

酸性 pH 条件对烤烟生理指标及叶片组织结构的影响

朱英华^{1*}, 屠乃美^{2,3}, 肖汉乾³, 张 国⁴

(1.安徽农业大学农学院,合肥 230036;2.湖南农业大学农学院,长沙 410128;3.中国烟草中南农业试验站,长沙 410128;
4.安徽皖南烟叶有限责任公司,安徽 宣城 242000)

摘要:以烤烟云烟 85 为供试材料,采用土培盆栽的方法研究了不同 pH 对烤烟叶片生理生化指标及叶片组织结构的影响。结果表明,pH 3.0 处理烤烟叶片的 SOD 活性、栅栏组织/叶厚、栅栏组织/海绵组织和脯氨酸含量随 pH 的降低而升高,而 pH<3.0 处理却随 pH 降低而降低,其变化趋势呈倒“V”型,pH3.0 是其变化的转折点。pH≤3.0 处理烤烟叶片的 POD 活性显著高于对照及 pH 3.5 处理,而 pH≤3.0 处理烤烟叶片的海绵组织厚度则显著低于对照及 pH 3.5 处理。烤烟叶片的栅栏组织厚度随 pH 降低先升高后降低,在 pH 3.5 达到最大值。烤烟叶片可溶性蛋白含量随 pH 降低而逐渐升高,pH≤3.0 处理显著高于对照及 pH 4.0 处理,而可溶性糖含量和烤烟叶片厚度则随 pH 的降低而显著降低。pH 3.0 可能是酸性 pH 对烤烟产生危害的阈值。酸性 pH 对烤烟海绵组织/叶片厚度比值无显著影响。NR 对酸性 pH 条件反应非常敏感,pH≤4.5 处理烤烟叶片的 NR 活性显著低于对照。

关键词:烤烟;酸性条件;pH;生理指标;组织结构

中图分类号:S572.01

文章编号:1007-5119(2011)04-0046-05

DOI:10.3969/j.issn.1007-5119.2011.04.011

Effect of Acid pH Condition on Biochemical Physiological Indices and Tissue Structure of Flue-cured Tobacco

ZHU Yinghua^{1*}, TU Naimei^{2,3}, XIAO Hanqian³, ZHANG Guo⁴

(1. College of Agronomy, Anhui Agricultural University, Hefei 230036, China; 2. College of Agronomy, Hunan Agricultural University, Changsha 410128, China; 3. Tobacco Agricultural Experiment Station of Central-south China, Changsha 410128, China; 4. Tobacco Leaf Company of Wannan, Xuancheng, Anhui 242000, China)

Abstract: A pot experiment was carried out to evaluate the effects of different pH value on physiological indices and tissue structure of flue-cured tobacco Yunyan 85. The results showed SOD activities, palisade tissue/leaf tissue value, palisade tissue/sponge tissue value and proline contents in pH≥3.0 treatments increased with pH value decrease. Further decrease in pH value resulted in a decrease in these parameters. The change trend was an inverted “V”-type and pH 3.0 was their turning point. POD activities in pH≤3.0 treatments were significantly higher than the control and pH≥3.5 treatments, but sponge tissue thickness in pH≤3.0 treatments were significantly lower than the control and pH≥3.5 treatments. Palisade tissue thickness increased from pH 5.6 to pH 3.5 and further decrease in acid pH resulted in significant decrease in the said parameters. Soluble protein contents pH≤3.0 treatments were significantly higher than the control and pH≥4.0 treatments, but they had no significant difference with pH 3.5 treatment. Soluble sugar and leaf thickness were significantly decreased with pH value decrease. pH 3.0 could be the hazard threshold for flue-cured tobacco. Acid pH condition had no significant difference on the ratio of sponge tissue thickness/leaf thickness among the treatments. NR was very sensitive to acid pH condition, and NR activities in pH≤4.5 treatment were significantly lower than the control.

