

## 模拟酸雨对不同颜色棉花种子萌发与 幼苗生理特性影响的研究

邱新棉<sup>1</sup>, 张仁忠<sup>2</sup>

(1. 浙江省农业科学院作物与核技术利用研究所, 杭州 310021;

2. 浙江师范大学化学与生命科学学院, 浙江金华 321004)

**摘要:**以 5 个不同颜色棉花品种为材料, 通过不同 pH 值的模拟酸雨处理棉花种子, 分别测定了发芽势、发芽率及 POD 活性、SOD 活性和可溶性糖含量的变化。结果表明, 不同的 pH 值模拟酸雨对 5 个品种的发芽势、发芽率均有一定的影响, 发芽势均高于各自的对照, 发芽率均低于对照, 且随着模拟酸雨酸性的增强而降低。POD 和 SOD 活性的变化也有一定的规律, pH 值从高到低, POD 活性呈现先降后升的趋势; SOD 活性变化呈现先升后降的趋势, 表明模拟酸雨对棉花幼苗的细胞发生了实质损伤, 其酶活性不可逆下降。5 个品种幼苗也受一定的模拟酸雨胁迫, 叶片中可溶性糖含量有所增加, 表明其对模拟酸雨胁迫的抵抗能力。结果显示酸雨对不同颜色棉花种子萌发与幼苗生理特性能造成一定的影响和危害。

**关键词:**棉花; 模拟酸雨; 种子萌发; 生理特性

**中图分类号:**S562.01 **文献标识码:**A

**文章编号:**1002-7807(2008)01-0023-06

## Influences of Simulated Acid Rain on Seed Germination and Seedling Physiological Characteristics in Different Colored Cotton Varieties

QIU Xin-mian<sup>1</sup>, ZHANG Ren-zhong<sup>2</sup>

(1. *The Institute of Crop and Nuclear Technology Energy Utilization, Zhejiang Academy of Agricultural Sciences, Hangzhou 310021, China*; 2. *College of Chemistry and Life Science, Zhejiang Normal University, Jinhua 321004, China*)

**Abstract:** Seeds of five different colored cotton varieties were treated by simulated acid rain with different pH values, then the germination energy, percentage of germination, the contents of POD, SOD and soluble sugars were tested. The results indicated that the simulated acid rain with different values influenced the germination energy and percentage of germination of the five cottons to different degrees. The germination energy of five varieties was higher than that of the controls and decreased significantly with the falling of pH values; percentage of germination also decreased with the falling of pH values but lower than that of the controls. With the falling of pH values, POD activity firstly decreased and then increased, higher than that of the controls at last; but SOD activity was firstly increased and then decreased. This showed simulated acid rain had damaged the cells of cotton seedling, the SOD activity decreased irreversibly. Soluble sugars in leaves of five different colored varieties increased a little after treated by simulated acid rain. This showed the cotton seedlings had some capability to tolerate the stress of simulated acid rain. Simulated acid rain was harmful for cotton seed germination and influenced physiological characteristics of cotton seedling.

**Key words:** cotton; simulated acid rain; seed germination; physiological characteristics

收稿日期: 2007-05-30 作者简介: 邱新棉 (1959-), 男, 副研究员, zwsmh@163.com

基金项目: 国家“863 计划”项目 (2006AA10Z1D2, 2001AA241089, 2004AA241089)、国家航天育种工程项目 (2006HA100084) 和浙江省科技重点项目 (991102310, 010007024, 2004C32020)

酸雨是指酸性的大气降水,包括酸性雨、雪、雾、露等沉降,通常指 pH 值低于 5.6 的降水<sup>[1]</sup>。1972 年联合国在斯德哥尔摩召开的人类环境会议上,瑞典人第一次把酸雨作为国际性问题提出<sup>[2]</sup>。随着酸雨污染及生态影响的日益扩大,酸雨问题日益受到世界各国政府和科学家的重视。由于酸雨对生态系统的严重危害,酸雨现已成为严重威胁世界环境的十大问题之一。我国已成为继北美、欧洲之后的世界第三大酸雨区,而且酸雨面积仍呈加速发展的趋势,酸雨在我国覆盖面积已占国土面积的 40%<sup>[3-6]</sup>。酸雨能够对陆地生态系统的植被造成一定的影响和危害已有报道<sup>[7-9]</sup>,李荣生、聂呈荣等人<sup>[10-11]</sup>研究了模拟酸雨对蔬菜、花生种子发芽与生长的影响, Park 等人<sup>[12]</sup>研究了模拟酸雨对 *Arabidopsis thaliana* 种子发芽与根、芽生长限制。酸雨不仅会对植被和农业生产产生直接影响或危害<sup>[13-14]</sup>,而且还会使铝、镉等重金属更易被植物吸收、富集,带来更大的污染问题<sup>[15-16]</sup>,进一步对植物的生长造成危害<sup>[17-18]</sup>。

