

DOI: 10.5846/stxb201708221511

项敬银, 俞飞, 伊力塔, 陈敏斯. 模拟酸雨和镉复合处理对秃瓣杜英生长和荧光参数的影响. 生态学报, 2018, 38(15): - .

Xiang J Y, Yu F, Yi Lita, Chen M S. Combined effects of artificial acid rain and Cd on the growth and fluorescence parameters of *Elaeocarpus glabripetalus*. Acta Ecologica Sinica, 2018, 38(15): - .

模拟酸雨和镉复合处理对秃瓣杜英生长和荧光参数的影响

项敬银, 俞 飞, 伊力塔*, 陈敏斯

浙江农林大学省部共建亚热带森林培育国家重点实验室, 临安 311300

摘要:通过盆栽试验研究了模拟酸雨(pH 3.0 和 pH 5.6)和镉(Cd 50 和 Cd 100)复合污染以及对照处理(CK)对秃瓣杜英(*Elaeocarpus glabripetalus*)的生长和生理指标的影响。结果表明:单独的酸雨处理显著增加了植株总生物量的积累,促进了根和叶片生物量的分配,降低了茎干生物量的分配,且显著降低了叶片中的镉含量。单独镉处理下,Cd 50 显著增加了植株生物量的积累,促进了根和叶片生物量的分配,Cd 100 虽抑制了植株生物量的积累,但生物量分配几乎不受影响。复合处理促进了植株根和叶片生物量的分配,降低茎干生物量分配,且降低了根冠比,其中 pH 5.6+Cd 100 显著促进了植株生物量的积累。所有处理的荧光参数与对照无显著差异,说明未对植株的 PS II 反应中心产生显著影响。镉在植株体内的积累为:根>茎>叶。酸雨强度和镉浓度的交互作用对生物量,镉含量和 F_0 影响显著。因此,秃瓣杜英对酸雨和镉的复合污染有较强的耐受能力。

关键词:酸雨;重金属;生物量;荧光参数;秃瓣杜英

Combined effects of artificial acid rain and Cd on the growth and fluorescence parameters of *Elaeocarpus glabripetalus*

XIANG Jingyin, YU Fei, YI Lita*, CHEN Minsi

State Key Laboratory of Subtropical Silviculture, Zhejiang A & F University, Lin'an 311300, China

Abstract: A pot experiment was conducted to study the effects of different acid gradients (pH 3.0 and pH 5.6), different cadmium concentrations (Cd 50 and Cd 100), and their combination (pH 3.0 + Cd 100, pH 5.6 + Cd 50 and pH 5.6 + Cd 100), as well as the control treatment (CK) on the growth and physiological indexes of *Elaeocarpus glabripetalus*. The results showed that the addition of single acid rain significantly increased the accumulation of total biomass, promoted the distribution of root and leaf biomass, reduced the distribution of stem biomass, and reduced the cadmium content in leaves. Cadmium alone (Cd 50) significantly increased the accumulation of plant biomass and promoted the distribution of root and leaf biomass. Cd 100 inhibited biomass accumulation, but the biomass allocation was largely unaffected. Their combination promoted the distribution of root and leaf biomass, reduced the distribution of stem biomass, and reduced the root-to-shoot ratio, and pH 5.6 + Cd 100 significantly promoted the accumulation of plant biomass. There were no significant differences in the fluorescence parameters between all treatments, indicating that there was no significant effect on the PS II reaction center of the plants. The accumulation of cadmium in the plant was in the order of root > stem > leaf. The interaction of acid rain intensity and cadmium concentration had significant effects on biomass, cadmium content, and F_0 . Therefore, *E. glabripetalus* has strong tolerance to acid rain and cadmium complex pollution.

基金项目:浙江省自然科学基金项目资助(LQ17C160004)

收稿日期:2017-08-22; 网络出版日期:2018-00-00

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: yilita@126.com

Key Words: acid rain; heavy metals; biomass; fluorescence parameters; *Elaeocarpus glabripetalus*

随着经济社会的快速发展,酸雨污染已成为中国重要的环境问题^[1]。目前,酸雨污染面积已占中国国土面积的 40%,特别是华东地区已成为中国酸雨形势最严重区域之一,酸雨频率及酸雨覆盖面积不断增长和扩大^[2-3]。临安大气本地污染监测站的数据显示:2005—2010 年,大气本地站降水各月 pH 均值均小于 4.5,达强酸雨程度,且酸雨 pH 值总体呈逐年下降趋势^[4]。相关研究指出,酸雨会破坏叶片角质层、表皮组织和气孔^[5],改变植物体内酶活性而影响光合作用^[6],抑制植物养分、水分的吸收和运输导致植物衰退^[7-9]。除此之外,由于工业生产的迅猛发展以及农田污灌,大量镉进入生态系统,镉因其化学活性强、移动性大、毒性持久,严重危及动植物生存和人类健康^[10-11]。目前在中国受到重金属污染的耕地面积近有 2000 万 hm^2 ,约占总耕地面积的 1/5^[12]。杨楠楠^[13]发现镉、汞、铅等元素严重超标的地区主要集中在浙江、上海、南京等发达城市中心,且区内中强度级以上的污染占 80%左右,并且在中心城市出现了较大面积的局部污染。镉作为对植物产生主要毒害作用的重金属污染物^[14],是植物生长的非必需元素,可使植物出现生长受阻的现象,使植株生长、产量及其在体内积累受到影响^[15-16]。然而自然状态下,绝对意义上的单一污染是不存在的,污染多具有伴生性和综合性^[17],各因素间可能会产生加和、协同或拮抗等作用。酸雨可以影响土壤中重金属的化学行为,二者共同导致植物生存条件进一步恶化^[18]。已有资料表明酸雨会造成土壤中有毒重金属元素活性明显提高,溶解性增加,迁移能力提高^[19],不仅形成对植物有害的土壤环境,而且使植物地上部分的茎叶中重金属含量明显提高,改变植物的理化性质,降低植物的抗性和品质^[20]。但张丽华等^[21]发现模拟酸雨作用于受重金属污染土壤时,污染土壤中不同重金属呈现不同的溶出规律,且溶出量与模拟酸雨 pH 相关。古昌红等^[22]发现在酸雨作用下,酸度的增加对污染土壤中 Cd、Zn、Cu 的释放影响不大。

