

DOI: 10.5846/stxb202007091786

周士钧, 丛岭, 刘莹, 张振明. 人工降雨对湿地植物叶表面颗粒物滞留的影响. 生态学报, 2021, 41(18): 7312-7321.

Zhou S J, Cong L, Liu Y, Zhang Z M. Effect of artificial rainfall on the retention of particulate matter on wetland plant leaf surface. Acta Ecologica Sinica, 2021, 41(18): 7312-7321.

人工降雨对湿地植物叶表面颗粒物滞留的影响

周士钧^{1,2}, 丛岭^{1,2}, 刘莹^{1,2}, 张振明^{1,2,*}

1 北京林业大学生态与自然保护学院, 北京 100083

2 北京林业大学黄河流域生态保护国家林业和草原局重点实验室, 北京 100083

摘要:现阶段植物滞尘作为治理大气颗粒物污染的有效方法已被广泛接受与应用。已有研究表明,降雨等方式对植物叶表面颗粒物的滞留有着显著的影响,可有效地将颗粒物从叶表面去除,使植物再次具有滞留颗粒物的能力。由于自然降雨难以量化,现有研究大多采用模拟降雨的方式,将降雨特性量化为降雨强度、降雨历时等可控变量,但较少将降雨高度这一变量纳入研究。且大多以森林生态系统或者城市生态系统中常见的乔、灌、草等植物为主要研究对象,而忽略了处于水陆过渡带的湿地生态系统中植物的特殊性。湿地生态系统不仅可通过植物叶片等结构滞留颗粒物,还可依靠增强空气相对湿度促进颗粒物的吸收和积累,导致湿地植物滞尘规律的特殊性。因此,选择北京地区湿地生态系统内的 4 种常见植物(香蒲、菖蒲、芦苇和黄花鸢尾)作为研究对象,通过人工模拟降雨的方式,将降雨特性量化为降雨高度与降雨强度两个变量,共设置 1 m(11 m)、2 m(10 m)两个不同降雨高度,30 mm/h、45 mm/h、60 mm/h 三种不同降雨强度,并将颗粒物划分粗颗粒物(10—100 μm)、细颗粒物(3—10 μm)、超细颗粒物(0.4—3 μm)三种粒径范围。通过滤膜法获得单位叶面积颗粒物去除量,探讨人工降雨对湿地植物叶表面颗粒物滞留的影响。主要研究结果如下:(1)颗粒物去除量在粗颗粒物(10—100 μm)粒径范围内最高;(2)所试 4 种湿地植物中,菖蒲的颗粒物去除量位居前列;(3)只有在一定的范围内,植物叶表面颗粒物去除量才随降雨强度的增加而增加;(4)不同降雨高度下所试湿地植物叶表面颗粒物去除量无明显规律,降雨高度之间无显著差异($P>0.05$)。

关键词:降雨高度;降雨强度;颗粒物;湿地植物;叶表面;人工降雨

Effect of artificial rainfall on the retention of particulate matter on wetland plant leaf surface

ZHOU Shijun^{1,2}, CONG Ling^{1,2}, LIU Ying^{1,2}, ZHANG Zhenming^{1,2,*}

1 School of Ecology and Nature Conservation, Beijing Forestry University, Beijing 100083, China

2 The Key Laboratory of Ecological Protection in the Yellow River Basin of National Forestry and Grassland Administration, Beijing Forestry University, Beijing 100083, China

Abstract: At the present stage, plant dust retention is widely used as an effective method to control atmospheric particulate pollution. Studies showed that rainfall, with a significant effect on the retention of particulate matter on the leaf surface of plants, could effectively remove particulate matter from the leaf surface and give the leaf surface with the ability to retain particulate matter again. As natural rainfall is difficult to quantify, most existing studies used the simulated rainfall to quantify rainfall characteristics using controllable variables such as rainfall intensity and rainfall duration, but the variable of rainfall height was less commonly included in studies. Most studies focus on plants such as trees, shrubs, and grasses, which are common in forest ecosystems or urban ecosystems, and ignore the special characteristics of plants in wetland ecosystems. Wetland ecosystems not only retain particulate matter through structures such as plant leaves, but also rely on

基金项目:国家自然科学基金面上项目(41877535)

收稿日期:2020-07-09; 修订日期:2021-07-05

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: zhenmingzhang@bjfu.edu.cn

enhancing relative air humidity to promote the uptake and accumulation of particulate matter, leading to the specificity of the dust retention patterns of wetland plants. Thus, this study selected common plants (*Typha orientalis*, *Acorus calamus*, *Phragmites australis*, *Iris wilsonii*) of the wetland ecosystem in Beijing area as the research object. Through artificial simulation of rainfall, the rainfall characteristics are quantified to two variables, rainfall height and rainfall intensity. Two different rainfall heights were 1 m (11 m) and 2 m (10 m). Three different rainfall intensities included 30 mm/h, 45 mm/h, and 60 mm/h. The particulate matter was divided into three particle size ranges, namely coarse particulate matter (10—100 μm), fine particulate matter (3—10 μm), ultrafine particulate matter (0.4—3 μm). The removed particulate matter per unit leaf area was obtained through the filter membrane method, and the effect of artificial rainfall on the retention of particulate matter on the leaf surface of wetland plants was discussed. The results are as follows: (1) The mass of particulate matter removal was the highest in the range of 10—100 μm , that is, in the coarse particle scale; (2) Among the four wetland plants tested in this study, *Acorus calamus* ranked the highest in particulate matter removal; (3) The mass of particulate matter removed from plant leaf surfaces increases with increasing rainfall intensity only within a certain range; (4) There was no significant pattern in the removal of particulate matter from the leaf surface of the tested wetland plants with rainfall height, and there was no significant difference between rainfall heights ($P>0.05$).