棉花是我国最重要的经济作物,据统计全国棉花每年种植面积达 550 万  $\text{hm}^2$  左右,但有关酸雨对棉花影响的报道甚少。本文探讨了 5 个不同颜色棉花品种在不同 pH 值的模拟酸雨条件下对棉花种子萌发及幼苗生理特性变化的规律。分别测定了发芽势、发芽率及 POD、SOD 的活性和可溶性糖含量的变化,结果表明种子发芽势明显高于各自的对照,而种子的发芽率随着酸雨 pH 值的减小而降低,说明酸雨对棉花幼苗生长发育具有一定的危害性;过氧化物酶 POD 和超氧化物歧化酶 SOD 的变化也有一定的规则性, pH 值从高到低,呈现一定的先降后升趋势,最终略高于各自的对照可溶性糖含量变化,在 5 个不同颜色棉花品种经模拟酸雨处理后,棉花幼苗的可溶性糖含量受一定的模拟酸雨胁迫,叶片中可溶性糖含量有所增加。因此,研究酸雨对棉花生理特性的影响,可以为进一步开展棉花逆境生理研究,指导棉花生产;也可为棉花育种、栽培技术等提供理论依据。

## 1 材料和方法

### 1.1 材料

试验于 2006 年 4 月在浙江省农业科学院作物与核技术利用研究所内进行。参试品种为颜色不同的天然彩色棉和白棉花共 5 个,分别是浙彩

棉 2 号(絮棕色)、浙彩棉 3 号(絮绿色)、泗棉 3 号(絮白色)、湘杂棉 2 号(絮白色)、慈抗杂 3 号<sup>[19-22]</sup>(絮白色),其中浙彩棉 2 号、浙彩棉 3 号、泗棉 3 号种子由浙江省农业科学院作物与核技术利用研究所提供,湘杂棉 2 号种子由湖南省棉花研究所提供,慈抗杂 3 号种子由慈溪市农业科学研究所提供。参试棉花种子均为前一年生产,经浓硫酸脱绒处理,用水洗净晾干,剔除干瘪、虫蛀、霉烂等种子<sup>[23]</sup>。

### 1.2 方法

**1.2.1 模拟酸雨的配制与处理。**模拟酸雨的配制参照张萍华等<sup>[24]</sup>,先配制成母液,然后用自来水稀释,并用密度比 4:1 的硫酸、硝酸混合溶液调成 pH 值分别为 2.5、3.5、4.5、5.5 四个梯度的模拟酸雨。将各梯度的模拟酸雨分别加入各发芽盒中,然后将发芽盒置于人工气候箱中进行培养,对照用自来水(pH 约 6.5)浇灌。每梯度处理 3 个重复,随后进行各项指标的测定。

**1.2.2 种子发芽试验。**用砂培法进行棉花种子发芽试验。发芽试验用的细砂先经大量清水淘洗、晒干,然后带发芽盒一同置于 120℃ 的烘箱内消毒 5 h。冷却后,每个发芽盒中分别加入适量不同 pH 值的模拟酸雨(对照组为自来水),然后将种子播入发芽盒中,置于人工气候箱中培养(温度  $(30 \pm 2)^\circ\text{C}$ ,湿度  $(90 \pm 5)\%$ )。4 月 4 日播种于砂床,每一处理有 3 次重复,每重复取棉子 20 粒,每天记载发芽数量,以胚根长至种子直径长度为发芽标准,除去当日发芽种子,3 d 计算种子发芽势,9 d 测定种子发芽率<sup>[23]</sup>。

