DOI: 10.5846/stxb201904280872

林鑫涛,张晶,陈健.持续干旱下金边黄杨的滞尘效应.生态学报,2020,40(15):5337-5346.

Lin X T, Zhang J, Chen J.Continuous drought stress impacts on *Euonymus japonicus* Thunb. var. *aurea-marginatus* Hort. particle retention. Acta Ecologica Sinica, 2020, 40(15):5337-5346.

持续干旱下金边黄杨的滞尘效应

林鑫涛,张 晶,陈 健*

浙江农林大学亚热带森林培育国家重点实验室,杭州 311300

摘要:为探寻持续干旱胁迫对典型常绿阔叶绿化植物滞尘能力与形态的影响,在开顶式气室内对不同供水条件下的金边黄杨 (*Euonymus japonicus* Thunb. var. *aurea-marginatus* Hort)进行了 35d 的机动车尾气(模拟颗粒物污染源)暴露实验,分别分析了正 常供水下与持续干旱下的金边黄杨对不同粒径颗粒物滞留量的变化,并观测了植株的形态变化。结果表明:(1)PD 组(持续干 旱+尾气暴露)的金边黄杨比 P 组(正常供水+尾气暴露)提前 9d 出现老叶的黄化、脱落现象,实验中仅 PD 组有成熟叶与幼叶 的脱落(19d 后)。(2)实验期间,PD 组植株对各粒径颗粒物的平均滞留量比 P 组低 2—3 μg/cm²,但在前 28d,持续干旱对两组 间滞尘量的影响不显著,而在第 35 天,则因 PD 组成熟叶的大面积脱落,干旱显著降低了各粒径颗粒物的滞留量约 38.60%— 46.54%,并使其滞尘能力大幅减弱。因此,短期的中轻度干旱对金边黄杨滞尘能力的影响较小,而极度干旱则加快了尾气暴露 下植株成熟叶的脱落,并降低了其滞尘效应。

关键词:颗粒物;持续干旱;滞尘能力;形态

Continuous drought stress impacts on *Euonymus japonicus* Thunb. var. *aurea-marginatus* Hort. particle retention

LIN Xintao, ZHANG Jing, CHEN Jian*

The State Key Laboratory of Subtropical Silviculture, Zhejiang Agriculture and Forestry University, Hangzhou 311300, China

Abstract: The objective of this study was to explore the particle retention capability and the morphology changes of typical evergreen broad-leaved greening plants under continuous drought stress. The experiment was taken place in an open-top chamber by supplying vehicle exhaust (simulating particle pollution source) and different watering regimes on the plant, *Euonymus japonicus* Thunb. var. *aurea-marginatus* Hort, and monitoring particle accumulation and morphology changes. Two watering regimes were implemented: exhaust exposure with continuous drought (PD) and exhaust exposure with normal water supply (P). The results showed that (1) the yellowing and shedding of the old leaves of the *E. japonicus* var. *aurea-marginatus* in the group PD was 9 days earlier than that in the group P, and only the group PD presented the shedding of mature leaves and young leaves after 19 days. (2) The particle retention in each particle size fraction of group PD was 2–3 μ g/cm² lower than that of group P after 35 days observation. There was no significant difference on particle retention in each particle size fraction by about 38.60%—46.54% on the 35th day. The significant change was attributed to many of the mature leaves of group PD fell off on the day of 35, which also indicated drought tolerance threshold. In conclusion, the short-term mild to moderate drought has slight effect on the particle retention ability of *E. japonicus* var. *aurea-marginatus*, while the extreme drought can accelerate the shedding of mature leaves under exhaust exposure, which may weaken its

收稿日期:2019-04-28; 网络出版日期:2020-05-21

基金项目:国家自然科学基金(41471442, 41101421)

^{*} 通讯作者 Corresponding author.E-mail: chenjian@ 126.com

particle retention effect.

Key Words: particulate matter; continuous drought; particle retention ability; morphology

城市植物(例如道路绿化、屋顶花园、生命墙、城市森林公园、城市绿地等)能够有效吸附空气中的颗粒物^[1-5],在减缓颗粒物污染上具有很大的潜力。树木覆盖率的增加有助于大气中悬浮颗粒物浓度的降低^[6],进而改善空气质量。植物的种类、生活型、叶片形态、叶表的微结构等均会影响植物的滞尘能力^[4,7-13]。Song 等^[9]通过扫描电镜(Scanning electron microscope)观测到叶片的气孔是颗粒物沉积的最佳区域之一,气孔大小、密度、数量以及开度等均会影响植物表面的颗粒物滞留量^[4,10-11,13]。Weerakkody 等^[3]发现蜡质含量丰富的植物,其表面吸附颗粒物的密度也较高。蜡质的化学成分、结构对颗粒物的滞留也具有重要作用^[14-16]。

水分被认为是影响植物生长发育的重要限制性因子^[17],城市的供水紧张使绿地植物长期处于干旱状态。 水分的匮乏会迫使植物气孔活动减弱或关闭、蒸腾降低^[18-19],也会使植物加大烷烃类物质、醛类物质的合成, 进而增加蜡质含量以适应不利环境^[20-21],这些形态结构的变化会减弱或增加植物叶片对颗粒物的吸附能力。 此外,干旱会改变叶片表面的微环境而影响颗粒物的滞留效果,如植物蒸腾作用减弱后,局部湿度的降低会减 弱叶表粘性而减小大粒子的沉降^[22]。