Keywords: flue-cured tobacco; acid condition; pH; biochemical indices; tissue structure

进入 20 世纪 90 年代以来,我国一些经济发达、交通便利的植烟老区烟叶生产开始出现萎缩趋势,出现“北烟南移”的现象,鲁、豫、皖种烟面积日趋减少,而云南、贵州等南方诸省逐渐成为产烟大

基金项目:国家烟草专卖局和湖南省烟草专卖局资助项目“湖南省基本烟田适宜性评价和可持续利用研究”(05-02)

作者简介:朱英华,女,博士,主要从事农业可持续发展研究。E-mail:zhuyinghua1973@126.com。*通信作者,E-mail:tnm505@163.com

收稿日期:2010-02-03

修回日期:2010-07-12

省^[1]。而我国酸雨区主要位于长江以南，以西南、华南较为突出，同时酸雨面积不断扩大，并向长江以北蔓延^[2]。硫酸型酸雨对大田作物、蔬菜以及木本植物危害屡见报道^[3-5]，但烟草方面仅在细胞透性、化学成分及产量方面有初步研究^[6]，烤烟对酸性 pH 的内在响应机理研究甚少。本研究在梯度酸性 pH 试验中通过测定保护酶 (SOD、POD) 和 NR 活性及脯氨酸、可溶性糖、可溶性蛋白含量来探讨烤烟对酸性 pH 应激性反应的内在机理，并通过烤烟叶片组织结构的变化来判断酸性 pH 对烟叶品质造成的潜在伤害，为烟草生产布局及种植区划提供参考。

1 材料与方法

1.1 试验设计

本试验于 2007 年在湖南农业大学烟草基地进行，供试烤烟品种为云烟 85，采用漂浮育苗，待烟苗长至 7 叶 1 心时，选取生长一致的健壮幼苗采用土培盆栽法移栽。酸性 pH 条件按湖南天然降雨中化学组分： K_2SO_4 0.75 mg/L、 $(NH_4)_2SO_4$ 8.9 mg/L、 $MgSO_4$ 0.88 mg/L、 $CaCl_2 \cdot 2H_2O$ 1.47 mg/L、 $CaCO_3$ 8.6 mg/L 和 Na_2SO_4 0.69 mg/L，用硫酸根和硝酸根离子（其物质的量比为 $SO_4^{2-}:NO_3^{-1}=7.5:1$ ）来调节所配溶液的 pH，用精度为 0.01 的 pH 酸度计调制所需酸度。在试验过程中，设置 pH 4.5、pH 4.0、pH 3.5、pH 3.0、pH 2.5、pH 2.0 共 6 个处理，以 pH 5.6 为对照。当烤烟移栽 30 d 后接受酸雨处理直至采收。每 3 天喷 1 次，喷施量为 1 000 mL/株，各处理栽烟 25 盆。

1.2 测定方法和数据分析

在烤烟移栽后 60 d 测定烤烟叶片的生理生化指标。硝酸还原酶 (NR) 采用活体法测定；超氧化物歧化酶 (SOD) 采用 NBT 法测定，以抑制 NBT 光化学还原能力来衡量，以能抑制 NBT 光还原速率 50% 的酶量为一个 SOD 活性单位 (U)，酶活性以 U/g，FW 来表示；过氧化物酶 (POD) 测定采用愈创木酚法，用 $\Delta OD_{470}/(mg \cdot min)$ ，FW 表示；

采用茚三酮与脯氨酸反应的方法测定游离脯氨酸含量；用 DNS 法测定烤烟叶片可溶性糖含量；考马斯亮蓝法测定可溶性蛋白质含量^[7]。在烤烟移栽后 60 d 取倒 6 叶，烟叶样品用 FAA (70%酒精) 固定液固定，石蜡快速包埋和切片，Olympas 显微镜观察测定。共观察 21 张切片，每张切片观察 5 个视野，用 SPSS 统计软件进行统计分析。

