

# 矮壮素缓解杨梅酸雨胁迫效应\*

刘建福\*\* 徐泽玮

(华侨大学生物工程与技术系, 福建厦门 361021)

**摘要** 试验对7年生东魁杨梅先进行模拟酸雨(pH 3.5)胁迫处理,1周后喷施矮壮素溶液,研究东魁杨梅花芽孕育期间,矮壮素缓解酸雨胁迫的生理效应。结果表明:酸雨胁迫下喷施低浓度矮壮素有利于提高杨梅叶片SOD、POD和CAT活性,增强细胞清除活性氧能力,缓解膜脂过氧化程度,降低丙二醛含量和质膜相对透性,提高叶片抗酸雨能力;同时,矮壮素可以缓解酸雨胁迫对叶绿体的破坏,低浓度矮壮素显著提高叶绿素和类胡萝卜素含量,增强叶片光合机能,显著提高净光合速率,从而增加花芽分化前期可溶性糖和蛋白质的累积,升高花芽分化后期C/N比值,促进杨梅的成花诱导,提高枝条成花率和座果数。

**关键词** 矮壮素; 东魁杨梅; 花芽分化; 生理指标; 酸雨胁迫

**中图分类号** S963 **文献标识码** A **文章编号** 1000-4890(2010)8-1548-06

**Alleviative effects of chlorocholine chloride on acid rain stress to *Myrica rubra* cv. Dongkui.** LIU Jian-fu, XU Ze-wei (Department of Bioengineering, Huaqiao University, Xiamen 361021, Fujian, China). *Chinese Journal of Ecology*, 2010, 29(8): 1548–1553.

**Abstract:** In this paper, chlorocholine chloride was sprayed on 7-year old *Myrica rubra* cv. Dongkui after 1-week simulated acid rain (pH 3.5) stress, aimed to study the alleviative effects of chlorocholine chloride on the acid rain stress to the floral bud formation and differentiation of the plant. Spraying low concentration chlorocholine chloride promoted the leaf superoxidase (SOD), peroxidase (POD), and catalase (CAT) activities, alleviated the peroxidation of membrane lipid, decreased the accumulation of malondialdehyde (MDA) and the relative permeability of cell membrane, and thus, enhanced the leaf resistance to acid rain. Meanwhile, chlorocholine chloride eased the degradation of chlorophyll and carotenoid, increased the transpiration, stomatal conductance, and net photosynthetic rate remarkably, and accordingly, increased the leaf soluble protein and sugar contents and promoted the floral bud differentiation and blooming and fruit-setting rates.

**Key words:** chlorocholine chloride; *Myrica rubra* cv. Dongkui; floral bud differentiation; physiological and biochemical indices; acid rain stress.

杨梅属于杨梅科(Myricaceae)杨梅属(*Myrica* L.)常绿乔木,中国南方特产果树,主要分布在长江流域以南,20°N—31°N,主要产区为浙江、江苏、福建、广东、广西、湖南、江西、云南等省(区),台湾、贵州、四川、重庆及安徽南部有少量分布。此外,在日本本州中部以西各地和朝鲜也有少量栽培或野生。欧洲和美洲则多引种作观赏或药用(陈杰忠,2003;李松平等,2008)。东魁杨梅是近年来大力引种栽培的品种,目前种植面积已超过600 km<sup>2</sup>,占杨梅总

面积的26%。然而,生产上由于管理粗放,出现品种退化,产量下降,品质变劣等现象。

近年来,酸雨分布正在以城市为中心向远郊和农村蔓延,杨梅产区也面临酸雨胁迫的影响。长期的高酸度酸雨使土壤的酸碱度发生变化,造成土壤中营养元素的大量淋失,导致土壤肥力下降,最终使土壤贫瘠化,这对果树生产带来很多负面影响,如何克服和缓解酸雨的危害,将是果树业急需解决的难题(付晓萍和田大伦,2006;Yong *et al.*, 2008)。矮壮素(chlorocholine chloride, CCC)是一种使用广泛的植物生长延缓剂,它能抑制细胞伸长,控制植株营养生长,促进生殖生长(杨志民和李志华,2005;黄