目前干旱对植物滞尘的影响研究多集中在针叶植物^[10, 15, 23-24]。针叶植物的枝条结构复杂,气孔排列紧密,气孔密度和表面粗糙度均高于阔叶树种,且其丰富的蜡质含量与油脂的分泌,使得针叶植物的滞尘能力通常被认为是强于阔叶植物的^[11-12, 25-27]。然而针叶植物对高强度交通污染的耐受性较差^[14],在南方城市的绿化中,其比例远低于阔叶植物,在机动车尾气污染严峻的长三角地区尤为明显。长期暴露在颗粒物污染中会导致植物形态特征的改变,最明显的现象就是叶片失绿^[28-30],有限的供水亦会使叶片的脱色衰败^[17, 19],然而干旱对颗粒物暴露下植物形态的研究鲜有报道,干旱下植物的滞尘机理尚不明晰。

本研究以金边黄杨(Euonymus japonicus Thunb. var. aurea-marginatus Hort.)为对象,将机动车尾气注入开顶式气室内以模拟颗粒物污染,根据供水条件差异分成正常供水下的尾气暴露组(PD组)。本研究旨在:(1)探究持续干旱对尾气暴露下的金边黄杨的形态影响;(2)对比金边黄杨 在正常供水下与持续干旱下对不同粒径颗粒物的单位叶面积滞留重量的变化;(3)分析干旱对金边黄杨滞尘 效应的影响。

1 材料和方法

1.1 实验材料

金边黄杨是大叶黄杨(Euonymus Japonicus L.)的一个变种,为卫矛科卫矛属的常绿阔叶灌木,是长三角地 区常见的绿化植物,因其优美的彩色叶片而在园林配置中广受关注,对光强具有较低的耐受性,能适应较为荫 蔽的环境^[31]。本研究选用树高(均高 0.8 m)和基径(平均 3 cm)较一致的 3 年生苗木,于 2017 年 3 月栽植于 直径 30 cm,高 28 cm 的塑料盆中,基质配比为园土:泥炭土:蛭石=7:7:6,最大田间持水量约为 50%。

1.2 实验地点

栽植好的苗木养于浙江农林大学平山实验基地(30°15′50.61″N; 119°42′54.51″E)的田间环境下约1年, 基地周边以农村居住地为主,3 km 范围内不存在高污染源。根据浙江省大气复合污染立体检测网络中的第 四中学(与基地的直线距离约 4.1 km)和市府大楼(与基地的直线距离约 2.9 km)两站点在 2013 年—2016 年 间的大气污染物监测数据,实验区的 PM_{2.5}年均浓度约 54.38 μg/m³,空气质量良好。

1.3 实验设计

金边黄杨的受控实验在修改后的开顶式气室(Open top chamber, OTC, 以下简称为"气室")内进行。气室 由塑钢、无色钢化玻璃构成, 主体高 3.5 m, 横截面为边长 1.5 m 的正八边形, 顶部为 45°锥形收口, 高为 1 m,

并与大气相通。锥形收口顶上 0.5 m 处架空放置一块钢化玻璃以避免降水进入气室。将机动车尾气直接排 入气室外的尾气收集装置中,后经鼓风系统将收集装置中的尾气通过管道注入气室内,注入时长为每日 5 h, 采取"早晚双高峰"模式以模拟城市污染特征,即早高峰:7:00—10:00;晚高峰:18:00—20:00。根据《环境空 气质量指数(AQI)技术规定(试行)》(HJ 633—2012)中的空气污染指数分级标准,将空气质量控制为重度污 染,即气室内 PM_{2.5}的 24 h 浓度控制在 150—250 μg/m³,则排入尾气的 PM_{2.5}浓度控制在 720—990 μg/m³。气 室内的 PM_{2.5}浓度通过 CPR-KA 空气质量检测仪(北京康尔兴科技发展有限公司,中国)进行动态监测,温度 通过 DS1923 系列 iButton 纽扣式温度记录仪(上海沃第森电子科技有限公司,中国)进行监测。

实验处理于 2018 年 4 月 10 日 18:00 开始,至 2018 年 5 月 15 日 18:00 结束。将尾气暴露气室内的金边 黄杨随机分成 2 组,一组正常供水(P 组),另一组持续干旱(PD 组),每组设置 4 个重复,金边黄杨的处理说 明见表 1。实验前通过充分浇水使所有盆栽的土壤含水量达至饱和,后通过停止供水让 PD 组的盆栽自然消 耗土壤水分,而 P 组的盆栽则在每日的土壤含水量测定后进行补水。土壤含水量使用便携式土壤水分仪 TDR100(Spectrum Technologies, Inc. 美国)在每日 17:00 左右测定并记录,测定频率为 1 次/d,以体积含水量 (Soil volumetric water content, θ_v)表示。类似的持续干旱实验表明,当植株开始进入枯萎状态但不至于大面积 死亡时的土壤体积含水量在 2.0%—5.0%之间^[15, 19, 23]。因而当 PD 组每日测得的 θ_v低于 5.0%时,对植株做 20—100 mL 的适当补水,使得土壤体积含水量不低于 2.0%,以保证植株在试验周期内不出现大面积的死亡 现象。P 组植株的土壤体积含水量控制在 37.5%—40.0%。

