

# 模拟酸雨对农作物种子萌发和幼苗生长的影响

彭彩霞<sup>2</sup> 彭长连<sup>1\*</sup> 林桂珠<sup>1</sup> 温达志<sup>1</sup>

(1. 中国科学院华南植物研究所, 广东广州 510450; 2. 广州长兴中学, 广东广州 510450)

**摘要:** 研究模拟酸雨对 3 种农作物种子萌发和幼苗生长的影响。结果表明: 不同 pH 值 (2.5, 4.5, 5.6) 的模拟酸雨对水稻和小麦的种子萌发没有影响, 但明显抑制了玉米种子萌发。模拟酸雨条件下, 3 种农作物幼苗的生长受到抑制, 生物量减少, 叶绿素和类胡萝卜素含量下降, 而叶绿素 a/b 的变化却不明显。pH4.5 和 5.6 的模拟酸雨对玉米 Fv/Fm、光化学猝灭 (qP) 的影响较小, 非光化学猝灭 (NPQ) 却明显下降, 表明酸雨伤害了植物 PSII 天线对激发能的非辐射耗散能力。

**关键词:** 模拟酸雨; 农作物; 种子萌发; 幼苗生长

中图分类号: Q945.11

文献标识码: A

文章编号: 1005-3395(2003)04-0400-05

## Effects of Simulated Acid Rain on Seed Germination and Seedling Growth of Three Crops

PENG Cai-xia<sup>2</sup> PENG Chang-lian<sup>1\*</sup> LIN Gui-zhu<sup>1</sup> WEN Da-zhi<sup>1</sup>

(1. South China Institute of Botany, the Chinese Academy of Sciences, Guangzhou 510650, China;

2. Guangzhou Changxing Middle School, Guangzhou 510650, China)

**Abstract:** The responses of seed germination and seedling growth of rice (*Oryza sativa* cv. Yuezha 223), wheat (*Triticum aestivum* cv. Gaoyun 5) and maize (*Zea mays* cv. Shangyu 2) to simulated acid rain were investigated by dipping seeds into solution of pH2.5, 4.5 and 5.6 made from mixtures of H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> and HNO<sub>3</sub>, and into distilled water (control). Different pH (2.5, 4.5, 5.6) simulated acid rain showed no effect on seed germination of rice and wheat, but significant inhibition effect was found in the germination of maize. Seedling growth of rice, wheat and maize was inhibited by simulated acid rain. Biomass and contents of chlorophyll and carotenoids decreased to some extent in all the three crop species grown under simulated acid rain, whereas no obvious changes in Chl a/b was exhibited in these crops. There was little effect on Fv/Fm and photochemical quenching of chlorophyll fluorescence (qP) in leaves of maize grown at pH 4.5 or 5.6 of simulated acid rain, but nonphotochemical quenching of chlorophyll fluorescence (NPQ) decreased markedly, revealing that non-radiation energy dissipation in the antenna of photosystem II was possibly damaged under acid rain condition.

**Key words:** Simulated rain acid; Crop; Seed germination; Seedling growth

随着经济的高速发展, 人类对煤、石油等化石燃料的需求日益增加, 化石燃料在燃烧过程中释放的 SO<sub>2</sub>、NO<sub>x</sub> 等废气严重影响了大气的环境质量。我国许多城市和地区普遍出现酸雨现象, 酸雨地区扩大, 频率提高, 雨水 pH 降低。经济活力最高、工业化

速度最快的广东省受酸雨的影响尤为严重。据广州市环境监测中心站资料统计 (广州市环境质量报告书 1985-2002, 广州市环境监测中心站, 未发表数据), 1985-2002 年广东省大气降水年平均 pH 值在 3.4-4.5 间的重酸雨区面积占全省总面积的 17.5%,

