

毛晓瑜, 楼艳笑, 戴超, 俞飞, 梁君瑛, 吕志强. 镉和酸雨对不同性别桑树幼苗光合生理的影响[J]. 应用与环境生物学报, 2020, 26 (1): 117-124
Mao XY, Lou YX, Dai C, Yu F, Liang JY, Lü ZQ. Effects of cadmium pollution and acid rain on photosynthetic characteristics of *Morus alba* seedling sexes [J]. *Chin J Appl Environ Biol*, 2020, 26 (1): 117-124

镉和酸雨对不同性别桑树幼苗光合生理的影响

毛晓瑜¹ 楼艳笑¹ 戴超¹ 俞飞¹✉ 梁君瑛² 吕志强³

¹浙江农林大学林业与生物技术学院 临安 311300

²浙江省航空护林管理站 杭州 310000

³浙江省农业科学院蚕桑研究所 杭州 310000

摘要 土壤镉(Cd)污染和酸沉降(AR)是当今全球性的环境问题,而雌雄异株植物对逆境胁迫的异性性别响应也是植物逆境生理生态研究的重要内容。为探讨桑树雌株、雄株和雌雄同株幼苗对土壤Cd污染和酸沉降的性别响应差异,以盆栽模拟法研究Cd(50 mg/kg)、AR(pH 3.0)及两者复合处理对不同性别桑树幼苗生物量积累与分配、光合荧光特性的影响。结果表明:(1)Cd处理显著降低了3种性别桑树幼苗的总生物量积累和光合速率,且存在性别差异,与对照相比,雄株总生物量仅下降了23.54%,而雌株和雌雄同株下降幅度分别为对照的29.43%和36.38%;雌株光合速率下降程度也低于雌株和雌雄同株。(2)Cd处理改变了桑树的生物量分配,雌株以减少茎生物量为主,与对照相比,雌株茎生物量降低了37.45%,但根、叶生物量仅降低了7.72%和9.71%;而雄株和雌雄同株以减少根、茎生物量为主,叶生物量仅降低了9.17%和5.28%。(3)3种性别桑树幼苗光合速率的下降是气孔导度和PSII实际光量子产量下降导致的,与对照相比,Cd处理与复合处理下,雌株气孔导度降低了47.39%和57.82%,PSII实际光量子产量降低了21.59%和18.49%;雌雄同株气孔导度下降了46.57%和58.88%;PSII实际光量子产量降低了26.63%和19.81%;而雄株气孔导度和PSII实际光量子产量下降程度均低于雌株和雌雄同株。(4)AR的加入导致了Cd胁迫下,雌株和雌雄同株叶生物量积累和光合速率的进一步下降,但是对雄株影响不大。由此可见,Cd通过降低光合能力抑制了3种性别桑树幼苗的生物量积累,对雄株的影响小于雌株和雌雄同株,而光合能力的下降是由气孔和非气孔因素共同作用引起的。(图3 表3 参39)

关键词 镉污染; 酸沉降; 雌雄异株; 生物量; 光合作用; 叶绿素荧光

Effects of cadmium pollution and acid rain on photosynthetic characteristics of *Morus alba* seedling sexes

MAO Xiaoyu¹, LOU Yanxiao¹, DAI Chao¹, YU Fei¹✉, LIANG Junying² & LÜ Zhiqiang³

¹College of Forestry and Biotechnology, Zhejiang A&F University, Hangzhou 311300, China

²Zhejiang Aerial Forest Fire Protection Station, Hangzhou 310000, China

³Institute of Sericulture, Zhejiang Academy of Agricultural Sciences, Hangzhou 310000, China

Abstract Cadmium (Cd) contamination in the soil and acid deposition are now global environmental problems. Differential sex responses of dioecious species to stress is also an important part of plant stress ecological research. To investigate the physiological characteristics of *Morus alba* seedling sexes when exposed to Cd and acid rain, we measured growth parameters, photosynthetic capacity, and chlorophyll fluorescence of Qiangsang1 (female), Nongsang14 (male), and Nongsang12 (monoecism) under Cd stress (Cd, 50 mg/kg), acid rain (AR, pH 3.0), and their combination (Cd + AR). Results indicate that under Cd stress, biomass and net photosynthetic rate (P_n) decreased in each sex when compared with the controls. Compared with the control, the total biomass of the males and females decreased by 23.54% and 29.43% respectively, and that of monoecious individuals decreased by 36.38%. Females and monoecious individuals exhibited greater declines in photosynthetic rate than did males. Additionally, Cd treatment changed the biomass distribution of *M. alba* seedlings, with females mainly showing reduced stem biomass while males and monoecious individuals principally showing reduced root and stem biomass. Compared with the control, the stem biomass of females decreased by 37.45%, but the root and leaf biomass decreased by 7.72% and 9.71%. For males and monoecious individuals, leaf biomass decreased by 9.17% and 5.28%, respectively. The decreases in P_n in three genders of *M. alba* seedlings were caused by declines in stomatal conductance (g_s) and the effective quantum yield of PS II (Φ_{PSII}). Under Cd treatment and the compound treatment, the g_s of females decreased by 47.39% and 57.82%, and Φ_{PSII} decreased

收稿日期 Received: 2019-03-28 接受日期 Accepted: 2019-06-02

浙江省自然科学基金项目(LQ17C160004)资助 Supported by the Zhejiang Provincial Natural Science Foundation of China (LQ17C160004)

✉通讯作者 Corresponding author (E-mail: 205yufei@163.com)

by 21.59% and 18.49%, respectively. The g_s of monoecious individuals decreased by 46.57% and 58.88% and Φ_{PSII} also decreased by 26.63% and 19.81% when compared with the control. When compared with effects of Cd treatment, decreases in leaf biomass and P_n in females and monoecious individuals were intensified by acid rain, but this pattern did not hold true for males. Therefore, our results indicated that Cd inhibited biomass accumulation in *M. alba* seedlings by reducing photosynthetic capacity, and the effect of Cd on males was less than that on females and monoecious individuals. Furthermore, the decline in photosynthetic capacity is caused by both stomatal and non-stomatal factors.

Keywords cadmium pollution; acid deposition; dioecious; biomass; photosynthesis; chlorophyll fluorescence

雌雄异株占被子植物的4%-10%，在自然生态系统和农林业生产中占据了重要的地位^[1]。大量研究结果发现，雌雄异株植物不仅在生殖方面存在差异，在逆境胁迫应答方面也存在性别差异。一些研究发现，在逆境胁迫条件下，不少植物的雌株对紫外线、重金属、干旱、盐等胁迫环境的耐受性要高于雄株^[2-4]。大部分的研究者认为这是雌株比雄株具有更高的生殖投入造成的，因为雌株不仅生产花朵，还生产种子和果实^[5-6]。在资源有限的条件下，植物营养生长、防御反应和生殖生长之间的投入是相互竞争的，分配给某个过程的能量增加会导致分配给另一个过程的能量减少，因此，雌株对生殖生长的高投入会导致其对逆境耐受性的下降^[7]。但是也有一些研究发现某些植物的雌株对逆境的耐受性高于雄株，因为雌株可以通过一些途径提高自己的抗逆性，例如与菌根共生吸收更多的矿物质等^[7]。当然还有一些研究发现雌雄异株植物对逆境并未表现性别响应差异^[7]。由此可见，雌雄异株植物对逆境胁迫的应答机制是非常复杂的。在自然界中，有些物种既有雌雄异株个体，又有雌雄同株个体，例如桑树，具有雌、雄和雌雄同株3种不同的性别。这一类植物的雌雄异株个体和雌雄同株个体在遭受逆境胁迫时，是否会具有性别相关的适应差异呢？目前几乎未见报道。

