

DOI: 10.13671/j.hjkxxb.2015.0803

董莲春, 俞飞, 刘美华, 等. 2016. 不同酸雨梯度下 3 种酸雨处理对茶树幼苗叶绿素荧光和光合特性的影响[J]. 环境科学学报, 36(9): 3495-3504
Dong L C, Yu F, Liu M H, et al. 2016. Effects of three kinds of acid rain treatments on chlorophyll fluorescence and photosynthetic characteristics of *Camellia sinensis* under different acid rain gradients[J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 36(9): 3495-3504

不同酸雨梯度下 3 种酸雨处理对茶树幼苗叶绿素荧光和光合特性的影响

董莲春^{1,2}, 俞飞^{1,2}, 刘美华^{1,2}, 余树全^{1,2}, 汪赛³, 伊力塔^{1,2,*}

1. 浙江农林大学林业与生物技术学院, 临安 311300
2. 亚热带森林培育国家重点实验室培育基地, 临安 311300
3. 安徽省铜陵市农科所, 铜陵 244000

收稿日期: 2015-10-13 修回日期: 2015-12-11 录用日期: 2015-12-21

摘要: 选择茶 (*Camellia sinensis*) 幼苗为试验材料, 在盆栽条件下采用受控模拟酸雨喷淋的试验方法, 设置 3 个酸雨梯度 pH 2.5、pH 4.0 和 pH 5.6, 每个梯度下分别设计地上处理、全淋处理和土壤处理, 测定其叶绿素荧光和光合特性。结果表明: 在 pH 2.5 酸雨胁迫下, 全淋处理显著减少了茶幼苗相对叶绿素含量 (SPAD) 合成、降低 PS II 原初光能转化效率 (F_v/F_m)、潜在活性 (F_v/F_0)、实际光化学量子产量 (Y_{ield})、光化学淬灭系数 (q_p) 以及净光合速率 (P_n)、气孔导度 (Cond)、蒸腾速率 (T_r) 等光合参数, 提高了胞间二氧化碳浓度 (C_i)、光补偿点 (LCP) 和暗呼吸速率 (R_d), 地上处理作用下茶幼苗受到抑制作用其次, 土壤处理对茶幼苗的抑制作用最小; 在 pH 4.0 酸雨胁迫下, 除光饱和点 (LSP)、光补偿点和暗呼吸速率其余各处理值均高于对照组 (CK), 并且土壤酸雨 > 地上酸雨 > 全淋酸雨处理 > CK, 而 pH 5.6 酸雨胁迫下, 各参数变化为土壤酸雨 > 地上酸雨 > CK > 全淋酸雨处理。可见, 在 pH 2.5 酸雨胁迫下, 全淋酸雨处理对幼苗的抑制作用最强; pH 4.0 和 pH 5.6 酸雨胁迫下, 土壤酸雨处理对于幼苗的促进作用最强; 处理方式和酸雨强度的交互作用下 F_v/F_m 、 A_{max} 、AQY、LSP、LCP 和 R_d 都具有显著差异, 而 SPAD、 F_v/F_0 、 Y_{ield} 、 q_p 差异不显著。得出结论为: 酸雨对植物的作用机理随酸雨浓度而定, 重度酸雨胁迫下, 直接和间接作用都有; 而中、轻度酸雨胁迫下, 主要是通过土壤酸化后对植物起间接作用。

关键词: 叶绿素荧光; 光合特性; 处理方式; 酸雨胁迫; 茶

文章编号: 0253-2468(2016)09-3495-10 中图分类号: X173 文献标识码: A

Effects of three kinds of acid rain treatments on chlorophyll fluorescence and photosynthetic characteristics of *Camellia sinensis* under different acid rain gradients

DONG Lianchun^{1,2}, YU Fei^{1,2}, LIU Meihua^{1,2}, YU Shuquan^{1,2}, WANG Sai³, YI Lita^{1,2,*}

1. School of Forestry and Biotechnology, Zhejiang Agriculture and Forestry University, Lin'an 311300
2. Nurturing Station for State Key Laboratory of Subtropical Silviculture, Lin'an 311300
3. Tongling Institute of Agricultural Sciences, Tongling 244000

Received 13 October 2015; received in revised form 11 December 2015; accepted 21 December 2015

Abstract: The chlorophyll fluorescence characteristics and photosynthesis of in different treatments under simulated acid rain stress (heavy, pH = 2.5; moderate, pH = 4.0; and weak, pH = 5.6) were studied. Simulated acid rain was sprayed in three different treatments. The 1st treatment was spraying the acid rain only on the aboveground of seedlings, the 2nd treatment was spraying both the seedlings and the soil and the 3rd treatment was only spraying the soil that seedlings were planted. In the 2nd treatment under heavy acid stress, the leaf relative chlorophyll content (SPAD) was significantly inhibited,

基金项目: 国家自然科学基金项目 (No.31100325); 浙江省高等学校中青年学科带头人学术攀登项目 (No.pd2013237); 浙江农林大学亚热带森林资源培育研究中心预研基金项目 (No.CCSFR2013003)