	Table 1	Description of treatments of E. Japonicus var. aurea-marginatus
组别	处理	说明
Group	Treatment	Description
P组	正常供水与尾气暴露	37.5%—40.0%的土壤体积含水量,每天暴露 PM2.5浓度为 720—990 µg/m3的尾气 5h
PD 组	持续干旱与尾气暴露	自然消耗土壤水分,但保证土壤体积含水量不低于 2.0%,每天暴露 $PM_{2.5}$ 浓度为 720—990 $\mu g/m^3$ 的尾气 5 h

表 1 金边黄杨的处理说明

P: 正常供水与尾气暴露 Exhaust exposure with normal water supply; PD: 持续干旱与尾气暴露 Exhaust exposure with continuous drought

实验处理前,使用去离子水冲洗所有植株的叶片以去除叶表原先滞留的颗粒物。有研究表明润湿的叶片 比干燥时具有更大的粘性,会加速颗粒物在叶表的沉降,并减弱颗粒物的再悬浮作用^[22, 26]。为避免叶片清洗 对实验期间植株滞尘速率的影响,将叶片的清洗工作安排在尾气处理前一天,以待植株叶片充分干燥。多数 学者认为降水或简单的清洗不能完全去除叶片表面原先滞留的颗粒物^[7, 26, 32],因而在尾气处理前(4月10日 17:00)采集植株叶片做初始滞尘测定,之后每隔7天采集一次叶片用以植株滞尘量的测定。

1.4 叶片采集

在每株植株的"东"、"南"、"西"、"北"四方位随机采取 4—5 片叶片,混合后装在干净的封口袋内,保存 于冰箱保鲜室直至样本滞尘量的测定。实验期间共采集 6 批样本(含本底采集),每批均为 4 包(重复)。为 确保得到足够的细颗粒物量,同时避免过多采样导致大颗粒物堵塞滤纸滤孔,且不影响植株的正常生长^[33], 每包叶片的采集面积控制在 200 cm²左右。

1.5 滞尘测定

叶片表面滞留的颗粒物采用洗脱称量法测定^[8,33:4]:将样本置于 500 mL 烧杯中,加入 250 mL 蒸馏水后 使用超声波清洗器清洗4 min,使叶表滞留的颗粒物充分脱离叶片,后取出叶片并使用蒸馏水进一步冲洗。对 上述两部分得到的浸洗液与冲洗液用标准分样筛(160 目,孔径约 100 μm)过滤后依次使用已烘干称重的孔 径为 10 μm(Whatman Type 91,英国)、2.5 μm(Whatman Type 42,英国)和 0.2 μm(Whatman PTFE 滤膜,英国) 的滤纸(膜)在直径 47 mm 的抽滤装置中进行共计 3 次的抽滤,从而得到三个粒径范围的颗粒物:大颗粒物 (10—100 μm),粗颗粒物(2.5—10 μm),细颗粒物(0.2—2.5 μm)。抽滤前后均将滤纸置于称量瓶中并在 60℃的烘箱中烘干 1 h 后置于干燥皿中冷却 24 h,从而使滤纸、称量瓶与干燥皿内的湿度保持一致,之后对含 有滤纸的称量瓶用万分之一的分析天平称重,抽滤前后两者差值即为样本吸附的各粒径颗粒物的重量 W_i (g)。

将上述浸洗后的叶片晾干/擦干,之后平整置于扫描仪上(Epson Perfection V370 Photo,爱普生(中国)有限公司,中国)进行扫描,得到的数码图像导入 Image J1.46r(National Institute of Health,美国)中进行叶面积 S (cm²)的计算,各样本不同粒径颗粒物的单位叶面积的滞留重量(以下简称"单位叶面积滞尘量")即为 W_i 与 S 的比值(µg/cm²)。

1.6 数据分析

单位叶面积滞尘量在各采样时间节点上的差异使用单因素方差分析(ANOVA)进行检验,之后采用 LSD 进行两两比较。方差分析前需检验数据的正态性分布(Shapiro-Wilk 检验, P>0.05)和方差齐性(Levene's 检验, P>0.05),若数据不满足正态性分布或方差齐性时,则在分析前采取自然对数转换。干旱与正常供水下滞 尘量的比较采用独立样本 t 检验进行分析。所有检验分析的显著水平为 0.05,数据以"均值±标准误"的形式 表示。数据的统计分析均在 SPSS 25.0(IBM,美国)中完成,图件在 Origin 2018(OriginLab,美国)中绘图。

2 结果

2.1 气室环境分析

临安自动气象观测站(区站号:58448:30°14′N; 119°41′E)记录的历史数据(国家气象科学数据共享服务 平台,http://data.cma.cn/site/index.html)表明,实验基地在近5年内同期的日均温度约18.6℃。iButton温度 记录仪显示,实验期间,气室内的日均温度约25.1℃,日最高温度可达32.7℃,多出现于10—14时,表明气室 内的温度较适宜植物生长^[35]而又不对其产生过度的高温胁迫。

空气质量检测仪显示(图1),气室内注入的尾气中的 PM_{2.5}时均浓度为(789.94±132.37) μg/m³,日均注 入时间为 5 h,气室内 PM_{2.5}的 24 h 平均浓度为 214.64 μg/m³,对应的空气质量指数级别为五级(IAQI=265, HJ 633—2012),属于重度污染,尾气处理符合实验设计需求。