秃瓣杜英,杜英科 (*Elaeocarpaceae*) 杜英属 (*Elaeocarpus*) 常绿乔木,亚热带典型地带性树种,在我国福建、浙江及云南等省(区)海拔 400—750 m 的常绿阔叶林和针阔混交林中广泛分布^[23]。中等喜光,生长迅速,在中性、微酸性的山地红壤、黄壤上均可生长;不仅抗风力强,也是城市绿化、庭园观赏和四旁绿化的优良树种。前期有研究发现秃瓣杜英的生物量积累、光合能力、PS II 原初光能转化效率和 PS II 潜在的活性在模拟酸雨处理下均有所升高^[23-24]。俞飞等^[25]也发现秃瓣杜英对酸雨胁迫有较强的适应能力。本研究旨在相关研究的基础上模拟酸雨和镉复合环境条件下,秃瓣杜英的生物量积累、镉分配差异和荧光参数的响应特征,探究复合污染对亚热带树木的响应机制。

1 材料与方法

1.1 试验地概况

试验地位于浙江农林大学东湖校区试验温室(119°44'E,30°16'N)。该地属中亚热带季风气候区,温暖湿润,光照充足,雨量充沛,具有春多雨、夏湿热、秋气爽、冬干冷的气候特征。年平均气温 16.6 °C,年降水日 158 d,年降水量 1454.1 mm,年日照时数 1825.7 h,无霜期年平均 237 d,土壤为红黄壤^[7]。

1.2 试验材料与试验设计

供试材料为浙江省农业科学研究院蚕桑所提供的 1 年生同种源实生秃瓣杜英幼苗,于 2016 年 5 月采用当地红黄壤将 120 棵幼苗移栽至高 40 cm、直径 30 cm 的塑料花盆中,每盆 1 株,将所有幼苗编号、挂牌,置于通风、遮雨的塑料薄膜受控大棚内。缓苗期常规管理,用蒸馏水浇灌;试验期间及时除草、浇灌,以免造成干旱。缓苗两个月待秃瓣杜英长势稳定后,选取株高和地径基本一致的幼苗随机分成 9 组,每组 12 株,共 108 株。

试验采用随机区组设计,3 次重复。设计 4 种类别处理方式:单一酸雨处理,包括 pH 3.0 和 pH 5.6;单一镉处理,包括 Cd 50 和 Cd 100;酸与镉复合处理,包括 pH 3.0+Cd 50、pH 3.0+Cd 100、pH 5.6+Cd 50 和 pH 5.6+Cd 100;以及对照处理:CK(pH 7.0+Cd 0)。一共 9 个处理。查阅资料得大多数植株镉浓度耐受范围均小于

50 mg/kg, 杜天庆等^[14]发现小麦耐受镉浓度为 300 $\mu\text{mol/L}$, 甜高粱幼苗、向日葵、香蕉耐受镉浓度分别为 12 mg/kg、100 $\mu\text{mol/L}$ 和 30 mg/kg^[26-28], 较少植株能耐受 100 mg/kg 的镉浓度, 因此本试验设置 Cd 50 和 Cd 100 两个梯度。

2016 年 7 月, 往花盆中加入氯化镉溶液(CdCl_2), 每 3 天加 1 次, 共 6 次, 最终使土壤中镉浓度接近 67.71 mg/kg 或 126.97 mg/kg。模拟酸雨用浓度 98%、密度 1.84 g/mL 的浓 H_2SO_4 和浓度 68%、密度 1.4 g/mL 的浓 HNO_3 配制(体积比 1:1)。喷淋前用蒸馏水稀释成 pH 3.0 和 pH 5.6 的溶液^[7]。依据临安市近 10 年各月平均降雨量确定每月模拟酸雨喷淋量^[29], 并平均分配到每周, 每周喷淋 2—3 次, 每次 300 mL, 直至 2016 年 9 月下旬试验结束。

1.3 测定方法

1.3.1 生物量测定

生物量测定: 2016 年 9 月, 将试验植株的根、茎、叶三部分分开, 先用自来水冲洗粘附于植物样品上的泥土和污物, 接着用超纯水冲洗, 最后用去离子水冲洗, 在烘干前先在 105℃ 下杀青 5 min, 然后在 60℃ 下于烘箱中烘至恒重, 称量各部分的生物量^[30]。

1.3.2 镉含量测定

用万分之一分析天平精确称取植株各部分样品干粉各 0.2000 g, 加入 2 mL MillQ 水和 5 mL HNO_3 , 隔日加入 1 mL H_2O_2 (HNO_3 和 H_2O_2 均为优级纯), 放入微波消解仪(CEM-MARS 6, 美国)中消解, 赶酸后再用 3% HNO_3 定容至 50 mL, 静置后用 SOLAAR M6 型原子吸收光谱仪(美国热电)测定根中的镉含量, 用电感耦合等离子体质谱仪(XSERIES 2 ICP-MS, 中国)测定茎和叶中的镉含量^[31]。

1.3.3 荧光参数测定

于 2016 年 7—9 月利用调制叶绿素荧光成像系统(IMAGING-PAM, WALZ, 德国)在晴朗天气的 9:00—11:00 时, 选择植株中上部成熟叶片(每株 3 片)进行叶绿素荧光参数的测定, 每个处理随机选取 3 株。每个处理的荧光参数值取 3 株植株的平均值。