Key Words: rainfall height; rainfall intensity; particulate matter; wetland plants; leaf surface; artificial rainfall

随着城市化和经济全球化的发展,颗粒物污染已成为影响人们正常生产生活的主要环境问题之一。颗粒物污染不仅对环境造成极大的危害,还对人体健康有严重的负面影响。流行病学和实验研究的证据一致表明,短期或长期暴露于颗粒物(PM),特别是最细颗粒物(即空气动力直径小于 2.5 μm 的空气颗粒物, $\text{PM}_{2.5}$),会增加心血管和呼吸系统疾病的发病率和死亡率,触发急性心脏事件^[1-3]。治理和控制颗粒物污染已成为维持和提高区域性和全球性环境质量、保障生态环境安全和人体健康的迫切需要,也是社会经济可持续发展的重大需求^[4]。

植物滞尘作为治理颗粒物污染最常见的方法,已广泛应用于日常生活之中。植物可作生物过滤器,在其叶表面等结构滞留颗粒物。现有国内外研究大多集中于常见单一植物类群(如乔、灌、草等)物种间大气颗粒物滞留能力的比较,以及造成其颗粒物滞留能力差异性原因的探讨。植物叶表面滞留颗粒物的能力取决于叶表面与颗粒物之间的粘附力,而粘附力的大小与叶表面微结构显著相关。研究证明叶表面微结构、叶片大小及形状、年龄、颗粒物的大小与来源等均是颗粒物滞留的重要预测因子^[5-8],强调叶片性状组合在影响颗粒物沉积方面的重要性^[9],有助于颗粒物污染修复的绿化植物物种选择。此外,植物所处环境对其叶表面颗粒物的滞留有明显的影响,不同下垫面对颗粒物的去除效果存在明显的差异。研究发现,与森林生态系统相比,湿地生态系统不仅可通过植物叶片等结构滞留颗粒物,还可依靠增强空气相对湿度促进颗粒物的吸收和积累^[10]。湿地生态系统处于水陆过渡带的特殊性逐渐被人了解,而处于其间的湿地植物其滞尘规律也应与常见的乔、灌、草等植物有所不同,理应进行进一步的研究,但现阶段关于湿地植物叶表面颗粒物滞留的研究较少。已有研究证明,不同下垫面可通过内部结构改变大气湍流交换^[11],且不同生态系统绿地植物配置模式与其滞尘效果密切相关^[12-13]。地表景观结构可引起局地气候变化并影响颗粒物的迁移转化^[14],不同下垫面通过影响气象因子进而影响大气颗粒物质量浓度,气象因子与大气颗粒物质量浓度之间存在显著相关性^[15-16]。

不过,植物滞尘仍存在一定的局限性,其滞留颗粒物的量有一定的阈值,一旦接近或到达阈值时,便不再滞留,且过多的颗粒物会对植物生理生态特性如光合特性造成影响,危害植物的正常生长发育^[17-18]。降雨、降雪等方式在此时便可有效的发挥其除尘作用,将颗粒物从植物叶表面去除,使叶表面重新具有滞留颗粒物的能力。由于自然降雨难以量化和控制,现阶段大部分研究都采用了人工模拟降雨的方法,将降雨分解为降雨强度、降雨历时等变量,更为精细的探讨降雨对叶表面颗粒物滞留的影响。人工模拟降雨的方法是利用能量相似的原理来模拟天然降雨的冲刷作用,通过模拟降雨的雨滴粒径与雨滴击溅速度来实现降雨能量的相

似,实验中一般通过调节降雨强度来实现^[19-20]。因此大多研究皆将降雨特性量化为降雨强度和历时,但忽略了降雨高度这一变量的影响。而当雨滴粒径越大时,雨滴击溅速度达到终速所需的降雨高度越大,此时则需考虑降雨高度通过影响雨滴动能对叶表面颗粒物滞留造成的影响^[19-20]。已有研究发现,降雨强度与叶表面颗粒物的去除效率呈正相关,较大的降雨强度可在较短时间清除大部分叶表面颗粒物,降雨时间和风速对清除率的影响不显著;而相对较小的降雨强度对叶表面颗粒物的去除作用存在很大差异,偶尔出现叶表面颗粒物量增大的现象,其关键影响因素是降雨时间和风速而不是雨滴大小分布^[21-22]。颗粒物去除量随降雨强度的增加而增加^[23-25]。降雨对不同粒径颗粒物去除能力有较大差异,10—100 μm 粒径范围的颗粒物更易去除,颗粒物去除量呈现出 10—100 μm >2.5—10 μm >0.4—2.5 μm 的规律,与未降雨前一致^[22,24,26]。

目前,关于降雨对植物叶表面颗粒物滞留的影响研究较多,且基本采用人工模拟降雨的方法。但研究对象主要针对森林生态系统、城市生态系统内常见的乔、灌、草等植物进行研究,且对降雨特性的量化大多为降雨强度和降雨历时,缺乏湿地生态系统常见植物以及降雨高度这一特性所致影响的研究。因此,本研究采用人工模拟降雨的方法,在对降雨特性的量化中加入降雨高度这一变量,并以常见湿地植物为研究对象,致力于探讨降雨对湿地植物叶表面颗粒物滞留的影响,为湿地生态系统的植物配置和物种选择提供一定的参考和依据。

1 研究方法

1.1 样品采集

本实验选取北京地区湿地生态系统常见植物——香蒲 (*Typha orientalis*)、菖蒲 (*Acorus calamus*)、芦苇 (*Phragmites australis*)、黄花鸢尾 (*Iris wilsonii*) 共四种进行研究,将采样地定于北京奥林匹克森林公园。已有研究证明风、降雨等气象因素对植物叶表面滞留颗粒物会产生一定的影响,一般认为 15 mm 的降水或者 17 m/s 的大风可以将植物叶片上积累的颗粒物冲刷掉^[27],因此选择在稳定天气(风和日丽的晴天)进行采样,经手持气象仪(Nielsen Kellerman, Kestrel 5500)测定出,地面 2 m 高度处风速均小于 2 m/s,且采样前 18 d 未下过雨,本研究认为此时收集的叶片样品表面颗粒物滞留量已达到饱和状态^[6,28-29],以此来避免气象因素对植物叶片滞留颗粒物的影响。同时,相关研究表明植物叶片的成熟程度显著影响叶表面颗粒物的滞留作用^[30],因此本文将采样季节定在植物生长的旺季(夏季),选取同一高度东南西北四个方向进行采样,叶片长势均良好,无病虫害,每个样采集叶片总面积约为 100—200 cm^2 ,采集的叶片密封保存在自封袋中并做好标记,人工模拟降雨实验前冷藏于 4 $^{\circ}\text{C}$ 的冰箱。

