [17] 李永红, 杨 悦. 水分胁迫对叶子花光合特性的影响[J]. 北方园艺, 2009(1): 181–184.
- [18] 钟赞华, 谢志南, 张雪芹, 等. 遮光对三角梅插穗生根及光合作用的影响[J]. 安徽农业科学, 2010, 38(30): 16748–16750.
- [19] 谢志南, 钟赞华, 赖瑞云, 等. 基质温度对三角梅插穗生根及其叶片光合作用的影响[J]. 广西植物, 2011, 31(2): 222–226.
- [20] 施建羽. 盐胁迫对三角梅光合特性的影响[J]. 福建热作科技, 2012, 37(1): 5–8.
- [21] 王黎明, 刘 动, 陈枫林, 等. 雾霾模拟方法及其装置研究[J]. 高电压技术, 2014, 40(11): 3297–3304.
- [22] 韩 帅, 唐 宇, 李 坤, 等. 模拟雾霾条件下光源的透过性实验研究[J]. 照明工程学报, 2014, 25(5): 111–115.
- [23] 谢寅峰, 杨万红, 杨 阳, 等. 外源一氧化氮对模拟酸雨胁迫下箬竹(*Indocalamus barbatus*) 光合特性的影响[J]. 生态学报, 2007, 27(12): 5193–5201.
- [24] 邢庆振, 郁松林, 牛雅萍, 等. 盐胁迫对葡萄幼苗光合及叶绿素荧光特性的影响[J]. 干旱地区农业研究, 2011, 29(3): 96–100.
- [25] 崔兴国. 盐胁迫对圆叶牵牛光合特性的影响[J]. 中国园艺文摘, 2011, 27(9): 30–31.
- [26] 刘全吉, 孙学成, 胡承孝, 等. 砷对小麦生长和光合作用特性的影响[J]. 生态学报, 2009, 29(2): 854–859.
- [27] Farquhar G D, Sharkey T D. Stomatal conductance and photosynthesis[J]. Ann Rev Plant Physiol, 1982, 33(33): 317–345.