Supported by the National Natural Science Foundation of China (No.31100325), the Zhejiang Provincial of the High-school of the Young Academic Leader Program of China (No.pd2013237) and the Zhejiang University of Agriculture and Forestry of Subtropical Forest Resources Cultivation Project Research Center Foundation of China (No.CCSFR2013003)

作者简介: 董莲春 (1991—), 女, E-mail: 1085371482@qq.com; * 通讯作者 (责任作者), E-mail: yilita@126.com

Biography: DONG Lianchun (1991—), female, E-mail: 1085371482@qq.com; * **Corresponding author**, E-mail: yilita@126.com

and most parameters were reduced including light energy transformation efficiency of PS II (F_v/F_m), activity potential of PS II (F_v/F_0), actual photochemical efficiency of PS II (Y_{ield}), photochemical quenching (q_p), net photosynthetic rate (P_n), stomatal conductance (Cond) and transpiration rate (T_r) while intercellular CO_2 concentration (C_i), light compensation point (LCP) and dark respiration rate (R_d) increased. *Camellia sinensis* seedlings were little affected in the 3rd treatment under heavy acid stress. Under moderate acid rain, the parameters of *Camellia sinensis* except LSP, LCP and R_d in three treatments increased with the trend: 3rd treatment > 1st treatment > 2nd treatment > CK. However, under weak acid rain, the parameters showed the order of 3rd treatment > 1st treatment > CK > 2nd treatment, which indicated that seedlings were significantly inhibited in the 2nd treatment under heavy acid stress, while the seedlings increased in the 3rd treatment under the moderate and weak acid stress. We concluded that F_v/F_m , A_{max} , AQY, LSP, LCP and R_d were affected significantly because of interactions between different acid stress and treatments, while SPAD, F_v/F_0 , Y_{ield} and q_p had no obvious change under different acid stress and treatments.

Keywords: chlorophyll fluorescence; photosynthetic characteristics; treatments; acid stress; *Camellia sinensis*

1 引言 (Introduction)

20 世纪 70 年代以来,酸雨污染已成为全球面临的主要环境问题之一,受到人们的普遍关注(樊后保,1996;金清等,2010;刘昊,2009;马博英,2006;单运峰,1988).而植物是陆地生态系统的主体,在多方面受到外部环境条件的胁迫.樊后保等(2005)研究发现 pH 2.5 和 pH 3.5 的模拟酸雨严重抑制了杉木种子的萌发和幼苗的成活. Bellani L. M. 研究发现酸雨促进了糖槭幼苗基径的生长,却抑制了白云杉幼苗基径的生长 (Bellani *et al.*, 1997). 单运峰等(1994)指出,酸雨对树木的伤害来自直接伤害和间接伤害两个方面.直接伤害是指酸雨直接影响植物的生理生化过程,体现在影响林木的根、茎、叶.间接伤害是酸雨经过一系列的物理、化学和生物过程引起土壤酸化,改变植物的生长环境.以往学者的实验设计均是模拟自然降雨,尽管这种研究方法为揭示酸雨对林木的作用机制提供了一定的借鉴价值,但也带来了相当的困惑:叶片光合作用对酸雨响应的敏感部位和原初响应的特性;当酸雨发生时首先伤害植物的是什么部位和有什么特性;目前大多数学者实验设计所限接受了德国 Göttingen 大学的 Ulrich (1980) 提出的“土壤酸化-铝毒理论”.即,森林衰退的主要原因是由酸沉降引起的土壤酸化及其对植物根系和养分吸收的间接影响导致,但并没有足够的研究证实这一理论.因此,本研究将通过改进实验方法,设计 3 种酸雨处理方式:地上处理(酸雨淋洗植物茎叶部分时土壤部分用薄膜隔离)、全淋处理(模拟自然降雨)和土壤处理(只淋洗植物土壤部分)等方式探索酸雨对林木影响的作用机制(汪赛等,2012).

茶在我国长江流域以南地区广有种植,是非常重要的经济树种.据统计,2013 年,我国茶种植面积达 $257.9 \times 10^4 \text{ hm}^2$,并有研究表明,茶是喜酸性土壤

的植物,在 pH 4.0~pH 6.5 范围内都能生长(孙海云,2011).本文以茶(*Camellia sinensis*)幼苗作为研究对象,通过受控试验模拟酸雨的形式开展不同酸雨处理方式下植株生理特性的测定,旨在揭示酸雨对茶幼苗的影响是通过酸化土壤对植物间接影响或是酸雨直接影响植物还是两者都存在,试图更全面地获知以茶为代表的喜酸植物种对酸雨胁迫的生理生态响应机制,为全球气候变化条件下探究植物种的生长及生理生化响应的机制提供参考.

2 材料和方法 (Materials and methods)

2.1 试验地概况和研究材料

试验地设在浙江省临安市(119°42' E, 30°14' N)境内的浙江农林大学野外试验大棚,该地属中纬度北亚热带季风气候,四季分明,气候温和,雨量充沛,年降水量为 1628.6 mm,年平均气温 16.4 °C.土壤为红黄壤.