首先, 暗适应: 用仪器专用暗适应叶夹 DLC-8 夹住待测叶片, 使其暗适应 20 min 后测定荧光参数, F_0 (初始荧光) 在暗适应后以弱调制测量光($0.05 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$) 诱导产生, 随后用强饱和脉冲($6000 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$) 激发产生最大荧光 F_m , 闪光 2 s。

接着, 光适应: 在自然光下直接测定, 在光化光打开之前, 测定一次 F_0 和 F_m' (光适应的样品打开饱和脉冲时得到的最大荧光产量), 然后在自然光照下系列饱和脉冲启动, 施加多次强饱和和闪光脉冲($6000 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$, 脉冲时间 2 s), 记录每次光适应下任意时刻的荧光产量(F_t) 和 F_m' , 每隔 20 s 测定一次, 直至脉冲终止, 取最后 6 次闪光的平均值(因闪光 10 次后基本达到稳态)。测定指标包括 F_0 、 F_m 、 F_t , 其中光系统 II 最大光化学效率(F_v/F_m)、非光化学淬灭系数(NPQ)和光化学淬灭系数(q_p)的计算公式如下:

$$\begin{aligned} F_v/F_m &= (F_m - F_0) / F_m \\ \text{NPQ} &= 1 - (F_m' - F_0') / (F_m - F_0) \\ q_p &= (F_m' - F_t) / (F_m' - F_0') \end{aligned}$$

1.4 数据处理

利用 SPSS 19.0 统计分析软件中单因素方差分析对所有数据进行正态性和齐性检验, 并采用 Tukey 或 Duncan 多重比较检验法进行差异显著性检验($P < 0.05$); 利用双因素方差分析进行酸雨强度和镉浓度的影响进行检验; 采用 Excel 绘制图表。

2 结果与分析

2.1 生物量积累与分配

从表 1 可以看出, 单独的酸雨处理显著($P < 0.05$)增加了秃瓣杜英的总生物量积累。其中, pH 3.0 和 pH

5.6 处理下的生物量与对照组相比分别提高了 30.58%和 16.31%,随着酸雨强度增加,植株的总生物量积累显著($P<0.05$)增加,且根冠比提高。结合图 1,酸雨处理改变了生物量的分配,pH 3.0 促进了植株叶片生物量的分配,叶所占总生物量的比例较对照提高了 40.40%;pH 5.6 促进了植株根生物量的分配,根所占总生物量的比例较对照提高了 37.73%,两者茎占生物量的比例较对照组显著($P<0.05$)下降。

单独 Cd 处理下,Cd 50 总生物量与对照组相比显著($P<0.05$)增加,提高了约 20.37%,结合图 1,Cd 50 促进了植株根及叶片生物量的分配,降低了茎干生物量的分配。而 Cd 100 的总生物量积累显著($P<0.05$)低于对照组,但生物量分配并未受太大影响。随着 Cd 浓度的升高,植株根生物量、叶生物量和总生物量的积累均显著($P<0.05$)下降。

复合处理下,pH 5.6+Cd 100 显著($P<0.05$)增加了总生物量积累,与对照组相比提高了 48.84%,其余处理方式总生物量与对照组相比差异不显著($P>0.05$)。所有处理均促进了植株根及叶片生物量的分配,降低了茎干生物量的分配(图 1),植株的根冠比也均下降。

表 1 酸雨和镉复合处理下秃瓣杜英生物量积累

Table 1 The effects of simulated acid rain and Cd on the biomass of *Eleocarpus glabripetalus*

模拟酸雨 pH 值 Simulated acid rain pH	模拟 Cd 浓度 Simulated Cd concentration/ (mg/kg)	根生物量 Root biomass/g	茎生物量 Stem biomass/g	叶生物量 Leaf biomass/g	总生物量 Total biomass/g	根冠比 Root-shoot ratio
pH 7.0	0	5.57±0.62de	10.15±0.55abc	6.36±0.71c	22.07±0.78de	2.98±0.30ab
	50	9.31±0.35b	11.03±0.83ab	9.37±0.45ab	29.71±0.93b	2.19±0.22ab
	100	4.55±0.05e	8.61±0.93bc	5.85±0.16c	19.01±0.83f	3.18±0.14a
pH 5.6	0	8.85±0.41b	9.27±1.85bc	7.56±1.18bc	25.67±3.44c	1.89±0.25b
	50	7.34±0.33c	9.34±0.28abc	7.92±0.17bc	24.60±0.45cd	2.45±0.40ab
	100	11.17±0.67a	12.02±2.50a	9.67±1.69ab	32.85±0.13a	1.95±0.19ab
pH 3.0	0	6.93±0.53cd	10.26±1.38abc	11.64±1.92a	28.82±0.01b	3.17±0.32a
	50	6.98±0.76cd	10.00±0.15abc	7.37±0.13bc	24.35±0.28cd	2.49±0.47ab
	100	6.34±1.90cd	8.12±1.03c	6.81±2.95bc	21.27±2.09ef	2.56±1.39ab

注:表内数据为平均值±标准误差;同列不同字母表示差异显著($P<0.05$)