盆栽的土壤体积含水量于每日 17 时测量并记录(图 2),后计算 P 组植株所需的补水量并做补水措施,从 而使 P 组植株的 θ_e保持在 37.5%以上。PD 组的起始 θ_e约为 36.6%(日常补水前),在持续干旱的前 10 日,θ_e 呈明显的下降趋势,平均每日降低约 2.76%。第 10 日后(4 月 20 日)θ_e降低至 10%以下,4 月 25 日 θ_e降低至 5%以下,之后开始对 PD 组植株做适当补水措施,使 PD 组的 θ_e维持在 2%—5%之间,直至实验结束。 15 期

2.2 金边黄杨的形态变化

实验期间,金边黄杨的形态特征变化见表 2。P 组 金边黄杨的部分老叶在第 19 天开始黄化并脱落,至 5 月 15 日,大部分植株完成老叶的脱落,小部分个体的幼 叶有所枯黄,除此外,未发现其他明显变化。PD 组的金 边黄杨在第 8 天便出现叶片干枯现象,此时 θ_e为 14. 86%±1.53%,2 天后,老叶开始脱落,而到第 19 天,PD 组的成熟叶甚至幼叶均有明显的黄化、脱落现象,到 5 月 8 日,大部分植株的叶片枯黄(θ_e<5%),受外力刺激 时易脱落,在实验结束后,大部分植株进入休眠状态,仅 尖端残留少量干枯叶片(枯绿)。

2.3 金边黄杨对不同粒径颗粒物的滞留动态变化

金边黄杨的初始滞尘量(本底滞尘)为(30.27± 2.44) μg/cm², P 组与 PD 组间的初始滞尘差异不显著



Fig.2 Time series of soil volumetric water content of group PD during the experiment

(*t*=-0.377,*P*^{ns}=0.719),其中大颗粒物的初始滞留量为(16.21±1.80) µg/cm²,粗颗粒物为(9.16±1.07) µg/cm²,而细颗粒物为(4.75±0.66) µg/cm²(图3)。正常供水时,P 组植株对不同粒径颗粒物的滞留量在前14天 增速较大,但相邻两采样节点上的滞尘量差异不显著,大颗粒物和细颗粒物均在第35天达到极大值52.41 µg/cm²和9.98 µg/cm²,较本底净增长约38.31 µg/cm²和5.49 µg/cm²,粗颗粒物在第28天较本底净增长了98.10%,之后略有降低;持续干旱时,PD 组植株滞留的三种颗粒物在前28天均随时间的推移而增大或波动, 之后,大颗粒物与粗颗粒物有显著降低,大颗粒物由极值的45.89 µg/cm²降低到28.02 µg/cm²,而粗颗粒物则 由极值的18.39 µg/cm²降低了53.1%,两种颗粒物在第35天的滞留量与初始值的差异不显著。细颗粒物在 实验期间的变化弱于另两种颗粒物,其滞留量在各采样节点间的差异不显著,极大值出现在第14天,之后开 始小幅下降,至实验结束,仅减少了0.89 µg/cm²,但仍比初始滞尘量高约1.13 µg/cm²。

组别 Group	$ heta_v$ /%	控制日期 Control date	处理天数/d Processing days	形态描述 Description of morphology
P 组	33.45 ± 2.06	04-29	19	部分老叶开始黄化并脱落
	32.77 ± 1.18	05-15	35	大部分植株的老叶脱落完毕,小部分植株的幼叶黄化
PD 组	28.85±1.23	04-18	8	部分植株的叶片干枯
	14.86±1.53	04-20	10	干枯叶片的比例增大,部分老叶开始脱落
	9.05 ± 1.23	04-24	14	部分植株的成熟叶开始枯黄
	5.74 ± 0.61	04-29	19	植株成熟叶、幼叶的枯黄脱落现象明显
	2.99 ± 0.35	05-08	28	部分植株叶片全部枯黄,受外界刺激时易脱落
	2.77 ± 0.23	05-15	35	部分植株进入休眠状态,仅小部分植株的尖端残留少量干枯叶片

表 2 实验期内金边黄杨的形态特征 Table 2 Morphological characteristics of *E. Japonicus* var. *aurea-marginatus* during the experiment

θv: 土壤体积含水量 Soil volumetric water content; P: 正常供水与尾气暴露 Exhaust exposure with normal water supply; PD:持续干旱尾气暴露 Exhaust exposure with continuous drought

2.4 金边黄杨滞留颗粒物的粒径构成变化

实验期间,金边黄杨叶片表面滞留颗粒物的粒径构成(贡献率)见图 4,其中以大颗粒占主要优势(57.0%—66.8%),粗颗粒其次(20.1%—27.5%),细颗粒做最小贡献(8.9%—16.2%)。正常供水时,P 组植株叶表上大颗粒的贡献率平均每7日增加 2.3%,细颗粒的贡献率在前 21 天相对稳定,之后下降了约 3.0%,粗颗粒以每周平均 1.7%的降幅持续下降;持续干旱时,PD 组植株叶片上的颗粒物粒径构成在前 14 天变化明显,主要表现为大颗粒大幅上升而粗颗粒急剧下降。之后,大颗粒每周的变幅在 1.1%内,而细颗粒在第5 周的贡献率急剧升高了约 5.4%。