\* 泉州市科技计划重点项目(2009N87)和晋江市科技计划重点资助项目(2009-1-4-11)。

\*\* 通讯作者 E-mail: jianfu@hqu.edu.cn

收稿日期: 2010-02-02 接受日期: 2010-04-15

广远和祁芳梅,2006),使植株的节间缩短、矮壮并抗倒伏(彭峰等,2004),促进叶片颜色加深,提高光合作用、酶活性、品质和产量(康朵兰等,2007;Wang & Xiao,2009),提高植物抗旱性、抗寒性和抗盐碱的能力(Luoranen *et al.*,2002;冯斗等,2009)。

本试验通过模拟酸雨,研究叶面喷施矮壮素对花芽孕育期的叶绿素含量、光合生理、膜脂过氧化作用和成花诱导的变化,探讨提高杨梅抗酸雨能力的最适矮壮素浓度,为改善杨梅的抗逆性提供理论依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 试验材料

供试材料为长势与立地条件基本一致的7年生东魁杨梅(*Myrica rubra* cv. Dongkui)。试验在华侨大学紫帽山教学实践基地进行,该基地地势平坦,土壤为沙壤土;位于117°25'E—119°05'E,24°30'N—25°56'N,属于亚热带海洋性季风气候,终年温和,雨量充沛;全年平均气温21℃;降雨量1010.9~1681.6 mm;年日照时数为1488~2131 h。

### 1.2 试验设计

根据福建酸雨降雨中 $\text{SO}_4^{2-}$ 和 $\text{NO}_3^-$ 的摩尔比为4.19(赵卫红,2006),配成pH值为3.5模拟酸雨,于2008年7月4日对试验材料喷施模拟酸雨进行酸雨胁迫,然后于7月11日、7月18日和7月25日进行喷施矮壮素进行处理,共喷施4次,设置5个矮壮素浓度0、500、1000、1500和2000  $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ ,以不喷施酸雨和矮壮素处理为对照,共6个处理,3次重复(1株为1个重复),随机区组实验设计。喷施模拟酸雨和矮壮素均在晴朗天气上午9:00前进行,用微型喷雾器向杨梅叶面喷施,喷至所有叶片滴液为度,0  $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 处理植株喷等量清水,试验期间用塑料薄膜遮挡自然降雨,其他按果园田间管理进行。

### 1.3 测定项目与方法

分别于花芽分化前期(2008年8月2日)和后期(2008年12月16日)进行取样,测定各项生理指标;处理与对照植株的叶片皆来自同向、同节位枝条上的成熟叶片。分别于盛花期(2009年3月1日)调查杨梅的枝条成花率,幼果期(2009年5月10日)统计枝条座果数,每个主枝各调查10个结果枝。

叶绿素含量和类胡萝卜素含量采用丙酮浸提法测定(邹琦,2000)。丙二醛(MDA)含量采用硫代巴

比妥酸反应法(王学奎,2006);质膜相对透性采用电导率法;可溶性糖含量采用蒽酮比色法测定;蛋白质含量采用考马斯亮蓝法测定(王学奎,2006)。超氧化物歧化酶(SOD)活性用氧化硝基四氮唑蓝(NBT)法测定,以单位时间内抑制NBT光还原50%为一个酶活性单位(U);愈创木酚比色法测定过氧化物酶(POD)活性,以每分钟 $A_{470}$ 变化值表示酶活性大小;过氧化氢酶(CAT)活性采用比色法测定,以每分钟 $A_{240}$ 的变化值表示酶活力大小(王学奎,2006)。用CI-340便携式光合作用测定系统测定叶片净光合速率(刘建福,2007a),开放气路,选择植株中上部树冠外围功能叶片(枝条顶端往下第4个叶片)进行测定,每处理测3株,每株选不同方位测8个叶片;测定时间为晴天9:00—11:00。