2 结果

2.1 酸性 pH 对烤烟叶片酶活性及脯氨酸、可溶性蛋白、可溶性糖含量的影响

表 1 结果显示 随 pH 的降低，烤烟叶片的 SOD 活性逐渐升高，在 pH 3.0 达到最大值，之后随 pH 降低，SOD 活性又开始逐渐降低，呈现倒“V”型趋势，除 pH 4.5 与对照差异不显著外，其他处理的 SOD 活性都显著高于对照。pH 3.5 处理烤烟叶片的 POD 活性与对照差别不大，当酸性 pH 下降到 3.0 时，烤烟叶片的 POD 活性显著升高， $pH \leq 3.0$ 处理烤烟叶片的 POD 活性显著高于对照及 pH 3.5 处理，pH 3.0 处理之间烤烟叶片的 POD 活性差异不显著。烤烟叶片的硝酸还原酶 (NR) 活性随 pH 的降低而降低，所有处理的 NR 活性都显著低于对照，但 pH 4.5 处理烤烟叶片的 NR 活性显著高于 pH ≤ 4.0 处理，pH ≤ 4.0 处理间烤烟叶片的 NR 活性差异不显著。pH 3.0 处理烤烟叶片脯氨酸含量随 pH 的降低显著升高，而 $pH \leq 3.0$ 处理烤烟叶片的脯氨酸含量则随 pH 的进一步降低而显著降低，pH 3.0 是烤烟叶片脯氨酸含量先升后降的转折点，并且所有处理的脯氨酸含量都显著高于对照。烤烟叶片的可溶性蛋白含量随 pH 降低逐渐升高，pH 4.0 处理的可溶性蛋白含量与对照差异不显著，pH ≤ 3.5 处理烤烟叶片的可溶性蛋白含量都显著高于对照。烤烟可溶性糖含量的变化趋势与可溶性蛋白恰好相反，不同处理烤烟可溶性糖含量随 pH 的降低而显著降低，pH 4.5 处理的可溶性糖含量与对照差异不显著，pH ≤ 4.0 处理烤烟叶片可溶性糖含量都显著低于对照，pH 2.0 处理的可溶性糖显著低于其他

表1 酸性 pH 条件对烤烟酶活性、脯氨酸含量、可溶性蛋白及可溶性糖含量的影响
Table 1 Effect of acid pH condition on enzyme activity, proline, soluble protein and soluble sugar content in flue-cured tobacco leaves

处理	SOD 活性/ (U·g ⁻¹ FW)	POD 活性/ (470·mg ⁻¹ min ⁻¹)	NR 活性/ (μg·g ⁻¹ h ⁻¹)	脯氨酸含量/ (μg·g ⁻¹)	可溶性蛋白含量/ (mg·g ⁻¹)	可溶性糖含量/ (μmol·g ⁻¹)
pH 5.6	77.71±1.83d	13.96±1.68b	40.02±1.63a	109.13±4.87e	12.44±0.41c	86.37±4.77a
pH 4.5	81.89±3.52d	13.80±0.50b	32.31±3.52b	133.17±5.00d	12.75±0.20c	78.72±1.02ab
pH 4.0	100.50±2.96bc	13.76±1.42b	27.02±1.64c	207.33±8.12c	13.41±0.09bc	73.53±3.58bc
pH 3.5	107.76±3.00b	13.19±0.75b	26.95±2.14c	222.03±21.44b	14.10±0.85ab	67.52±2.15cd
pH 3.0	122.89±3.52a	17.05±0.91a	26.34±0.61c	267.19±5.20a	14.64±0.37a	65.55±3.61cd
pH 2.5	118.61±1.83a	17.74±1.53a	25.27±0.46c	235.72±4.3b	14.71±0.29a	61.54±3.59d
pH 2.0	97.01±6.61c	18.68±0.23a	25.42±2.14c	222.84±13.16b	14.66±0.14a	53.04±2.89e

注：不同字母表示差异达 0.05 显著水平，下同。

5 个处理 pH 2.5 处理可溶性糖含量与 pH 3.0 和 pH 3.5 处理差异不显著，但显著低于 pH 4.0 处理。

2.2 酸性 pH 对烤烟叶片组织结构的影响

表 2 结果显示，不同处理烤烟叶片厚度随 pH 的降低而降低，所有处理烤烟叶片厚度都显著低于对照处理，pH 3.5 处理之间烤烟叶片厚度相差不大，但显著高于 pH≤3.0 处理，当 pH≤3.0 后，烤烟叶片厚度随 pH 的降低而显著降低。不同处理烤烟叶片的栅栏组织厚度随 pH 的降低呈先升高后降低趋势，呈现倒“V”型，pH 3.5 处理烤烟叶片的栅栏组织厚度随 pH 的降低而逐渐增加，pH 4.0 处理与对照差异不显著，pH 3.5 处理显著高于对照，但 pH≤3.0 处理烤烟叶片的栅栏组织厚度随 pH 的降低而显著降低，pH 3.0 与对照差异不显著，但显著低于 pH 3.5 处理又显著高于 pH≤2.5 处理。pH 3.5 处理烤烟叶片的海绵组织低于对照，但与对照差异不显著，pH≤3.0 处理之间烤烟叶片的海绵组织差异不显著，但显著低于对照及 pH 3.5 处理。不同处理烤烟叶片组织比表现为，随 pH 的降低，烤烟叶片栅栏组织厚度与叶片厚度比值呈现先升高后降低趋势，pH 3.0 处理烤烟叶片栅栏组织厚度与叶片厚度比值随 pH 的降低而逐渐升高且处理