收稿日期: 2003-06-09

接受日期: 2003-09-04

基金项目: 广东省环境保护局科技开发项目(2000-10); 佛山市科学技术局科技发展专项资金(0102007A)资助

\* 通讯作者 Corresponding author

全省约 80% 的地区不同程度地受到酸雨的影响。酸雨的出现不但危害到水体、土壤、森林等生态系统,使土壤酸化,森林凋亡,而且使农作物减产,经济受重大损失。全省共有 17 个城市被国家划为酸雨控制区,占全省面积的 63%,“九五”期间全省酸雨频率平均在 35%–51%。据测算我省每年因酸雨造成的经济损失约 40 亿左右<sup>[1]</sup>。我国自 80 年代中期开始有报道酸雨和模拟酸雨对农作物的影响<sup>[2–4]</sup>,但系统研究不同农作物对酸雨的响应及机理方面的工作还不多,本文比较了水稻、玉米、小麦等农作物的种子萌发和幼苗生长对模拟酸雨的响应,初步探讨酸雨伤害光合机构的部分机理,为筛选对酸雨有高抗性的农作物品种奠定理论基础。

## 1 材料和方法

**植物材料** 农作物分别选用水稻 (*Oryza sativa*) 粤杂 223, 小麦 (*Triticum aestivum*) 高原 5 号(属抗旱品种,由山东农业大学提供)和玉米 (*Zea mays*) 尚玉 2 号种子。水稻和玉米种子都由中国科学院华南植物研究所提供。

**模拟酸雨的配制及处理** 根据 1997 年广州地区酸雨降水中( $\text{SO}_4^{2-}$ ) / ( $\text{NO}_3^-$ )的比例为 2.74 (广州市环境质量报告书, 1997, 广州市环境监测中心站, 未发表数据), 以蒸馏水稀释摩尔浓度 2.75: 1 混合的浓  $\text{H}_2\text{SO}_4$  和浓  $\text{HNO}_3$  液, 得到 pH 为 2.5, 4.5, 5.6 的模拟酸雨溶液, 作物种子在蒸馏水中吸胀后, 分别放置于含不同 pH 的模拟酸雨溶液和对照蒸馏水的培养皿中进行种子萌发和幼苗生长试验, 温度为 25°C, 光照强度为  $40 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ , 每个处理 5 个重复。

**叶绿素含量的测定** 称 0.1 g 鲜重的叶片, 以 80% 丙酮浸提, 按林植芳等的方法<sup>[5]</sup>用 UV-V 分光光度计(Lambda 25, Perkin Elmer Inc. USA) 测定叶绿素和类胡萝卜素的含量。

**叶绿素荧光的测定** 根据彭长连等<sup>[6]</sup>的方法, 用脉冲调制荧光仪(Pulse Modulation Fluorometer, PAM, Walz, Germany) 测定叶片的叶绿素荧光诱导曲线。原初荧光( $F_0$ )是用暗适应 15 min 的叶片在弱调制测量光( $0.05 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ ) 诱导下产生的, 最大荧光( $F_m$ )则是在  $F_0$  之后用强饱和脉冲( $3000 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ ) 激发。当荧光从最大值降低到接近  $F_0$  水平时, 用光强为  $300 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$  的光化光诱导荧光动力学。根据 Schreiber 等<sup>[7]</sup>、Genty 等<sup>[8]</sup>和 Foyer 等<sup>[9]</sup>的方法计算不同的荧光参数:  $F_v/F_m$ ,  $qP$

和 NPQ。

## 2 结果和分析

### 2.1 酸雨对主要农作物种子萌发的影响

不同农作物种子萌发对模拟酸雨的响应差异较大(表 1), 水稻种子的发芽率几乎不受酸雨的影响, 对旱生作物小麦的影响也较小, 但严重抑制了玉米的种子萌发。酸雨的 pH 越低, 玉米种子的萌发率也越低, 当 pH 为 2.5 时, 其萌发率只有对照的 70%。