1.2 实验设计与方法

1.2.1 人工模拟降雨实验

人工模拟降雨实验于北京林业大学人工模拟降雨大厅开展,降雨大厅位于北京市鹫峰实验林场,其人工降雨装置为 QYJY-503C。降雨过程采用旋转的下喷式和叠加式喷头模拟自然降雨。每个降雨区的大小为 8 m $\times$ 8 m,降雨高度为 12 m,实验使用一个独立降雨区。在人工模拟降雨实验正式开始之前,先进行预实验,在平地上对降雨大厅降雨均匀性进行标定,通过调节降雨大厅的喷头的压强与开度控制雨强,摆放 8—24 个雨水收集器,在 5 或 15 min 内进行雨水的收集并称量体积,通过公式计算得出人工降雨预实验雨强,以及降雨均匀度系数,判断其是否达到实验所需,多次实验调节至所需雨强,并确保降雨均匀度系数大于 0.85 (均匀度系数大于 0.8 时,方为有效^[31]),再进行正式实验。

实验装置图如图 1 所示,分为叶片放置层与集水层两层,设置旋钮可以自由调节两层的高度,高度设计为 1 m 和 2 m (由于人工模拟降雨大厅的降雨高度为 12 m,且降雨大厅的降雨高度无法调节,所以本文所定义的降雨高度为“植物叶片离地高度”)。将每种植物叶片均匀放置于叶片放置层,每个样品间隔一定的距离,并在植物叶片下方垂直放置雨水收集器,收集冲洗植物叶片后的雨水。共 4 种植物,每种植物 3 组重复,结果取平均值,并在每场降雨中同高度放置孔径相同的雨水收集器,收集未冲洗植物叶片的雨水作为空白对照,重

复 3 组,结果取平均值。本研究共设计三个降雨强度,分别为 30 mm/h、45 mm/h、60 mm/h,每个降雨强度依不同降雨高度降雨两场,共降雨 6 场,每场降雨历时 1 h。

1.2.2 颗粒物去除量测定

对实验所用材料进行编号,将孔径为 10 μm 、3 μm 和 0.4 μm 的滤膜分别放入写好编号的滤膜盒中,滤膜放入 60 $^{\circ}\text{C}$ 烘箱中干燥 30 min 后置于室内(25 $^{\circ}\text{C}$) 稳定 24 h^[32] 后称量并记录滤膜初始质量。人工模拟降雨后收集的雨水先通过孔径为 100 μm 的不锈钢筛,以去除直径超过 100 μm 的大颗粒物,之后将其依次通过已知孔径为 10 μm 、3 μm 和 0.4 μm 的滤膜过滤,使用隔膜真空泵(GM-1.0 A 60 L/min)进行抽滤,加快过滤速率,此时滤膜上分别得到粒径范围为 10—100 μm 、3—10 μm 、0.4—3 μm 的颗粒物。过滤后的滤膜重复过滤前滤膜的处理过程,确保过滤前后滤膜烘干及稳定流程所用时间和温度相同,称量并记录滤膜过滤后质量。

1.2.3 叶表面积测定

雨后的叶片常温下干燥后用扫描仪(HP Deskjet 1510 series)扫描,所得图像结合 Image J(Version 1.51j8, Wayne Rasband, National Institute of Health, USA)图像处理软件测量叶片单面叶表面积(基于彩色通道相似性图像分割方法计算而得^[33])。由于该方法所得面积为叶片单面投影表面积,需通过对叶片微结构测定,选择适宜的叶表面积计算方法。一般,植物叶表面积=叶单面投影表面积 $\times$ 2。

1.2.4 单位叶面积颗粒物去除量计算

根据测定的叶片的总表面积以及去除的颗粒物的总质量,即可得到单位叶面积颗粒物去除量。计算方程如下:

$$Q = \frac{W_2 - W_1}{A}$$

其中, Q 为单位叶面积去除颗粒物量($\mu\text{g}/\text{cm}^2$); W_2 为滤膜末重(μg); W_1 为滤膜初重(μg); A 为叶面积(cm^2)。

1.3 数据处理与分析样品采集

实验所得的数据使用 Excel 2007 软件进行初步的编辑处理,利用 SPSS 22.0 软件进行数据分析,首先检验数据是否符合正态分布。数据符合正态分布后,采用单因素方差分析(one-way analysis of variance, ANOVA)对相同植物条件下,同一雨强不同粒径叶表面颗粒物去除量之间进行比较,事后多重比较采用 LSD 法。同一粒径条件下,相同植物不同降雨强度间差异、相同降雨强度不同植物间差异亦用单因素方差分析和 LSD 法多重比较。相同植物条件下,同一雨强不同降雨高度之间的比较则采用独立样本 T 检验。差异显著性水平皆设定为 0.05。本文所用图使用 Sigmaplot 12.5 软件进行图表绘制。

2 结果与分析

2.1 湿地植物叶表面不同粒径颗粒物滞留的差异

总的来说,如图 2 所示,无论降雨强度与高度如何变化,植物叶表面不同粒径颗粒物去除量基本都呈现粗颗粒物(10—100 μm) 粒径范围内颗粒物去除量最高,且基本呈现粗颗粒物(10—100 μm) > 细颗粒物(3—10 μm) > 超细颗粒物(0.4—3 μm) 的趋势。但不同粒径颗粒物之间无显著差异($P > 0.05$),偶有出现粗颗粒物显著大于细颗粒物或超细颗粒物($P < 0.05$)。特别的,在降雨强度为 30 mm/h 时,菖蒲在不同高度皆表现出,超细颗粒物去除量大于细颗粒物去除量的现象。而在降雨高度 2 m 下,当降雨强度为 60 mm/h 时芦苇和黄花