间差异不显著，但都显著高于对照；pH≤2.5 处理的栅栏组织厚度与叶片厚度比值随 pH 的降低而降低，但与对照差异不显著。酸性 pH 对烤烟海绵组织厚度与叶片厚度比值影响不大，处理间差异未达到显著水平。烤烟栅栏组织与海绵组织的比值随 pH 降低先升高后降低，pH 3.0 是烤烟叶片栅栏组织与海绵组织厚度比值的最高点和转折点。pH 3.0 处理烤烟叶片栅栏组织厚度与海绵组织厚度比值随 pH 降低迅速升高，而后显著降低。

3 讨论

适度逆境胁迫下可激发植物自身抗逆体系，诱导膜保护酶活性和膜保护物质含量升高，减少活性氧引起的膜脂过氧化作用。当超过植物的“应激”或抗性限度时，转而抑制膜保护酶的活性和保护物质的合成，膜脂过氧化加剧^[3]。在烟草 PVYN 接种初期的 SOD 活性增高，但接种 16 d 后其 SOD 活性逐渐降低^[8]。成熟度适宜的烟叶，在烘烤过程中其保护酶 (SOD、POD) 活性较高，而 PPO 活性较低^[9]。

Schaller^[10]研究表明，凡是影响细胞质 Ca²⁺含量和 pH 的因子都可能通过影响蛋白激酶的活性间接影响质膜 H⁺-ATPase 的磷酸化及其活性。轻度模

表2 酸性 pH 条件对烤烟叶片组织结构的影响
Table 2 Effect of acid pH condition on tissue of flue-cured tobacco leaves

处理	叶厚/μm	栅栏组织厚度/μm	海绵组织厚度/μm	栅栏组织/叶厚	海绵组织/叶厚	栅栏组织/海绵组织
pH 5.6	196.91±3.61a	62.42±6.85b	82.48±6.88a	0.32±0.04b	0.42±0.05a	0.77±0.19c
pH 4.5	170.63±3.40b	67.13±8.17ab	74.71±3.90a	0.39±0.05a	0.44±0.04a	0.90±0.03bc
pH 4.0	173.21±5.42b	71.44±6.93ab	71.59±2.70a	0.40±0.02a	0.42±0.03a	0.95±0.06b
pH 3.5	178.80±7.88b	74.09±3.95a	71.43±1.60a	0.41±0.01a	0.40±0.03a	1.04±0.09ab
pH 3.0	145.11±6.62c	62.01±3.09b	51.43±4.09b	0.43±0.06a	0.36±0.07a	1.21±0.06a
pH 2.5	124.03±10.71d	44.62±1.28c	52.43±3.46b	0.36±0.02ab	0.42±0.09a	0.85±0.13bc
pH 2.0	117.68±5.22d	39.41±2.43c	41.55±1.60b	0.33±0.02b	0.35±0.04a	0.95±0.10b