### 1.4 数据统计分析

采用SPSS 13.0统计分析软件对数据进行描述性统计和正态性检验,然后做相关性分析与One Way ANOVA方差分析,并用LSD法进行多重比较。

## 2 结果与分析

### 2.1 矮壮素对酸雨胁迫下杨梅叶片抗氧化酶活性的影响

逆境下,植物体体内产生较多的活性氧,而SOD、POD和CAT是植物细胞中最重要的清除活性氧的酶。由图1可见,喷施矮壮素明显提高酸雨胁迫下杨梅叶片的SOD、POD和CAT3种酶活性。喷施矮壮素处理显著提高酸雨胁迫下花芽分化期叶片SOD活性,500~1000  $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 矮壮素的SOD活性略高于其他处理,矮壮素各处理间的差异不显著;相同矮壮素浓度下,花芽分化前期和花芽分化后期的SOD活性差异不显著。酸雨胁迫下,POD活性随着矮壮素浓度增加而先增加后降低,总体表现为花芽分化前期高于后期,特别是矮壮素浓度为500和1000  $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 时达到显著差异水平。花芽分化前期矮壮素浓度为500和1000  $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 时POD活性显著高于其他处理,浓度为500  $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 时POD活性达到最大值,比0  $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 处理提高了79.4%;而高浓度矮壮素的POD活性反而下降,低于0  $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 处理。花芽分化后期矮壮素浓度为500~1500  $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 时POD活性明显高于其他处理,但处理间差异不显著。酸雨胁迫下,CAT活性随着矮壮素浓度的增加而表现为先增加后降低趋势,且均显著高于0  $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 处理;花芽分化前期的CAT活性显著

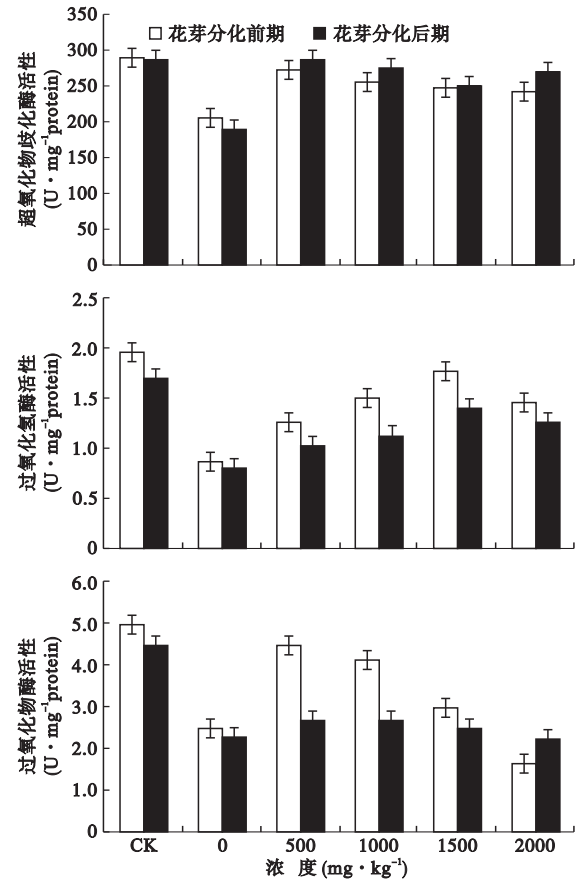


图 1 矮壮素对酸雨胁迫下杨梅叶片 SOD、POD 和 CAT 活性的影响  
Fig.1 Effects of CCC of different concentrations on the activities of superoxide, peroxidase and catalase in leaves of *Myrica rubra* cv. Dongkui under acid rain stress

高后期,矮壮素浓度为 1500 mg · kg<sup>-1</sup>时花芽分化期的 CAT 活性均达到最大值,分别比 0 mg · kg<sup>-1</sup>处理提高了 103.5% 和 78.2%;矮壮素各处理浓度间的差异均达到显著水平。可见,喷施矮壮素显著提高酸雨胁迫下叶片 SOD、POD 和 CAT 活性,但不同时期酶活性的反应不一致,总体表现为花芽分化前期的酶活性高于花芽分化后期;喷施 500 ~ 1500 mg · kg<sup>-1</sup>矮壮素有利于酸雨胁迫下杨梅叶片酶活性的提高,增强清除活性氧的能力,降低细胞膜脂过氧化程度。

2.2 矮壮素对酸雨胁迫下杨梅丙二醛含量和质膜透性的影响

酸雨胁迫下,杨梅发生膜脂过氧化作用,导致 MDA 含量升高,杨梅叶片喷施矮壮素后丙二醛含量和质膜相对透性发生变化(图 2)。不同矮壮素浓度处理下花芽分化前期的 MDA 含量均显著高于后期;无论是前期还是后期 MDA 含量均表现为随着