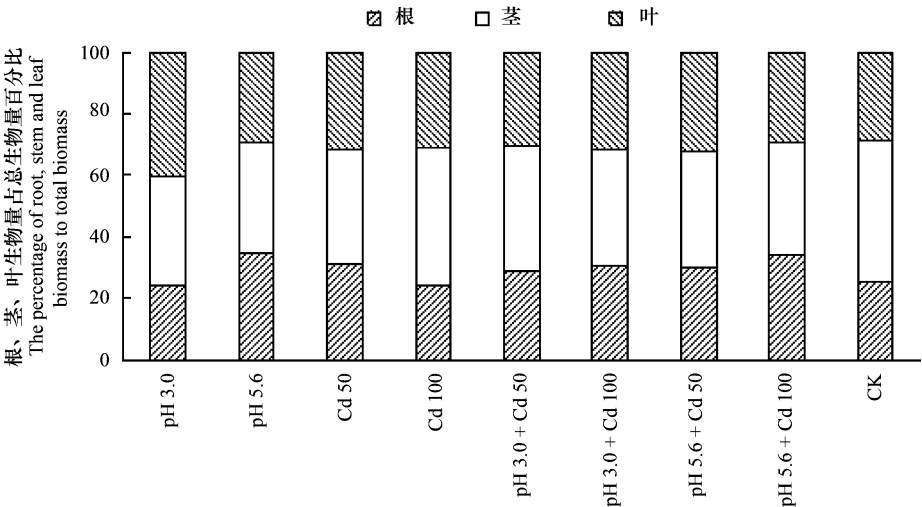


图 1 复合处理下秃瓣杜英生物量分配

Fig.1 The effects of simulated acid rain and Cd on the biomass allocation of *Eleocarpus glabripetalus*

2.2 镉积累

从表 2 可以看出,单独酸雨处理下,植株总的镉含量与对照组无显著差异 ($P>0.05$),但显著降低了叶中的镉含量,特别是 pH 3.0 和 pH 5.6 处理中叶的镉含量与对照组相比分别减少了 64.06% 和 32.81%。随着酸雨强度的增强,植株根、茎、叶及总的镉含量均下降,pH 3.0 条件下最明显。

单独的镉处理必将显著增加植株器官的镉含量的积累,Cd 50 和 Cd 100 总的镉含量分别是对照组的 19.67 倍和 26.33 倍。随着镉浓度的升高,植株根、茎、叶及总的镉含量均显著增加 ($P<0.05$),Cd 100 总的镉含量与 Cd 50 相比增加了 33.86%。

而在复合处理下,与对照组相比,4 种处理方式均显著 ($P<0.05$) 增加了植株根、茎、叶及总的镉含量的积累。pH 3.0+Cd 50、pH 3.0+Cd 100、pH 5.6+Cd 50 和 pH 5.6+Cd 100 总的镉含量分别是对照的 16.80、25.24、22.42 和 16.31 倍。

表 2 酸雨和镉复合处理下秃瓣杜英镉的积累

Table 2 Effects of simulated acid rain and Cd on Cd accumulation in *Eleocarpus glabripetalus*

模拟酸雨 pH 值 Simulated acid rain pH	模拟 Cd 浓度 Simulated Cd concentration/ (mg/kg)	根 Cd 含量 Cd content of root/(mg/kg)	茎 Cd 含量 Cd content of stem/(mg/kg)	叶 Cd 含量 Cd content of leaf/(mg/kg)	总 Cd 含量 Total Cd content/ (mg/kg)
pH 7.0	0	35.24±1.46e	6.37±0.35e	0.64±0.03g	42.25±1.25e
	50	756.18±34.45c	63.93±4.07d	7.03±0.16a	827.14±30.33c
	100	955.79±36.58a	127.18±18.72b	6.67±0.02b	1089.64±65.28a
pH 5.6	0	37.36±4.50e	6.69±0.15e	0.43±0.02h	44.48±2.61e
	50	852.56±38.90b	88.32±1.96c	1.98±0.10f	942.86±38.49b
	100	628.53±1.75d	54.59±4.15d	2.67±0.10d	685.79±6.00d
pH 3.0	0	17.29±0.30e	1.77±0.13e	0.23±0.00i	19.29±0.27e
	50	638.60±42.36d	64.90±2.32d	2.23±0.11e	705.73±39.51d
	100	880.86±14.79b	177.09±6.06a	3.57±0.13c	1061.52±8.70a

2.3 荧光参数

从图 2 可看出,单独酸雨处理下各荧光参数与对照组无显著差异 ($P>0.05$),可见单独酸雨处理对秃瓣杜英 PS II 反应中心并没有显著 ($P>0.05$) 影响。随着酸雨强度的增加,不同处理间的各荧光参数也无显著差异 ($P>0.05$)。

单独镉处理的各荧光参数与对照均没有显著差异 ($P>0.05$),表明单独镉处理对秃瓣杜英 PS II 反应中心没有显著 ($P>0.05$) 影响。随着镉浓度的增加,两种处理间的各荧光参数无显著差异 ($P>0.05$)。

与对照组相比,复合处理未对植株的各荧光参数产生显著性 ($P>0.05$) 影响,说明复合处理对秃瓣杜英 PS II 反应中心没有显著影响 ($P>0.05$)。各复合处理间,pH 5.6+Cd 100 的 F_0 显著 ($P<0.05$) 低于 pH 5.6+Cd 50,而 NPQ 显著 ($P<0.05$) 高于 pH 5.6+Cd 50;pH 5.6+Cd 50 的 qP 值显著 ($P<0.05$) 高于 pH 3.0+Cd 100。

2.4 酸雨强度、镉浓度及交互作用对秃瓣杜英生理参数的影响

从表 3 可以看出,酸雨强度对秃瓣杜英的根生物量,总生物量,根、茎、叶、总镉含量和 NPQ 均有显著 ($P<0.05$) 影响;镉浓度对根、茎、叶、总镉含量和 q_p 有显著 ($P<0.05$) 影响;酸雨强度和镉浓度的交互作用对根、茎、叶、总生物量,根、茎、叶、总镉含量和 F_0 有显著 ($P<0.05$) 影响。

3 讨论

本研究发现,经过短期的酸雨和镉复合处理模拟试验,单独的酸处理显著促进了植株总生物量的积累,具体表现在对根和叶片生物量的提高;发现植株总生物量的提高可能是酸雨中的氮素进入土壤后的施肥效应所导致的。我国亚热带地区的土壤普遍缺氮^[32-33],而氮沉降可在土壤缺氮的条件下,提高土壤的有效氮水平。