供试材料茶属于山茶科(Theaceae)山茶属(*Camellia*),为常绿灌木或小乔木,喜欢湿润的气候,广泛种植于中国南方的丘陵红壤区.

2.2 试验设计

选择长势一致的 2 年生茶幼苗于 2011 年 3 月移栽于塑料花盆中,花盆随机分成 10 组,每组 7 盆,用黄壤土进行栽培,在缓苗期间,用自来水浇灌,2011 年 4 月开始喷洒酸雨.所配制的酸雨中 $V_{H_2SO_4} : V_{HNO_3} = 8:1$,用 98% 的浓硫酸和 68% 的浓硝酸配置成酸原液,再用蒸馏水稀释成 pH 值为 5.6、4.0 和 2.5 的 3 个浓度梯度的酸雨喷洒液(殷秀敏等,2010; Back, 1995).每月酸雨喷淋量根据浙江省临安市月平均降雨量确定.酸雨喷施期间用塑料大棚遮挡自然降雨,酸雨喷洒采用喷雾法,于 2011 年 4 月中旬开始喷洒,每隔 3 d 喷 1 次(樊后保,1996).

试验设置 pH 5.6(轻度酸雨)、pH 4.0(中度酸雨)和 pH 2.5(重度酸雨)3 个酸雨浓度梯度,每个

梯度设置 3 种处理方式,即:①地上处理(T1),用塑料薄膜纸隔离土壤层,酸雨只淋洗植物地上部分,旨在揭示酸雨对植物的直接作用机制;②全淋处理(T2),模拟自然降雨,酸雨淋洗植物叶片和茎干部分再自然流入土壤,旨在揭示酸雨对植物直接和间接作用机制;③土壤处理(T3),酸雨只淋洗植物土壤部分,各种淋洗方式喷洒的酸雨量相等,旨在论证 Ulrich 的“土壤酸化-铝毒理论”.外加一组空白对照组(CK),喷以等量清水.每个处理组有 7 盆,之后选择其中的 5 株作为各项指标测定的材料.

2.3 测定方法

2.3.1 叶绿素荧光参数的测定 试验于 2011 年 8 月中旬进行,每组挑选 5 盆长势一致的植株,每株上选取 3 片长势一致,照光均一的叶片,用便携式调制叶绿素荧光仪 PAM-2100(Walz, Germany)测定它们的叶绿素荧光参数(张教林, 2003; 陈贻竹等, 1995),每片叶片叶脉两边各测 1 次.测定前植物先暗适应 20 min,然后测定初始荧光(F_0)、最大荧光(F_m)、稳定荧光 F_s 、光下最大荧光 F'_m 、光适应下的 F'_0 、PS II 最大光化学效率(F_v/F_m)以及光适应下 PS II 实际光化学效率(Y_{ield})和光化学猝灭系数(q_p),再计算得出 PS II 潜在光化学活性(F_v/F_0) (喻方圆, 2004; Sant'Anna-Santos *et al.*, 2006).

$$F_v/F_m = (F_m - F_0)/F_m$$

$$F_v/F_0 = (F_m - F_0)/F_0$$

$$Y_{ield} = (F'_m - F_s)/F'_m$$

$$q_p = (F'_m - F_s)/(F'_m - F'_0)$$

2.3.2 光合参数的测定 同期,同取样进行测定.利用 Li-6400 便携式光合作用测定系统(Li-COR, USA)的 6400-02B 内置式红蓝光源测定其光合作用特征参数和光响应曲线.测定时设置叶室温度 25 °C,流量为 500 $\mu\text{mol} \cdot \text{s}^{-1}$,相对湿度 60%,光强(Photosynthetic photon quanta flux density, PAR)由强到弱依次设定为 2000、1500、1000、600、300、200、100、80、50、20 和 0 $\mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$,每个光强下植物照射 3 min.待测定值稳定后开始读数.在仪器上直接得到的数据包括:净光合速率 P_n ($\mu\text{mol CO}_2 \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$)、气孔导度 Cond($\text{mol H}_2\text{O} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$)、胞间 CO_2 浓度 C_i ($\mu\text{mol CO}_2 \cdot \text{mol}^{-1}$)和蒸腾速率 T_r ($\text{mmol H}_2\text{O} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$)等(李佳等, 2010).以光强(PAR)为横坐标,净光合速率(P_n)、胞间二氧化碳浓度(C_i)、气孔导度(Cond)、蒸腾速率(T_r)为纵坐标绘制光响应曲线,并利用 PhotosynAssistant 软件对 P_n -PAR 光响应曲

线进行拟合,得到最大净光合速率(A_{max})、暗呼吸速率(R_d)、光饱和点(LSP)、光补偿点(LCP)、表观量子效率(AQY),光响应曲线拟合的方程为:

$$P_n = [AQY \times L + A_{\text{max}} - \text{sqrt}[(AQY \times L + A_{\text{max}})^2 - 4 \times AQY \times A_{\text{max}} \times L \times K]/2 \times K] - R_d$$

式中, P_n 为净光合速率; A_{max} 为最大净光合速率, $A_{\text{max}} \leq 50$;AQY 为表观量子效率, $0 < AQY < 0.125$;L 为光合有效辐射; K 为光响应曲线的曲率, $0 < K < 1.2$ (汪赛, 2014).