镉(Cd)污染和酸沉降是当前全球性的环境问题。中国是受土壤Cd污染和酸沉降影响严重区域，部分地区的土壤Cd含量达到了13.43 mg/kg^[8]，长期受污水灌溉的地区土壤Cd含量甚至达到了200 mg/kg^[9]；而部分地区酸沉降高达6.70 kmol_h⁻² a⁻¹^[10]，试验地临安酸雨均值低至pH 4.0，且硝酸根离子对降水酸度的贡献率逐年增大^[11]，因此在模拟酸雨母液配置时需综合考虑计算浓硫酸与浓硝酸的配比。Cd可通过影响植物光合作用、呼吸作用、水分吸收、代谢酶活性等抑制植物生长^[12]，在前人的研究中，当土壤Cd含量为100 mg/kg时，显著抑制了植株光合能力以及生物量积累^[13]。另外，已有的研究总结指出，pH 3.5为酸雨对植物叶片生长造成急性伤害的阈值^[14-15]，当模拟酸雨处理的pH值低于3.5时，就会显著抑制植物叶片生长，破坏细胞膜结构，降低光合速率等，而当模拟酸雨处理的pH值高于3.5时，植物生长并不会受到显著影响，pH值达到5.0时甚至会促进植物生长^[16-17]；同时，酸沉降还会影响土壤中Cd的化学性质及其活性，激活并增加Cd对植物的毒害作用，降低植物对Cd的耐受性^[18]。因此，本研究模拟土壤Cd污染和酸沉降复合条件下桑树的生物量积累以及光合荧光特性，探讨雌雄同株和雌雄异株桑树对逆境胁迫的响应特征。

1 材料与方法

1.1 试验地概况

试验地位于浙江省浙江农林大学东湖校区基地大棚

(119°44' E, 30°16' N)，属中亚热带季风气候区^[19]。试验地四季分明，月均最低气温出现在冬季，为4.1℃，月均最高气温出现在夏季，为29.1℃；同时，试验地雨量充沛，年降水日可达到158 d，年降水量为1 628.6 mm；另外，试验地光照充足，年日照总时长可达到1 825.7 h，这为夏季植物光合试验提供了有利条件；试验所用土壤为当地红黄壤^[19-22]。

1.2 试验材料与试验设计

桑树(*Morus alba* L.)为桑科桑属落叶乔木或灌木，适应性强，我国东北至西南各省区、西北直至新疆均有栽培。桑树一直是家蚕(*Bombyx mori*)饲料，因为具有生长快速，成活率高，较高的重金属吸附能力，近年来在荒漠化治理、盐碱地治理、土壤重金属污染地区治理与修复等领域的功能都在被逐渐发掘，兼具经济和生态价值^[23-24]，而且，桑树兼具雌雄异株个体和雌雄同株个体，强桑1号、农桑14号、农桑12号分别为雌株、雄株、雌雄同株，且强桑1号仅有雌株，农桑14号仅有雄株，农桑12号仅有雌雄同株，3者均不存在另外两种性别植株，因此本试验选取上述材料作为研究不同性别桑树环境响应差异的试验材料。

试验用桑树扦插条于春季剪取自浙江省农业科学院蚕桑研究所，品种为强桑1号(雌株)，农桑14号(雄株)，农桑12号(雌雄同株)。选取长短、粗细均较为接近的无病虫害桑树枝条，浸泡生根粉8 h后进行扦插，育苗期间保持日常通风、浇水养护。选择直径26 cm，高40 cm的塑料花盆，每盆称取9 kg土壤，待扦插条于基质中生根后，将其移栽至花盆中，每盆1株，对每盆桑树进行编号并挂牌以区分，置于塑料大棚内，仅进行拔草、浇水、松土等日常养护。缓苗两个月后从3种性别桑树幼苗中分别挑选80株健康且长势一致的盆栽苗，各性别随机分成4组，每组20株，进行Cd污染与模拟酸雨试验。土壤为当地红黄壤，养分和Cd背景值分别为：土壤pH为5.18，速效K质量分数71.0 mg/kg，速效N质量分数57.3 mg/kg，速效P质量分数2.91 mg/kg，Cd质量分数0.004 mg/kg。

试验共设置4个处理，分别为Cd处理(50 mg/kg: Cd)，AR处理(pH 3.0: AR)，Cd和AR复合处理(50 mg/kg Cd + pH 3.0: Cd + AR)，对照处理(CK)。

Cd处理采用模拟Cd污染土壤培养法。于扦插缓苗共计3个月后，根据每盆9 kg土壤重量，计算需要加入的Cd元素总含量，在一个月中分6次，将CdCl₂·2.5H₂O配制成水溶液后，利用量杯均匀浇至花盆中，期间测量土壤Cd含量，使其达到约50 mg/kg干土。

模拟酸雨溶液利用质量分数98%的浓H₂SO₄与质量分数68%的浓HNO₃进行配制，考虑到近几年酸雨中NO₃⁻浓度不断增加^[11]，因此配置母液时浓H₂SO₄与浓HNO₃的体积比定为1:1。模拟酸雨处理采用现配现淋的方式，即根据试验地近10

年平均降水量计算后,用蒸馏水稀释为pH 3.0的水溶液,于扦插缓苗共计3个月后,喷淋于试验植株^[19, 25],等量蒸馏水(pH 7.0)喷淋作为对照处理,每周两次,每次均为300 mL.模拟Cd污染与AR处理3个月后,进行各指标测定,指标测定期间仍进行每周两次浇酸处理,直至试验结束.

1.3 测定方法

生物量测定: 试验完成后,收获全部试验桑树,剪除扦插母条,将根、茎、叶分别用自来水冲洗表面附着的尘土后,用蒸馏水作最后冲洗.随后置于烘箱中杀青,时间5 min,温度设置为105 °C,再在烘箱中烘干,温度设置为60 °C,直至恒重(于烘干48 h后,间隔3 h连续称重,使两次干重差低于0.3 mg).最后测定各器官干重,并计算总干重.

气体交换参数测定: 选择晴朗的天气,于08:00-11:30进行气体交换测定.每组分别随机选择3株桑树幼苗,指定东南侧朝向的第4片成熟叶片为测定对象,并标记.仪器为便携式光合作用测定系统(LI-6400XT, LI-COR, USA).测定时主要参数设置如下:叶室温度25 °C,相对湿度60%,流量500 $\mu\text{mol/s}$ ^[19].测定指标如下:净光合速率(net photosynthetic rate, P_n)、气孔导度(stomatal conductance, g_s)、蒸腾速率(transpiration rate, E).

叶绿素荧光参数测定: 同期,选取气体交换测定时标记的叶片,利用调制叶绿素荧光成像系统(IMAGINGPAM, WALZ, GERMANY)进行叶绿素荧光参数测定.测试前设置活化光为7,测量光为2,且先利用叶夹使叶片暗适应20 min^[26].测定初始荧光(minimal fluorescence, F_0)、最大荧光(maximal fluorescence, F_m),从而计算得到PSII最大光化学量子产量(maximum photochemical efficiency of PSII, F_v/F_m)、PSII实际光合量子产量(effective quantum yield of PSII, Φ_{PSII})、光化学淬灭系数(photochemical quenching, q_p)以及非光化学淬灭系数(non-photochemical quenching,

q_N)^[19].