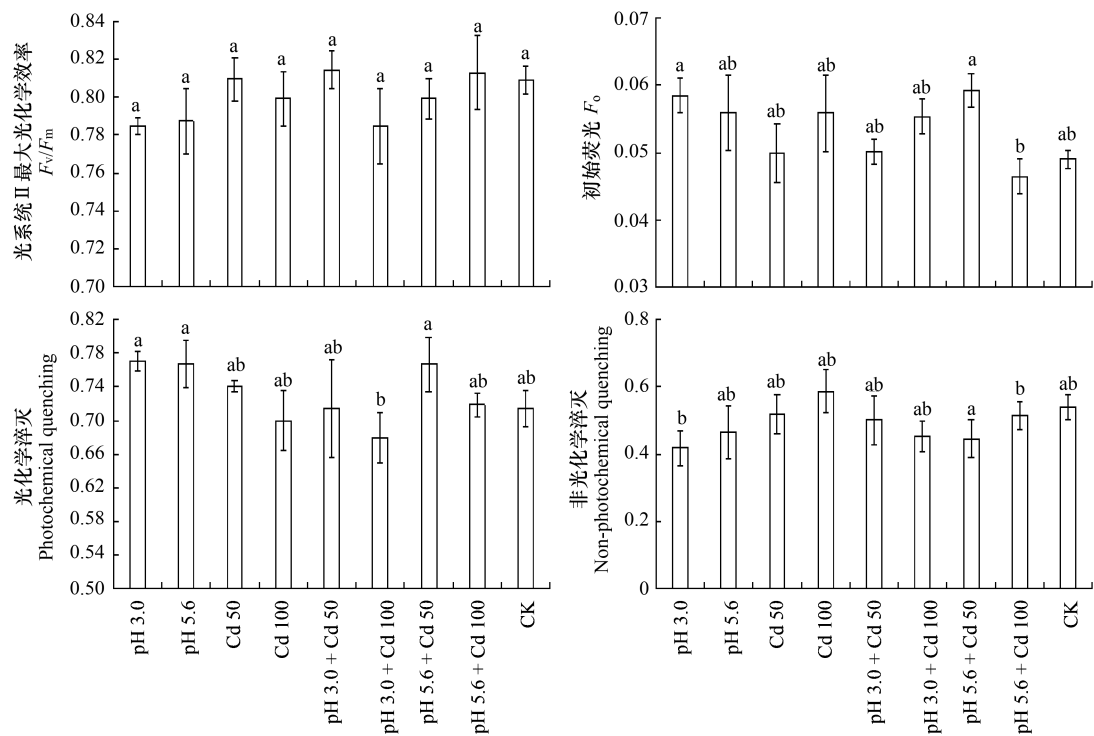


图2 酸雨和 Cd 复合处理对秃瓣杜英荧光参数的影响
Fig.2 Effects of simulated acid rain and Cd on fluorescence parameters in *Eleocharis glabripetalus*

表3 酸雨强度、镉浓度及交互作用对秃瓣杜英生理参数的双因素方差分析

Table 3 Two-way ANOVE for the effects of pH value of simulated acid rain, cadmiun concentration, and their interactions on the physiological parameters of *Eleocharis glabripetalus*

参数 Parameter	酸雨强度 Acid rain intensity		Cd 浓度 Cd concentration		酸雨强度×Cd 浓度 Acid rain intensity × Cd concentration	
	F	P	F	P	F	P
根生物量 Root biomass	29.247 *	0.000 *	2.239	0.153	22.364 *	0.000 *
茎生物量 Stem biomass	0.723	0.507	0.374	0.696	4.021 *	0.030 *
叶生物量 Leaf biomass	2.275	0.149	1.180	0.343	7.163 *	0.004 *
总生物量 Total biomass	16.824 *	0.000 *	3.382	0.072	38.126 *	0.000 *
根冠比 Root-shoot ratio	3.504	0.066	0.580	0.576	1.772	0.205
根生物量占总生物量百分比 The percentage of root biomass to tatal biomass	3.199	0.080	0.325	0.729	1.854	0.189
茎生物量占总生物量百分比 The percentage of stem biomass to tatal biomass	3.308	0.075	0.067	0.935	2.368	0.116
叶生物量占总生物量百分比 The percentage of leaf biomass to tatal biomass	0.706	0.515	0.298	0.748	0.968	0.470
根镉含量 Cd content of root	18.107 *	0.000 *	2047.686 *	0.000 *	59.244 *	0.000 *
茎镉含量 Cd content of stem	31.450 *	0.000 *	428.122 *	0.000 *	64.469 *	0.000 *
叶镉含量 Cd content of leaf	2116.708 *	0.000 *	3406.707 *	0.000 *	496.502 *	0.000 *
总镉含量 Total Cd content	18.630 *	0.000 *	1814.122 *	0.000 *	72.734 *	0.000 *
F_v/F_m	1.525	0.244	2.331	0.126	1.349	0.313
F_0	1.768	0.199	0.696	0.511	8.512 *	0.000 *
NPQ	6.065 *	0.010 *	1.350	0.284	1.201	0.345
q_P	3.243	0.063	7.450 *	0.004 *	1.861	0.161

* 为显著度为 $P<0.05$

此外,氮素的输入所引起的生物量增加在植物体内分布是不均匀的。因为氮素的输入主要引起叶片中氮含量的上升或增加了植物叶片面积及数目,促进了叶片生物量积累^[34-35],与本试验研究结果一致。而相关研究发现在酸雨浓度较低的情况下,低浓度的酸雨对植物的株高、胸径以及叶绿素含量、光合速率、生物量等影响较小甚至有一定的促进作用^[36-40]。Thomas 等^[41]发现在自然条件下,酸沉降在个体水平上促进了 24 种美国常见植物的生物量的积累,与本研究结果相符。