表 1 模拟酸雨对 3 种农作物种子萌发的影响

Table 1 Effect of simulated acid rain on seed germination of three crops

作物种类 Crop species	萌发率 Germination rate (%)			
	pH 2.5	pH 4.5	pH 5.6	Control
水稻 <i>Oryza sativa</i>	99.20	99.20	100	100
小麦 <i>Triticum aestivum</i>	94.60	97.17	99.35	100
玉米 <i>Zea mays</i>	69.84	76.79	79.37	100

### 2.2 模拟酸雨对农作物幼苗生长的影响

模拟酸雨的 pH 值越低, 对农作物幼苗生长的抑制就越大。pH 为 2.5 时, 水稻、小麦和玉米的胚根生长都被完全抑制, 而胚芽鞘的生长虽然也被抑制, 但在生长的初期(8–10 d) 3 种农作物的幼苗都有一定的生长(图 1)。

当酸雨的 pH 值为 4.5 和 5.6 时, 对生长初期(8–10 d) 水稻胚根的生长有促进作用, 但随后根尖开始凋亡。与对照相比, pH 5.6 的酸雨对水稻胚芽鞘的生长影响不大, 但 pH 4.5 则抑制胚芽鞘的生长(图 1 A, B)。

在实验时间内, pH 为 4.5 和 5.6 的酸雨对小麦胚根的生长一直都具促进作用, 而胚芽鞘的生长与对照没有多大差别, 只是 pH 4.5 对小麦胚芽鞘后期(10–12 d)的生长有一定的抑制作用(图 1 C, D)。

pH 为 4.5 和 5.6 的酸雨对玉米胚根生长的影响不大, 但 pH 4.5 的酸雨 10–12 d 时开始抑制玉米的胚根生长, 但胚芽鞘生长比对照要慢些, 尤其 pH 4.5 对其胚芽鞘生长的抑制效果更为明显(图 1 E, F)。

### 2.3 模拟酸雨对 3 种农作物生物量的影响

不同 pH 值的模拟酸雨溶液对水稻, 玉米和小麦幼苗生物量(鲜重)都有不同程度的影响。处理 12 d 后 3 种农作物的生物量都下降, 酸性越强, 生物量越小(表 2)。