2.3.3 相对叶绿素含量的测定 叶绿素荧光和光合参数测定的同时,利用便携式叶绿素含量测定仪(SPAD-502, Japanese)测定植株的相对叶绿素含量,选取与叶绿素荧光参数测定时相同的植株上的相同叶片,每片叶片测定 6 次,取平均值,15 个叶片平均值作为该处理的测定结果.

2.4 处理方法

Excel 进行数据整理并进行作图,用 SPSS16.0 对数据进行方差齐性检查,并进行双因素的方差分析.

3 结果(Results)

3.1 酸雨胁迫对茶树叶片相对叶绿素含量的影响

相对叶绿素含量(SPAD)与植物叶绿素含量密切相关,能较好地反映植物叶绿素含量的变化(Kitao *et al.*, 2003).从图 1 可以看出,重度酸雨胁

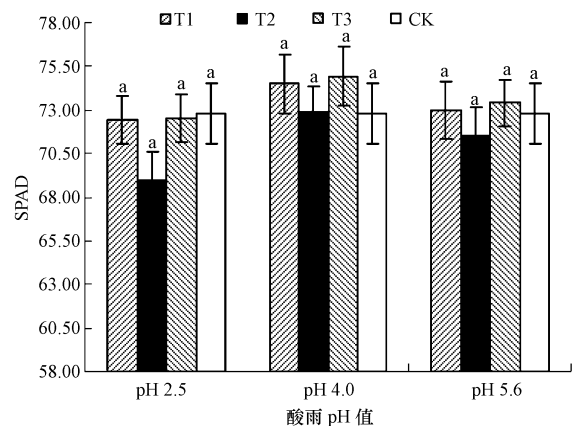


图 1 不同酸雨处理对茶相对叶绿素含量的影响(平均值 \pm 标准误差),柱上不同字母表示存在显著差异($p < 0.05$) (T1: 地上酸雨处理;T2: 全淋酸雨处理;T3: 土壤酸雨处理;CK: 空白对照)

Fig. 1 Effect of different acid rain treatments on the relative chlorophyll content of *Camellia sinensis* seedlings (Mean \pm S.E.), Bars with different letters are significantly different at $p = 0.05$ level

迫下,处理组相对叶绿素含量低于对照组,具体表现为:CK>土壤处理>地上处理>全淋处理.而中度胁迫下,处理组均高于对照组,具体表现为:土壤处理>地上处理>全淋处理>CK.轻度酸雨胁迫下,变化趋势为土壤处理>地上处理>CK>全淋处理.但3种酸雨强度下,各处理组与对照之间差异均不显著($p>0.05$).初步表明3种处理方式下杜英幼苗相对叶绿素含量都是随着酸雨酸度升高而先增加后下降.轻、重度胁迫下,全淋条件下抑制叶绿素合成,中度胁迫下,促进叶绿素合成;重度胁迫下,地上和土壤条件下抑制叶绿素合成,轻、中度胁迫下,促进叶绿素合成.

3.2 酸雨胁迫对茶树叶片叶绿素荧光参数的影响

F_v/F_m 代表PS II原初光能转化效率, F_v/F_0 表示PS II的潜在活性,非环境胁迫条件下叶片的 F_v/F_m 极少变化,胁迫条件下该指数明显下降(林文雄等,

2002).PS II实际光化学效率(Y_{ield})常用来作为植物叶片光合电子传递速率快慢的相对指标(胡文海等,2005).光化学猝灭系数(q_p)反映的是PS II天线色素吸收的光能用于光化学传递的份额(马博英,2006).

从图2可以看出,重度酸雨胁迫下,处理组叶绿素参数中的 F_v/F_m 、 F_v/F_0 、 Y_{ield} 和 q_p 都低于对照组,具体表现为CK>土壤处理>地上处理>全淋处理,各处理组与对照之间差异均不显著($p>0.05$).说明土壤、地上和全淋酸雨处理降低了其原初光能转化效率、PS II的潜在活性、PS II实际光化学量子产量和PS II天线色素吸收的光能用于光化学传递的能力.而中度酸雨胁迫下,处理组均高于对照组,具体表现为土壤处理>地上处理>全淋处理>CK.其中, F_v/F_0 和 q_p 各处理组与对照组之间差异均不显著($p>0.05$),而 F_v/F_m 和 Y_{ield} 地上和土壤组与对照组