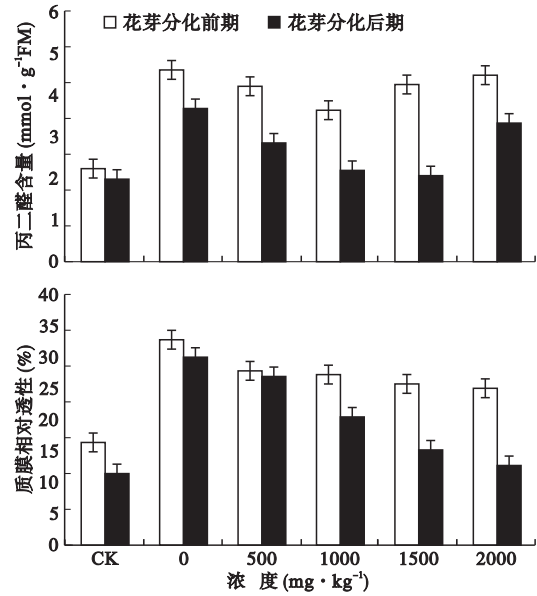


图 2 矮壮素对酸雨胁迫下杨梅叶片丙二醛含量和电解质渗漏率的影响  
Fig.2 Effects of CCC of different concentrations on malondialdehyde contents and electrolytic leakage in leaves of *Myrica rubra* cv. Dongkui under acid rain stress

矮壮素浓度的增加先下降后上升。其中,花芽分化前期矮壮素浓度为 1000 mg · kg<sup>-1</sup>时 MDA 含量降为最低值,比 0 mg · kg<sup>-1</sup>处理降低了 20.9%,而花芽分化后期 MDA 含量最低值的浓度为 1000 ~ 1500 mg · kg<sup>-1</sup>。可见,喷施 1000 ~ 1500 mg · kg<sup>-1</sup>矮壮素可以显著降低酸雨胁迫下杨梅 MDA 含量,减轻膜脂过氧化程度,而高浓度矮壮素并没有起到缓解酸雨胁迫的作用。

酸雨胁迫下细胞的质膜系统受到伤害,表现为质膜相对透性增加。从图 2 可见,酸雨胁迫下,喷施不同浓度矮壮素均降低质膜相对透性,且花芽分化后期的质膜相对透性显著低于前期。花芽分化前期的质膜相对透性均显著高于 0 mg · kg<sup>-1</sup>处理,但处理间的差异不显著。花芽分化后期的质膜相对透性随矮壮素浓度的增加而降低,500 mg · kg<sup>-1</sup>矮壮素处理与 0 mg · kg<sup>-1</sup>处理差异不显著;喷施 1000 ~ 2000 mg · kg<sup>-1</sup>矮壮素的均显著低于 0 mg · kg<sup>-1</sup>处理。说明酸雨胁迫条件下,喷施矮壮素可降低花芽分化期的质膜相对透性,减少电解质渗漏,提高叶片的抗酸雨能力。

2.3 矮壮素对酸雨胁迫下杨梅叶片光合色素含量的影响

叶绿素是绿色植物进行光合作用的色素,其含量高低是反映植物光合能力强弱的重要指标之一。

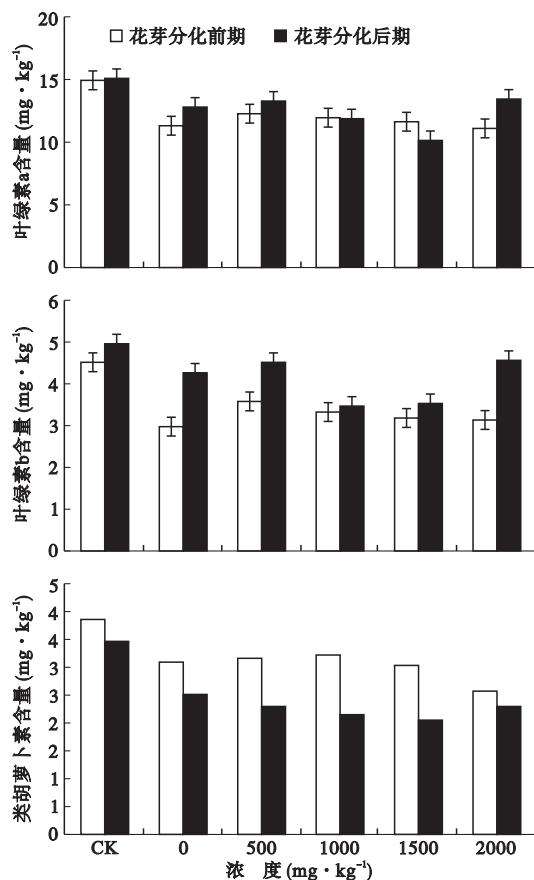


图3 矮壮素对酸雨胁迫下杨梅叶绿素和类胡萝卜素含量的影响

Fig.3 Effects of CCC of different concentrations on the content chlorophyll and carotenoids in leaves of *Myrica rubra* cv. Dongkui under acid rain stress