发芽势(%):3 d 内长成正常幼苗的种子数占供试种子的百分比。

发芽率(%):9 d 内长成正常幼苗的种子数占供试种子的百分比。

**1.2.3 生理指标测定。**取培养半个月后的各品种棉花幼苗真叶作为试验材料,分别进行 POD、SOD 活性及可溶性糖含量的测定<sup>[25-26]</sup>。

过氧化物酶活性的测定采用愈创木酚比色法,以每分钟吸光度变化值表示酶活性的大小,即以  $\Delta\text{OD}_{470} \cdot \text{min}^{-1} \cdot \text{g}^{-1}$  鲜重表示。取 1 g 幼苗叶片于研钵中,加适量  $0.05 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$  pH=5.5 的磷酸缓冲液研磨成匀浆,在  $4000 \text{ r} \cdot \text{min}^{-1}$  离心 10 min,取上清液,低温下保存。酶活性测定反应体系:2.9 mL  $0.05 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$  磷酸缓冲液、1.0 mL 质量分数为 2% 的  $\text{H}_2\text{O}_2$ 、1.0 mL  $0.05 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$

愈创木酚和 0.1 mL 酶液。用分光光度计在 470 nm 波长下测吸光值,每隔 1 min 读数 1 次。

超氧化物歧化酶活性的测定采用分光光度法,以抑制氮蓝四唑(NBT)光氧化还原一半的酶量定义为一个酶活力单位,用 1 个酶活力单位每克( $U \cdot g^{-1}$ )表示。取 0.5 g 叶片(去叶脉)于预冷的研钵中,加 2 mL 预冷的提取介质( $50 \text{ mmol} \cdot L^{-1}$  pH=7.8 磷酸缓冲液,内含质量分数为 1% 的聚乙烯吡咯烷酮),冰浴下研磨成匀浆,再加入提取介质冲洗研钵,于 4℃ 下  $10500 \text{ r} \cdot \text{min}^{-1}$  离心 20 min,上清液即为 SOD 粗酶液。取 4 支质地相同、透明度好的试管(2 支测定,2 支对照),依次加入显色反应试剂。混匀后,其中 1 支对照管作遮光处理,与其它各管同时置于光照培养箱内反应 10~20 min(温度 25~35℃)。反应终止后,以遮光的对照管作为空白,分别在 560 nm 波长下测定各管的吸光度,计算超氧化物歧化酶活性。

可溶性糖含量的测定采用分光光度法,用  $\text{mmol} \cdot L^{-1}$  表示。称取 1 g 剪碎的叶片,至研钵中,加入 2 mL 质量分数为 10% 的三氯乙酸(TCA)和少量石英砂研磨至匀浆,再加适量三氯乙酸进一步研磨,匀浆在  $4000 \text{ r} \cdot \text{min}^{-1}$  离心 10 min,上清液为样品提取液。取离心的上清液 2 mL(对照加 2 mL 蒸馏水),加入 2 mL 质量分数为 0.6% 的硫代巴比妥酸溶液(TBA),混匀,将混合物于沸水浴上反应 15 min,迅速冷却再离心,取上清液测定 450 nm 波长下的消光度,计算可溶性糖含量。

## 2 结果与分析

### 2.1 不同 pH 值模拟酸雨对棉花种子发芽的影响

5 个不同颜色棉花品种用不同 pH 值的模拟酸雨处理与对照比较,其种子发芽势均高于各自的对照。但随着时间的推移,很快处理组有的棉花幼苗逐渐枯死,发芽率明显低于各自的对照,而且发芽率明显随着模拟酸雨 pH 值的降低而降低。由表 1 结果说明模拟酸雨对 5 个不同品种的种子萌发有一定的促进作用,但对棉花幼苗的正常生长发育有较明显的抑制作用,而且 5 个品种之间的耐酸能力也存在着差异。总体上 2 个天然彩色棉的发芽势、发芽率比 3 个白棉花高,这可能与不同颜色棉花品种控制的基因不同有关<sup>[27-28]</sup>。浙彩棉 2 号是棕色棉花品种,控制棕色纤维色素的基因  $Lc_2$  为单基因控制,表现为不完全显性;浙

