

朱韦京,余树全,汪 赛,等. 不同酸雨作用方式对茶树幼苗生长与光合特征参数的影响[J]. 江苏农业科学,2014,42(10):232-235.

不同酸雨作用方式对茶树幼苗生长与光合特征参数的影响

朱韦京,余树全,汪 赛,伊力塔,沈 露

(浙江农林大学,浙江临安 311300)

摘要:通过改进试验设计,研究酸雨(pH 值为 4.0)对茶树幼苗的直接作用、间接作用及综合作用的影响程度。结果显示:经过 2 年的试验观测,直接作用、间接作用、综合作用、对照 4 种不同作用方式下茶植株地径、株高增长量差异并不显著。经过 1 年的试验观测发现,4 种不同作用方式下的植株叶绿素相对含量差异不显著。就叶绿素荧光参数来看,短期内直接作用和间接作用能够显著促进茶树幼苗叶片的能量捕获效率,而综合作用会产生显著的抑制作用;1 年后,4 种不同作用方式下的植株叶绿素荧光参数差异不显著。就光响应曲线部分参数来看,短期内直接作用能有效降低植株有机物的消耗量,增强植株对弱光的利用能力,促进茶树幼苗生长,而综合作用相对抑制了茶树幼苗的生长;1 年后,综合作用依然会对茶树幼苗的光能利用情况产生一定程度的抑制作用。可见从短期来说,直接作用有促进茶树幼苗生长的效应;从长期来说,综合作用会对茶树幼苗生长产生一定程度的抑制作用。

关键词:酸雨;作用方式;茶树;生长;光合特性

中图分类号: Q945.79 **文献标志码:** A **文章编号:** 1002-1302(2014)10-0232-04

目前,酸雨已成为公认的全球性环境问题之一,酸雨对森林影响的研究也成为生态研究的热点,不过酸雨在中国亚热带森林生态系统的退化和破坏过程中所起的作用仍有许多问题。近 30 年来,我国酸雨范围不断扩大,酸雨区已超过全国面积的 40%,我国已成为全球第三大酸雨区。森林是酸雨的主要受体,酸雨对林木的危害是多方面的,有直接作用,也有间接作用。如酸雨会使森林植物叶绿素含量和组成发生变化,破坏活性氧代谢系统平衡,影响其生理及光合同化能力,抑制生长;通过离子效应使叶片中 K^+ 、 Ca^{2+} 、 Mn^{2+} 、 Zn^{2+} 、 Mg^{2+} 等大量减少,造成养分不平衡,减缓植物的干物质积累;此外,酸雨还会影响土壤的盐基离子,即不但导致土壤中钙、镁等盐基离子和养分元素淋失,还会使土壤的 pH 值下降,导致土壤酸化、植物可获得的养分减少、土壤有机碳流失等现象的发生^[1-5]。段小华等发现,适度的酸雨有利于茶树生物量的积累,茶树可通过增强抗氧化酶活性或通过一些渗透调节物质(脯氨酸和可溶性糖)增强其对酸雨和低浓度铝的适应性和耐受能力^[6]。黄媛等发现,在模拟酸雨的条件下,随着酸雨酸度增加,茶叶的茶多酚和咖啡碱含量先增加后下降,氨基酸、儿茶素和可溶性糖含量则下降,黄酮含量的变化不显著^[7]。经过多年的研究发现,酸雨对植物的影响包括酸雨与枝叶表面接触的直接作用、通过土壤酸化的间接作用及两者的共同作用。尽管相关研究为揭示酸雨对林木的作用机制提供了一定的借鉴价值,但由于试验设计的不足,还是给研究带来了相当的困难,酸雨通过对植物叶片和的干茎淋洗后进入