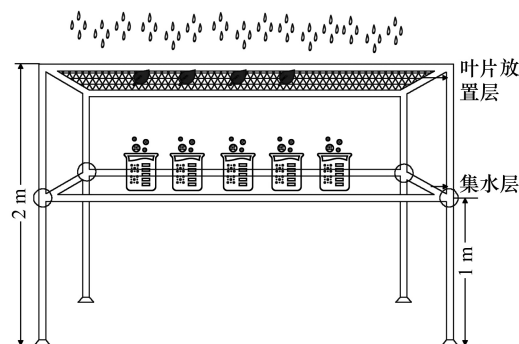


图 1 实验装置图

Fig.1 Experimental set-up diagram

鸢尾表现出细颗粒物去除量大于粗颗粒物去除量的现象。

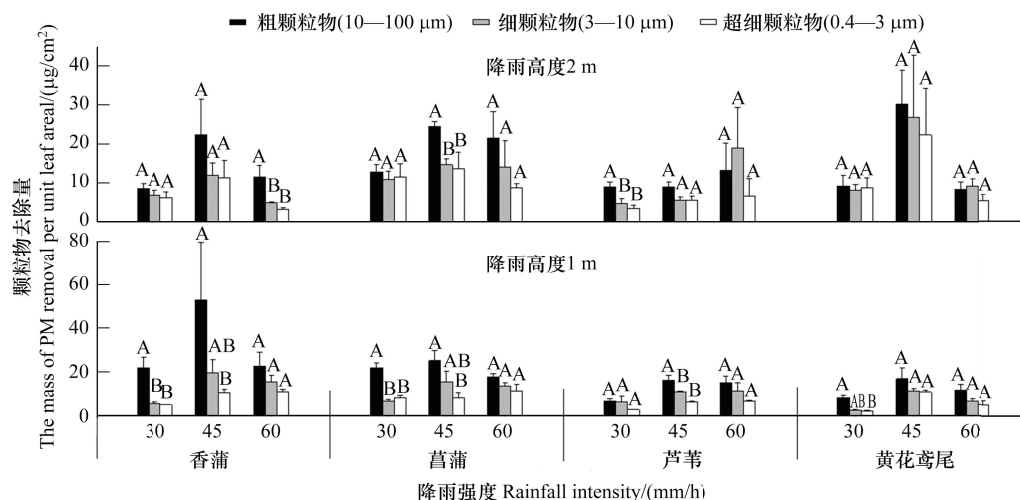


图2 湿地植物叶表面不同粒径颗粒物去除量比较

Fig.2 Comparison of the removal of particulate matter with different particle sizes on the leaf surface of wetland plants

不同大写字母表示粒径间 LSD 多重比较结果在 0.05 水平上差异显著

2.2 降雨强度对湿地植物叶表面颗粒物滞留的影响

具体而言,如图3所示,当降雨高度为2 m时,在降雨强度30 mm/h和45 mm/h下,菖蒲和黄花鸢尾的颗粒物去除量高于香蒲和芦苇;在降雨强度60 mm/h下,菖蒲和芦苇高于香蒲和黄花鸢尾。当降雨高度为1 m时,不同降雨强度下则基本呈现香蒲和菖蒲的颗粒物去除量高于芦苇和黄花鸢尾的现象。综合来看,菖蒲在本实验所试4种湿地植物中,颗粒物去除量皆排在前列。但湿地植物间叶表面颗粒物去除量无显著差异($P>0.05$)。

同时,不难看出,随着降雨强度的增加颗粒物去除量并未完全呈现增长的趋势。仅芦苇在降雨高度为2 m时及所试植物在降雨高度1 m且为超细颗粒物时,单位叶面积颗粒物去除量随降雨强度呈现增长的趋势,其余皆基本表现为降雨强度45 mm/h时颗粒物去除量最高,出现了低降雨强度下颗粒物去除量大于高降雨强度下颗粒物去除量的现象。颗粒物去除量随降雨强度增加的变化大致呈现为一个中间微微凸起的山形。

2.3 降雨高度对湿地植物叶表面颗粒物滞留的影响

总的来说,在不同粒径范围内,各湿地植物在不同降雨强度下颗粒物去除量随降雨高度的变化规律不明显,且两降雨高度之间无显著性差异($P>0.05$)。此外,黄花鸢尾在不同降雨强度和粒径范围内,单位颗粒物去除量随降雨高度基本呈现为2 m>1 m,芦苇则基本表现为1 m>2 m,香蒲和菖蒲表现则不明显。

3 讨论

3.1 湿地植物叶表面不同粒径颗粒物滞留的差异

由上可知,在不同降雨强度下,基本都呈现粗颗粒物(10—100 μm)粒径范围内颗粒物去除量最高,且大小趋势基本表现为粗颗粒物(10—100 μm)>细颗粒物(3—10 μm)>超细颗粒物(0.4—3 μm),部分表现细颗粒物(3—10 μm)低于超细颗粒物(0.4—3 μm),但颗粒物之间并无显著差异($P>0.05$),偶有出现粗颗粒物显著大于细颗粒物或超细颗粒物($P<0.05$)。这表明降雨对粗颗粒物(10—100 μm)滞留的影响显著高于细颗粒物(3—10 μm)和超细颗粒物(0.4—3 μm),这与已有研究结果相同^[26,34],主要的原因可能是:(1)不同粒径颗粒物与叶表面滞留方式不同。已有研究证明,颗粒物和植物叶片通常以滞留或停着、附着和粘附三种方式起作用,以粗颗粒(10—100 μm)为主的颗粒通常采用滞留或停着的方式,附着在植物叶表面较为松散,接触