彩棉 3 号是绿色棉花品种,控制绿色纤维色素的基因  $Lg$  为由一对不完全显性主效基因控制,并受若干微效基因修饰,有关不同颜色的棉花品种的抗逆性与控制基因有关,有待于进一步研究。

表 1 不同 pH 值模拟酸雨对棉花种子发芽势、发芽率的影响

Table 1 Effects of different pH simulated acid rain on the germination energy, percentage germination of cotton seeds

品 种	处理模拟酸雨 pH 值	发芽势 /%	发芽率 /%
浙彩棉 2 号	2.5	95.00	25.00
	3.5	94.67	31.67
	4.5	96.00	47.33
	5.5	93.33	66.67
	CK	91.67	93.33
浙彩棉 3 号	2.5	88.33	22.67
	3.5	85.67	34.00
	4.5	86.33	48.33
	5.5	84.00	61.67
	CK	82.00	85.00
泗棉 3 号	2.5	82.33	19.00
	3.5	86.67	27.33
	4.5	85.00	42.00
	5.5	81.67	50.00
	CK	75.00	81.67
湘杂棉 2 号	2.5	88.33	16.00
	3.5	85.00	31.33
	4.5	84.33	40.67
	5.5	82.67	51.00
	CK	77.00	78.33
慈抗杂 3 号	2.5	80.67	17.00
	3.5	86.33	21.67
	4.5	85.00	36.67
	5.5	87.67	49.33
	CK	73.33	78.33

### 2.2 不同 pH 值模拟酸雨对棉花幼苗 POD 活性的影响

POD 是活性氧胁迫下植物体内有毒物质  $O_2^-$  和  $H_2O_2$  的清除剂,可防止细胞内过量自由基对生物大分子与质膜的破坏,与生物体的胁迫状态密切相关。POD 也可在逆境或衰老后期表达为伤害效应,即参与活性氧生成,引发膜脂过氧化,是植株衰老到一定阶段的产物,抑或作为一种衰老指标<sup>[29]</sup>。图 1 结果显示,除浙彩棉 2 号外,其余 4 个品种随着模拟酸雨 pH 值的降低,POD 活性变化呈单峰曲线,基本上在 pH5.5 处出现一个低谷。其中,浙彩棉 3 号、泗棉 3 号、慈抗杂 3 号均在 pH4.5 处出现一个峰值,湘杂棉 2 号在 pH3.5 处出现峰值。

从总体上看, POD 含量值在 CK、pH5.5、pH4.5、pH3.5、pH2.5 等区间中, 浙彩棉 2 号和湘杂棉 2 号呈先下降再上升的趋势, 而浙彩棉 3 号、泗棉 3 号、慈抗杂 3 号呈先下降再上升, 然后再下降再上升的趋势, 但 5 个不同品种总的趋势呈上升的趋势, 特别是在 pH2.5 模拟酸雨处理的 5 个不同品种, 其幼苗叶片中的 POD 活性均高于各自对照, 依次分别为对照的 1.25、1.22、1.58、1.70、1.15 倍。幼苗叶片中 POD 活性的升高, 这可能是由于存活的棉花幼苗经历半个月的模拟酸

雨胁迫, 其体内协调机制作用的结果, 使其清除  $O_2^-$  和  $H_2O_2$  的活性氧能力明显提高, 抗逆性增强。过氧化物酶 POD 和超氧化物歧化酶 SOD 是植物体内两种重要的保护酶, 当植物处于逆境胁迫条件时, POD、SOD 等保护酶通过协调作用机制能够有效地清除  $O^-$ 、 $OH^-$ 、 $H_2O_2$  等自由基, 防御膜过氧化, 维持植物体内的平衡, 使细胞膜系统免受伤害。POD 活性变化的规律在一定程度上表征植物修复进程。