土壤,它对林木的影响是从地上部分的叶片和干茎开始的,还是从地下部分的根系开始的,或是通过影响土壤成分进而对植物生长产生影响?如果诸多可能因素均对植物产生影响,那么其先后顺序和过程又是如何?本研究旨在通过改进试验设计,研究酸雨对茶树幼苗的直接作用、间接作用及综合作用的影响程度,这对揭示酸雨对树木幼苗的作用规律、科学评价酸雨对森林的影响、制定森林恢复措施具有重要意义。我国是世界上最大的产茶国,年产量达 140 万 t,占世界总产量的 33%,而茶叶又是浙江省主要的传统产业之一,一直以来在国民经济中占有极其重要的地位。近年来,浙江省的酸雨分布范围不断扩大、危害程度不断加重^[8]。以茶树[*Camellia sinensis* (Linn.) O. Kuntze]幼苗为试验材料,以受控试验来模拟酸雨对其生长和光合特性参数的影响,这为酸雨地区的茶树栽培提供了科学的依据。

1 材料与方法

1.1 研究地概况

试验地位于浙江农林大学野外试验地,地理位置为 119°44'E、30°16'N,属中亚热带季风气候区,温暖湿润,四季分明,雨量充沛,年降水量为 1 400 mm,所降水的 pH 值平均为 4.04,达到强酸雨的程度^[9-10]。

1.2 试验材料 with 处理

选取长势基本一致的二年生茶树幼苗 70 株,将幼苗随机分成 10 组,每组 7 株。采用试验地红壤土栽培,植株栽于高 40 cm、直径 30 cm 的塑料花盆中,每盆栽种 1 株,对所有苗木进行编号、挂牌。将盆栽幼苗置于通风、遮雨的塑料薄膜大棚内,缓苗期间用自来水浇灌,常规管理。

用浓 H_2SO_4 (浓度 98%,密度 1.84 g/mL) 和浓 HNO_3 (浓度 68%,密度 1.4 g/mL) 按 8:1 的体积比配制母液,并用蒸馏水稀释,利用 HI98129 精密型酸度计测定配制 pH 值为 4.0

收稿日期:2013-12-08

作者简介:朱韦京(1988—),男,浙江湖州人,硕士研究生,从事森林生态及恢复生态学研究。E-mail:121741423@qq.com。

通信作者:余树全,博士,教授,从事森林生态及恢复生态学研究。E-mail:yushuq@zafu.edu.cn。

的酸雨溶液^[11-13]。根据浙江临安地区多年的月均降水量,确定每天每盆植物喷淋酸雨约 130 mL(与当地总的降水量基本持平)^[14]。

经过 2 个月的恢复生长后,2011 年 3 月起使试验植株接受 3 种不同的酸雨喷淋作用方式,将空白处理作为对照,3 种酸雨作用方式具体如下:(1)直接作用。即酸雨仅喷淋叶片和干茎,用塑料膜完全遮盖植株生长的土壤后,对其地上部分喷淋酸雨溶液,待植株地上部分无水滴时除去塑料膜,并对其土壤补充等量自来水。(2)间接作用。即酸雨仅喷淋土壤,避免酸雨与植株叶片、干茎接触,然后用塑料膜完全遮盖植株生长的土壤,为其地上部分补充等量的自来水,待植株地上部分无水滴时除去塑料膜。(3)综合作用。即模拟自然降水过程,酸雨喷淋植株叶片、干茎后,进入盆栽土壤中。(4)空白对照。试验期间,对空白对照组补充与当期酸雨等量的自来水。

1.3 测定方法

1.3.1 生长量的测定 酸雨喷淋试验于 2011 年 3 月开始,分别于 2012 年 3 月和 2013 年 3 月用游标卡尺和卷尺进行株高(H ,cm)、地径(D ,cm)等生长指标的测定。

1.3.2 叶片光合特征参数的测定 于 2011 年 8 月和 2012 年 8 月 09:00—11:00 选择晴朗天气进行测定。每种植物每个梯度随机选取 3~5 株植物,每株植物从冠层选取 1 张当年生的功能叶片进行测定。利用 LI-6400 便携式光合仪(LI-COR,USA)测定光响应曲线,测定时使用分析仪自带的 6400-02 LED 红蓝光源,叶室温度设为 25℃,流量为 500 $\mu\text{mol/s}$,相对湿度 60%。先将叶片置于 1 000 $\mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ 的光强下充分诱导,依次测定光强梯度为 2 000、1 500、1 000、600、300、200、150、100、80、50、20、0 $\mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ 下的净光合速率,待测定值稳定后开始读数。