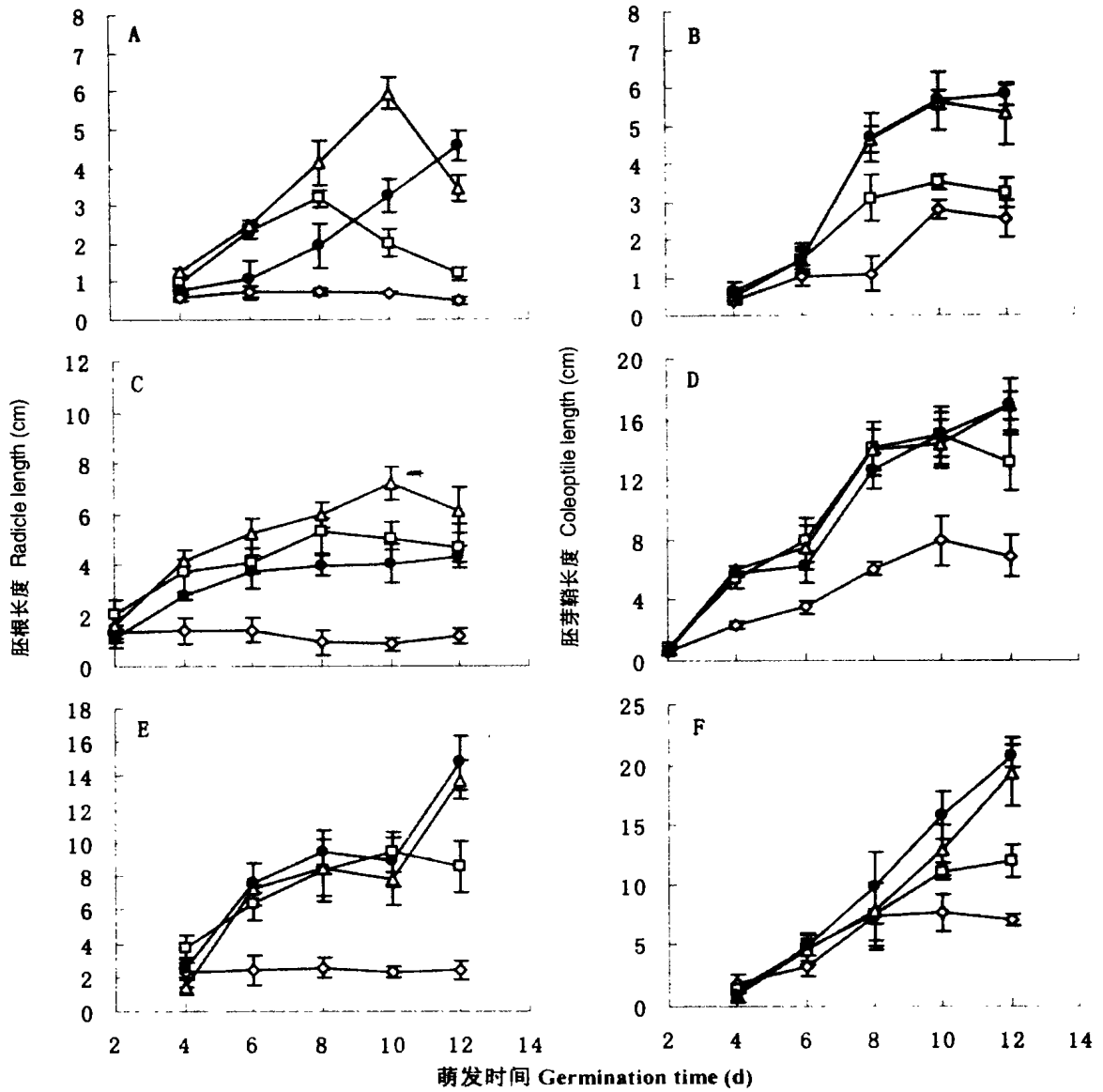


图 1 模拟酸雨对 3 种农作物幼苗生长的影响

Fig. 1 Effect of simulated acid rain on seedling growth of three crops

A,B: 水稻 *Oryza sativa*; C, D: 小麦 *Triticum aestivum*; E, F: 玉米 *Zea mays*

◇ pH 2.5; □ pH 4.5; △ pH 5.6; ● Control

表 2 模拟酸雨处理 12 d 后 3 种农作物幼苗生物量的变化

Table 2 Changes in biomass of crop seedlings grown under simulated acid rain for 12 days

作物种类 Crops	生物量 Biomass (g FW (5 individuals) <sup>-1</sup> )			
	pH 2.5	pH 4.5	pH 5.6	Control
水稻 <i>Oryza sativa</i>	0.18±0.01 (74.11%)	0.23±0.02 (92.51%)	0.24±0.02 (95.53%)	0.25±0.02 (100%)
小麦 <i>Triticum aestivum</i>	0.46±0.02 (70.00%)	0.60±0.08 (91.22%)	0.65±0.05 (99.85%)	0.65±0.04 (100%)
玉米 <i>Zea mays</i>	4.15±0.31 (54.00%)	5.14±0.56 (66.80%)	6.82±0.48 (88.50%)	7.70±0.65 (100%)

括号内为对照的百分数 Data in brackets are percentage of the control (n=5)