拟酸雨胁迫对四川大头茶幼苗的叶绿素含量、细胞膜透性及 3 种保护酶活性均无明显影响,但随着模拟酸雨 pH 的降低,叶绿素含量显著降低,细胞膜相对透性增加,MDA 含量显著增加,酶活性受到明显抑制^[4]。SOD 活性中心的金属离子能通过自身的交替还原和再氧化方式催化氧自由基还原成过氧化氢和氧,从而控制了膜脂的过氧化水平,保护了膜系统^[11-12]。硝酸还原酶活力的适宜 pH 范围在 pH 6.5~8.5,最适 pH 为 7.5,很低的 pH 使硝酸还原酶活性丧失^[13]。脯氨酸也是膜保护物质,其在逆境期具有清除活性自由基、降低细胞酸度以及作为能量库调节细胞氧化还原势等^[14]。小麦幼苗茎叶可溶性糖含量和含 N 量随酸雨的酸度增加而降低,处理间差异逐渐增大^[5]。本研究结果表明,pH 3.0 处理烤烟叶片的 SOD 活性随 pH 的降低显著升高,当 pH 低于 3.0 后,烤烟叶片的 SOD 活性显著下降,pH 3.0 是烤烟叶片 SOD 对酸雨的最大“应激”或抗性限度。烤烟叶片 POD 活性随 pH 的降低而逐渐升高,pH 3.5 处理烤烟叶片的 POD 活性与对照差异不显著,但 pH \leq 3.0 处理烤烟叶片的 POD 活性显著高于对照及 pH 3.5 处理。pH 3.0 是酸性 pH 激发烤烟叶片 POD 活性显著升高的临界点。硝酸还原酶(NR)随 pH 的降低而降低,并且对酸性 pH 非常敏感,pH 4.5 是烤烟叶片硝酸还原显著降低的临界点,pH 4.5 处理烤烟叶片的 NR 活性显著低于对照,而 pH \leq 4.0 处理烤烟叶片的 NR 活性又显著低于 pH 4.5 处理。酸性 pH 条件下,所有处理的脯氨酸含量都显著高于对照,并且其脯氨酸含量随 pH 的降低先显著上升后显著下降,pH 3.0 是烤烟叶片脯氨酸含量先升后降的转折点。烤烟叶片的可溶性蛋白含量随 pH 降低逐渐升高,pH \leq 3.5 处理烤烟叶片可溶性蛋白含量显著高于对照,pH 4.0 和 pH 4.5 处理与对照差异不显著。烤烟叶片的可溶性糖随 pH 的降低而显著降低,除 pH 4.5 处理与对照差异不显著,其他处理都显著低于对照。由此可见,在酸性 pH 条件下,随 pH 的降低,烤烟叶片含氮化合物积累量增加而碳水化合物积累量减少,并且 pH 3.0 可

能是酸性 pH 对烤烟产生伤害的阈值。

硫酸型酸雨的硫酸根在植物细胞质膜上的转运受 H⁺-ATPase 向外排出一个质子产生的电化学势梯度所驱动,硫酸根转运蛋白将一个硫酸根离子协同三个质子主动共转运进入细胞内,结果硫酸根离子的进入使双倍的质子流入胞内,由此导致胞质 pH 下降(细胞质 pH 值通常稳定在 7.3~7.5)^[15]。当酸雨 pH 达到一定的阈值时,将破坏植物的微结构,降低叶绿素含量和光合速率,出现可见受害症状,阻碍生长发育,酸性较强的酸雨甚至引起植物组织的伤害或坏死^[16]。pH 3.0 的酸雨使青菜叶表皮出现轻度瓦解,pH 2.0 的酸雨则使表皮细胞完全瓦解,海绵组织细胞出现部分瓦解,栅栏组织细胞出现不规则排列等现象^[17]。本研究结果表明,烤烟叶片厚度随 pH 的降低而显著降低,所有处理的叶片厚度显著低于对照,pH 3.5 处理之间烤烟叶片厚度差异不显著,但显著高于其他处理;pH 3.0 处理显著高于 pH 2.5 和 pH 2.0 处理。烤烟叶片的栅栏组织厚度随 pH 的降低呈先升后降趋势,pH 3.5 处理烤烟叶片栅栏组织厚度随 pH 降低逐渐增加,而 pH \leq 3.0 处理则随 pH 的降低显著降低。烤烟叶片的海绵组织厚度随 pH 的降低逐渐降低,pH 3.5 处理的海绵组织厚度虽然低于对照,但差异不显著;pH \leq 3.0 处理之间的海绵组织厚度差异不显著,但显著低于对照及 pH 3.5 处理,pH 3.0 是烤烟叶片海绵组织厚度显著下降的转折点。烤烟叶片栅栏组织与叶片厚度的比值随 pH 的降低先升高后降低,pH 3.0 处理栅栏组织厚度与叶片厚度比值达到最大值,酸性 pH 低于 3.0 后,其值显著下降。酸性 pH 对烤烟叶片海绵组织厚度与叶片厚度的组织比影响不大,处理间没有达到显著性差异。栅栏组织厚度与海绵组织厚度比值的变化趋势与栅栏组织厚度的变化趋势基本相同,pH 3.0 处理的栅栏组织厚度与海绵组织厚度比值随 pH 的降低而显著升高,在 pH 3.0 处达到最大值后又显著降低。处理的栅栏组织厚度与海绵组织厚度比值随 pH 的降低而显著升高,在 pH 3.0 处达到最大值后又显著降低。