1.3.3 叶绿素荧光参数的测定 于 2011 年 8 月和 2012 年 8 月 09:00—11:00 选择晴朗天气进行测定。在测定光合特征参数的同时进行荧光参数的测定,选取部位相同、叶龄一致的叶片,采用德国 WALZ 公司生产的便携式叶绿素荧光仪(PAM-2100)测定叶绿素荧光参数。每株选取 5 张受光一致、均为新梢上的功能叶,以确保所选材料的一致性,重复 5 次。测定指标包括 F_0 (固定荧光产量,别称初始荧光)、 F_m (最大荧光产量)、 F_t (任意时刻的荧光产量)、 F_v (可变荧光产量)、 F_v/F_0 (常用于表示植物叶片 PS II 潜在活性)、 F_v/F_m (常用于表示 PS II 光化学效率)、 $Yield$ (PS II 实际光化学量子产量)^[15]。

1.3.4 叶绿素相对含量 进行茶叶叶绿素荧光参数测定的同时,利用便携式叶绿素含量测定仪 (SPAD-502,日本)测定相同的叶片的叶绿素相对含量,每张叶片测定 10 次并取平均值^[16]。

1.3.5 数据分析 采用光合小助手对原始数据进行曲线拟合,得到植物叶片的暗呼吸速率(R_d)、表观量子效率(AQE)、光补偿点(LCP)、光饱和点(LSP)、最大光合速率(A_{\max})。该软件采用的曲线拟合方程为:

$$A = \frac{\Phi Q + A_{\max} - \sqrt{(\Phi Q + A_{\max})^2 - 4\Phi Q K A_{\max}}}{2K} - R_d。$$

式中: A 代表光合速率; Q 代表光照强度; Φ 代表表观量子效

率; K 代表光合曲线的曲率,其大小介于(0,1)之间。在数据分析前对所有数据进行正态性与齐性检验,数据处理分析利用 SPSS 18.0 软件,使用 Origin 8.0 软件完成相关图表制作。

2 结果与分析

2.1 不同酸雨作用方式下茶树生长量的变化

植物的生长量是植物对外在自然环境条件综合作用的反应结果,因此可以直观地反映植物光合作用与呼吸作用共同作用的结果,是综合评价植物生长状况的指标^[17]。如表 1 所示,2011 年 3 月至 2012 年 3 月茶树地径平均增长量为 0.16 cm,直接作用、间接作用、综合作用、对照 4 种不同作用方式下的地径增长量差异不显著($P > 0.05$);2012 年 3 月至 2013 年 3 月茶树地径平均增长量为 0.13 cm,4 种不同作用方式之间差异依然不显著($P > 0.05$)。2011 年 3 月至 2012 年 3 月、2012 年 3 月至 2013 年 3 月茶树株高平均增长量为 6.06、5.81 cm,且 4 种不同作用方式之间差异均不显著($P > 0.05$)。

表 1 不同酸雨作用方式对茶树幼苗生长量的影响

时间	酸雨作用方式	增长量(cm)	
		地径	株高
2011 年 3 月至 2012 年 3 月	直接作用	0.15 ± 0.03a	4.32 ± 1.05a
	间接作用	0.18 ± 0.02a	5.66 ± 1.14a
	综合作用	0.15 ± 0.03a	6.99 ± 1.80a
	对照	0.14 ± 0.02a	7.27 ± 1.22a
2012 年 3 月至 2013 年 3 月	直接作用	0.18 ± 0.08a	6.57 ± 1.88a
	间接作用	0.11 ± 0.03a	3.20 ± 2.21a
	综合作用	0.07 ± 0.01a	5.10 ± 1.53a
	对照	0.15 ± 0.04a	8.38 ± 2.22a