相同或不同物种的不同生态型或同一植株的不同部位对某一金属的积累能力不同^[42-43]。进入秃瓣杜英体内的镉主要富集在根部,其次在茎,最后为叶。陆志强等^[44]也发现镉在白骨壤幼苗中的含量为根>茎>叶>子叶。超积累植物(*Hyperaccumulator*)指可以超量累积某些化学元素的野生植物。理想的重金属超积累植物一般具有以下特征^[45]:(1)可以耐受高水平的重金属;(2)地上部超量积累某种或几种重金属时,不影响植物的正常生长,通常超出普通植物的 100 倍以上,比如超积累植物积累的镉含量可达 100 $\mu\text{g/g}$ (干重)以上。(3)生长迅速;(4)生物量大;(5)根系发达。从秃瓣杜英生长的情况来看,Cd 50 显著促进了总生物量的积累,Cd 100 虽显著降低了植株总生物量的积累,但生物量分配并未受太大影响。秃瓣杜英在长期的进化过程中对胁迫环境有了较强的适应性,镉浓度较低对植株体无直接伤害作用,反而被作为“养分”而吸收。我们可以看出,秃瓣杜英的镉耐受浓度较高,因此 Cd 50 促进了总生物量积累,Cd 100 虽抑制了总生物量积累,但植株通过稳定生物量分配进行自我保护。复合处理均显著增加了植株根、茎、叶及总的镉含量的积累,但植株的生物量积累与对照组并无显著差异。植株通过根部吸收水分和营养,虽然地上部分也能吸收一部分营养,但根部吸收能力大于地上部分,因此植株可能是通过降低根冠比,增强根部吸收能力来自我调节。而 pH 5.6+Cd 100 显著促进了总生物量的积累,其总的镉含量显著低于 Cd 50,表明其在植株承受范围内。张帆等^[46]发现在高浓度的镉处理下,有效氮供应充足,能显著促进一些植株生长及叶绿素含量的增加,与本研究相符。

此外,所有处理的 F_v/F_m 、 F_0 、NPQ 以及 q_p 与对照组无显著差异 ($P>0.05$),表明秃瓣杜英 PS II 反应中心未受到显著影响。pH 5.6+Cd 100 的 F_v/F_m 值达到最高,即 PS II 原初光能转化效率达到最高,且 NPQ 值高于对照,表明该处理对 PS II 反应中心的影响仍处于植物自身调节范围内,可以通过热耗散的形式进行调节,这可能也是其生物量积累达到最高的原因。pH 5.6+Cd 100 的 F_0 显著低于 pH 5.6+Cd 50,而 NPQ 显著高于 pH 5.6+Cd 50,说明 pH 5.6+Cd 100 通过热耗散的手段减少 PS II 反应中心所受的影响,从而使其生物量积累显著高于 pH 5.6+Cd 50。pH 5.6+Cd 50 的 q_p 值显著高于 pH 3.0+Cd 100,表明 pH 5.6+Cd 50 的电子传递活性显著高于 pH 3.0+Cd 100,因此其生物量积累显著高于 pH 3.0+Cd 100。Cd 50 的 F_v/F_m 值和 q_p 值高于对照,说明植株的 PS II 原初电子受体的氧化还原状态较高、PS II 开放中心的数目较多^[22],PS II 具有高的电子传递活性和原初光能转化效率,因此其生物量的积累显著高于对照。 F_v/F_m 值和 q_p 值的降低可能是造成 Cd 100 生物量积累显著下降的原因,但植株通过提高 NPQ 值,把热耗散作为自我保护的一种手段,稳定了生物量的分配,减缓 Cd 100 的伤害作用。

所有处理的荧光参数与对照组相比并无显著差异,是什么造成了植株生长的差异呢?推测可能土壤酸化增大了植株根系细胞膜透性,促进镉向细胞的吸附及跨膜运输,增大胞内镉含量,进而加剧对根系的伤害。此外,镉处理亦能增加植株根系细胞膜透性,抑制 H^+ -ATP 酶活性,增大细胞外 H^+ 输入,降低胞内 H^+ 外排,导致胞质更加酸化,加剧对根系的伤害^[47]。这导致了植株根系有丝分裂受到抑制,阻碍伸长生长,降低生物量和活力^[48]。本实验中,所有处理均使植株根、茎、叶中的镉含量占植株总镉含量的比例发生变化,均提高了根中镉含量所占的比例、降低了叶片中镉含量所占的比例,其中 Cd 50 及 pH 5.6+Cd 100 显著降低了茎中镉含量所占的比例。相关研究发现镉能通过影响植物水分及营养元素的吸收,降低作物光合色素的含量和光合速率,抑制光合产物的输送,降低气孔导度,影响叶绿素酶活性,进而抑制光合作用,最终导致植株矮小,生物量下降^[49-50]。且经双因素方差分析表明,酸雨强度和镉浓度的交互作用对根、茎、叶、总生物量,根、茎、叶、总镉含量和 F_0 有显著 ($P<0.05$) 影响。说明两者之间存在一个“最优组合”,本试验发现 pH 5.6+Cd 100 处理的镉含量积累是复合处理中最低的,且其生物量积累达到最高。以上可能是导致植株生长产生差异的原因。

本实验初步探究了酸雨和镉及其复合环境处理条件下秃瓣杜英的生长、生理的响应特征,但由于实验时间较短,还不能充分量化不同处理的作用效果,未能明确处理之间的相互关系。且相关试验表明,在相同 pH 条件下,自然酸雨比模拟酸雨对植物的伤害更大^[51]。所以需经过进一步长期观测与测量,才能获得其复合处理环境条件下的响应特征。