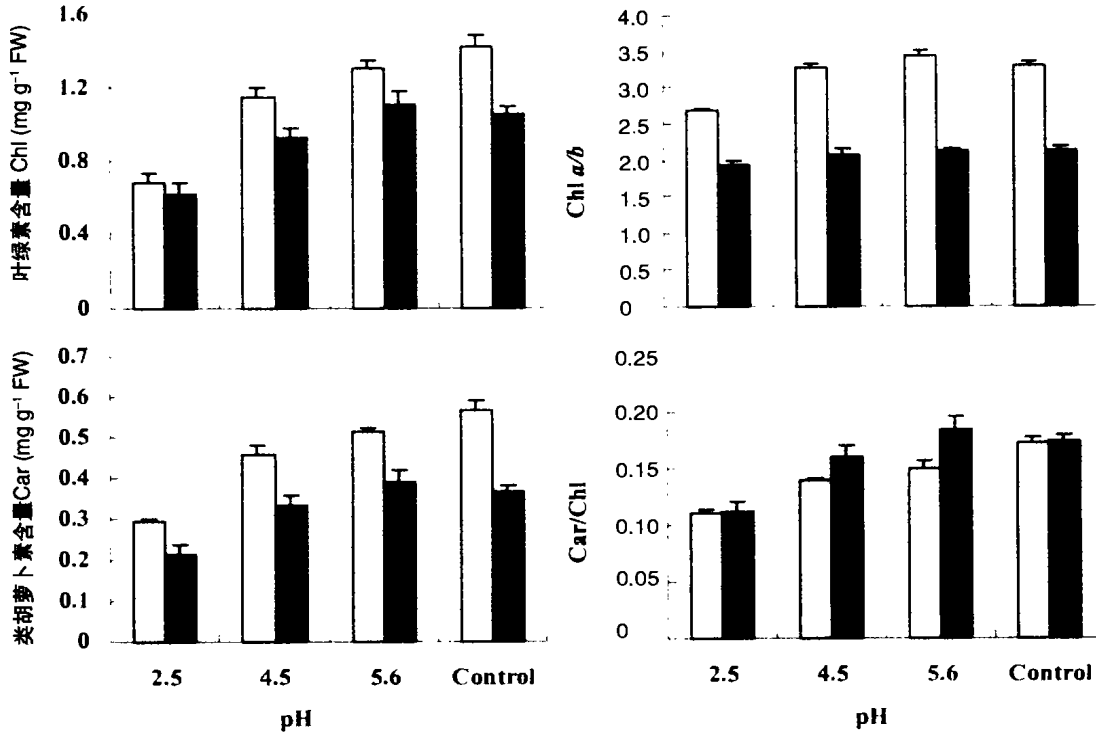


图 2 模拟酸雨处理 12 d 后小麦和玉米叶片光合色素含量的变化

Fig. 2 Changes in photosynthetic pigment content in leaves of maize and wheat grown under simulated acid rain for 12 days

■ 小麦 *Triticum aestivum*; □ 玉米 *Zea mays*

2.4 模拟酸雨对 3 种农作物幼苗光合色素含量的影响

模拟酸雨条件下生长的小麦和玉米的叶绿素合成受到抑制, 酸雨的 pH 值越低受抑制的程度越大(图 2)。处理 12d 后, pH 为 2.5 时小麦叶绿素含量只有对照的 58%, 而玉米仅为对照的 48%, 玉米受影响的程度大于小麦。pH 5.6 的酸雨下小麦叶绿素含量略高于对照。在 pH4.5 和 5.6 的模拟酸雨下生长的小麦和玉米, 其叶绿素 a/b 没有明显的变化, 但当 pH 降至 2.5 时, 叶绿素 a/b 则下降。

类胡萝卜素是植物细胞中一种重要的辅助色素, 在光合作用过程中的主要功能包括过刺激发能的耗散和活性氧的清除, 保护其细胞器免受伤害<sup>[9]</sup>。酸雨条件下, 类胡萝卜素含量的变化与叶绿素的变化趋势一致。类胡萝卜素 / 叶绿素也随酸雨 pH 值的降低而下降(图 2)。在对照或 pH 2.5 的酸雨中生长的小麦和玉米, 两者的类胡萝卜素 / 叶绿素几乎没有差异, 但在 pH 4.5 和 5.6 的酸雨中生长的小麦类胡萝卜素则高于玉米。