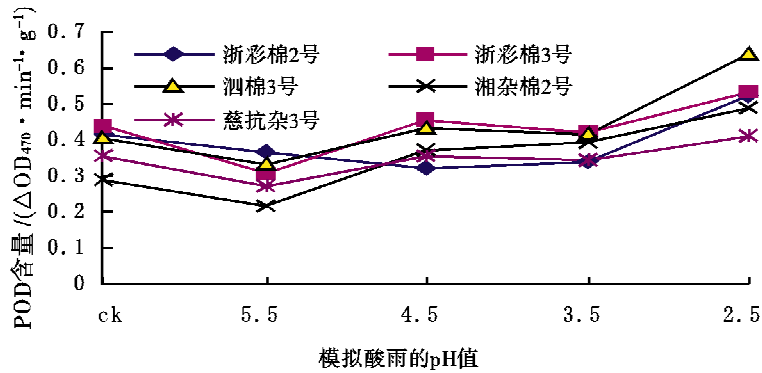


图 1 不同 pH 值模拟酸雨对棉花幼苗 POD 活性的影响

Fig. 1 The effect of different pH simulated acid rain on the levels of POD of cotton seedling

2.3 不同 pH 值模拟酸雨对棉花幼苗 SOD 活性的影响

超氧化物歧化酶 SOD 是需氧生物中普遍存在的一种含金属酶, 能够保护细胞膜系统使其不被自由基的伤害, 其活性与植物抗性密切相关。图 2 表明 SOD 活性变化和 POD 相似, 除浙彩棉 3 号 SOD 活性变化呈明显的双峰曲线外, 其余 4 个棉花品种幼苗叶片中的 SOD 活性变化总体上也随着模拟酸雨 pH 值的降低, 表现为先升后降的明显趋势, 呈单峰曲线。这与严重玲等<sup>[30]</sup>对小麦的研究以及齐泽民等<sup>[31]</sup>对药用木本植物杜仲研究的 SOD、POD 活性在不同酸度酸雨胁迫下, 呈单峰曲线型变化的观点基本一致。浙彩棉 3 号的 SOD 活性变化这种明显呈双峰曲线, 是否与控制绿色纤维的 *Lg* 基因有关, 还待进一步研究。

由图 2 可知, 从 pH4.5 到 pH2.5, SOD 活性随着 pH 值下降而下降的趋势非常明显。特别是 pH2.5 模拟酸雨处理的 5 个不同颜色棉花品种, 其幼苗叶片的 SOD 活性与各自对照比较, 依次分别降低了 25.88%、15.80%、26.32%、67.27% 和 67.58%, 这与刘燕云等<sup>[32]</sup>研究的结果基本一致。这可能是由于随着模拟酸雨 pH 的下降, 当其酸度到达一定程度时, 棉花幼苗的细胞发生了实质损伤, 其酶活性不

可逆降低<sup>[29]</sup>。

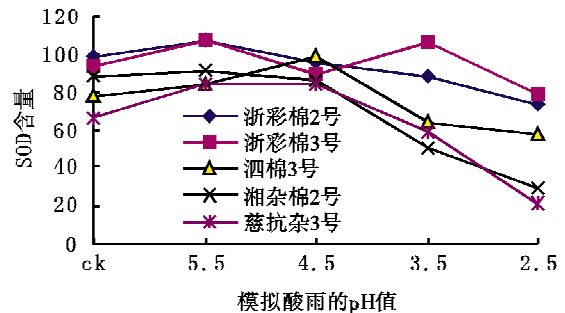


图 2 不同 pH 值模拟酸雨对棉花幼苗 SOD 活性的影响

Fig. 2 The effect of different pH simulated acid rain on the levels of SOD of cotton seedling

2.4 不同 pH 值模拟酸雨对棉花幼苗可溶性糖含量的影响

可溶性糖是植物细胞内一种重要的渗透调节物质, 其含量的多少是植物体内碳水化合物代谢的重要标志, 植物受逆境胁迫后其含量会增加<sup>[25,33-34]</sup>。图 3 结果表明, 5 个不同颜色棉花品种除浙彩棉 3 号可溶性糖含量变化曲线呈双峰曲线外, 其它 4 个棉花品种均呈单峰曲线。同样, 浙彩棉 3 号可溶性糖含量变化这种明显呈双峰曲线, 是否与控制绿色纤维的 *Lg* 基因有关<sup>[27-28]</sup>, 也有待进一步研究。