4 结 论

随酸性 pH 的降低,烤烟叶片 POD 活性和可溶性蛋白含量明显升高,但可溶性糖含量和叶片厚度则随 pH 的降低而逐渐降低。NR 活性对酸性 pH 反应非常敏感, pH 4.5 弱酸性可以引起烤烟叶片 NR 的显著降低。pH 在 5.6~3.0 之间,随 pH 的降低,烤烟叶片的 SOD 活性、栅栏组织/叶厚、栅栏组织/海绵组织和脯氨酸含量逐渐升高,但过低的酸性 pH (pH < 3.0) 导致烤烟叶片 SOD 活性和脯氨酸含量降低。随酸性 pH 降低,烤烟叶片的栅栏组织厚度先升高后降低,在 pH 3.5 达到最大值;海绵组织厚度则随 pH 的降低而降低,但 pH 3.5 处理与对照差异不显著,但显著高于 pH ≤ 3.0 处理;酸性 pH 对烤烟叶片的海绵组织/叶厚无显著影响。

参考文献

- [1] 朱俊峰. 世界烟叶生产趋势与中国烟叶生产的“北烟南移”现象分析[J]. 世界农业, 2008 (7): 22-23.
- [2] 汪家权, 吴劲兵, 李如忠, 等. 酸雨研究进展与问题探讨[J]. 水科学进展, 2004, 15 (4): 526-530.
- [3] Wolfe D M. Low temperature effects on early vegetative growth, leaf gas exchange and water potential of chilling sensitive and chilling-tolerant crop species [J]. Ann Bot, 1991, 67: 205-212.
- [4] 朱韦, 魏虹, 彭月, 等. 模拟酸雨对四川大头茶幼苗的生理生态影响[J]. 西南师范大学学报, 2006, 31 (2): 147-150.
- [5] 童贯和, 刘天骄, 黄伟. 模拟酸雨及其酸化土壤对小麦幼苗膜脂过氧化水平的影响[J]. 生态学报, 2005, 25 (6): 1509-1516.
- [6] 夏明忠. 模拟酸雨对烟草细胞透性和化学成分及产量的影响[J]. 农业环境保护, 1989, 8 (1): 23-25.
- [7] 张志良, 瞿伟菁. 植物生理学实验指导[M]. 北京: 高等教育出版社, 2003.
- [8] 文才艺, 吴元华, 李浩戈, 等. 接种 PVYN 后烟草叶片 SOD 活性和 MDA 含量变化研究[J]. 中国烟草科学, 1999, 20 (1): 12-14.
- [9] 王传义, 孙福山, 王廷晓, 等. 不同成熟度烟叶烘烤过程中生理生化变化研究[J]. 中国烟草科学, 2009, 30 (3): 49-53.
- [10] Schaller G E, Sussman M R. Phosphorylation of the plasma-membrane H⁺-ATPase of oat roots by a calcium-stimulated protein kinase[J]. Planta, 1988, 173: 509.
- [11] Salin M L, Bridges M S. Isolation and characterization of iron-containing superoxide dismutase from water lily *Nuphar luteum* [J]. Plant Physiol, 1980, 69: 162-185.
- [12] Lee E H, Bennett H L. Superoxide dismutase, a possible protective enzyme against ozone injury in snap beans[J]. Plant Physiol, 1982, 69: 1444-1449.
- [13] 林振武. 硝酸还原酶的研究[J]. 植物生理学报, 1984 (4): 16-19.
- [14] Kavikishor P B, Hong Z L. Overexpression of A-pyrroline-5-arboxylate synthetase increases proline production and confers osmotolerance in transgenic plants[J]. Plant Physiol, 1995, 111: 1387-1396.
- [15] Buchanan B B, Gruissem W, Jones R L. Biochemistry & Molecular Biology of Plants (Photocopy) [M]. Beijing: Science Press (by arrangement with the American Society of Plant Physiologists, 2000), 2002(110.121.123): 831-833.
- [16] 冯宗炜. 酸雨对生态系统的影响——西南地区酸雨研究[M]. 北京: 中国科学技术出版社, 1993.
- [17] 王玮. 模拟酸雨处理的青菜显微和亚显微结构观察及部分生理指标测定[J]. 环境科学, 1988, 9 (3): 12-17.