图 3 不同粒径颗粒物的单位叶面积滞留量 $/(\mu g/cm^2)$



小写字母表示在 0.05 水平下 P 组或 PD 组滞尘量在时间上的差异,*表示 P 组与 PD 组在该时间点的滞尘量差异显著;P:正常供水与尾气 暴露;PD:持续干旱尾气暴露





Fig.4 Particle size composition of particulate matter on the surface

2.5 持续干旱对金边黄杨滞尘能力的分析

实验期间,P 组金边黄杨的平均滞尘量(总颗粒物)为 56.98 μ g/cm²(图 5),高于 PD 组 7.93 μ g/cm²,独立 样本 t 检验表明 P 组与 PD 组在实验期间的平均滞尘量无显著差异(t=1.610,P=0.114)。各时间节点的 t 检 验表明,持续干旱仅在第 35 天极显著的降低了植株的总滞尘量约 45.53%(t=7.456,P<<0.01),而在前 28 天, 虽然植株的滞尘量总体上表现为 P 组>PD 组,但该时期内未发现两组间的滞尘量有显著性差异。当以净单 位叶面积总滞尘量(去除本底后的滞尘量)评估持续干旱对植株滞尘量的影响时(图 5),P 组在实验期间的平 均滞尘量比 PD 组高 56.05% 且达到显著水平(t=2.400,P=0.021),但两组在第 7—28 天的平均净滞尘量上未 发现显著性差异(t=0.087,P=0.382)。在各时间节点上,持续干旱仍仅在第 35 天显著降低了金边黄杨的净 滞尘量(t=6.759,P<0.01)。



小写字母表示在 0.05 水平下 P 组或 PD 组滞尘量在时间上的差异,*表示 P 组与 PD 组在该时间点的滞尘量差异显著

3 讨论

3.1 金边黄杨的形态变化

P 组植株在实验期间的形态变化表明,正常供水时,尾气暴露 35 天对金边黄杨成熟叶、幼叶的形态影响 较小,而老叶则在第 19 天开始黄化、脱落,暗示此时尾气对植物细胞产生了毒害作用。暴露初期,叶片滞留的 颗粒物或因堵塞气孔^[9],干扰气体交换,使叶表温度增高^[30],或因"遮荫效应"^[36],而导致叶绿素合成受阻;尾 气中的某些成分也会促使叶绿素降解或抑制叶绿素合成酶的活性^[2,36],或因活性氧(Reactive Oxygen Species, ROS)的过量累积^[28]而导致叶绿素的含量降低,进而叶片失绿黄化。当尾气对细胞的毒害作用超过其耐受性 极限时,便发生叶片的脱落现象,但该现象仅在老叶上发生则可能是因为老叶对尾气的抗性较弱,或因老叶表 面更高的颗粒物滞留量^[15-16,37]而加大了其损伤。此外,植物也可能通过将尾气中吸收的有害物质富集到老 叶中来减小尾气对成熟叶与幼叶的毒害。

PD 组植株的老叶黄化脱落比 P 组提前了 9d,部分植株在处理 35d 后进入休眠状态(去除胁迫后有复苏现象),成熟叶与幼叶几乎脱落完毕,这暗示着干旱与尾气可能存在正交互作用而加重了植物体的损伤。 Hanslin 等^[23]与 Subhash 等^[38]均表示水分对植物的负面影响强于尾气,干旱则因为对气体交换的强烈干 扰^[18-19]或加快了 ROS 的积累^[39]而使尾气对植物的伤害加快,而尾气则可能因破坏叶片蜡质结构、形状,甚至 使其降解或退化^[2, 15, 30, 40]而降低了植株对干旱的耐受性^[29, 39]。因此,持续干旱与尾气共同作用对金边黄杨 的破坏明显高于单独的尾气暴露。

3.2 持续干旱下金边黄杨的滞尘效应

大气颗粒物沉降到植物表面的过程与其粒径大小密切相关^[22, 37]。P 组的金边黄杨对各粒径颗粒物的滞 留量随时间推移而增大或在波动中达到动态平衡,而 PD 组的金边黄杨在第 35 天对大、粗颗粒物的滞留量显 著降低了近 38.9%和 53.1%(图 3、图 5),主要原因有以下两方面:(1)PD 组植株的叶片在第 28 天已基本枯 黄,之后叶片纷纷脱落(表 2),第 35 天时仅在植株尖端残留干枯幼叶,迫使最后一次的采样对象由原先的成 熟叶改至幼叶。成熟叶更加粗糙的叶片表面可能使其对颗粒物的捕获能力高于幼叶^[15-16, 37]。(2)极度干旱 下,PD 组植株的叶片含水量低下,实验 28 天后的叶片在外界刺激时易脱落(图 2、表 2),这暗示着在叶片采 集、土壤含水量测量等实验过程对植株叶片的抖动强度会相对增大,以及在气室内走动时带来的软风也会使 部分滞留在表面的颗粒物重新悬浮至大气中^[22],虽然该风速对颗粒物的再悬浮作用有限^[26, 32]且实验中已尽 量避免,但 PD 组植株在胁迫后,叶片表面的润湿性和粘性的降低可能减弱其对颗粒物的滞留^[13],振动或软 风对颗粒物的再悬浮作用会有一定的加强。此外,叶片大量脱落后会减弱植株内的气体湍流,以此减少了粗 颗粒物对植株表面的撞击机会^[22, 26],从而造成了粗颗粒物更高的降低率。