1.4 数据处理

使用SPSS 22软件对以上各指标进行一元方差分析(ANOVA)比较平均数间的差异,平均数间的多重比较采用LSD检验($P < 0.05$),必要时进行数据的对数转换;Cd处理、AR处理、性别对桑树幼苗的效应及其中两者或三者之间的交互作用采用多因素方差分析进行处理($P < 0.05$);使用Excel 2013绘制图表.

2 结果与分析

2.1 Cd和酸雨处理对幼苗生物量积累和分配的影响

Cd处理显著降低了3种性别桑树幼苗的总生物量积累(图1),雌株、雄株和雌雄同株的总生物量积累比各自对照分别降低了29.43%, 23.54%和36.38%,可见Cd对雌雄同株生物量积累的抑制最用最大.而且Cd处理对不同性别桑树生物量分配的影响不同. Cd处理下,雌株茎生物量显著下降,但是根和叶生物量变化不大,与对照相比,雌株根、茎和叶生物量分别减少了7.72%、37.45%和9.71%;显著降低了雄株和雌雄同株根、茎生物量,对叶生物量影响不大,雄株根、茎和叶生物量分别比对照降低了39.40%、20.53%和9.17%,雌雄同株根、茎和叶生物量分别比对照降低了33.91%、41.94%和5.28%. AR处理亦显著抑制了3种性别桑树生物量的积累,雌株、雄株和雌雄同株的总生物量积累分别比对照分别降低了17.39%, 15.01%和19.40%.复合处理的作用与Cd处理的作用基本一致,显著抑制了桑树的生物量积累,雌株、雄株和雌雄同株的总生物量积累比各自对照分别降低了36.23%, 26.05%和43.46%,而且雌雄同株的叶生物量积累比对照降低了14.62%.

由图1还可知,同种性别不同处理的生物量表现为:雌株

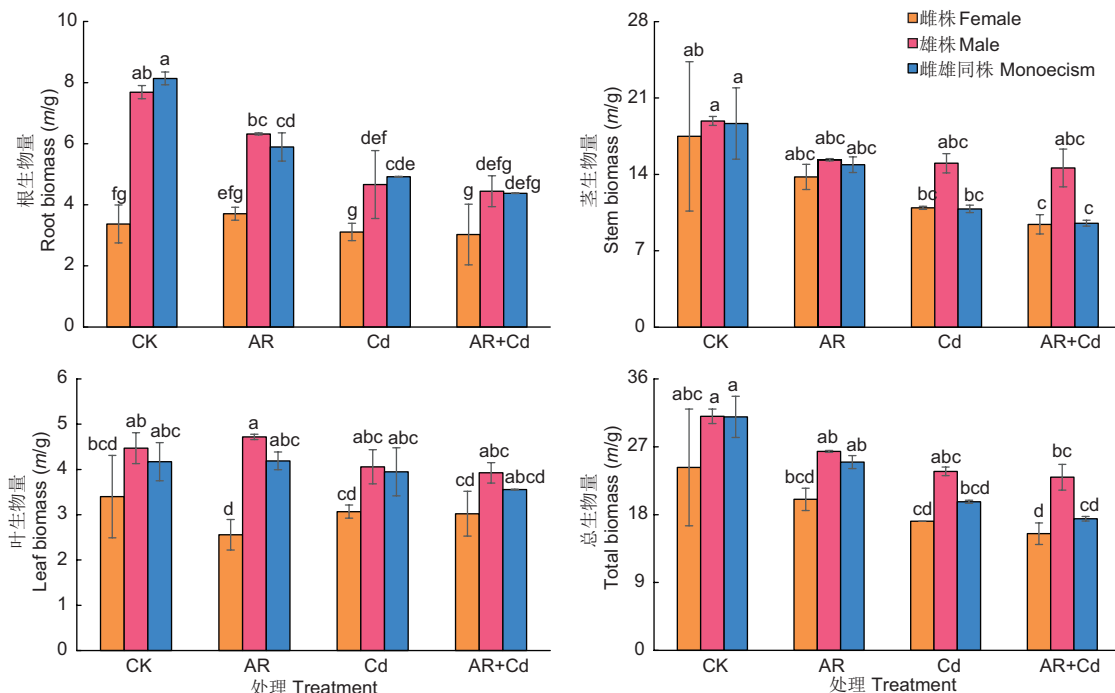


图1 Cd和AR复合处理对桑树幼苗生物量积累的影响(平均值±标准误). CK: 对照处理; AR: 酸雨处理; Cd: 镉处理; Cd + AR: 复合处理. 不同字母表示不同处理组间存在显著差异($P < 0.05$).

Fig. 1 Effect of Cd²⁺ and acid rain on the biomass accumulation in *Morus alba* seedlings (mean ± SE). CK: Control check; AR: Acid rain treatment; Cd: Cadmium treatment; AR + Cd: Compound treatment. Different letters indicate significant difference ($P < 0.05$) according to LSD test.

根、叶生物量均不存在显著差异,茎生物量以及总生物量也仅有对照组与复合处理组之间表现出了显著差异;雄株茎、叶生物量均不存在显著差异,Cd处理以及复合处理下,雄株根生物量积累显著低于对照与AR处理;雌雄同株叶生物量均不存在显著差异,但Cd处理以及复合处理下的根、茎、总生物量积累均显著低于对照。

由表1可知,Cd处理对桑树幼苗根、茎、总生物量积累的影响极显著,对叶生物量积累影响不显著;AR处理对根、总生物量积累影响显著,但对茎、叶生物量积累影响不显著;性别影响除了茎生物量积累方面以外均极显著。Cd与性别交互作用对根生物量影响显著,对其他器官没有显著影响;Cd与AR、AR与性别交互作用对各器官生物量影响并不显著;Cd、AR与性别三者交互作用对各器官生物量影响也不显著。

表1 Cd、AR、性别及三者交互作用对桑树幼苗生物量积累的影响
Table 1 Cd, AR, sex and their interactive effect on the biomass accumulation in *Morus alba* seedlings

处理 Treatment	根生物量 Root biomass (m/g)	茎生物量 Stem biomass (m/g)	叶生物量 Leaf biomass (m/g)	总生物量 Total biomass (m/g)
F_{Cd}	**	**	ns	**
F_{AR}	*	ns	ns	*
F_S	**	ns	**	**
$F_{Cd \times AR}$	ns	ns	ns	ns
$F_{Cd \times S}$	*	ns	ns	ns
$F_{AR \times S}$	ns	ns	ns	ns
$F_{Cd \times AR \times S}$	ns	ns	ns	ns

F_{Cd} : Cd效应; F_{AR} : 酸沉降效应; F_S : 性别效应; $F_{Cd \times AR}$: Cd与AR的交互效应; $F_{Cd \times S}$: Cd与性别的交互效应; $F_{AR \times S}$: AR与性别的交互效应; $F_{Cd \times AR \times S}$: Cd、AR和性别三者的交互效应。

F_{Cd} : Cd effect; F_{AR} : AR deposition effect; F_S : Sex effect; $F_{Cd \times AR}$: Interactive effect of Cd and AR; $F_{Cd \times S}$: Interactive effect of Cd and sex; $F_{AR \times S}$: Interactive effect of N and sex; $F_{Cd \times AR \times S}$: Interactive effect of Cd, AR and sex.

ns: $P > 0.05$; *: $0.01 \leq P < 0.05$; **: $P < 0.01$.