酸雨胁迫下叶绿体结构受到破坏,光合色素含量降低(刘建福,2007b;鲁美娟等,2009)。由图3可以看出,喷施矮壮素明显改变酸雨胁迫下杨梅花芽分化期的叶绿素和类胡萝卜素含量。

花芽分化前期喷施低浓度矮壮素显著提高酸雨胁迫下叶绿素和类胡萝卜素含量,500和1000 mg·kg<sup>-1</sup>时显著提高叶绿素a、叶绿素b和类胡萝卜素含量,与0 mg·kg<sup>-1</sup>处理差异达到显著水平;而矮壮素为1500和2000 mg·kg<sup>-1</sup>时叶绿素a、叶绿素b和类胡萝卜素含量反而略微下降,但与0 mg·kg<sup>-1</sup>处理差异不显著。花芽分化后期喷施矮壮素后,叶绿素a、叶绿素b和类胡萝卜素含量随着矮壮素浓度的增加而先降低后上升。矮壮素浓度为1000和1500 mg·kg<sup>-1</sup>时与其他处理的差异显著,且与0 mg·kg<sup>-1</sup>处理差异显著;浓度为500和2000 mg·kg<sup>-1</sup>时其含量与0 mg·kg<sup>-1</sup>处理差异不显著。

相同浓度矮壮素处理的叶绿素含量均表现为花

芽分化后期高于花芽分化前期,而类胡萝卜素含量则是花芽分化前期高于花芽分化后期。可见,矮壮素作用时间延长则杨梅叶片叶绿素含量增加,而类胡萝卜素含量降低。田间植株形态观察发现,0 mg·kg<sup>-1</sup>处理植株叶片出现黄绿,而喷施矮壮素处理的叶片颜色变绿,且高浓度处理的颜色较深,从而表明矮壮素处理可以缓解酸雨对叶绿体结构的破坏,提高杨梅叶片叶绿素和类胡萝卜素含量。

## 2.4 矮壮素对酸雨胁迫下杨梅叶片净光合速率的影响

喷施矮壮素提高了酸雨胁迫下杨梅叶片的净光合速率(图4)。净光合速率均随着矮壮素浓度的增加而呈现先提高后降低,但显著高于0 mg·kg<sup>-1</sup>处理。矮壮素浓度为500和1000 mg·kg<sup>-1</sup>时的净光合速率表现为花芽分化后期高于前期,而喷施1500和2000 mg·kg<sup>-1</sup>的表现为花芽分化前期高于后期。可见,喷施低浓度矮壮素有利于长时间提高酸雨胁迫下杨梅的净光合速率,而高浓度矮壮素则降低其净光合速率。酸雨胁迫下,喷施1000 mg·kg<sup>-1</sup>矮壮素有利于提高杨梅花芽分化期的净光合速率。

## 2.5 矮壮素对酸雨胁迫下杨梅叶片可溶性糖和蛋白质含量的影响

由图5可知,酸雨胁迫下喷施矮壮素可以提高杨梅叶片可溶性糖含量。花芽分化前期矮壮素浓度为2000 mg·kg<sup>-1</sup>的可溶性糖含量显著高于0 mg·kg<sup>-1</sup>处理,其他处理与0 mg·kg<sup>-1</sup>处理差异不显著;花芽分化后期矮壮素浓度为500和1500 mg·kg<sup>-1</sup>时其含量显著高于其他处理,与0 mg·kg<sup>-1</sup>处理差异显著。