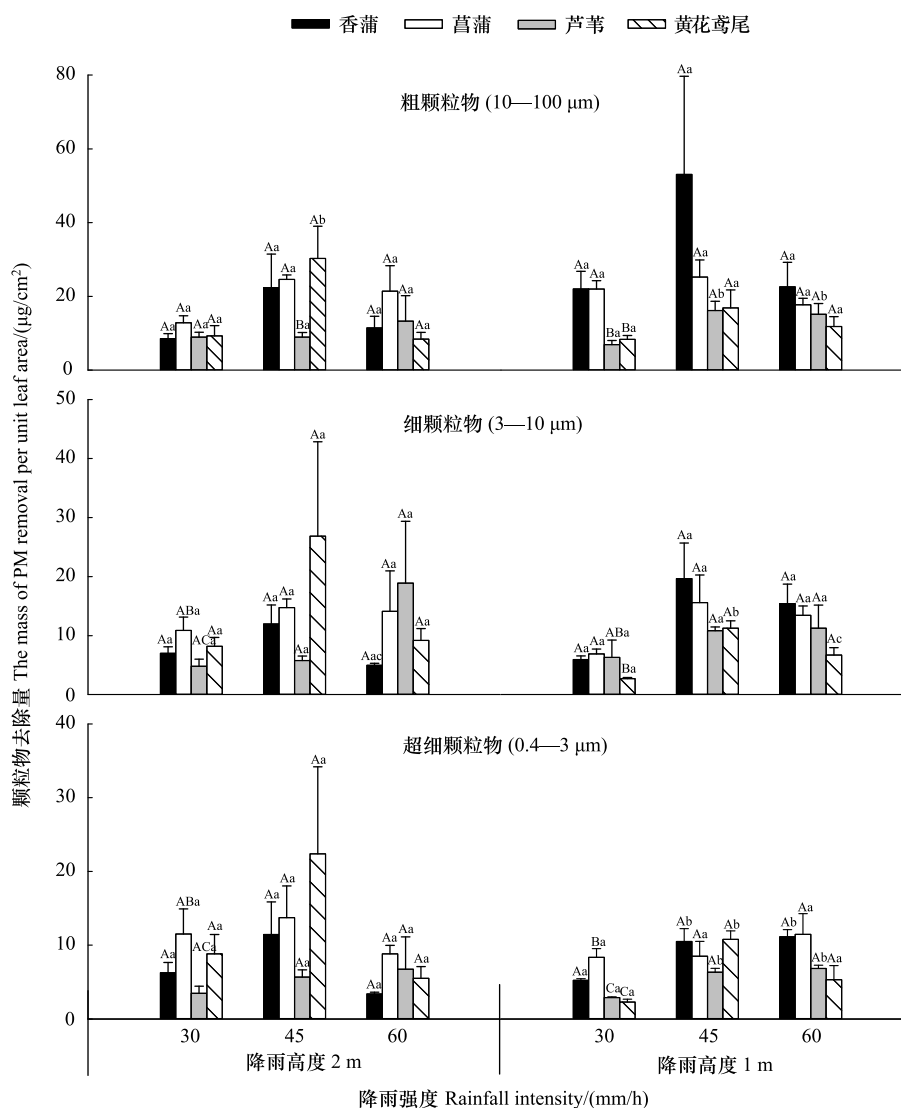


图3 降雨强度对湿地植物叶表面颗粒物去除的影响

Fig.3 Effect of rainfall intensity on the removal of particulate matter on wetland plant leaf surface

不同大写字母表示不同植物间 LSD 多重比较结果在 0.05 水平上差异显著,不同小写字母表示不同降雨强度间在 0.05 水平上差异显著

不是特别紧密,容易被雨水冲走,而细颗粒(3—10 μm)和超细颗粒(0.4—3 μm)则通常以附着和粘附为主,滞留能力较强,叶表面的相对接触面积较大且紧密,不易洗脱^[35]。(2)颗粒物的来源。颗粒物的来源也是重要影响因素之一,由于不同的 PM 来源,不同粒径的 PM 的物理和化学性质差异很大^[36],颗粒物可能已经与特定的化学物质结合形成了难以被雨水清除的化合物^[36-37]。(3)降雨对叶表面颗粒物滞留的影响。降雨使不同植物的叶片表面颗粒物的滞留受到粒径特征的影响,粒径特征可能取决于叶片的表面显微结构、植物种类、物理特性、植物群以及叶面积等^[38]。

3.2 湿地植物物种间叶表面颗粒物去除量比较

由上可知,虽然总体来看,菖蒲在本实验所试 4 种湿地植物中,颗粒物去除量皆排在前列,但各湿地植物叶表面颗粒物去除量之间无显著差异($P > 0.05$)。发生此类现象的原因可能是植物生理生态特性的差异。研究证明,颗粒物滞留在不同叶片尺寸之间($P < 0.001$),不同叶片形状之间($P < 0.001$)以及不同叶片微观形态之间($P < 0.001$)都存在显著差异^[5]。因此本研究对所试植物叶片进行形态观察,香蒲叶条形,长 40—70 cm,宽 0.4—0.9 cm,上部扁平,下部腹面微凹,背面逐渐隆起呈凸形;菖蒲叶剑状线形,长 90—150 cm,中部宽 1—