2.2 Cd和酸雨处理对气体交换的影响

Cd处理显著降低了3种性别桑树幼苗的 P_n 、 g_s 、 E (图2)。其中雌株、雄株和雌雄同株的 P_n 分别比各自对照降低了34.01%、27.33%和36.69%,这与对生物量积累的影响一致;雌株、雄株和雌雄同株的 g_s 和 E 分别比各自对照降低了47.39%、40.37%、46.57%和54.42%、48.99%、37.78%。AR处理显著降低了雌株和雌雄同株的 P_n ,但对雄株没有影响。复合处理也显著降低了3种性别桑树幼苗的 P_n 、 g_s 、 E 。其中雌株、雄株和雌雄同株的 P_n 分别比各自对照降低了41.34%、27.81%和43.39%;雌株、雄株和雌雄同株的 g_s 和 E 分别比各自对照降低了57.82%、36.73%、58.88%和42.33%、48.10%、54.04%。可见复合处理对雌株和雌雄同株 P_n 的抑制作用小于Cd处理,但对雄株的影响不大。各处理对3种性别桑树幼苗胞间二氧化碳浓度的影响均不显著。

同时,由图2可知,AR处理、Cd处理以及复合处理下,雌株 P_n 、 g_s 、 E 均与对照组存在显著差异,AR处理时的 P_n 与复合处理时的 P_n 之间也存在显著差异;对照组与AR处理下,雄株 P_n 不存在显著差异,但前两种处理下的 P_n 值均与Cd处理以及复合处理间存在显著差异,Cd处理与复合处理下,植株叶片 g_s 、 E 均显著低于对照;AR处理、Cd处理以及复合处理下,雌雄同株 P_n 、 g_s 、 E 均显著低于对照组,但这3种处理之间不存在显著差异。

由表2可知,Cd处理和AR处理均对桑树幼苗 P_n 、 g_s 、 E 的

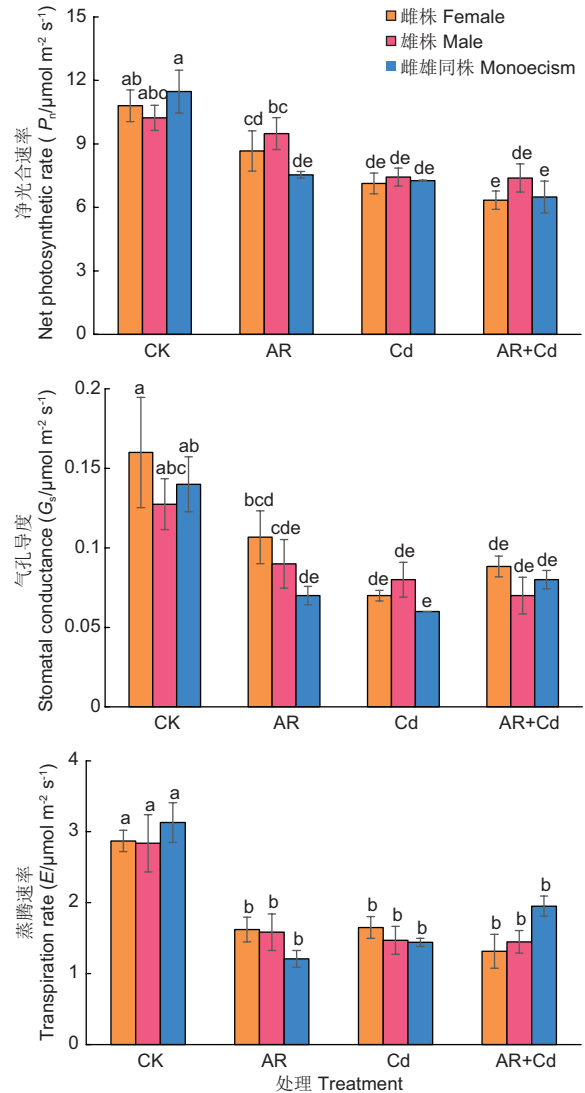


图2 Cd和AR复合处理对桑树幼苗气体交换的影响(平均值±标准误)。CK: 对照处理; AR: 酸雨处理; Cd: 镉处理; Cd + AR: 复合处理。不同字母表示不同处理组间存在显著差异($P < 0.05$)。

Fig. 2 Effect of Cd²⁺ and acid rain on the gas exchange in *Morus alba* seedlings (mean ± SE). CK: Control check; AR: Acid rain treatment; Cd: Cadmium treatment; AR + Cd: Compound treatment. Different letters indicate significant difference ($P < 0.05$) according to LSD test.

影响极显著;而性别对各气体交换参数影响不显著。Cd与性别交互作用对根生物量影响显著,对其他器官没有显著影响;Cd与AR交互作用对 P_n 影响显著,对 g_s 、 E 影响极显著;Cd与性别、AR与性别交互作用对各气体交换参数影响并不显著;Cd、AR与性别三者交互作用对各气体交换参数影响也不显著。

2.3 Cd和酸雨处理对叶绿素荧光参数特性的影响

Cd处理对3种性别桑树幼苗的 F_v/F_m 和 q_p 的影响均不显著,但是显著降低了 Φ_{PSII} ,升高了 q_N (图3)。其中雌株、雄株和雌雄同株的 Φ_{PSII} 比各自对照分别降低了21.59%、18.51%和26.63%, q_N 比各自对照分别升高了22.80%、16.28%和24.67%。AR处理对3种性别桑树幼苗的叶绿素荧光参数影响均不显著。复合处理对3种性别桑树幼苗的 F_v/F_m 和 q_p 的影响均不显著,但是显著抑制了 Φ_{PSII} 值,雌株、雄株和雌雄同株的 Φ_{PSII} 比各自对照分别降低18.49%、14.01%和19.81%。复合作用还显著提高了雌株和雌雄同株的 q_N ,但是对雄株的 q_N 没有显著影响。

表2 Cd、AR、性别及三者交互作用对桑树幼苗气体交换的影响
Table 2 Cd, AR, sex, and their interactive effect on the gas exchange in *Morus alba* seedlings

处理 Treatment	净光合速率 Net photosynthetic rate ($P_n/\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-2}$)	气孔导度 Stomatal conductance ($g_s/\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$)	蒸腾速率 Transpiration rate ($E/\text{mmol m}^{-2} \text{s}^{-1}$)
F_{Cd}	**	**	**
F_{AR}	**	**	**
F_S	ns	ns	ns
$F_{Cd \times AR}$	*	**	**
$F_{Cd \times S}$	ns	ns	ns
$F_{AR \times S}$	ns	ns	ns
$F_{Cd \times AR \times S}$	ns	ns	ns

F_{Cd} : Cd效应; F_{AR} : 酸沉降效应; F_S : 性别效应; $F_{Cd \times AR}$: Cd与AR的交互效应; $F_{Cd \times S}$: Cd与性别的交互效应; $F_{AR \times S}$: AR与性别的交互效应; $F_{Cd \times AR \times S}$: Cd、AR和性别三者的交互效应。
 F_{Cd} : Cd effect; F_{AR} : AR deposition effect; F_S : Sex effect; $F_{Cd \times AR}$: Interactive effect of Cd and AR; $F_{Cd \times S}$: Interactive effect of Cd and sex; $F_{AR \times S}$: Interactive effect of N and sex; $F_{Cd \times AR \times S}$: Interactive effect of Cd, AR and sex.
 ns: $P > 0.05$; *: $0.01 \leq P < 0.05$; **: $P < 0.01$.