细颗粒物主要滞留在叶片的气孔周边或密毛覆盖区^[37,41],雨水对其冲刷作用或风力对其再悬浮作用也 弱于大、粗颗粒物^[7,42],其滞留程度也是三种粒径中最高的。细颗粒物体积小、质量轻,且在水汽的作用下易 聚集成大粒子^[22,26],因而对滞尘重量的反应较弱,无论是正常供水或持续干旱时均是如此(图3)。Räsänen 等^[10]表示阔叶植物较强的蒸腾作用会降低叶片的表面温度,而热泳现象会增加细颗粒物向叶表迁移,较高的 气孔活动也会使颗粒物(尤其是盐粒子)更容易潮解^[40]而增加其沉降速率。在持续干旱14d后,PD组的土壤 体积含水量基本低于10%,此时植株的蒸腾速率与气孔导度可能已大幅下降^[19],伴随的是蒸腾作用与气孔活 动的减弱以及细粒子沉降的减缓,因而细颗粒物的滞留量不再明显升高而在波动中变化。对于 PD 组在第35 天的细颗粒物滞留量变化不明显,我们猜测可能是因为振动或风力对细粒子的再悬浮作用较弱^[26],且尾气中 高浓度的细颗粒物使其在叶表的沉降多于再悬浮,而此时的幼叶表面的气孔与密毛覆盖区的发育程度可能较 高,对细颗粒物具有良好的滞留效果。

植物表面滞留颗粒物的粒径构成主要受到植物叶片特征和污染源的影响^[12,34]。在金边黄杨的粒径构成 上,大颗粒物占据 50%以上,细颗粒物在 20%以下(图 4),这与道路旁的植物表面的粒径构成是相似的^[8,36]。 各粒径颗粒物的贡献率变化可能是由沉降速率的差异造成的,沉降速率则与颗粒物的性质与沉降形式相关。 细颗粒物主要以布朗扩散或随气流运动时被植物截获而沉降,粗颗粒物的沉降以惯性碰撞为主,而大颗粒物 主要在重力作用下沉降^[1,22]。通常大颗粒物的沉降速率最高,细颗粒物最低,这解释了 P 组中大颗粒的贡献 率逐渐增长的趋势。细颗粒物在前 21d 保持较高的贡献率可能是因为尾气中高浓度的细粒子加大了植株对 其捕获效率^[36],之后植株对细粒子的滞留基本达到饱和(21d 后植株对细颗粒物的滞留量变化差异不显著, 图 3),但大颗粒物仍保持较高的滞留速率,因而产生了 P 组植株各粒径颗粒物的贡献率变化。在持续干旱 下,PD 组植株的气孔活动减弱及叶片微形态的变化均会影响叶片对颗粒物的滞留效率,其中以细颗粒物受到 的影响最为明显(图 3)。因此,在相同的污染源下,PD 组植株的粒径构成变化异于 P 组。两组在各时间节点 的粒径构成上,以第 35 天的差异最小,这可能是因为此时植株对各粒径颗粒物的滞留达到饱和,污染源对粒 径构成的影响强于叶表微形态的差异。

在单位叶面积的滞尘重量上,持续干旱使金边黄杨对各粒径颗粒物的平均滞留量减少 2—3 μg/cm²,但 两组植株在前 28d 的统计学差异不显著。Hanslin 等^[23]发现中度干旱能增加欧洲赤松(*Pinus sylvestris* L.)幼 苗的滞尘重量,Räsänen 等^[10, 15, 24]则发现重度干旱会减少毛桦(*Betula pubescens* Ehrh.)的颗粒物捕捉效率,而 中轻度干旱对欧洲云杉(*Picea abies* (L.) Karst.)与欧洲赤松的作用则是相反的。与本研究相似的是:上述研

究均未发现干旱对植物滞尘的显著影响。

在第35天,PD组金边黄杨的滞尘量极显著低于P组,其原因与PD组滞尘量在第35天的急剧下降类 似,将采样对象改为幼叶后,虽然使两组在该节点的滞尘量比较失去了意义,但这也是持续干旱与尾气暴露共 同作用下,植株形态变化造成的必然结果——成熟叶基本脱落完毕,此时植株的滞尘能力明显减弱。受限于 实验材料,本研究只在单位叶面积的尺度上分析持续干旱对植物滞尘重量的影响,而实际应用中则更为关注 在单木尺度或群落尺度上的滞尘效应,其中单木尺度的滞尘量可简单表征为总叶面积与单位叶面积滞尘量的 乘积^[9,33]。持续干旱下金边黄杨总叶面积的大幅降低明显会减弱植株在单木尺度上的滞尘量,以此将降低 其滞尘效应,而受限的实验数据无法定量分析金边黄杨的单木滞尘量与干旱胁迫间的关系。