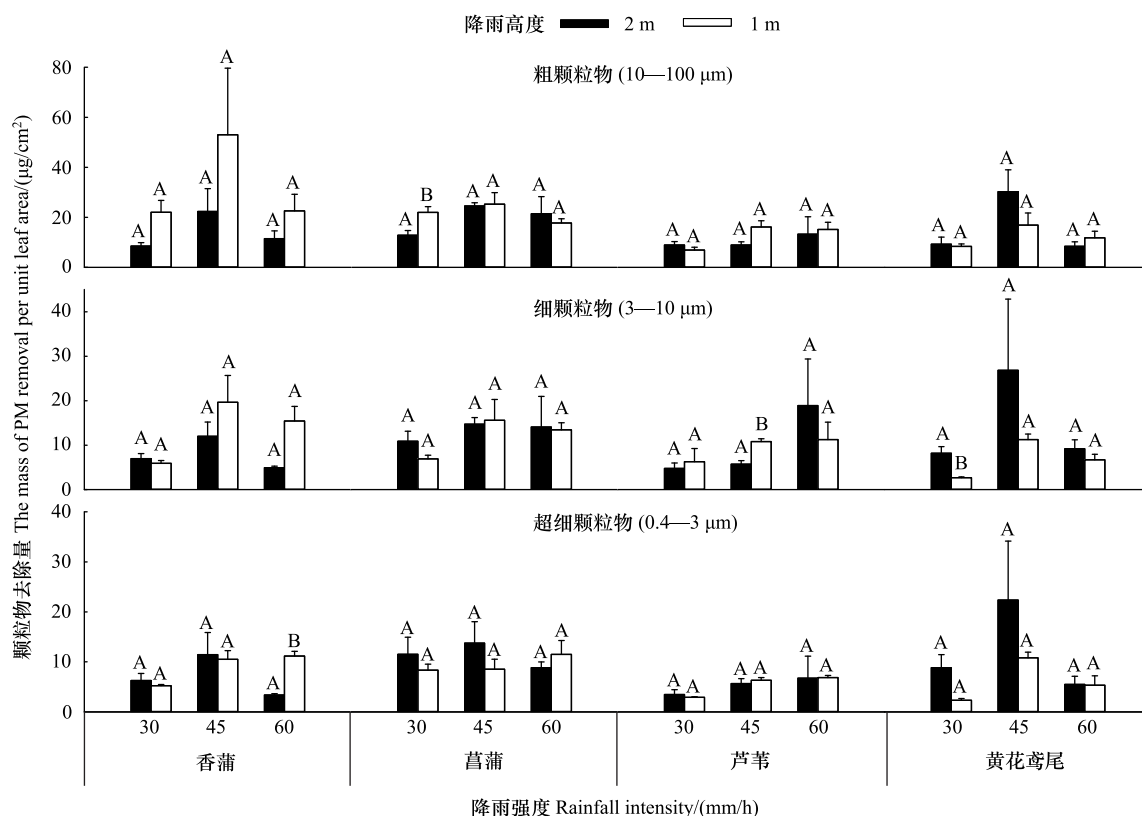


图4 降雨高度对湿地植物叶表面颗粒物去除的影响

Fig.4 Effect of rainfall height on the removal of particulate matter on the leaf surface of wetland plants

不同大写字母表示两降雨高度之间独立样本 T 检验结果在 0.05 水平上差异显著

3 cm, 中肋在两面均明显隆起; 芦苇叶披针状线形, 长 30 cm, 宽 2 cm; 黄花鸢尾叶宽条形, 长 25—55 cm, 宽 5—8 cm, 不同植物叶片形态存在显著差异, 可能为原因之一。同时, 已有研究证明褶皱、凹槽、小室、突起等叶表面显微结构能显著促进叶片对颗粒物的滞留^[5-6, 29]。因此本研究采用扫描电镜对所试湿地植物叶片表面进行观察, 不难发现实验所试植物叶表面微结构皆有明显的褶皱、凹槽、突起以及气孔等, 但 4 种植物间略有不同, 香蒲明显可以看到排列整齐的网状凹槽, 菖蒲则可以看到褶皱、突起以及气孔, 而芦苇有规则水平排列的圆突起和横脊, 黄花鸢尾叶表面则存在平行的横沟脊及气孔, 可能为原因之二。与此同时, 在扫描电镜观察植物叶表面微结构时部分植物叶片上仍有发现颗粒物的存在, 说明当前降雨所设置的降雨强度、历时等未能完全去除颗粒物, 可能由此造成所试湿地植物叶表面颗粒物去除量的差异, 此为第三个可能的原因。此外, 虽然所试植物样品皆来自同一采样点, 但所采不同植物乃至相同植物叶片上所滞留的颗粒物总量并不相同, 可能对实验结果造成一定的误差。

3.3 降雨强度对湿地植物叶表面颗粒物滞留的影响

由上可知, 植物叶表面颗粒物去除量仅在少数情况下随降雨强度的增大而变大, 大部分皆表现出低降雨强度下的颗粒物去除量大于高降雨强度的现象。例如在降雨高度为 1 m 时, 粗颗粒物和细颗粒物去除量皆在降雨强度为 45 mm/h 时最大, 大于高降雨强度 (60 mm/h), 与已有研究结果存在些许不同^[23, 25-26], 可能的原因主要有以下两个方面: 一是人工模拟降雨的局限性。在自然降雨中, 由于各种因素, 降雨的强度在一段时间内不是恒定的, 且模拟降雨实验选择的降雨强度远远高于自然降雨时的强度。自然降雨强度是基于 24 h 的降雨, 而模拟降雨是基于 1 h 的降雨。由于设备的限制, 模拟降雨强度也设置为高于自然降雨的中等或中等至中等降雨强度 (按照中国气象局标准, 中到大雨: 12 h 内降雨量 5—14.9 mm, 或 24 h 内降雨量 10—

24.9 mm;大雨:12 h 内降雨量 15—29.9 mm 或 24 h 内降雨量 25—49.9 mm)。同时,自然降雨中雨水的复杂成分也难以模拟,且自然降雨条件下叶片表面的湿沉降也是增加 PM 输入的途径。自然降雨中雨水所携带的颗粒物可能会滴到植物表面被植物吸收^[34],增加了降雨所去除的颗粒物的量。虽然本文在设置模拟降雨实验时加入了空白对照组以消除模拟降雨雨水中所携带的颗粒物对实验结果的影响,但不能完全排除其所造成的影响。此外,降雨所处环境不同。模拟降雨大厅由于是室内环境,下垫面为水泥地,且没有植被覆盖,与本实验所试植物生长的环境存在着一定的差异。已有研究证明,地表景观结构引起局地气候变化并影响颗粒物的迁移转化^[14],不同生态系统通过影响气象因子进而影响大气颗粒物质量浓度,气象因子与大气颗粒物质量浓度之间存在显著相关性。其中,相对湿度是影响颗粒物浓度的最重要的气象因素,与颗粒物浓度成正相关^[16,39]。而风也是可能影响 PM 浓度的因素,一些研究表明,细 PM 浓度随着风速的增加而逐渐降低,粗 PM 浓度则由于风下的粉尘再悬浮而增加^[40-41]。而室内为静风条件,气象因素影响几乎忽略不计,且在室内环境下,温度在降雨前后变幅较稳定,对颗粒物的滞留影响忽略不计,与实际环境降雨前后温度的明显变异不符。在人工模拟降雨中实验环境存在限制,不可能提供类似于植物采样地点的环境条件。可通过改善实验环境,减少自然气象条件与模拟条件之间的差异。