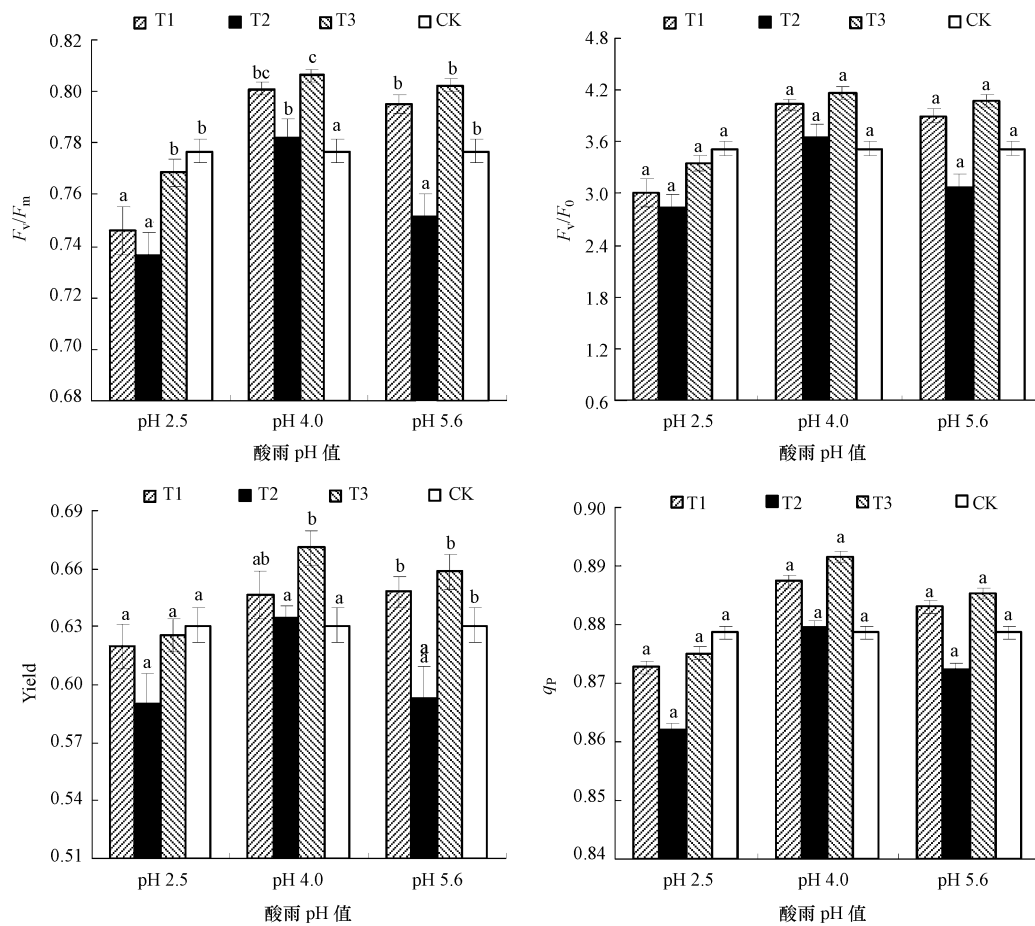


图2 3种酸雨处理方式对茶树幼苗 F_v/F_m 、 F_v/F_0 、 Y_{ield} 和 q_p 的影响(平均值±标准误差),柱上不同字母表示存在显著差异($p<0.05$)(T1:地上酸雨处理;T2:全淋酸雨处理;T3:土壤酸雨处理;CK:空白对照)

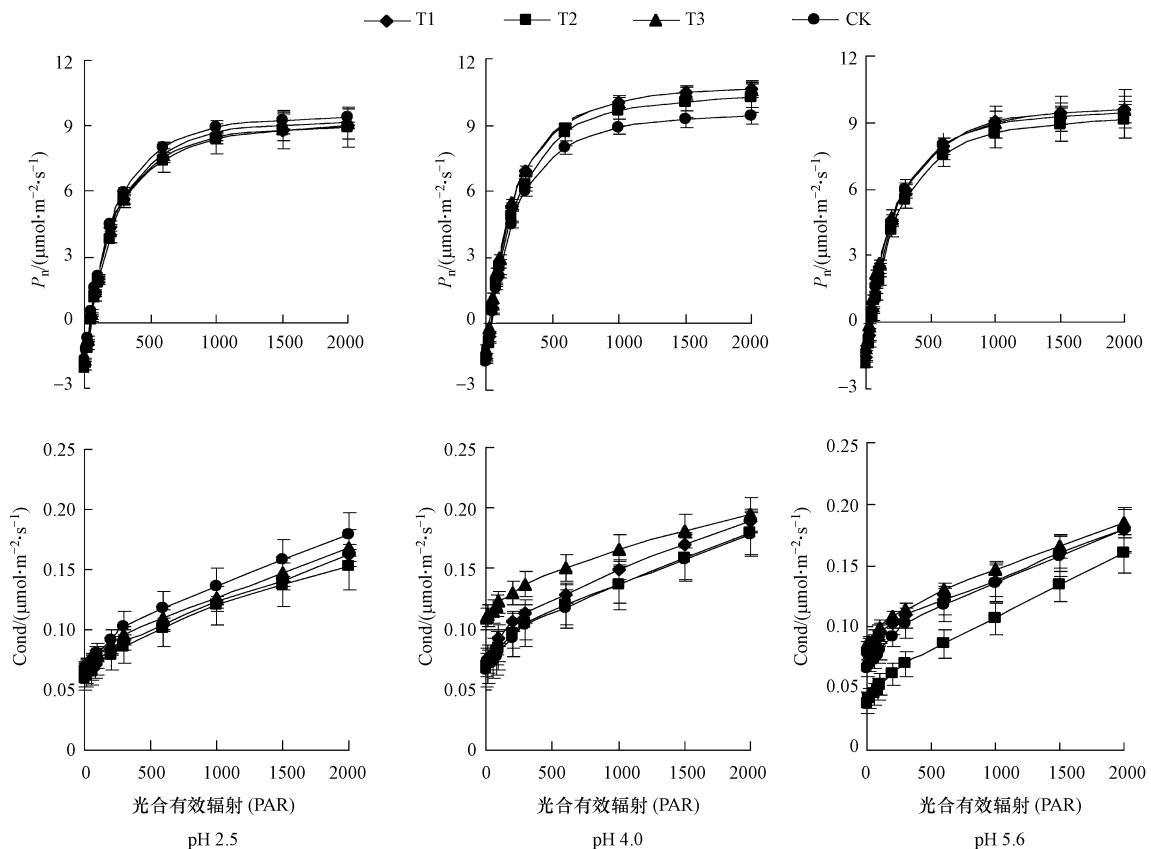
Fig.2 Effect of different acid rain treatments on F_v/F_m 、 F_v/F_0 、 Y_{ield} and q_p of *Camellia sinensis* seedlings (Mean±S.E.). Bars with different letters are significantly different at $p=0.05$ level