4 结论

本研究在开顶式气室(OTC)中以机动车尾气模拟颗粒物污染,对不同供水条件下的金边黄杨的形态与颗 粒物滞留量的动态的观测分析表明:(1)正常供水时的尾气暴露(P组)使金边黄杨在第19天出现老叶黄化、 脱落现象,而持续干旱下的尾气暴露(PD组)则比P组提前9d显现该现象,之后在第19天促使植株的成熟 叶与幼叶脱落。(2)P组植株在实验期间对大颗粒物(10—100 µm)、粗颗粒物(2.5—10 µm)和细颗粒物 (0.2—2.5 µm)的平均滞留量分别为(34.76±2.92) µg/cm²、(13.33±0.91) µg/cm²、(8.21±0.58) µg/cm²,而持 续干旱使PD组的植株对各粒径颗粒物的平均滞留量减少2—3 µg/cm²。然而,在前28d未发现干旱对滞尘 量的显著性影响,而在第35天,干旱则显著降低了各粒径颗粒物的滞留量约38.60%—46.54%。可见,短期的 中轻度干旱对金边黄杨滞尘能力的影响较小,而极度干旱则促使尾气暴露下植株成熟叶的大面积脱落,并造 成其滞尘能力大幅度降低,从而减弱了金边黄杨的滞尘效应。

致谢:李铭、黄垌茗、舒达、叶璞对实验处理给予帮助,林权虹、陆婷、钱瀚睿、黄菡菡等对室内指标分析给予 帮助。

参考文献(References):

- Gourdji S. Review of plants to mitigate particulate matter, ozone as well as nitrogen dioxide air pollutants and applicable recommendations for green roofs in Montreal, Quebec. Environmental Pollution, 2018, 241: 378-387.
- [2] Ram S S, Majumder S, Chaudhuri P, Chanda S, Santra S C, Chakraborty A, Sudarshan M. A review on air pollution monitoring and management using plants with special reference to foliar dust adsorption and physiological stress responses. Critical Reviews in Environmental Science and Technology, 2015, 45(23): 2489-2522.
- [3] Weerakkody U, Dover J W, Mitchell P, Reiling K. Particulate matter pollution capture by leaves of seventeen living wall species with special reference to rail-traffic at a metropolitan station. Urban Forestry & Urban Greening, 2017, 27: 173-186.
- [4] Weerakkody U, Dover J W, Mitchell P, Reiling K. Quantification of the traffic-generated particulate matter capture by plant species in a living wall and evaluation of the important leaf characteristics. Science of the Total Environment, 2018, 635: 1012-1024.
- [5] Wu H T, Yang C, Chen J, Yang S, Lu T, Lin X T. Effects of green space landscape patterns on particulate matter in Zhejiang province, China. Atmospheric Pollution Research, 2018, 9(5): 923-933.
- [6] McDonald A G, Bealey W J, Fowler D, Dragosits U, Skiba U, Smith R I, Donovan R G, Brett H E, Hewitt C N, Nemitz E. Quantifying the effect of urban tree planting on concentrations and depositions of PM₁₀ in two UK conurbations. Atmospheric Environment, 2007, 41(38): 8455-8467.
- [7] Przybysz A, Szebø A, Hanslin H M, Gawroński S W. Accumulation of particulate matter and trace elements on vegetation as affected by pollution level, rainfall and the passage of time. Science of the Total Environment, 2014, 481: 360-369.
- [8] Sæbø A, Popek R, Nawrot B, Hanslin H M, Gawronska H, Gawronski S W. Plant species differences in particulate matter accumulation on leaf surfaces. Science of the Total Environment, 2012, 427-428: 347-354.
- [9] Song Y S, Maher B A, Li F, Wang X K, Sun X, Zhang H X. Particulate matter deposited on leaf of five evergreen species in Beijing, China: source identification and size distribution. Atmospheric Environment, 2015, 105: 53-60.
- [10] Räsänen J V, Holopainen T, Joutsensaari J, Ndam C, Pasanen P, Rinnan Å, Kivimäenpää M. Effects of species-specific leaf characteristics and reduced water availability on fine particle capture efficiency of trees. Environmental Pollution, 2013, 183: 64-70.
- [11] Zhang W K, Wang B, Niu X. Relationship between leaf surface characteristics and particle capturing capacities of different tree species in Beijing. Forests, 2017, 8(3): 92.

[12]	刘同彦, 纪媛, 蒋春晓, 邵鹏, 李海英, 贾黎明. 基于洗脱称量粒度分析的北京常见树种树叶滞纳大气颗粒物特性. 林业科学, 2016, 52
	(12): 74-83.