4 结论

本研究结果显示:经过短期的酸雨和镉复合处理的模拟受控试验,单独的酸雨处理显著增加了植株总生物量的积累,促进了根和叶片生物量的分配,降低了茎干生物量的分配,且显著降低了叶片中的镉含量。随着酸雨强度的增加,植株器官镉含量积累下降,且生物量积累增加。单独镉处理下, Cd 50 显著增加了植株生物量的积累,促进了根和叶片生物量的分配, Cd 100 虽抑制了植株生物量的积累,但生物量分配几乎不受影响。复合处理促进了植株根和叶片生物量的分配,降低茎干生物量分配,且降低了根冠比,其中 pH 5.6+ Cd 100 显著促进了植株生物量的积累,其植株镉含量的积累为复合处理中最低。所有处理均未对植株的 PS II 反应中心产生显著 ($P>0.05$) 影响,镉处理和复合处理显著增加了植株镉含量的积累,镉在植株体内的积累为:根>茎>叶。同时,双因素方差分析表明,酸雨强度和镉浓度的交互作用对根、茎、叶、总生物量,根、茎、叶、总镉含量和 F_0 有显著 ($P<0.05$) 影响。

参考文献 (References):

- [1] Wang Y P, Wang Y, Kai W B, Zhao B, Chen P, Sun L, Ji K, Li Q, Dai S J, Sun Y F, Wang Y D, Pei Y L, Leng P. Transcriptional regulation of abscisic acid signal core components during cucumber seed germination and under Cu^{2+} , Zn^{2+} , NaCl and simulated acid rain stresses. *Plant Physiology and Biochemistry*, 2014, 76(5): 67-76.
- [2] Guo J H, Liu X J, Zhang Y, Shen J L, Han W X, Zhang W F, Christie P, Goulding K W T, Vitousek P M, Zhang F S. Significant acidification in major Chinese croplands. *Science*, 2010, 327(5968): 1008-1010.
- [3] 解淑艳,王瑞斌,郑皓皓. 2005-2011 年全国酸雨状况分析. *环境监控与预警*, 2012, 4(5): 33-37.
- [4] 赵伟,康丽莉,林惠娟,浦静姣,马千里. 临安大气本底站酸雨污染变化特征与影响因素分析. *中国环境监测*, 2012, 28(4): 9-14.
- [5] 马连祥,周定国,徐魁梧. 酸雨对杨树生长和木材化学性质的影响. *林业科学*, 2000, 36(6): 95-99.
- [6] 汪赛,伊力塔,余树全,张超,石晶晶. 模拟酸雨对青冈光合及叶绿素荧光参数的影响. *应用生态学报*, 2014, 25(7): 2183-2192.
- [7] 王利,杨洪强,张召,范伟国,姜倩倩,冉昆. 根区酸化对平邑甜茶叶片光系统 II 活性及光合速率的影响. *林业科学*, 2011, 47(10): 167-171.
- [8] Singh A, Agrawal M. Acid rain and its ecological consequences. *Journal of Environmental Biology*, 2008, 29(1): 15-24.
- [9] Shukla J B, Sundar S, Naresh R. Modeling and analysis of the acid rain formation due to precipitation and its effect on plant species. *Natural Resource Modeling*, 2013, 26(1): 53-65.
- [10] 周建利,陈同斌. 我国城郊菜地土壤和蔬菜重金属污染研究现状与展望. *湖北农学院学报*, 2002, 22(5): 476-480.
- [11] 江解增,许学宏,余云飞,陈庆生,廖启林. 蔬菜对重金属生物富集程度的初步研究. *中国蔬菜*, 2006, 1(7): 8-11.
- [12] 吴彩斌,雷恒毅,宁平. *环境学概论*. 北京:中国环境科学出版社, 2005: 376-378.
- [13] 杨楠楠. 长三角地区土壤重金属的空间分异特征及风险评价研究[D]. 济南:山东师范大学, 2010.
- [14] 杜天庆,杨锦忠,郝建平,苗果园. Cd、Pb、Cr 三元胁迫对小麦幼苗生理生化特性的影响. *生态学报*, 2009, 29(8): 4475-4482.
- [15] 何江华,杜应琼,周晓洪,柳勇,陈俊坚,王少毅,何文彪,李淑仪. Cd 对叶菜生长和产量的影响及其在叶菜体内的积累. *农业环境科学学报*, 2006, 25(3): 597-601.
- [16] 潘秀,刘福春,柴民伟,刘立民,森田茂纪,石福臣. 镉在互花米草中积累、转运及亚细胞的分布. *生态学杂志*, 2012, 31(3): 526-531.
- [17] 周东美,王慎强,陈怀满. 土壤有机污染物-重金属复合污染的交互作用. *土壤与环境*, 2000, 9(2): 143-145.
- [18] 郭朝晖,廖柏寒,黄昌勇. 酸雨中 SO_4^{2-} 、 NO_3^- 、 Ca^{2+} 、 NH_4^+ 对红壤中重金属的影响. *中国环境科学*, 2002, 22(1): 6-10.
- [19] 彭莉,黄亮,李承碑,张成,王定勇. 模拟酸雨作用下紫色土镉复合污染对苕笋的影响. *水土保持学报*, 2006, 20(3): 28-31.
- [20] 司美茹,苏涛,赵云峰. 模拟酸雨与重金属复合胁迫对绞股蓝生长及根际微生物的影响. *生态与农村环境学报*, 2011, 27(2): 69-74.
- [21] 张丽华,朱志良,郑承松,张华,赵建夫. 模拟酸雨对三明地区受重金属污染土壤的淋滤过程研究. *农业环境科学学报*, 2008, 27(1): 151-155.
- [22] 古昌红,单振秀. 模拟酸雨下污染土壤中重金属 Cd、Zn、Cu 的释放特征. *矿业安全与环保*, 2010, 37(6): 13-15, 19-19.