2.5 模拟酸雨对农作物叶绿素荧光特性的影响

模拟酸雨使玉米叶片 PSII 原初光化学效率 (Fv/Fm) 稍微下降, 但对光化学猝灭的影响不明显(表 3)。影响最为明显的是非光化学猝灭(NPQ), 在

pH4.5 和 5.6 的酸雨中生长的玉米, 其叶片的 NPQ 较对照分别下降了 20%和 25.6%。说明酸雨损伤了植物的非辐射耗过量光的能力, 使植物更易遭受光抑制和光破坏。

表 3 模拟酸雨处理 12 d 后玉米叶绿素荧光参数的变化

Table 3 Changes in chlorophyll fluorescence parameters in leaves of maize grown under simulated acid rain for 12 days

处理 Treatment	Fv/Fm	qP	NPQ
Control	0.752±0.015	0.355±0.009	1.802±0.031
pH 4.5	0.746±0.008	0.366±0.011	1.436±0.110
pH 5.6	0.733±0.005	0.341±0.012	1.341±0.007

n=5

3 讨论

模拟酸雨对农作物水稻和小麦的种子萌发几乎没有影响, 即使 pH 低至 2.5, 这两种农作物的种子仍可正常萌发, 与前人报道模拟酸雨对小麦种子发芽影响的结果一致<sup>[11]</sup>。然而玉米种子的发芽率却明显受酸雨的抑制, pH 5.6 的模拟酸雨使其发芽率下降了 20%。有研究表明模拟酸雨引起种子透性的变化, 使其离子平衡失调, 破坏了内部正常的生理

效应,致使种子萌发受阻<sup>[12]</sup>。本文结果显示,不同种类的农作物种子发芽率对酸雨的反应存在较大的差别,这可能与其种子本身的特性有关,具体原因有待进一步研究。

随着模拟酸雨 pH 值的降低,3 种农作物的生长受抑制的程度增大,光合色素叶绿素和类胡萝卜素的合成也明显被抑制,但对叶绿素 a/b 比的影响不大,前人的研究表明模拟酸雨使叶片酸化后, Mg<sup>2+</sup> 从叶绿素中失去而形成脱镁叶绿素,从而导致叶绿素的含量下降,另外酸雨也可以降低叶片的抗氧酶活性,使其细胞内的氧化逆境加剧,活性氧增多<sup>[12]</sup>,类胡萝卜素可能因直接参与猝灭活性氧而导致其含量下降。pH2.5 的模拟酸雨严重抑制了 3 种农作物胚根的生长,但对胚芽鞘的影响相对小些,其机理还不清楚,而酸性相对较弱的酸雨(pH4.5 或 5.6) 在小麦种子的萌发和生长初期能明显促进胚根的生长,其原因可能是适度的酸性条件下能促进种子蛋白质和淀粉的水解作用供给胚的生长<sup>[11]</sup>,但种子萌发 10 d 左右,其胚根的生长就开始受到抑制。

模拟酸雨对玉米叶片 Fv/Fm 和 qP 没有明显的影响,但明显抑制了 PSII 重要的光保护作用机制之一的非辐射能量耗散 NPQ 的形成,而 NPQ 的诱导与叶绿体类囊体膜跨膜质子梯度的建立密切相关。强光下, H<sup>+</sup> 跨膜运输进入类囊体腔内,使类囊体腔内外 pH 梯度升高,腔内被酸化,激活了与叶黄素循环相关的酶活性,从而启动了非辐射能量耗散 NPQ 的形成<sup>[13,14]</sup>。我们推测酸雨条件下由于叶片的酸化,类囊体腔外 H<sup>+</sup> 增加,影响了类囊体跨膜 pH 梯度的升高,从而影响 NPQ 的形成, Gilmore 和 Yamasaki<sup>[15]</sup> 发现叶绿体在酸性环境下,其 PSII 的 NPQ 下降。因此我们认为模拟酸雨能抑制 NPQ 的形成,降低了植物光保护的能力,使其更易受光环境因子的伤害,可能是酸雨对植物产生伤害的重要原因之一。