注:同列数据后不同小写字母表示差异显著($P < 0.05$)。下表同。

2.2 不同酸雨作用方式下茶树叶片叶绿素相对含量的变化

叶绿素是树木光合作用中重要的和最有效的光能吸收色素,在光合作用过程中起接受能量和转换能量的作用^[18]。叶绿素相对含量与叶绿素含量具有显著的相关性,能较好地反映植物叶绿素含量的变化^[19-20]。由表 2 可知,经过 6 个月的试验处理即 2011 年 8 月,直接作用、间接作用、综合作用、对照的植株叶绿素相对含量平均为 71.73,其中直接作用和综合作用的叶绿素相对含量较高,间接作用和对照处理较低,但差异不显著($P > 0.05$);经过 18 个月的试验处理后即 2012 年 8 月,这 4 种不同作用方式下植株叶绿素相对含量平均为 61.13,其中直接作用和综合作用的叶绿素相对含量仍然较高,但 4 种不同作用方式之间差异不显著($P > 0.05$)。

表 2 不同作用方式下茶叶叶绿素相对含量的变化情况

酸雨作用方式	叶绿素相对含量		
	2011 年 8 月	2012 年 8 月	2012 年 8 月比 2011 年 8 月减少量
直接作用	74.65 ± 2.75a	66.69 ± 3.61a	7.96 ± 3.33a
间接作用	71.33 ± 2.37a	58.79 ± 3.23a	12.54 ± 2.18a
综合作用	72.06 ± 3.65a	64.70 ± 0.61a	7.36 ± 0.38a
对照	68.87 ± 2.84a	54.34 ± 3.34a	14.53 ± 4.39a

2.3 不同酸雨作用方式下茶树叶片叶绿素荧光参数的变化

在众多荧光参数中,高的 F_v/F_m 、 F_v/F_0 的值已基本被公

认为叶片高光合效率的重要依据,且不少研究指出 F_v/F_m 、 F_v/F_0 有很好的一致性^[21-22]。在 4 种不同作用方式下,茶树幼苗叶绿素荧光暗适应参数 F_v/F_m 、 F_v/F_0 的值变化规律基本一致。 F_v/F_m 、 F_v/F_0 的值越高,说明 PS II 反应中心的能量捕获效率越高。经过 6 个月的试验处理(2011 年 8 月),综合作用的 F_v/F_m 、 F_v/F_0 的值最低,对照组其次,直接作用、间接作用较高,且与综合作用、对照差异显著,说明短期内酸雨对植株叶片或土壤的作用是促进茶树幼苗叶片的能量捕获效率,但 2 种作用方式的促进程度差异不显著;另外,综合作用下植株 F_v/F_m 、 F_v/F_0 的值显著低于其他作用方式,说明短期内酸雨对植株叶片、土壤的综合作用会抑制茶树幼苗叶片的能量捕获效率。经过 18 个月的试验处理后(2012 年 8 月),4 种不同作用方式植株叶片的 F_v/F_m 、 F_v/F_0 的值之间差异不显著,说明从长期来看茶幼苗叶片的能量捕获效率对酸雨有较好的适应性,不同作用方式短期内所产生的促进或抑制影响均会逐渐消失(表 3)。

2.4 不同酸雨作用方式对茶树光响应曲线部分参数的影响

光是植物进行光合作用的能量来源,酸雨作用会使植物对光的反应发生变化。2011 年 8 月,直接作用的 R_d 显著低于其他作用方式,表观量子效率 AQE 显著高于综合作用,光补偿点 LCP 显著低于间接作用和综合作用,可见酸雨对叶片

表 3 不同作用方式下茶叶叶绿素荧光参数的变化情况

时间	酸雨作用方式	F_v/F_m	F_v/F_0
2011 年 8 月	直接作用	0.801 ± 0.002c	4.03 ± 0.06c
	间接作用	0.799 ± 0.002c	3.99 ± 0.06c
	综合作用	0.713 ± 0.004a	2.50 ± 0.05a
	对照	0.784 ± 0.004b	3.68 ± 0.09b
2012 年 8 月	直接作用	0.800 ± 0.005a	3.98 ± 0.13a
	间接作用	0.793 ± 0.005a	3.88 ± 0.13a
	综合作用	0.776 ± 0.005a	3.49 ± 0.09a
	对照	0.773 ± 0.019a	3.68 ± 0.30a