另一方面则是实验方法与装置的局限性。本实验采用滤膜法计算叶表面颗粒物去除量。实验过程中使用三种不同孔径的滤膜对冲洗叶片后的雨水进行过滤,但由于对滤膜所能承载颗粒物量的阈值,以及冲洗叶片后雨水所含颗粒物总量的不清晰,会出现冲洗后的雨水颗粒物量大于滤膜所能承载的量,出现过滤慢,过滤时间长的现象,长时间的过滤缓慢还会导致颗粒物沉积在玻璃器材内壁,导致极大的实验误差。如何判断所过滤雨水中的颗粒物量与滤膜的承载量之间的大小关系,何时更换滤膜,更换几次,存在着极大的主观判断。实验装置中叶片放置层不同植物样品之间并无直接的隔断,只是将植物叶片按一定距离放置于同一平面,在降雨过程中,不可避免的会有冲洗其他植物叶片的雨水相互滴溅,实际收集的该种植物冲洗叶片后的雨水存在一定的偏差。

3.4 降雨高度对湿地植物叶表面颗粒物滞留的影响

由上可知,在不同粒径范围内,各湿地植物在不同降雨强度下,颗粒物去除量随降雨高度的变化无明显规律,两降雨高度之间无显著性差异($P>0.05$)。可能的原因是:第一,高度设置的局限性。本实验于北京林业大学人工降雨大厅开展,人工降雨大厅的降雨高度为 12 m,但其降雨高度无法调节。故实验设计中的降雨高度只能通过实验装置进行调节。而预实验中所得出的降雨强度与降雨均匀度系数,是在水平地面,即降雨高度为 12 m 时所得,提升高度所造成的影响忽略不计,但仍是造成误差的原因之一。此外,集水瓶与叶片放置层有一定的距离,雨水在冲洗叶片之后会经过一段空气到达集水瓶,可能造成一定影响。第二,本文通过人工模拟降雨开展实验,实验所得的降雨强度其参考的标准,以及所用雨水皆与天然降雨不同,对实验结果会有一定的干扰。第三,本文通过滤膜法来获得颗粒物去除量,在雨水过滤时可能因未过滤完全或过滤时的损失而存在一定实验误差。第四,本文实验装置中叶片放置层中未能完全将各实验植物完全隔离开,可能会因相邻植物叶片击溅的雨水造成该植物颗粒物去除量增加或减少,引起实验误差。第五,本实验在室内静风条件下进行,与植物天然生长的环境条件不同,且实验中未考虑再悬浮。

4 结论

(1)不同粒径颗粒物去除量基本呈现粗颗粒物(10—100 μm)>细颗粒物(3—10 μm)>超细颗粒物(0.4—3 μm)的大小趋势,但粒径之间基本无显著差异($P>0.05$);

(2)所试湿地植物中,当降雨高度为 2 m 时,在降雨强度 30 mm/h 和 45 mm/h 下,菖蒲和黄花鸢尾的颗粒物去除量高于香蒲和芦苇;在降雨强度 60 mm/h 下,菖蒲和芦苇高于香蒲和黄花鸢尾。当降雨高度为 1 m 时,不同降雨强度下则基本呈现香蒲和菖蒲的颗粒物去除量高于芦苇和黄花鸢尾的现象。可结合当地自然降雨雨强大小,为人工湿地建造以及退化湿地修复的物种选择提供参考;

(3)在不同降雨高度下,大多皆出现较高降雨强度下颗粒物去除量小于较低降雨强度的现象,似乎不同植物存在颗粒物最适去除雨强,应在接下来的研究中继续进行讨论;

(4)降雨高度之间颗粒物去除量基本无显著差异($P>0.05$)。似乎降雨高度并不是影响降雨对植物叶表面颗粒物去除的主要因子。是否可忽略不计其影响,应开展进一步的研究。

参考文献(References):