酸雨胁迫下喷施矮壮素后,杨梅花芽分化前期的蛋白质含量显著高于花芽分化后期。花芽分化前

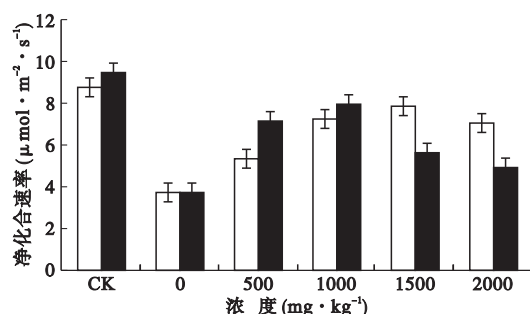


图4 矮壮素对酸雨胁迫下杨梅叶片净光合速率的影响  
Fig.4 Effects of CCC of different concentrations on net photosynthetic rate of *Myrica rubra* cv. Dongkui under acid rain stress



期的蛋白质含量随着矮壮素浓度的增加而先升高后降低,浓度为 1000 mg · kg<sup>-1</sup>时达到最大值;花芽分化后期的蛋白质含量均低于 0 mg · kg<sup>-1</sup>处理,浓度为 500 和 1000 mg · kg<sup>-1</sup>时其含量显著低于其他处理。

可溶性糖含量/可溶性蛋白质含量的比值(C/N)用于衡量花芽分化的指标之一,C/N 值高有利于花芽分化诱导。从图 5 可以看出,花芽分化后期的 C/N 值高于花芽分化前期,花芽分化前期 C/N 值随着矮壮素浓度的增加先下降后上升,花芽分化后期的 C/N 值表现为逐渐下降,且花芽分化后期的 C/N 值对杨梅的成花起到直接作用。因此,酸雨胁迫下,喷施 500 mg · kg<sup>-1</sup>矮壮素显著提高 C/N 值,有利于杨梅的成花诱导。

2.6 矮壮素对酸雨胁迫下杨梅成花座果的影响

由图 6 可看出,喷施不同浓度矮壮素促进酸雨胁迫下杨梅的花芽诱导,显著提高其枝条成花率和

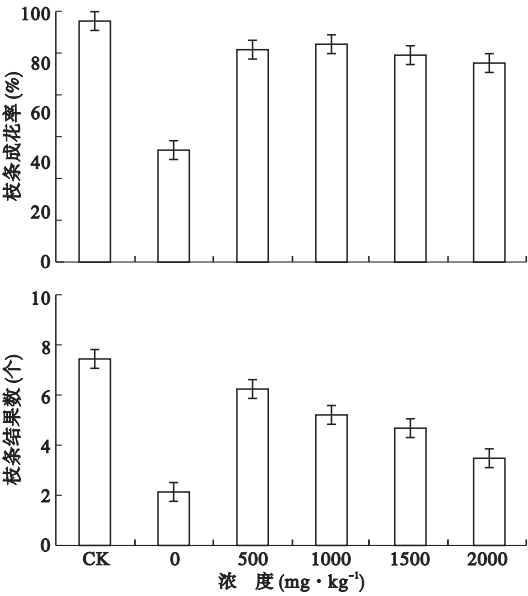


图 6 矮壮素对酸雨胁迫下杨梅枝条成花率和座果数的影响  
Fig. 6 Effects of CCC of different concentrations on the rates of blooming and fruit-setting in *Myrica rubra* under acid rain stress

座果数。随着矮壮素浓度的增加,枝条成花率和座果数均表现出显著上升然后缓慢下降的变化趋势,但均显著高于 0 mg · kg<sup>-1</sup>处理。矮壮素浓度为 500 mg · L<sup>-1</sup>时,枝条结果数达到最大值为 6.21 个,枝条成花率为 84.9%;喷施 1000 mg · L<sup>-1</sup>矮壮素,枝条成花率达到最大值 87.1%;随着矮壮素浓度的继续增加,枝条成花率和结果数反而下降。说明矮壮素浓度过高不利于杨梅的成花和座果。由此可见,有利于酸雨胁迫下杨梅成花和座果的矮壮素浓度为 500 mg · L<sup>-1</sup>左右。