5 个不同颜色棉花品种经 pH2.5 模拟酸雨处理后, 浙彩棉 2 号、浙彩棉 3 号、湘杂棉 2 号可溶性

糖含量与对照相比有所增加,分别比其对照升高了 20.35%、25.10%、25.23%,说明棉花幼苗在受模拟酸雨的胁迫后,可溶性糖含量有所增加而泗棉 3 号和慈抗杂 3 号的可溶性糖含量与对照相比有所下降,分别比其对照下降了 18.20%、17.75%。这可能是由于泗棉 3 号和慈抗杂 3 号的可溶性糖含量在起始点(对照)处本来就高所致。但从总的趋势来看,棉花幼苗在受一定模拟酸雨胁迫后,叶片中可溶性糖含量有所增加,增强了其对模拟酸雨胁迫的抵抗能力。

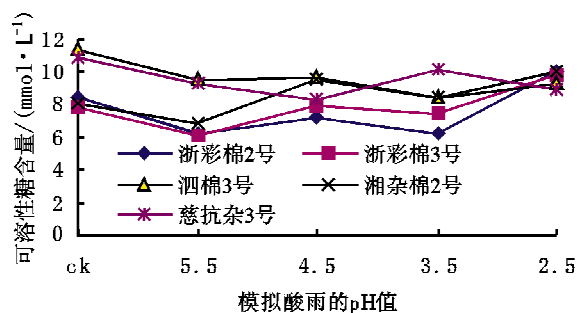


图3 不同 pH 值模拟酸雨对棉花幼苗可溶性糖含量的影响  
Fig. 3 The effect of different pH values simulated acid rain on soluble sugars content of cotton seedling

### 3 讨论

**3.1** 本研究分析结果表明,不同 pH 值的模拟酸雨对浙彩棉 2 号、浙彩棉 3 号、泗棉 3 号、湘杂棉 2 号、慈抗杂 3 号等 5 个不同颜色棉花品种的发芽势、发芽率均有一定的影响。5 个不同颜色棉花品种的发芽势均高于各自的对照,但其发芽率均明显比各自对照低,且明显随着模拟酸雨酸性的增强而降低,特别是酸性较强的模拟酸雨(pH3.5 和 pH2.5)处理过的棉花种子,其发芽率更低,仅有 16%到 34%不等。这说明适度短暂的模拟酸雨处理可能对棉花种子发芽有一定的促进作用,长期的模拟酸雨胁迫对棉花幼苗的正常生长、发育有抑制作用,尤其是低 pH 值模拟酸雨的抑制作用尤为明显。

**3.2** 过氧化物酶 POD 和超氧化物歧化酶 SOD 是植物体内两种重要的保护酶,当植物处于逆境胁迫条件时,POD、SOD 等保护酶通过协调作用机制能够有效地清除  $O^{\cdot-}$ 、 $OH^{\cdot}$ 、 $H_2O_2$  等自由基,防御膜过氧化,维持植物体内的平衡,使细胞膜系统免受伤害<sup>[35]</sup>。POD 活性变化的规律在一定程度上表征植物修复进程。本研究中的 5 个不同颜色棉花品种幼苗的 POD 活性,从 CK 到 pH2.5,呈现一定的先降后升趋势,最终略高于 CK,这表明种子受酸雨胁迫后,应激修复启动,伤害在一定

程度上缓和,导致 POD 活性随之下降,但当种子本身积累过多  $H_2O_2$  时,POD 活性上升,又开始了新修复过程,缓解伤害,并逐渐恢复到正常水平<sup>[26]</sup>。SOD 活性变化的规律随着模拟酸雨 pH 值的降低呈现先升后降的趋势,表明模拟酸雨对棉花幼苗的细胞发生了实质损伤,其酶活性不可逆下降。总之,5 个不同颜色棉花品种的 POD 和 SOD 活性的变化趋势不尽一致,用 pH2.5 模拟酸雨处理的棉花幼苗,其幼苗叶片中的 POD 活性均高于各自对照,依次分别达对照的 1.25、1.22、1.58、1.70、1.15 倍,而幼苗叶片中的 SOD 活性均比对照低,依次分别为各自对照的 74.12%、84.20%、73.68%、32.73%、32.42%。这可能是由于模拟酸雨 pH 值的下降到一定程度,细胞发生实质损伤,其酶活性不可逆降低,具体的机理及动态变化过程有待今后进一步深入研究。植物体内 POD、SOD 等保护酶活性高,则表明其抗逆性强,有利于植物对逆境胁迫的抵御。