由图3可知, 同种性别4种不同处理的叶绿素荧光特性为: 雌株 F_v/F_m 不存在显著差异, 对照和AR处理下, Φ_{PSII} 、 q_p 显著高于Cd处理, 而 q_N 显著低于Cd处理; 雄株 F_v/F_m 没有显著差异, Cd处理下, q_p 低于AR处理, q_N 显著高于其余3种处理; 雌雄同株 F_v/F_m 也不存在显著差异, 对照和AR处理下, Φ_{PSII} 、 q_p 显著高于Cd处理, 而 q_N 显著低于Cd处理。

由表3可知, Cd处理对桑树幼苗叶片 F_v/F_m 影响不显著, 对 Φ_{PSII} 、 q_p 、 q_N 影响极显著; AR处理对叶绿素荧光各参数影响均不显著; 性别对 q_p 、 q_N 影响极显著, 但对 F_v/F_m 和 Φ_{PSII} 没有显著影响。Cd与AR交互作用对 F_v/F_m 和 Φ_{PSII} 影响显著, 但对 q_p 、 q_N 没有显著影响。Cd与性别交互作用对 q_N 影响极显著, 但对其

他叶绿素荧光参数没有显著影响; AR与性别以及Cd、AR与性别三者交互作用交互作用对叶绿素荧光参数影响均不显著。

3 讨论

雌雄异株植物对环境胁迫的差异化响应是在长期进化过程中产生的, 属于性别次级二态性的内容之一^[7]。Cd是植物的非必需元素, 当在植物体内到达一定含量时会危害植物的正常生长。Cd会导致植物根系变得又短又粗, 且活力下降, 从而影响作物水分和营养元素的吸收, 同时降低作物光合速率, 抑制光合产物的输送, 最终导致植株矮小, 生物量下降^[12]。而酸雨会导致土壤中重金属形态向活性态转化, 提高重金属的植物可吸收利用性^[12]。

Cd会破坏光合机构, 降低植物的光合能力^[27]。本试验发现, Cd处理显著降低了3种性别桑树幼苗的净光合速率, 酸雨的加入增加了Cd对雌株和雌雄同株净光合速率的抑制, 但是对雄株的影响不大。除了非气孔因素, 光合速率下降很可能与气孔因素有关。前人的研究发现Cd胁迫会导致植物气孔关闭, 降低气孔导度, 例如马引利等发现随着Cd²⁺浓度的升高和处理时间的延长, 蚕豆 (*Vicia faba*) 气孔开度逐渐减小, 当Cd²⁺浓度达到10 mg/L时, 气孔几乎完全关闭^[28]。董袁媛等的研究也发现, 当土壤中的Cd含量超过20 mg/kg时, 黄麻 (*Corchorus capsularis*) 的气孔导度显著下降^[29]。本试验也发现3种性别桑树幼苗的气孔导度和蒸腾速率在Cd处理下均显著下降, 而且复合处理下雌雄同株的气孔关闭情况比Cd处理下更严重, 说明植株净光合速率的降低可能是由于CO₂在叶肉细胞中的扩散受阻引起的, 表明光合作用的降低可能是因为气孔导度以及蒸腾速率的下降导致的CO₂供应减少而导致的^[30-31]。结合净光合速率, 气孔导度和胞间二氧化碳浓度变化趋势, 可以推测Cd引起的气孔关闭是光合速率下降的另一个

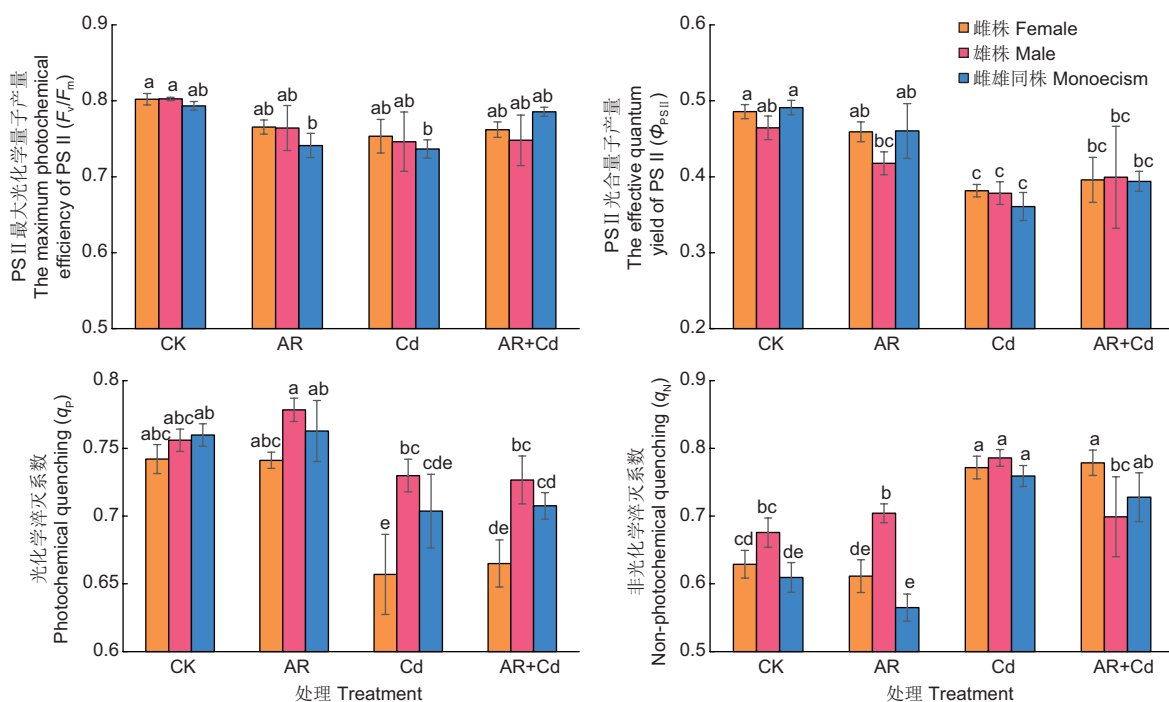


图3 Cd和AR复合处理对桑树幼苗叶绿素荧光参数特性的影响(平均值±标准误)。CK: 对照处理; AR: 酸雨处理; Cd: 镉处理; Cd + AR: 复合处理。不同字母表示不同处理组间存在显著差异 ($P < 0.05$)。

Fig. 3 Effect of Cd²⁺ and acid rain on the chlorophyll fluorescence parameters in *Morus alba* seedlings (mean ± SE). CK: Control check; AR: Acid rain treatment; Cd: Cadmium treatment; AR + Cd: Compound treatment. Different letters indicate significant difference ($P < 0.05$) according to LSD test.