- [23] 殷秀敏, 余树全, 江洪, 刘美华. 酸雨胁迫对秃瓣杜英幼苗叶片叶绿素荧光特性和生长的影响. 应用生态学报, 2010, 21(6): 1374-1380.
- [24] Liu M H, Yi L T, Yu S Q, Yu F, Yin X M. Chlorophyll fluorescence characteristics and the growth response of *Elaeocarpus glabripetalus* to simulated acid rain. Photosynthetica, 2015, 53(1): 23-28.
- [25] 俞飞, 宋琦, 刘美华, 董莲春, 伊力塔. 模拟酸雨不同处理对秃瓣杜英幼苗生物量和生理的影响. 林业科学, 2016, 52(5): 92-100.
- [26] 吐尔逊·吐尔洪, 再吐尼古丽·库尔班, 叶凯. 重金属 Cd 和 Pb 在甜高粱幼苗体内的积累特性研究. 中国农学通报, 2013, 29(3): 80-85.
- [27] 殷恒霞, 李霞, 米琴, 王文颖, 张文胜, 徐进. 镉、锌、铜胁迫对向日葵早期幼苗生长的影响. 植物遗传资源学报, 2009, 10(2): 290-294, 299-299.
- [28] 黄月华, 付芝红, 余舒舒, 江剑侑, 胡跃. 重金属 Cd 对香蕉幼苗生理生化指标的影响. 安徽农业科学, 2011, 39(5): 2742-2744.
- [29] 李佳, 江洪, 余树全, 蒋馥蔚, 殷秀敏, 鲁美娟. 模拟酸雨胁迫对青冈幼苗光合特性和叶绿素荧光参数的影响. 应用生态学报, 2009, 20(9): 2092-2096.
- [30] 顾翠花, 王懿祥, 白尚斌, 吴建强, 杨一. 四种园林植物对土壤镉污染的耐受性. 生态学报, 2015, 35(8): 2536-2544.
- [31] 李龙, 高晓阳, 陈艾亨, 武国华. 微波消解-电感耦合等离子体质谱法测定麻黄中的铜、锰、锌、镍. 质谱学报, 2013, 34(3): 157-162.
- [32] LeBauer D S, Treseder K K. Nitrogen limitation of net primary productivity in terrestrial ecosystems is globally distributed. Ecology, 2008, 89(2): 371-379.
- [33] 路翔, 项文化, 刘聪. 中亚热带 4 种森林类型土壤有机碳氮贮量及分布特征. 水土保持学报, 2012, 26(3): 169-173.
- [34] Magill A H, Aber J D, Hendricks J J, Bowden R D, Melillo J M, Steudler P A. Biogeochemical response of forest ecosystems to simulated chronic nitrogen deposition. Ecological Applications, 1997, 7(2): 402-415.
- [35] Knops J M, Reinhart K. Specific leaf area along a nitrogen fertilization gradient. The American Midland Naturalist, 2000, 144(2): 265-272.
- [36] 鲁美娟, 江洪, 李巍, 余树全, 曾波, 蒋馥蔚, 李佳, 金清. 模拟酸雨对刨花楠幼苗生长和光合生理的影响. 生态学报, 2009, 29(11): 5986-5994.
- [37] 金清, 江洪, 余树全, 金静, 王艳红. 酸雨胁迫对亚热带典型树种幼苗生长与光合作用的影响. 生态学报, 2009, 29(6): 3322-3327.
- [38] 王玉魁, 郭慧媛, 阎艳霞, 张汝民, 高岩, 温国胜. 酸雨胁迫对毛竹叶片光合速率和叶绿素荧光参数的影响. 生态环境学报, 2015, 24(9): 1425-1433.
- [39] 金清, 江洪, 余树全, 殷秀敏. 酸雨胁迫对苦槠幼苗气体交换与叶绿素荧光的影响. 植物生态学报, 2010, 34(9): 1117-1124.
- [40] 樊后保, 臧润国, Waki K. 女贞种子和幼苗对模拟酸雨的反应. 林业科学, 2000, 36(6): 90-94.
- [41] Thomas R Q, Canham C D, Weathers K C, Goodale C L. Increased tree carbon storage in response to nitrogen deposition in the US. Nature Geoscience, 2010, 3(1): 13-17.
- [42] Osters A H, Ekvall L, Greger M. Sensitivity to, and accumulation of, cadmium in *Betula pendula*, *Picea abies*, and *Pinus sylvestris* seedlings from different regions in Sweden. Canadian Journal of Botany, 2000, 78(11): 1440-1449.
- [43] Prasad M N V. Heavy Metal Stress in Plants; From Biomolecules to Ecosystems. 2nd ed. Berlin Heidelberg: Springer, 2004.
- [44] 陆志强, 陈昌徐, 马丽, 郑文教. 镉胁迫对白骨壤幼苗钾钠镁吸收与分配的影响. 应用生态学报, 2015, 26(5): 1313-1319.
- [45] 杜群. 环境法融合论: 环境·资源·生态法律保护一体化. 北京: 科学出版社, 2003: 27-240.
- [46] 张帆, 万雪琴, 翟晶. 镉处理下增施氮对杨树叶绿素合成和叶绿体超微结构的影响. 核农学报, 2014, 28(3): 485-491.
- [47] 王丽红, 孙飞, 陈春梅, 王园园, 刘一帅, 周青. 酸化土壤铝和镉对水稻幼苗根系生长的复合影响. 农业环境科学学报, 2013, 32(12): 2511-2512.
- [48] 王学华, 戴力. 作物根系镉滞留作用及其生理生化机制. 中国农业科学, 2016, 49(22): 4323-4341.
- [49] 葛才林, 骆剑峰, 刘冲, 殷朝珍, 王泽港, 马飞, 罗时石. 重金属对水稻光合作用和同化物输配的影响. 核农学报, 2005, 19(3): 214-218.
- [50] 王琴儿, 曾英, 李丽美. 镉毒害对水稻生理生态效应的研究进展. 北方水稻, 2007, (4): 12-16.
- [51] 单运峰, 冯宗炜. 模拟酸雨对马尾松和杉木幼树的影响. 环境科学学报, 1988, 8(3): 307-315.