3 讨 论

矮壮素是季铵型化合物,是植物生长延缓调节剂。它可经植物叶片、幼枝、芽、根系和种子进入体内,主要是通过抑制犍牛儿犍牛儿焦磷酸 (GGPP) 转变为贝壳杉烯而抑制赤霉素 (GA) 的合成,实现生理效应。张彦广等 (2006) 研究表明,施用矮壮素降低蓝花棘豆 GA 含量水平,对花序生长产生显著抑制作用,并且随处理浓度增加,花序生长受到的抑制作用显著增强。杨炜茹等 (2006) 证实,高浓度矮壮素可有效抑制地榆 GA、吲哚乙酸 (IAA) 的合成;通过调控 IAA 和玉米素 (ZT) 含量的变化而参与生殖器官的发育,进而对开花数和花期造成一定影响。

酸雨胁迫下,细胞内自由基平衡体系的维持对

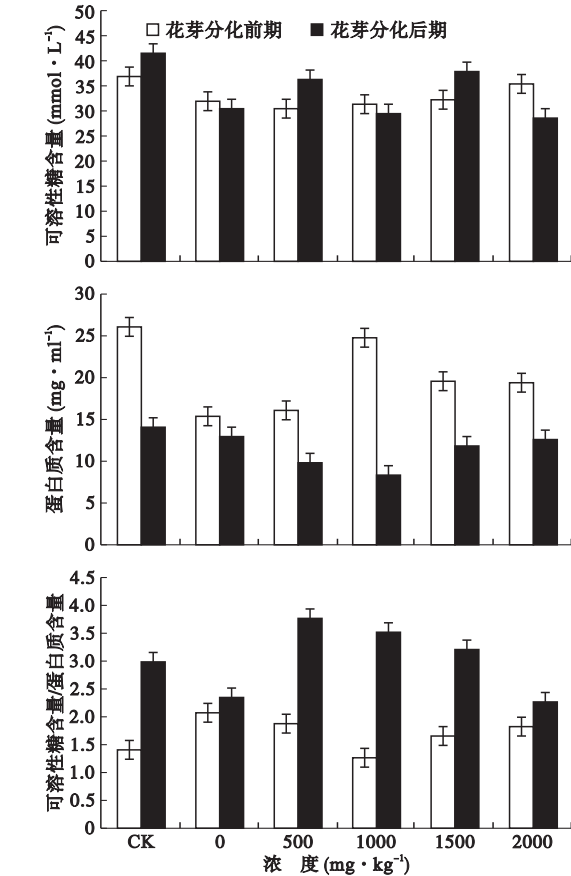


图 5 矮壮素对酸雨胁迫下杨梅叶片可溶性糖和蛋白质含量的影响  
Fig. 5 Effects of CCC of different concentrations on the contents of soluble sugar and protein in leaves of *Myrica rubra* cv. Dongkui under acid rain stress

植物抗性至关重要。抗氧化酶活性与植物活性氧代谢直接相关, SOD、POD 和 CAT 构成植物体内重要的酶促活性氧清除系统, 其活性水平代表植物体清除活性氧自由基的能力, 反映植物抗逆境能力的高低。孔雀草喷施矮壮素后, 叶绿素含量提高, 植株体内 POD、SOD、CAT 和 IAA 氧化酶活性都显著增高(任吉君等, 2006; Wang *et al.*, 2008)。本试验结果表明, 喷施 500 ~ 1500 mg · kg<sup>-1</sup> 矮壮素提高了杨梅 SOD、POD 和 CAT 活性, 有助于减轻植株活性氧胁迫水平, 增强了杨梅抗酸雨能力。

叶面喷施矮壮素可抑制果树新梢的生长、矮化树冠、提高叶片质量、增强光合效能、促进花芽分化、增加早期产量; 葡萄在花期用矮壮素 100 mg · L<sup>-1</sup> 叶面喷施, 也能促进坐果、提高产量且不降低含糖量(胡瑶等, 2007)。王惠群等(2007)研究表明, 较低浓度矮壮素促进了马铃薯植株光合色素含量和净光合速率的提高, 而较高浓度矮壮素则抑制植株叶片生长, 降低净光合速率。本研究表明, 喷施 500 ~ 1000 mg · kg<sup>-1</sup> 矮壮素能提高酸雨胁迫下叶片光合色素水量和光合效率, 促进可溶性糖和蛋白的累积, 升高花芽分化后期 C/N 比值, 促进杨梅的成花诱导。综合效应以 500 mg · L<sup>-1</sup> 处理最佳, 可以作为生产管理上的参考用量。