表3 Cd、AR、性别及三者交互作用对桑树叶绿素荧光参数特性的影响
Table 3 Cd, AR, sex and their interactive effect on the chlorophyll fluorescence parameters in *Morus alba* seedlings

处理 Treatment	PSII最大光化学 量子产量 (F_v/F_m)	PSII实际光合 量子产量 (Φ_{PSII})	光化学 淬灭系数 (q_P)	非光化学 淬灭系数 (q_N)
F_{Cd}	ns	**	**	**
F_{AR}	ns	ns	ns	ns
F_S	ns	ns	**	**
$F_{Cd \times AR}$	*	*	ns	ns
$F_{Cd \times S}$	ns	ns	ns	**
$F_{AR \times S}$	ns	ns	ns	ns
$F_{Cd \times AR \times S}$	ns	ns	ns	ns

F_{Cd} : Cd效应; F_{AR} : 酸沉降效应; F_S : 性别效应; $F_{Cd \times AR}$: Cd与AR的交互效应; $F_{Cd \times S}$: Cd与性别的交互效应; $F_{AR \times S}$: AR与性别的交互效应; $F_{Cd \times AR \times S}$: Cd、AR和性别三者的交互效应。

F_{Cd} : Cd effect; F_{AR} : AR deposition effect; F_S : Sex effect; $F_{Cd \times AR}$: Interactive effect of Cd and AR; $F_{Cd \times S}$: Interactive effect of Cd and sex; $F_{AR \times S}$: Interactive effect of N and sex; $F_{Cd \times AR \times S}$: Interactive effect of Cd, AR and sex.

ns: $P > 0.05$; *: $0.01 \leq P < 0.05$; **: $P < 0.01$.

原因。

Cd对植物体的主要危害之一是破坏光合机构^[32]。Cd会导致植物叶绿体类囊体结构破损,使叶绿素含量和Chl a/b比例下降,且引起部分捕光色素蛋白复合体LHCII解聚,最后令植物叶片中向PSII反应中心传递的能量减少^[33]。叶绿素荧光作为光合作用研究的重要探针,有研究认为Cd处理对光系统II造成了明显的伤害^[34]。本试验中,Cd处理并没有引起PSII最大光化学量子产量的显著下降,说明PSII仍然能维持正常的光合电子传递活性,即Cd处理没有导致3种性别桑树幼苗PSII反应中心的损伤。但是Cd处理降低了实际光量子产量,性别差异与生物量积累和净光合速率一致,可见桑树光合能力的下降与PSII反应中心实际光量子产量下降有关。另外,Cd处理以及复合处理下,雌株、雌雄同株光化学淬灭系数均显著降低,说明PSII中的氧化状态已经趋于不稳定,反应中心的开放程度下降,叶片吸收光能的光化学反应减弱。从非光化学淬灭系数可以看出,Cd处理下,雌株、雄株、雌雄同株在PSII受到损伤后,均显著升高了非光化学淬灭系数,即通过较高的热耗散来保护光合机构^[35],使得由过剩光能所激发的电子被用来生成活性氧的比例增加^[36]。

本试验中,Cd显著抑制了3种性别桑树幼苗的生物量积累,且不同性别之间的生物量抑制程度与净光合速率一致,雄株较低,雌株雌雄同株较高多,可以推测生物量积累的下降是净光合速率受抑制造成的,由此可见,桑树雄株对Cd的耐受性较大。这与一些前人的研究一致,Chen等发现滇杨(*Populus yunnanensis*)的雄株在Cd胁迫环境下的生物量积累高于雌株^[37]。Varga等对*Ilex paraguariensis*的研究^[38],

Pietrini等对*Antennaria dioica*的研究^[39]也得出了类似的研究。但是与臧畅等人的研究结果相反,臧畅等的研究发现在100 mg/kg土壤Cd污染的情况下,桑树雌株的耐受性高于雄株^[13],这可能是桑树雌株对更高浓度的Cd耐受性高于雄株的缘故,也说明雌雄异株植物对逆境的耐受性差异会根据环境变化而变化。本试验中,复合处理下加重了雌株和雌雄同株生物量积累的受抑制情况,而且显著降低了雌雄同株叶片生物量,但是对雄株的影响不大,说明酸雨的加入会增大Cd对雌株和雌雄同株幼苗的伤害。本试验还发现不同性别桑树幼苗在Cd胁迫环境下的生物量分配存在差异。Cd胁迫环境下,雌株显著降低了茎生物量的积累,但是根和叶生物量积累变化不大,而雄株和雌雄同株显著降低了根、茎生物量,叶生物量积累变化不大。叶是植物进行光合作用最主要的器官,所以3种性别桑树都选择了保留叶生物量,以维持最大的光合能力。而根系是土壤Cd进入植物体的第一通道,一方面Cd会导致植物根系变得粗短,另一方面植物也会减少根系的生长以限制对Cd的吸收,这称为植物对重金属的逃避策略。所以,桑树雄株和雌雄同株可能采取了逃避策略以减轻Cd的伤害,而雌株可能采取了滞留作用,积累逆境蛋白和脯氨酸,提高抗氧化酶系统活性等其他策略^[12]。

4 结论

土壤Cd污染会通过降低光合速率,导致3种性别桑树幼苗的生物量积累下降,而光合速率的下降是由于气孔关闭以及实际光量子产量减少与光化学淬灭系数下降引起的。而且,不同性别桑树受Cd胁迫的程度存在差异。雄株的生物量积累、光合速率、气孔关闭程度和实际光量子产量下降程度低于雌株和雌雄同株。复合处理加重了Cd对雌株和雌雄同株生物量积累和光合能力的抑制。可见这两种性别对Cd污染和复合污染的耐受性低于雄株。另外,Cd胁迫下3种性别桑树幼苗生物量分配存在差异,这可能是由于雄株、雌雄同株以限制Cd进入植株体内作为应对Cd胁迫的主要策略,而雌株不是。

由此可见,本研究的3种性别桑树中,雄株更适合在Cd污染地区生长,它们对土壤重金属Cd胁迫的适应性更强。当前评价植物的耐受性多为单一胁迫下的适应机制,但现实中植物往往处于双重甚至是多重的环境压力,胁迫方式增加时,植物是否会改变应对策略以适应环境,这种应变能力也应该作为植物耐受性的评判标准之一。本试验对Cd和酸雨胁迫下3种性别桑树幼苗生长、光合生理指标进行了分析,为酸雨日益严重现状下,重金属污染地区修复树种的性别选择提供参考。但如果继续延长重金属Cd及模拟酸雨胁迫时间,3种性别桑树生长生理指标以及保护酶含量、Cd元素积累与分配差异等生化指标也有待研究。

参考文献 [References]

- Chen L, Zhang L, Tu L, Xu Z, Zhang J, Gao S. Sex-related differences in physiological and ultrastructural responses of *Populus cathayana* to Ni toxicity [J]. *Acta Physiol Plant*, 2014, **36** (7): 1937-1946
- 陈娟, 李春阳. 环境胁迫下雌雄异株植物的性别响应差异及竞争关系[J]. *应用与环境生物学报*, 2014, **20** (4): 743-750 [Chen J, Li CY. Sex-specific responses to environmental stresses and sexual competition of dioecious plants [J]. *Chin J Appl Environ Biol*, 2014, **20** (4): 743-750]
- Verdú, Miguel, Villarsalvador P, García Fayos P. Gender effects on the post-facilitation performance of two dioecious *Juniperus* species [J]. *Funct Ecol*, 2010, **18** (1): 87-93