**3.3** 可溶性糖是植物细胞内的一种重要渗透调节物质,它能够增加胞内溶质浓度,减少逆境胁迫对细胞的伤害。大量研究表明,植物受干旱、高温、低温、酸等逆境胁迫时可溶性糖含量会增加,而且胁迫下可溶性糖含量与植物的抗逆能力存在一定的相关性<sup>[36]</sup>。当处于相同的逆境胁迫条件时,抗性强的植物体内可溶性糖含量的相对变化要大。本研究表明,棉花幼苗的可溶性糖含量受一定的模拟酸雨胁迫后,叶片中可溶性糖含量有所增加,反映了其对模拟酸雨胁迫的抵抗能力。但 5 个不同颜色棉花品种幼苗叶片中可溶性糖含量的相对变化不尽相同,说明这 5 个不同颜色棉花品种之间的抗模拟酸雨胁迫的能力存在一定的差异。

**3.4** 5 个不同颜色棉花品种除浙彩棉 3 号(絮绿色)的 SOD 活性、可溶性糖含量变化曲线呈双峰曲线外(浙彩棉 3 号的 POD 活性变化曲线亦呈双峰曲线),其它 4 个棉花品种均呈单峰曲线,这可能与不同颜色棉花品种控制的基因有关。浙彩棉 2 号是棕色纤维色素的棉花品种,控制棕色纤维的基因  $Lc_2$  为单基因控制,表现为不完全显性,它定位于棉花基因组 D 亚组第 18 染色体上。浙彩棉 3 号是绿色纤维色素的棉花品种,控制绿色纤维的基因  $Lg$  为由一对不完全显性主效基因控制,并受若干微效基因基因修饰,它定位于棉花基因组 D 亚组第 15 染色体上<sup>[27-28]</sup>。有关不同颜色的棉花品种的曲线变化与控制基因有关,还有待于进一步研究。综上所述酸雨对不同颜色棉花种