之间差异显著($p < 0.05$).轻度酸雨胁迫下,变化趋势为土壤处理>地上处理>CK>全淋处理,其中 F_v/F_0 和 q_p 各处理组与对照之间差异均不显著($p > 0.05$),而 F_v/F_m 和 Y_{ield} 全淋组与对照组之间差异显著($p < 0.05$).这说明土壤处理对 F_v/F_0 、 Y_{ield} 、 q_p 的正面影响最大,地上处理次之,全淋处理最小;中度酸雨胁迫下,这种影响表现为促进茶叶叶片叶绿素的合成,使茶叶片潜在活性略有升高,而重度酸雨胁迫则表现为抑制叶片叶绿素的合成和造成潜在活性的降低.

植物受到酸雨的胁迫,其光合速率会发生变化,植物的干物质的积累也会发生改变. P_n 是指光合作用产生的糖类减去呼吸作用消耗的糖类(即净光合作用产生的糖类)的速率.气孔是植物叶片与外界进行气体交换的主要通道,气孔张开的程度用气孔导度(Cond)表示,气孔张开程度的不同会影响光合作用,呼吸作用及蒸腾作用(蒋馥蔚等,2008). C_i 是光合生理生态研究中经常用到的一个参数, C_i 的变化方向是确定光合速率变化的主要原因和是否为气孔因素的必不可少的判断依据(Farquhar, 1982; 许大全, 1997; Genty; 1989). T_r 是指植物在单位时间内通过单位面积蒸腾作用所散失的水量,该指标的

高低反映了植物对周围环境适应的能力(白静, 2007),与 Cond 息息相关,其值越大,净光合速率越高.

由图 3 可知,在 pH 2.5 酸雨处理下,当 PAR 低于 $200 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 时,不同处理间樟树 P_n 均与 PAR 呈线性关系,且随着 PAR 强度的增强而增大,同时不同处理间的 P_n 差别不大;当 PAR 在 $200 \sim 2000 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 之间, P_n 随光强的增加而缓慢增大,不同酸雨处理间的 P_n 增大不同,同一光合有效辐射强度下,地上、全淋和土壤酸雨处理的茶树 P_n 均小于对照,总体呈现出:CK>土壤>地上>全淋,说明重度酸雨处理下伤害了茶树利用 $200 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 以上的光合有效辐射的能力;Cond 表现出:CK>土壤>地上>全淋,各处理组与对照组无显著差异($p > 0.05$); C_i 在 pH 2.5 酸雨处理下对照组小于各处理组,总体表现出全淋>地上>土壤>CK; T_r 在 pH 2.5 酸雨处理下,总表现为:CK>土壤>地上>全淋.在 pH 4.0 酸雨处理下 P_n 表现为:土壤>地上>全淋>CK,而在 pH 5.6 酸雨处理下为:土壤>地上>CK>全淋;在 pH 4.0 和 pH 5.6 酸雨处理下,Cond 与 P_n 规律相似,分别表现为:土壤>地上>全淋>CK 和土壤>地上>