- 4 Xu X, Peng G, Wu C, Korpelainen H, Li C. Drought inhibits photosynthetic capacity more in females than in males of *Populus cathayana* [J]. *Tree Physiol*, 2008, **28** (11): 1751-1759
- 5 尹春英, 李春阳. 雌雄异株植物与性别比例有关的性别差异研究现状与展望[J]. *应用与环境生物学报*, 2007, **13** (3): 419-425 [Yin CY, Li CY. Gender differences of dioecious plants related sex ratio: recent advances and future prospects [J]. *Chin J Appl Environ Biol*, 2007, **13** (3): 419-425]
- 6 Pickering CM, Arthur M. Patterns of resource allocation in the dioecious alpine herb *Aciphylla simplicifolia* (Apieaceae) [J]. *Aust Ecol*, 2010, **28** (5): 566-574
- 7 Sergi MunnéBosch, Marta Juvany. Sex-related differences in stress tolerance in dioecious plants: a critical appraisal in a physiological context [J]. *J Exp Bot*, 2015, **66** (20): 6083
- 8 赵晓军, 陆泗进, 许人骥, 李伯苓, 吴国平, 魏复盛. 土壤重金属镉标准值差异比较研究与建议[J]. *环境科学*, 2014, **35** (4): 1491-1497 [Zhao XJ, Lu SJ, XU RJ, Li BL, Wu GP, Wei FS. Soil heavy metal cadmium standard limit and range of background value research [J]. *Environ Sci*, 2014, **35** (4): 1491-1497]
- 9 赵子豪, 宋琦, 李利, 楼锦锋, 罗建勋, 俞飞. 南方四季杨雌雄幼苗对镉胁迫光合生理响应的差异[J]. *森林与环境学报*, 2019, **39** (2): 201-207 [Zhao ZH, Song Q, Li L, Lou JF, Luo JX, Yu F. Difference in photosynthesis and physiological response of male and female *Populus deltoides* × *nigra* to Cd stress [J]. *J For Environ*, 2019, **39** (2): 201-207]
- 10 谢丹妮, 张婷, 余倩, 余德祥, 段雷. 重庆市十二五期间SO₂和NO_x总量控制对降低酸沉降的效果评估[J]. *中国环境科学*, 2017, **37** (11): 4072-4077 [Xie DN, Zhang T, Yu Q, Yu DX, Duan L. Evaluating effects of total emission control for sulfur dioxide and nitrogen oxides in Chongqing during the twelfth five-year-plan: trend in acid deposition at Tieshanping during 2011-2016 [J]. *Chin Environ Sci*, 2017, **37** (11): 4072-4077]
- 11 牛彧文, 顾骏强, 俞向明, 蒋和荣, 代鑫. 长三角区域背景地区降水化学特征[J]. *环境化学*, 2010, **29** (3): 358-362 [Niu YW, Gu JQ, Yu XM, Jiang HR, Dai X. The chemical feature of precipitation in the yangtze river delta background region [J]. *Environ Chem*, 2010, **29** (3): 358-362]
- 12 张凯, 徐波, 孟昭军, 王琪, 谷岱霏, 严善春. 铜、镉胁迫对杨树叶片中防御蛋白活性的影响[J]. *东北林业大学学报*, 2014, **11**: 43-46 [Zhang K, Xu B, Meng ZJ, W Q, Gu DF, Yan SC. Effect of copper and cadmium on defensive protein activity in poplar leaves [J]. *J North For Univ*, 2014, **11**: 43-46]
- 13 臧畅, 吕志强, 董莲春, 徐艺, 俞飞. 不同性别桑树幼苗对镉与酸雨复合处理的生长响应及镉积累差异[J]. *应用生态学报*, 2018, **29** (3): 969-975 [Zang C, Lü ZQ, Dong LC, Xu Y, Yu F. Growth response and cadmium accumulation differences of different gender *Morus alba* seedlings to combined treatments of Cd and acid rain [J]. *Chin J Appl Ecol*, 2018, **29** (3): 969-975]
- 14 Abrabar S, Iarssen T, Carmichael G R. Acid rain and acidification in China: the importance of base cation deposition [J]. *Environ Pol*, 2000, **110** (1): 89-102
- 15 Amthor FH, Wang YH. Effects of simulated acid rain on germination, foliar damage, chlorophyll contents and seedling growth of five hardwood species growing in China [J]. *For Ecol Manage*, 2000, **126** (3): 321-329
- 16 樊后保, 臧润国, Waki K. 女贞种子和幼苗对模拟酸雨的反应[J]. *林业科学*, 2000, **36** (6): 90-94 [Fan HB, Zang RG, Waki K. Responses of seeds and seedlings of *Ligustrum lucidum* to simulated acid rain [J]. *Sci Silva Sin*, 2000, **36** (6): 90-94]
- 17 樊后保, 黄玉梓, 李燕燕, 林德喜. 模拟酸雨对杉木种子萌发和幼苗生长的影响[J]. *江西农业大学学报*, 2005, **27** (6): 875-879 [Fan HB, Huang YZ, Li YY, Lin DX. Effects of simulated acid rain on seed germination and seedling growth of *Cunninghamia lanceolata* [J]. *Acta Agri Univ Jiangxi*, 2005, **27** (6): 875-879]
- 18 丁永祯, 李志安, 邹碧, 谭万能, 顾伟, 曹裕松. 机酸对珠江三角洲水稻土镉解吸行为的影响[J]. *应用与环境生物学报*, 2007, **13** (3): 289-293 [Ding YZ, Li ZA, Zou B, Tan WN, Gu W, Cao YS. Effect of organic acids on cadmium desorption from paddy soil of the pearl river delta in China [J]. *Chin J Appl Environ Biol*, 2007, **13** (3): 289-293]
- 19 徐晨阳, 毛晓瑜. 不同浓度酸雨对镉污染下桑树幼苗生物量和生理特性的影响[J]. *浙江农业学报*, 2018, **30** (12): 2112-2120 [Xu CY, Mao XY. Effects of different concentrations of acid rain on biomass allocation and physiological characteristics in *Morus alba* seedlings under cadmium pollution [J]. *Acta Agric Zhejiangensis*, 2018, **30** (12): 2112-2120]
- 20 Shukla JB, Sundar S, Shivangi, Naresh R. Modeling and analysis of the acid rain formation due to precipitation and its effect on plant species [J]. *Nat Res Mod*, 2012: 10.1111/j.1939-7445.2012.00119.x
- 21 祝小祥, 谢国雄, 徐进, 徐祖祥. 临安市雷竹林土壤肥力分析与培肥措施[J]. *中国农学通报*, 2013, **28**: 72-76 [Zhu XX, Xie GX, Xu J, Xu ZX. The fertilization measures and analysis of soil fertility in the bamboo shoot groves (CV. *Ventricousinternode*) in Lin'an city [J]. *Chin Agric Sci Bull*, 2013, **28**: 72-76]
- 22 方晓波, 史坚, 廖欣峰, 楼中, 周吕艳, 余海霞. 临安市雷竹林土壤重金属污染特征及生态风险评价[J]. *应用生态学报*, 2015, **26** (6): 1883-1891 [Fang XB, Shi J, Liao XF, Lou Z, Zhou LY, Yu HX. Heavy metal pollution characteristics and ecological risk analysis for soil in *Phyllostachys praecox* stands of Lin'an [J]. *Chin J Appl Ecol*, 2015, **26** (6): 1883-1891]
- 23 张炎周, 唐亚, 陈克明, 孙辉. 等高固氮植物篱中套种桑树的桑叶产量及生物产量[J]. *应用与环境生物学报*, 2001, **7** (4): 303-307 [Zhang YZ, Tang Y, Chen KP, Sun H. Leaf yield and biological production of mulberry planted in contour hedgerows of nitrogen fixing plants [J]. *Chin J Appl Environ Biol*, 2001, **7** (4): 303-307]
- 24 廖森泰, 肖更生, 施英. 蚕桑资源高效综合利用的新内涵和新思路[J]. *蚕业科学*, 2009, **35** (4): 913-916 [Liao ST, Xiao GS, Shi Y. A new train of thoughts and ideas for efficient comprehensive utilization of sericultural resources [J]. *Acta Sericol Sin*, 2009, **35** (4): 913-916]
- 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[J]. *林业科学*, 2016, **52** (5): 92-100 [Yu F, Song Q, Liu MH, Dong LC, Yi LT. Effects of different acid rain treatments on biomass allocation and physiological characteristics in *Elaeocarpus glabripetalus* seedlings [J]. *Sci Silv Sin*, 2016, **52** (5): 92-100]
- 26 刘壮壮, 骆敏, 彭方仁, 杨标, 陈涛, 李永荣. 不同品种薄壳山核桃