**致谢:** 广州长兴中学学生许德民,程振翔,叶和雨等参与了部分实验,在此表示感谢。

#### 参考文献

- [1] <http://www.sepa.gov.cn/650490891693195264/20030214/1036812.shtml> [EB/OL]
- [2] Liu L G (刘连贵), Cao H F (曹洪法), Xiong Y J (熊严军). A study on effects of simulated acid rain and sulphur dioxide on crops [J]. *Envir Sci* (环境科学), 1996, 17(2):1-19. (in Chinese)
- [3] Zhang L B (张林波), Cao H F (曹洪法), Shen Y W (沈英娃), et al. Effect of acidic deposition on agriculture of Jiangsu, Zhejiang, Anhui, Fujian, Hunan, Hubri and Jiangxi: damage to agricultural ecosystem [J]. *China Envir Sci* (中国环境科学), 1998, 18(1): 12-17. (in Chinese)
- [4] Gu M H (顾明华), Lu S N (陆申年), Li X F (黎晓峰), et al. The effect of simulated acid precipitation and acid fog on the physiology and growth of rice [J]. *J Guangxi Agri Univ* (广西农业大学学报), 1994, 13(3):217-222. (in Chinese)
- [5] Lin Z F (林植芳), Li S S (李双顺), Lin G Z (林桂珠), et al. Superoxide dismutase activity and lipid peroxidation in relation to senescence of rice leaves [J]. *Acta Bot Sin* (植物学报), 1984, 26: 605-615. (in Chinese)
- [6] Peng C L (彭长连), Lin Z F (林植芳), Lin G Z (林桂珠), et al. Effect of tourism and industrialization on the atmospheric quality of subtropical forests and on chlorophyll fluorescence of two species of woody plants [J]. *Acta Bot Sin* (植物学报), 1998, 40: 270-276. (in Chinese)
- [7] Schreiber U, Schliwa U, Bilger W. Continuous recording of photochemical and nonphotochemical chlorophyll fluorescence quenching with a new type of modulation fluorometer [J]. *Photosyn Res*, 1986, 10:51-62.
- [8] Genty B, Briants J M, Baker N R. The relationship between the quantum yield of photosynthetic electron transport and quenching of chlorophyll fluorescence [J]. *Biochim Biophys Acta*, 1989, 990: 87-92.
- [9] Foyer C H, Furbank R, Harbinson J. The mechanisms contributing to photosynthetic control of electron transport carbon assimilation in leaves [J]. *Photosyn Res*, 1990, 25:83-100.
- [10] Croce R, Weiss S, Bassi R. Carotenoid-binding sites of the major light-harvesting complex II of higher plants [J]. *J Biol Chem*, 1999, 274(42):29613-29623.
- [11] Chen Y J (陈永吉), Chen S Y (陈穗云), Zhang J H (张晋海). Effect of simulated acid rain on seed germination and seedling development in wheat and maize [J]. *Shandong Envir* (山东环境), 1997, 78(4):13-15. (in Chinese)
- [12] Yan CL (严重玲), Li RZ (李瑞智), Zhong ZC (钟章成). Effect of simulated acid rain on ecophysiological characteristics of mung bean and maize [J]. *Chin J Appl Ecol* (应用生态学报), 1995, 6 (supp.):124-131. (in Chinese)
- [13] Horton P, Ruban A V, Walters R G. Regulation of light harvesting in green plants: Indication by non-photochemical-quenching of chlorophyll fluorescence [J]. *Plant Physiol*, 1994, 106:415-420.
- [14] Gilmore A M. Mechanistic aspects of xanthophyll cycle-dependent photoprotection in higher plant and plant chloroplasts and leaves [J]. *Physiol Plant*, 1997, 99:197-209.
- [15] Gilmore A M, Yamasaki H. 9-Aminoacridine and dibucaine exhibit competitive interactions and complicated inhibitory effects that measurements of delta-pH and xanthophyll cycle-dependent photosystem II energy dissipation [J]. *Photosynth Res*, 1998, 57(2):159-174.