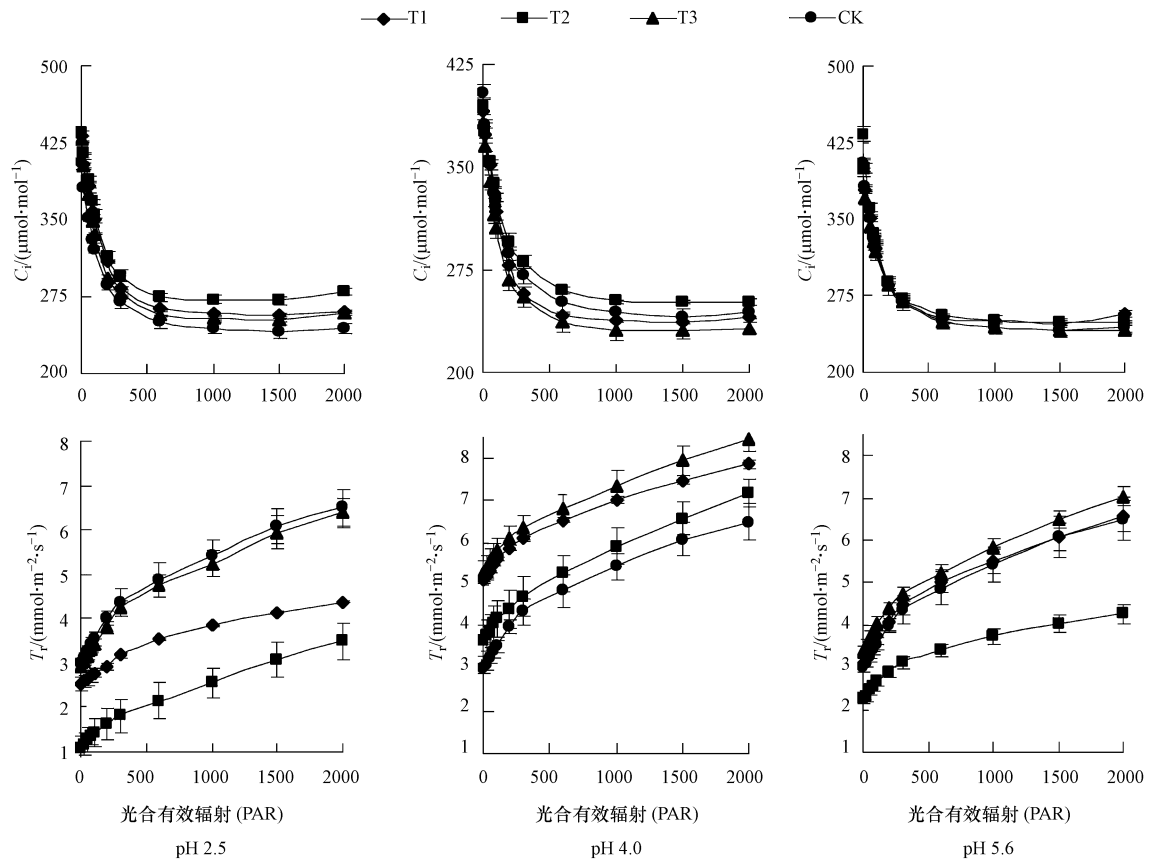


图3 3种酸雨处理方式对茶幼苗的气体交换参数的影响(T1:地上酸雨处理;T2:全淋酸雨处理;T3:土壤酸雨处理;CK:空白对照)

Fig.3 Effect of gas exchange parameters of *Camellia sinensis* in the three simulated acid rain treatments

CK>全淋; C_i 在 pH 4.0 酸雨处理下为 CK>全淋>地上>土壤,而在 pH 5.6 酸雨处理下为全淋>CK>地上>土壤,这与 P_n 和 Cond 的变化规律相反; T_p 的规律与 Cond 一致,这跟甘德欣的研究相同,认为气孔导度的下降必然引起蒸腾速率的降低,蒸腾速率的高低与气孔的开关息息相关(甘德欣,2006).

3.4 酸雨胁迫对茶树光合作用特征参数的影响

光响应曲线可以测量叶片适应不同水平光照的能力,对研究植物的限制范围及其他植物叶片的胁迫的效应十分有价值,正常环境下光响应曲线是稳定的,当受到胁迫时光合参数指标就会发生变化(张瑞华,2008;Chen,2005).

A_{max} 表示植物叶片的最大净光合速率,AQY 是指植物每吸收一个光量子所固定的 CO_2 或释放 O_2 的分子数,两者均是衡量植物光合能力大小的参数.由表 1 可知,在 pH 2.5 的酸雨处理下,地上处理组的最大净光合速率比对照组提高了 0.5%,土壤处理组与对照组相比 A_{max} 提高了 2.3%,而全淋处理组与对照组相比 A_{max} 减少了 14.5%,全淋处理组与对照

组有显著差异;而 AQY 4 组之间差异不显著;在 pH 4.0 的酸雨处理下,各处理组的 A_{max} 都比对照组有所提高,与对照组相比,地上、全淋和土壤分别提高了 1.9%、1.7% 和 3.0%,各处理组的 A_{max} 和 AQY 与对照组均无显著差异;在 pH 5.6 的酸雨处理下,地上和土壤处理组的 A_{max} 比对照组略有提高,而全淋组比对照组减少了 3.5%,各处理组与对照组均无显著差异,但 AQY 全淋组与对照组有显著差异,地上和土壤组与对照组无显著差异.