- 光合及快速叶绿素荧光诱导动力学特性[J]. 东北林业大学学报, 2017, **45** (4): 36-42 [Liu ZZ, Luo M, Peng FR, Yang B, Chen T, Li YR. Characteristics of photosynthesis and fast chlorophyll fluorescence induction dynamics in different *Pecan* cultivars [J]. *J North For Univ*, 2017, **45** (4): 36-42]
- 27 简敏菲, 张乖乖, 史雅甜, 余厚平, 陈奕奇. 土壤镉、铅及其复合污染胁迫对丁香蓼(*Ludwigia prostrata*)生长和光合荧光特性的影响[J]. 应用与环境生物学报, 2017, **23** (5): 69-76 [Jian MF, Zhang GG, Shi YT, Yu HP, Chen YQ. Effects of single and combined pollution stress of cadmium and lead in soil on the growth and photosynthetic fluorescence characteristics of *Ludwigia prostrata* [J]. *Chin J Appl Environ Biol*, 2017, **23** (5): 69-76]
- 28 马引利, 牛娇, 江泽宇. 水杨酸在氯化镉胁迫诱导蚕豆气孔运动中的作用[J]. 山西师范大学学报(自然科学版), 2015 (2): 69-73 [Ma YL, Niu J, Jiang ZY. Effects of salicylic acid on CdCl₂ stress-caused stomatal movement in *Vicia Faba* [J]. *J Shanxi Norm Univ (Nat Sci Ed)*, 2015 (2): 69-73]
- 29 赵晶, 冯文强, 秦鱼生, 喻华, 廖明兰, 甲卡拉铁, 程瑜, 王昌全, 涂仕华. 不同氮肥对小麦吸收镉的影响[J]. 应用与环境生物学报, 2010, **16** (1): 58-62 [Zhao J, Feng WQ, Qin YS, Yu H, Liao ML, Jia KLT, Cheng Y, Wang CQ, Tu SH. Effects of different nitrogen fertilizers on cadmium uptake by wheat [J]. *Chin J Appl Environ Biol*, 2010, **16** (1): 58-62]
- 30 陈娟, 曾青, 朱建国, 刘钢, 曹际玲, 谢祖彬, 唐昊治, 小林和彦. 施氮肥缓解臭氧对小麦光合作用和产量的影响[J]. 植物生态学报, 2011, **35** (5): 523-530 [Chen J, Zeng Q, Zhu JG, Liu G, Cao JL, Xie ZB, Tang HZ, Xiao LHY. Nitrogen supply mitigates the effects of elevated [O₃] on photosynthesis and yield in wheat [J]. *Chin J Plant Ecol*, 2011, **35** (5): 523-530]
- 31 郑柳, 贺雪莲, 邱文敏, 韩小娇, 刘明英, 何正权, 卓仁英. 镉处理后两种景天的光合相关参数变化[J]. 草业科学, 2017, **32** (5): 1024-1031 [Zhen L, He XL, Qiu WM, Han XJ, Liu MY, He ZQ, Zhuo RY. Variation in photosynthesis related parameters in two kinds of *Sedum* after cadmium treatment [J]. *Prata Sci*, 2017, **32** (5): 1024-1031]
- 32 刘侯俊, 李雪平, 韩晓日, 刘轶飞, 芦俊俊. 铁镉互作对水稻脂质过氧化及抗氧化酶活性的影响[J]. 应用生态学报, 2013, **24** (8): 2179-2185 [Liu HJ, Li XP, Han XR, Liu YF, Lu JJ. Effects of Fe-Cd interaction on the lipid peroxidation and antioxidative enzyme activities of rice [J]. *Chin J Appl Ecol*, 2013, **24** (8): 2179-2185]
- 33 赵海燕. Cr⁶⁺胁迫对小麦DH群体幼苗发育性状的影响及QTL定位研究[D]. 泰安: 山东农业大学, 2012 [Zhao HY. Study on effect of developmental characters in wheat seedling DH lines and QTL mapping under Cr⁶⁺ stress [D]. Tai'an: Shandong Agricultural University, 2012]
- 34 谭长强, 郝海坤, 彭玉华, 申文辉, 黄志玲, 曹艳云. 镉氮对台湾栾木和杂交相思生长与光合特性的影响[J]. 西北农林科技大学学报(自然科学版), 2018, **46** (2): 1-6 [Tan CQ, Hao HK, Peng YH, Shen WH, Huang ZL, Cao YY. Effects of cadmium and nitrogen on growth and photosynthesis of *Alnus formosana* and *Acacia mangium* × *Acacia auriculiformis* [J]. *J Northwest A&F Univ (Nat Sci Ed)*, 2018, **46** (2): 1-6]
- 35 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[J]. 应用生态学报, 2014, **25** (8): 2183-2192 [Wang S, Yi LT, Yu SQ, Zhang C, Shi JJ. Effects of simulating acid rain on photosynthesis and chlorophyll fluorescence parameters of *Quercus glauca* [J]. *Chin J Appl Ecol*, 2014, **25** (8): 2183-2192]
- 36 许耀照, 曾秀存, 郁继华, 颀建明, 张国斌. 水杨酸对高温胁迫下黄瓜幼苗叶绿素荧光参数的影响[J]. 西北植物学报, 2007 (2): 267-271 [Xu YZ, Zeng XC, Yu JH, Jie JM, Zhang GB. Effects on chlorophyll fluorescence parameters of cucumber seedlings in salicylic acid and high temperature stress [J]. *Acta Bot Bor Sin*, 2007 (2): 267-271]
- 37 Chen L, Han Y, Jiang H, Korpelainen H, Li C. Nitrogen nutrient status induces sexual differences in responses to cadmium in *Populus yunnanensis* [J]. *J Exp Bot*, 2011, **62** (14): 5037-5050
- 38 Varga S, Kytöviita MM. Differential competitive ability between sexes in the dioecious *Antennaria dioica* (Asteraceae) [J]. *Ann Bot*, 2012, **110** (7): 1461
- 39 Pietrini F, Zacchini M, Iori V, Pietrosanti L, Ferretti M, Massacci A. Spatial distribution of cadmium in leaves and its impact on photosynthesis: examples of different strategies in willow and poplar clones [J]. *Plant Biol*, 2010, **12** (2): 355-363