- [13] 刘璐, 管东生, 陈永勤. 广州市常见行道树种叶片表面形态与滞尘能力. 生态学报, 2013, 33(8): 2604-2614.
- [14] Dzierżanowski K, Popek R, Gawrońska H, Sæbø A, Gawroński S W. Deposition of particulate matter of different size fractions on leaf surfaces and in waxes of urban forest species. International Journal of Phytoremediation, 2011, 13(10): 1037-1046.
- [15] Räsänen J V, Holopainen T, Joutsensaari J, Pasanen P, Kivimäenpää M. Particle capture efficiency of different-aged needles of Norway spruce under moderate and severe drought. Canadian Journal of Forest Research, 2014, 44(7): 831-835.
- [16] Terzaghi E, Wild E, Zacchello G, Cerabolini B E L, Jones K C, Di Guardo A. Forest filter effect: role of leaves in capturing/releasing air particulate matter and its associated PAHs. Atmospheric Environment, 2013, 74: 378-384.
- [17] 王宁, 袁美丽, 陈浩, 李真真, 张铭鑫. 干旱胁迫及复水对入侵植物节节麦幼苗生长及生理特性的影响. 草业学报, 2019, 28(1): 70-78.
- [18] Li C Y. Population differences in water-use efficiency of *Eucalyptus microtheca* seedlings under different watering regimes. Physiologia Plantarum, 2000, 108(2): 134-139.
- [19] 李娟, 彭镇华, 高健, 陈媛文. 干旱胁迫下黄条金刚竹的光合和叶绿素荧光特性. 应用生态学报, 2011, 22(6): 1395-1402.
- [20] Kim K S, Park S H, Jenks M A. Changes in leaf cuticular waxes of sesame (Sesamum indicum L.) plants exposed to water deficit. Journal of Plant Physiology, 2007, 164(9): 1134-1143.
- [21] Kosma D K, Bourdenx B, Bernard A, Parsons E P, Lü S Y, Joubès J, Jenks M A. The impact of water deficiency on leaf cuticle lipids of Arabidopsis. Plant Physiology, 2009, 151(4): 1918-1929.
- [22] 马克明, 殷哲, 张育新. 绿地滞尘效应和机理评估进展. 生态学报, 2018, 38(12): 4482-4491.
- [23] Hanslin H M, Przybysz A, Slimestad R, Sæbø A. Stress acclimation and particulate matter accumulation in *Pinus sylvestris* saplings affected by moderate combinations of urban stressors. Science of the Total Environment, 2017, 593-594: 581-591.
- [24] Räsänen J V, Yli-Pirilä P, Holopainen T, Joutsensaari J, Pasanen P, Kivimäenpää M. Soil drought increases atmospheric fine particle capture efficiency of Norway spruce. Boreal Environment Research, 2012, 17(1): 21-30.
- [25] Beckett K P, Freer-Smith P, Taylor G. Effective tree species for local air-quality management. Journal of Arboriculture, 2000, 26(1): 12-19.
- [26] 王会霞,石辉,王彦辉.典型天气下植物叶面滞尘动态变化.生态学报,2015,35(6):1696-1705.
- [27] 张维康, 王兵, 牛香. 北京不同污染地区园林植物对空气颗粒物的滞纳能力. 环境科学, 2015, 36(7): 2381-2388.
- [28] Daresta B E, Italiano F, de Gennaro G, Trotta M, Tutino M, Veronico P. Atmospheric particulate matter (PM) effect on the growth of Solanum lycopersicum cv. Roma plants. Chemosphere, 2015, 119: 37-42.
- [29] Pariyar S, Noga G. Rainfall does not impair particulate matter accumulation on peri-urban field crops, but improves photosynthetic activity at UV exposure. Environmental and Experimental Botany, 2018, 156: 288-297.
- [30] Rai P K. Impacts of particulate matter pollution on plants: Implications for environmental biomonitoring. Ecotoxicology and Environmental Safety, 2016, 129; 120-136.
- [31] 庄猛,姜卫兵,花国平,曹晶,李刚.金边黄杨与大叶黄杨光合特性的比较.植物生理学报,2006,42(1):39-42.
- [32] Beckett K P, Freer-Smith P, Taylor G. Particulate pollution capture by urban trees: effect of species and windspeed. Global Change Biology, 2000, 6(8): 995-1003.
- [33] 林鑫涛, 叶诺楠, 王彬, 陈健, 游诗雪, 张昕丽. 亚热带常绿树种对不同粒径颗粒物的滞留能力. 广西植物, 2016, 36(2): 170-176.
- [34] 刘金强,曹治国,刘欢欢,张少伟,贾黎明,贾忠奎,席本野.基于超声清洗的树木叶面颗粒物粒径分布与吸滞效率研究——以银杏和 油松为例.植物生态学报,2016,40(8):798-809.
- [35] 刘正佳,刘纪远,邵全琴.不同土地覆盖类型上植被生长的最适温度.地球信息科学学报,2014,16(1):1-7.
- [36] Prusty B A K, Mishra P C, Azeez P A. Dust accumulation and leaf pigment content in vegetation near the national highway at Sambalpur, Orissa, India. Ecotoxicology and Environmental Safety, 2005, 60(2): 228-235.
- [37] 石辉, 王会霞, 李秧秧, 刘肖. 女贞和珊瑚树叶片表面特征的 AFM 观察. 生态学报, 2011, 31(5): 1471-1477.
- [38] Subhash N, Mohanan C N, Mallia R J, Muralidharan V. Quantification of stress adaptation by laser-induced fluorescence spectroscopy of plants exposed to engine exhaust emission and drought. Functional Plant Biology, 2004, 31(7): 709-719.
- [39] 李磊, 贾志清, 朱雅娟, 綦艳林. 我国干旱区植物抗旱机理研究进展. 中国沙漠, 2010, 30(5): 1053-1059.
- [40] Burkhardt J, Pariyar S. Particulate pollutants are capable to 'degrade' epicuticular waxes and to decrease the drought tolerance of Scots pine (*Pinus sylvestris* L.). Environmental Pollution, 2014, 184: 659-667.
- [41] Shao F, Wang L H, Sun F B, Li G, Yu L, Wang Y J, Zeng X R, Yan H, Dong L, Bao Z Y. Study on different particulate matter retention capacities of the leaf surfaces of eight common garden plants in Hangzhou, China. Science of the Total Environment, 2019, 652: 939-951.
- [42] 徐晓梧,余新晓,宝乐,樊登星,张欢.模拟降雨对常绿植物叶表面滞尘的影响.生态学报,2017,37(20):6785-6791.