进行的直接作用在短期内能有效降低植株有机物的消耗,增强植株对弱光的利用能力,促进茶树幼苗的生长;综合作用处理的 R_d 最高,AQE 显著低于其他作用方式,LCP 显著高于其他作用方式,说明酸雨的综合作用方式短期内会抑制茶树幼苗的生长。2012 年 8 月,4 种不同作用方式下植株的 R_d 、 A_{max} 、LSP 等指标的值差异均不显著,但综合作用下的 AQE 显著低于其他作用方式,LCP 显著高于其他作用方式,说明从长期来看茶树幼苗对酸雨具有一定的适应性,与对照相比,直接作用和间接作用 2 种方式并未对植株的光能利用情况产生显著影响,但综合作用会产生一定程度的抑制作用(表 4)。

表 4 不同作用方式下茶光合作用 - 光响应曲线的特征参数值

时间	酸雨作用方式	R_d	A_{max}	AQE	LCP	LSP
		[$\mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$]	[$\mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$]		[$\mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$]	[$\mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$]
2011 年 8 月	直接作用	1.27 ± 0.30a	13.46 ± 1.07a	0.052 ± 0.002b	25.47 ± 6.71a	1 457.02 ± 22.32a
	间接作用	2.08 ± 0.08b	13.07 ± 1.78a	0.056 ± 0.003b	54.00 ± 5.59b	1 451.95 ± 24.39a
	综合作用	2.15 ± 0.09b	13.70 ± 1.58a	0.049 ± 0.003a	62.06 ± 4.43c	1 505.74 ± 29.16a
	对照	1.65 ± 0.20b	12.75 ± 0.94a	0.059 ± 0.003b	39.27 ± 5.57b	1 474.16 ± 38.22a
2012 年 8 月	直接作用	0.79 ± 0.16a	12.56 ± 1.56a	0.036 ± 0.001ab	18.67 ± 3.53a	1 520.00 ± 31.02a
	间接作用	0.84 ± 0.09a	11.79 ± 1.43a	0.029 ± 0.006b	40.00 ± 8.33a	1 414.67 ± 27.84a
	综合作用	0.45 ± 0.05a	10.97 ± 1.04a	0.008 ± 0.004c	56.00 ± 4.06b	1 227.33 ± 26.45a
	对照	1.04 ± 0.14a	11.04 ± 1.68a	0.041 ± 0.003a	17.00 ± 6.08a	1 333.33 ± 38.88a

3 结论与讨论

根据 Ulrich 等提出的土壤酸化 - 铝毒理论可知,酸雨对树木幼苗的危害是由酸雨导致土壤酸化而产生的^[23],那么是否可以认为如果酸雨没有进入土壤就不会对树木幼苗产生不利影响?如不能区分影响过程,则很难正确解释酸雨对树木幼苗的作用机制。因此,本研究通过改进试验,研究酸雨对茶树幼苗的作用过程,探讨酸雨对茶树幼苗的直接作用、间接作用及综合作用的影响程度,是对 Ulrich 土壤酸化 - 铝毒理论^[23]的验证和丰富。

3.1 地径、株高增长量对不同酸雨作用方式的响应和适应

笔者发现,2011 年 3 月至 2012 年 3 月间接作用下的茶树地径增长量最大,对照增长量最小;但 2012 年 3 月至 2013 年 3 月直接作用下的地径增长量最大,综合作用下的地径增长量最小。2 年中对照的株高增长量均最大,其中 2011 年 3 月至 2012 年 3 月株高增长量最小的是直接作用,2012 年 3 月至 2013 年 3 月株高增长量最小的是间接作用。经过 2 年的试验观测可知,直接作用、间接作用、综合作用、对照处理的茶树

地径、株高增长量差异并不显著。不同树种的生长特性差异、对酸雨敏感性的差异、酸雨作用时间的差异以及植物对酸雨的伤害所表现出的形态差异是造成相关试验结果不同的主要原因^[24]。本研究发现,茶树对于一般的酸雨(pH 值为 4.0)危害具有一定的抗性,另外由于茶本身生长较缓慢,所以用 2 年时间对植株株高、地径等生长量进行观测尚无法探明不同作用方式之间的差异性,或许随着处理时间的延长,作用效果会逐渐明显。