子萌发与幼苗生理特性会造成一定的影响和危害。

#### 参考文献:

- [1] 李铁锋. 环境地学概论[M]. 北京: 中国环境科学出版社, 1996: 56-57.
- [2] 李文华, 杨修. 环境与发展[M]. 北京: 科学技术文献出版社, 1984: 80-83.
- [3] 代伟, 饶应福. 我国酸雨危害及防治对策[J]. 矿山环保, 2002, 43(1): 12-15.
- [4] 齐文启, 席俊清, 汪志国, 等. 酸雨研究的现状和发展趋势[J]. 中国环境监测, 2002, 18(1): 6-11.
- [5] 田贺忠, 陆永棋, 郝吉明. 中国酸雨和二氧化硫污染控制历程及进展[J]. 中国电力, 2001, 34(1): 51-57.
- [6] 喻真英, 何红兵. 试论酸雨问题及控制对策[J]. 湖南环境生物职业技术学院学报, 2004, 10(2): 116-118.
- [7] 傅柳松, 吴方正. 酸雨对植物生长的影响[J]. 环境污染与防治, 1993, 15(1): 22-25.
- [8] 张延毅, 郭德惠. 模拟酸雨对青菜和莴苣生长的影响[J]. 中国环境科学, 1986, 6(1): 31-36.
- [9] LEE J J, Neely G E, Perrigan S C, et al. Effect of simulated sulfuric acid rain on yield, Growth and foliar injury of several crops[J]. Environmental and Experimental Botany, 1981, 21(2): 171-185.
- [10] 李荣生, 胡哲生, 时忠杰. 模拟酸雨对蔬菜种子发芽的影响[J]. 农业环境保护, 2001, 20(5): 355-356, 365.
- [11] 聂早荣, 陈思果, 温玉辉, 等. 模拟酸雨对花生种子萌芽及幼苗生长的影响[J]. 中国油料作物学报, 2003, 25(1): 34-36.
- [12] PARK J B, Lee S. Growth responses of Arabidopsis thaliana exposed to simulated acid rain[J]. Journal of the Korean Society for Horticultural Science, 1999, 40(2): 146-151.
- [13] 杨本宏. 我国酸雨危害现状及防治对策[J]. 合肥联合大学学报, 2000, 6(2): 102-106.
- [14] 邢廷铤. 酸雨对农业生产的影响及对策[J]. 土壤与环境, 2002, 11(1): 98-100.
- [15] 孔繁翔, 桑伟莲, 蒋新, 等. 铝对植物毒害及植物抗铝作用机理[J]. 生态学报, 2000, 20(5): 855-862.
- [16] KOCHIAN I. V. Cellular mechanism of aluminum toxicity and resistance in plants[J]. Annual Reviews Plant Physiol Plant Mol Biol, 1995, 46: 237-260.
- [17] DELHAIZE E, Ryan P R. Update on environmental stress; aluminum toxicity and tolerance in plants[J]. Plant Physio, 1995, 107(2): 315-312.
- [18] 牟树森, 杨学春. 酸雨危害与土壤酸化问题的调查研究[J]. 西南农业大学学报, 1988, 10(1): 12-19.
- [19] 邱新棉, 俞碧霞, 包立生, 等. 优质天然彩色棉新品种——浙彩棉 2 号[J]. 中国棉花, 2006, 33(4): 20.
- [20] 邱新棉, 俞碧霞, 张吕望. 泗棉 3 号在浙江省的表现与高产栽培技术[J]. 中国棉花, 1996, 23(7): 15-17.
- [21] 李育强, 曾昭云, 金林, 等. 湘杂棉 2 号介绍[J]. 中国棉花, 1997, 24(10): 28-30.
- [22] 黄一青, 曹光第, 金珠群, 等. 慈抗杂 3 号[J]. 中国棉花, 2006, 33(2): 18-19.
- [23] 邱新棉, 方华. 彩色棉与白棉花棉子发芽受温度的影响[J]. 中国棉花, 2000, 27(8): 8-10.
- [24] 张萍华, 闵航, 申秀英, 等. 模拟酸雨对白术根际微生物的影响[J]. 浙江师范大学学报, 2005, 28(3): 309-312.
- [25] 郝再彬, 苍晶, 徐仲. 植物生理实验[M]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学出版社, 2004: 106-116.
- [26] 张志良. 植物生理学实验指导[M]. 北京: 高等教育出版社, 2002: 154-155.
- [27] 邱新棉, 周文龙, 李茂松, 等. 天然彩色棉纤维色素的遗传基础形成及湿处理色素变化规律的研究[J]. 中国农业科学, 2003, 35(6): 611-615.
- [28] 邱新棉. 天然彩色棉研究进展及发展前景[J]. 棉花学报, 2004, 16(4): 249-254.
- [29] 王丽红, 蔡丽单, 曾庆玲, 等. 酸雨对 3 类不同抗性种子萌发过程的影响 VI—酸雨胁迫对 3 类种子萌发 POD 活性的影响[J]. 农业环境科学学报, 2005, 24(3): 442-445.
- [30] 严重玲, 洪业汤, 王世杰, 等. 稀土元素对酸雨胁迫小麦活性氧清除系统响应的作用[J]. 作物学报, 1999, 25(4): 504-507.
- [31] 齐泽民, 钟章成, 邓君, 等. 模拟酸雨对杜仲叶膜脂过氧化及氮代谢的影响[J]. 西南师范大学学报, 2001, 26(1): 38-44.
- [32] 刘燕云, 曹洪法. 酸雨和 SO<sub>2</sub> 作用下 SOD 酶活性与菠菜叶片损伤相关性的研究[J]. 应用生态学报, 1993, 4(2): 223-225.
- [33] 刘鹏, 杨玉爱. 油菜在低硼胁迫下生理反应的研究进展[J]. 中国油料作物学报, 1999, 21(1): 74-78.
- [34] POSSINGHAM J V, Spemer D. Manganese as a functional component of chloroplasts[J]. Aust J Biol Science, 1962, 15(1): 58-68.
- [35] 刘鹏, 杨玉爱. 铝、硼对大豆叶片膜脂过氧化及体内保护系统的影响[J]. 植物学报, 2000, 42(5): 461-466.
- [36] 王富荣. 植物抗寒指标的种类及其应用[J]. 植物生理学通讯, 1987, (3): 49-55. ●