## 参考文献

- 陈杰忠. 2003. 果树栽培学各论(南方本). 北京: 中国农业出版社: 367-372.
- 冯斗, 张涛, 裯维言, 等. 2009. 3 种生长延缓剂对甜高粱幼苗生长和生理特性的影响. 热带作物学报, **30**(10): 1468-1472.
- 付晓萍, 田大伦. 2006. 酸雨对植物的影响研究进展. 西北林学院学报, **21**(4): 23-27.
- 胡瑶, 宋明, 魏萍. 2007. 多效唑、矮壮素和比久在园艺作物上的应用. 南方农业, (6): 65-67.
- 黄广远, 祁芳梅. 2006. 不同浓度矮壮素对沟叶结缕草生长的影响. 安徽农业科学, **34**(5): 899-900, 917.
- 康朵兰, 萧浪涛, 陈立德, 等. 2007. 喷施矮壮素对加工型马铃薯大西洋后期光合性能、产量和品质的影响. 邵阳学院学报(自然科学版), **4**(4): 95-99.
- 李松平, 金志凤, 冯涛. 2008. 浙江杨梅主产地气候资源和气候变化特征. 浙江农业学报, **20**(3): 199-202.
- 刘建福. 2007a. 磷胁迫对澳洲坚果幼苗叶片光合作用的影响. 西南师范大学学报(自然科学版), **32**(2): 45-48.
- 刘建福. 2007b. 模拟酸雨对杨梅生理生化特征的影响. 中

- 国农学通报, **23**(10): 110-113.
- 鲁美娟, 江洪, 余树全, 等. 2009. 模拟酸雨对山核桃和杨梅光合生理特征的影响. 生态学杂志, **28**(8): 1476-1481.
- 彭峰, 陈嫣嫣, 郝日明, 等. 2004. 多效唑和矮壮素对盆栽彩色马蹄莲的矮化实验. 植物资源与环境学报, **13**(4): 32-34.
- 任吉君, 王艳, 孙秀华, 等. 2006. 多效唑、矮壮素和摘心对孔雀草的矮化效应. 沈阳农业大学学报, **37**(3): 390-394.
- 王惠群, 萧浪涛, 李合松, 等. 2007. 矮壮素对马铃薯中薯 3 号光合特征和磷素营养的影响. 植物营养与肥料学报, **13**(6): 1143-1147.
- 王学奎. 2006. 植物生理生化实验原理和技术. 北京: 高等教育出版社.
- 杨炜茹, 张彦广, 石秀霞. 2006. 矮壮素对地榆株高及内源激素含量变化的影响. 河北农业大学学报, **29**(1): 12-15.
- 杨志民, 李志华. 2005. 矮壮素对高羊茅生长特性影响的研究. 草业科学, **22**(12): 31-33.
- 张彦广, 张启翔, 杜鸿云, 等. 2006. 矮壮素对蓝花棘豆 IAA、GA 及花序生长的影响. 河北农业大学学报, **29**(2): 16-18.
- 赵卫红. 2006. 福建省城市酸性降水特征及变化趋势. 云南环境科学, **25**(3): 48-51.
- 邹琦. 2000. 植物生理学实验指导. 北京: 中国农业出版社.
- Luoranen J, Rikala R, Aphalo PJ. 2002. Effect of CCC and daminozide on growth of silver birch container seedlings during three years after spraying. *New Forests*, **23**: 71-80.
- Wang HQ, Xiao LT. 2009. Effects of chlorocholine chloride on phytohormones and photosynthetic characteristics in potato (*Solanum tuberosum* L.). *Journal of Plant Growth Regulation*, **28**: 21-27.
- Wang LH, Huang XH, Zhou Q. 2008. Response of peroxidase and catalase to acid rain stress during seed germination of rice, wheat and rape. *Frontiers of Environmental Science & Engineering in China*, **2**: 364-369.
- Yong OK, Rusty JR, Eun JL, *et al.* 2008. Phytolacca americana from contaminated and noncontaminated soils of South Korea: Effects of elevated temperature, CO<sub>2</sub> and simulated acid rain on plant growth response. *Journal of Chemical Ecology*, **34**: 1501-1509

**作者简介** 刘建福, 男, 1975 年生, 博士研究生。主要从事植物生理与分子生物学方面的研究。E-mail: jianfu@hqu.edu.cn

**责任编辑** 李凤芹