3.2 叶绿素相对含量、叶绿素荧光参数对不同酸雨作用方式的响应和适应

本研究发现,4 种不同作用方式下的茶叶叶绿素相对含量差异不显著。短期来看,综合作用处理的 F_v/F_m 、 F_v/F_0 的值最低,对照其次,直接作用、间接作用组最高,且与综合作用、对照差异显著。说明直接作用和间接作用短期内能够显著促进茶树幼苗叶片的能量捕获效率,而综合作用会产生显著的抑制作用,18 个月后 4 种不同作用方式下植株叶绿素荧光参数差异不显著。茶叶表面光滑、叶片革质,叶表的蜡质层和角质层都较厚,而且模拟酸雨滴落在叶片上滞留的时间较

短,所以离子侵入叶片细胞进而产生毒害的风险较低。另外,本试验还发现酸雨喷淋叶片后有助于降低部分病虫害对植株叶片的侵噬风险(这须在进一步的研究中加以验证),初步推测这是导致短期直接作用下植株叶绿素相对含量、荧光参数、光响应曲线部分参数等相对较好的主要原因,但长期来看这种促进效应会逐渐消失。Ulrich 等提出的土壤酸化-铝毒理论认为,酸雨对树木幼苗的危害是由酸雨导致土壤酸化而产生的,当土壤 pH 值下降到 5.5 以下时,原固定于晶格中的铝可逐渐解离,以离子态释放到溶液中,直接危害植物生长^[25]。经过 18 个月的试验处理,与其他作用方式相比,间接作用对茶树幼苗各项参数并未表现出显著的促进或抑制效果,可能随着处理时间的延长,作用效果会逐渐显著。叶片是植株健康状况的重要表征,由于试验条件所限,本研究并未对土壤的 pH 值、离子含量等指标进行检测,仅从叶片生理指标的变化情况推断不同作用方式对植株生长的影响程度,这须在进一步的试验中加以完善。

3.3 不同酸雨作用方式下的光合作用-光响应特征参数的比较

总体来看,4 种不同作用方式下茶树的 A_{\max} 差异不显著,说明 pH 值为 4.0 的酸雨胁迫可能没有破坏其光合结构。长期来看,2011 年 8 月至 2012 年 8 月 A_{\max} 在地上酸雨(pH 值为 4.0)作用处理下最高,2011 年 8 月,茶树在直接作用方式处理下的 R_d 显著低于对照,这可能表明茶幼苗对地上酸雨胁迫不敏感,且在无光条件下呼吸作用较旺盛;直接作用处理显著降低了茶叶的 LCP。综合来看,短期内直接作用有助于促进茶树幼苗的生长,长期来看综合作用会对茶树幼苗生长产生一定的抑制作用。相比生长量、相对叶绿素含量以及部分叶绿素荧光参数而言,光响应曲线相关参数更有利于展现酸雨不同作用方式对茶树幼苗生长状况的影响。经分析发现,与其他作用方式相比,综合作用会对茶树幼苗生长产生一定程度的抑制作用,如 AQE 显著降低、LCP 显著升高等。由此推测,长期的直接作用与间接作用均会对茶树幼苗的生长产生某种程度的抑制作用,但是由于试验时间以及植株自身修复能力的影响,这种抑制作用并未达到某个阈值,从而使相关指标与对照差异显著,而综合作用作为两者的结合强化,得以在较短时间内呈现出来。

参考文献:

- [1] Singh A, Agrawal M. Acid rain and its ecological consequences[J]. Journal of Environmental Biology, 2008, 29(1): 15-24.
- [2] Kim Y O, Rodriguez R J, Lee E J, et al. Phytolacca americana from contaminated and noncontaminated soils of South Korea; effects of elevated temperature, CO₂ and simulated acid rain on plant growth response[J]. Journal of Chemical Ecology, 2008, 34(11): 1501-1509.
- [3] Kimmins J P. A foundation for sustainable management[M]. Englewood Cliff: Prentice Hall, 2004: 596.
- [4] Neves N R, Oliva M A, Centeno D D, et al. Photosynthesis and oxidative stress in the restinga plant species *Eugenia uniflora* L. exposed to simulated acid rain and iron ore dust deposition; potential use in environmental risk assessment[J]. Science of the Total Environment, 2009, 407(12): 3740-3745.
- [5] 林 岩, 段 雷, 杨永森, 等. 模拟氮沉降对高硫沉降地区森林土壤酸化的贡献[J]. 环境科学, 2007, 28(3): 640-646.
- [6] 段小华, 胡小飞, 邓泽元, 等. 模拟酸雨和铝添加对茶树生长及生理生化特性的影响[J]. 江西农业大学学报, 2012, 34(2): 304-310.
- [7] 黄 媛, 段小华, 胡小飞, 等. 模拟酸雨和铝调控对茶叶主要化学品质与铝积累的影响[J]. 热带亚热带植物学报, 2011, 19(3): 254-259.
- [8] 宋晓东, 江 洪, 余树全, 等. 浙江省酸雨的空间分布格局及其未来变化趋势预测[J]. 环境污染与防治, 2009, 31(1): 13-16.
- [9] 赵 伟, 康丽莉, 林惠娟, 等. 临安大气本底站酸雨污染变化特征与影响因素分析[J]. 中国环境监测, 2012, 28(4): 9-14.
- [10] 林丰妹, 焦 荔, 盛 侃, 等. 杭州市酸雨污染现状及成因分析[J]. 环境监测管理与技术, 2004, 16(3): 17-20.
- [11] 徐德才. 酸雨污染与防治——浙江区域酸雨趋势与防治对策[J]. 煤矿环境保护, 1995, 9(4): 25-28.
- [12] 齐泽民, 钟章成. 模拟酸雨对杜仲光合生理及生长的影响[J]. 西南师范大学学报: 自然科学版, 2006, 31(2): 151-156.
- [13] 李志国, 翁忙玲, 姜 武, 等. 模拟酸雨对乐东拟单性木兰幼苗部分生理指标的影响[J]. 生态学杂志, 2007, 26(1): 31-34.
- [14] 殷秀敏, 伊力塔, 余树全, 等. 酸雨胁迫对木荷叶片气体交换和叶绿素荧光参数的影响[J]. 生态环境学报, 2010, 19(7): 1556-1562.
- [15] 田海涛, 高培军, 温国胜. 7 种箬竹抗寒特性比较[J]. 浙江林学院学报, 2006, 23(6): 641-646.
- [16] 金 静, 江 洪, 余树全, 等. 孑遗植物银杏(*Ginkgo biloba* L.) 伴性光合生理特征与进化生态[J]. 生态学报, 2008, 28(3): 1128-1136.
- [17] 金 清, 江 洪, 余树全, 等. 酸雨胁迫对亚热带典型树种幼苗生长与光合作用的影响[J]. 生态学报, 2009, 29(6): 3322-3327.
- [18] 黄瑞冬, 王进军, 许文娟. 玉米和高粱叶片叶绿素含量及动态的比较[J]. 杂粮作物, 2005, 25(1): 30-31.
- [19] 姜丽芬, 石福臣, 王化田, 等. 叶绿素计 SPAD-502 在林业上应用[J]. 生态学杂志, 2005, 24(12): 1543-1548.
- [20] 宋绪忠, 赵永军, 张金凤, 等. 茶树叶片叶绿素含量与叶色值相关性研究[J]. 山东林业科技, 2002(6): 10-12.
- [21] 林文雄, 吴杏春, 梁义元, 等. UV-B 辐射胁迫对水稻叶绿素荧光动力学的影响[J]. 中国生态农业学报, 2002, 10(1): 8-12.
- [22] 张其德, 蒋高明, 朱新广, 等. 12 个不同基因型冬小麦的光合能力[J]. 植物生态学报, 2001, 25(5): 532-536.
- [23] Ulrich B, Mayer R R, Khanna P K. Chemical changes due to acid precipitation in a loess-derived soil in central Europe[J]. Soil Science, 1980, 130(4): 193-199.
- [24] 鲁美娟, 江 洪, 李 巍, 等. 模拟酸雨对刨花楠幼苗生长和光合生理的影响[J]. 生态学报, 2009, 29(11): 5986-5994.
- [25] 刘 强, 郑绍建, 林咸永. 植物适应铝毒胁迫的生理及分子生物学机理[J]. 应用生态学报, 2004, 15(9): 1641-1649.