- [1] Pui D Y H, Chen S C, Zuo Z L. $PM_{2.5}$ in China: Measurements, sources, visibility and health effects, and mitigation. *Particuology*, 2014, 13: 1-26.
- [2] Martinelli N, Olivieri O, Girelli D. Air particulate matter and cardiovascular disease: a narrative review. *European Journal of Internal Medicine*, 2013, 24(4): 295-302.
- [3] Franklin B A, Brook R, Pope C A. Air pollution and cardiovascular disease. *Current Problems in Cardiology*, 2015, 40(5): 207-238.
- [4] 张帅, 苏应辉, 譙四红, 张延芹, 樊孝萍, 荣新军, 田元玲. 大气污染的植物修复研究进展. *湖北林业科技*, 2010, (6): 32-35, 43-43.
- [5] Weerakkody U, Dover J W, Mitchell P, Reiling K. Evaluating the impact of individual leaf traits on atmospheric particulate matter accumulation using natural and synthetic leaves. *Urban Forestry & Urban Greening*, 2018, 30: 98-107.
- [6] 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.
- [7] 王蕾, 哈斯, 刘连友, 高尚玉. 北京市六种针叶树叶面附着颗粒物的理化特征. *应用生态学报*, 2007, 18(3): 487-492.
- [8] 高国军, 徐彦森, 莫莉, 余新晓. 植物叶片对不同粒径颗粒物的吸附效果研究. *生态环境学报*, 2016, 25(2): 260-265.
- [9] Leonard R J, McArthur C, Hochuli D F. Particulate matter deposition on roadside plants and the importance of leaf trait combinations. *Urban Forestry & Urban Greening*, 2016, 20: 249-253.
- [10] Zhang Y, Yan G X, Dai L Y, Cong L, Wu Y N, Zhai J X, Zhang Z M. Removal ability of different underlying surfaces to near-surface particulate matter. *Environmental Technology*, 2021, 42(12): 1899-1910.
- [11] Ren Y, Zhang H S, Wei W, Wu B G, Cai X H, Yu S. Effects of turbulence structure and urbanization on the heavy haze pollution process. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2019, 19(2): 1041-1057.
- [12] 谢滨泽. 城市绿地植物叶表面微结构及配置方式对其滞留 $PM_{2.5}$ 等颗粒物的影响[D]. 西安: 西安建筑科技大学, 2015.
- [13] 罗曼. 不同群落结构绿地对大气污染物的消减作用研究[D]. 武汉: 华中农业大学, 2013.
- [14] 娄彩荣, 刘红玉, 李玉玲, 李玉凤. 大气颗粒物($PM_{2.5}$, PM_{10})对地表景观结构的响应研究进展. *生态学报*, 2016, 36(21): 6719-6729.
- [15] Deng S X, Ma J, Zhang L L, Jia Z K, Ma L Y. Microclimate simulation and model optimization of the effect of roadway green space on atmospheric particulate matter. *Environmental Pollution*, 2019, 246: 932-944.
- [16] 丛岭, 翟杰休, 马文梅, 刘佳凯, 王宇, 武亚楠, 张振明. 林地和湿地大气颗粒物阻滞效果研究. *生态环境学报*, 2017, 26(6): 1017-1025.
- [17] Popek R, Lukowski A, Grabowski M. Influence of particulate matter accumulation on photosynthetic apparatus of physocarpus opulifolius and sorbaria sorbifolia. *Polish Journal Environmental Studies*, 2018, 27(5): 2391-2396.
- [18] 裘璐函, 何婉璿, 刘美华, 陈景锋, 温国胜. 杭州市 6 种常见绿化树种滞尘能力及光合特性. *浙江农林大学学报*, 2018, 35(1): 81-87.
- [19] 薛燕妮, 徐向舟, 王冉冉, 程飞. 人工模拟降雨的能量相似及其实现. *中国水土保持科学*, 2007, 5(6): 102-105, 112-112.
- [20] 徐向舟, 刘大庆, 张红武, 董占地, 朱明东. 室内人工模拟降雨试验研究. *北京林业大学学报*, 2006, 28(5): 52-58.
- [21] Luan T, Guo X L, Zhang T H, Guo L J. Below-cloud aerosol scavenging by different-intensity rains in Beijing City. *Journal of Meteorological Research*, 2019, 33(1): 126-137.
- [22] 刘辰明, 张志强, 陈立欣, 邹瑞, 张璐, 高源, 李冬梅. 降雨对北方城市 5 种典型城市绿化树种叶面滞尘的影响. *生态学报*, 2018, 38(7): 2353-2361.
- [23] Weerakkody U, Dover J W, Mitchell P, Reiling K. The impact of rainfall in remobilising particulate matter accumulated on leaves of four evergreen species grown on a green screen and a living wall. *Urban Forestry & Urban Greening*, 2018, 35: 21-31.
- [24] 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.
- [25] 郭若妍, 王会霞, 石辉. 模拟降雨对常绿植物叶表面滞留颗粒物的影响. *生态学杂志*, 2019, 38(7): 1991-1999.
- [26] 马文梅, 武亚楠, 张振明. 降雨对植物叶表面颗粒物的淋洗作用. *北京林业大学学报*, 2018, 40(8): 50-55.
- [27] 邱媛, 管东生, 宋巍巍, Peart M R. 惠州城市植被的滞尘效应. *生态学报*, 2008, 28(6): 2455-2462.
- [28] Wang L, Gong H L, Liao W B, Wang Z. Accumulation of particles on the surface of leaves during leaf expansion. *Science of the Total Environment*, 2019, 652: 939-951.

- Environment, 2015, 532: 420-434.
- [29] 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.
- [30] 左娜, 王会霞, 杨贞, 钟梦婷, 石辉, 王彦辉. 不同径级白皮松滞留空气中颗粒物的特征. *生态学杂志*, 2017, 36(2): 367-373.
- [31] 霍云梅, 毕华兴, 朱永杰, 许华森, 王晓贤, 常译方. QYJY-503C 人工模拟降雨装置降雨特性试验. *中国水土保持科学*, 2015, 13(2): 31-36.
- [32] Dzierzanowski K, Popek R, Gawróńska 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.
- [33] 韩殿元, 黄心渊, 付慧. 基于彩色通道相似性图像分割方法的植物叶面积计算. *农业工程学报*, 2012, 28(6): 179-183.
- [34] Xu X W, Zhang Z M, Bao L, Mo L, Yu X X, Fan D X, Lun X X. Influence of rainfall duration and intensity on particulate matter removal from plant leaves. *Science of the Total Environment*, 2017, 609: 11-16.
- [35] 郭若妍. 不同降雨强度及风速对植物滞留颗粒物的影响[D]. 西安: 西安建筑科技大学, 2019.
- [36] 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.
- [37] Hunsche M, Bringe K, Schmitz-eiberger M, Noga G. Leaf surface characteristics of apple seedlings, bean seedlings and kohlrabi plants and their impact on the retention and rainfastness of mancozeb. *Pest Management Science*, 2006, 62(9): 839-847.
- [38] 吕铃钥, 李洪远, 杨佳楠. 植物吸附大气颗粒物的时空变化规律及其影响因素的研究进展. *生态学杂志*, 2016, 35(2): 524-533.
- [39] Cong L, Zhang H, Zhai J X, Yan G X, Wu Y N, Wang Y, Ma W M, Zhang Z M, Chen P J. The blocking effect of atmospheric particles by forest and wetland at different air quality grades in Beijing China. *Environmental Technology*, 2020, 41(17): 2266-2276.
- [40] Zhang B E, Jiao L M, Xu G, Zhao S L, Tang X, Zhou Y, Gong C. Influences of wind and precipitation on different-sized particulate matter concentrations ($PM_{2.5}$, PM_{10} , $PM_{2.5-10}$). *Meteorology and Atmospheric Physics*, 2018, 130(3): 383-392.
- [41] Yang T Y, Wang Y, Wu Y N, Zhai J X, Cong L, Yan G X, Zhang Z M, Li C Y. Effect of the wetland environment on particulate matter and dry deposition. *Environmental Technology*, 2020, 41(8): 1054-1064.