LCP 是表示植物对弱光的适应能力大小的参数,LCP 越小说明植物对弱光的适应能力越强,LCP 越高说明植物利用弱光的能力越低.LSP 是表示植物的强光的适应能力的大小,LSP 越大说明植物的耐阴性越强,在强光下也不容易发生光抑制现象(甘德欣,2006).在 pH 2.5 的处理下,各处理组的 LCP 与对照组比较,地上、全淋和土壤分别提高了 42.8%、28.6% 和 14.3%,各处理组的 LSP 与对照组比较土壤组增高了 8.1%,全淋组降低了 33.7%,地上组略有下降;pH 4.0 处理下,各处理的光补偿点

和光饱和点均比对照组低,但 4 组之间差异不显著;在 pH 5.6 下,光补偿点地上和全淋与对照组相比都提高了 28.6%,而土壤比对照组减少了 28.6%,光饱和点土壤组比对照组增高了 11.0%,两者之间有显著差异,全淋组比对照组降低了 4.7%,两者之间有显著差异。

R_d 指的是植物在无光时进行的呼吸速率,暗呼吸速率越高说明植物消耗的有机物质越多,这不利于植物的生长,也是植物生长过程中受胁迫程度的

间接反映(李万超,2008)。pH 2.5 下,各处理组均比对照组高,地上、全淋和土壤各处理组分别增加了 22.0%、11.3%和 7.7%,且地上和全淋组均与对照组存在显著差异;pH 4.0 下,各处理组均比对照组低,地上、全淋和土壤各处理组分别降低了 7.1%、0.6%和 31.5%,土壤组与对照组存在显著差异;pH 5.6 下,地上和土壤组与对照组相比,分别降低了 5.4%和 32.7%,土壤组与对照组存在显著差异,而全淋组比对照组增加了 11.3%。

表 1 3 种酸雨处理方式对茶树幼苗光合作用特征参数的影响(平均值±标准误差)

Table 1 Effect of three acid rain treatments on photosynthetic parameters of *Camellia sinensis* seedlings (Mean±S.E.)

酸雨梯度	处理方式	最大净光合速率	表观光量子效率	光补偿点	光饱和点	暗呼吸速率
		$A_{max}/$ ($\mu\text{mol CO}_2 \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$)	AQY/ ($\mu\text{mol CO}_2 \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$)	LCP/ ($\mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$)	LSP/ ($\mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$)	$R_d/$
pH2.5	T1	14.24±0.18 ^a	0.061±0.001 ^b	40±1.25 ^a	1044±29.7 ^b	2.05±0.07 ^a
	T2	12.12±1.19 ^b	0.061±0.001 ^b	36±2.95 ^a	700±87.3 ^c	1.87±0.67 ^a
	T3	14.50±1.01 ^a	0.069±0.001 ^a	32±1.51 ^b	1142±78.6 ^a	1.81±0.09 ^b
	CK	14.17±0.51 ^a	0.065±0.002 ^{ab}	28±1.09 ^b	1056±106.1 ^b	1.68±0.10 ^b
pH4.0	T1	14.44±0.77 ^a	0.065±0.001 ^a	24±2.31 ^a	904±60.6 ^b	1.56±0.30 ^a
	T2	14.41±0.72 ^a	0.067±0.001 ^a	28±0.96 ^a	1044±27.3 ^{ab}	1.67±0.07 ^a
	T3	14.59±0.57 ^a	0.067±0.002 ^a	20±0.89 ^a	1050±73.3 ^a	1.15±0.03 ^b
	CK	14.17±0.51 ^a	0.065±0.002 ^a	28±1.09 ^a	1056±106.1 ^a	1.68±0.10 ^a
pH5.6	T1	14.21±0.42 ^a	0.073±0.001 ^a	36±2.22 ^a	1080±74.3 ^{ab}	1.59±0.17 ^a
	T2	13.68±1.14 ^a	0.061±0.001 ^b	36±1.86 ^{ab}	1006±102.9 ^c	1.87±0.11 ^a
	T3	14.27±0.57 ^a	0.073±0.001 ^a	20±1.60 ^b	1172±141.5 ^a	1.13±0.22 ^b
	CK	14.17±0.51 ^a	0.065±0.002 ^a	28±1.09 ^{ab}	1056±106.1 ^b	1.68±0.10 ^a

注:1. T1: 地上酸雨处理;T2: 全淋酸雨处理;T3: 地下酸雨处理;CK: 空白对照; 2. 同列不同小写字母表示差异显著($p<0.05$) Data with different small letters in the same column indicated significant difference at 0.05 level; 3. 表中数据为光合作用特征参数值 The data are photosynthetic parameters above table;最大净光合速率(A_{max}) Maximum net photosynthetic rate;表观光量子效率(AQY) Apparent quantum yield;光补偿点(LCP) Light compensation point;光饱和点(LSP) Light saturation point;暗呼吸速率(R_d) Dark respiration rate.

3.5 酸雨强度、处理方式及二者交互作用对茶树生理参数的影响

如表 2 所示,酸雨强度和处理方式对茶的 F_v/F_m 、 F_v/F_0 、 Y_{ield} 、 q_P 、 P_n 、 $Cond$ 、 C_i 、 T_r 、 A_{max} 、AQY、LSP、LCP 和 R_d 都有显著影响($p<0.05$),但对相对叶绿素含量(SPAD)的影响差异不显著($p>0.05$)。酸雨

强度对 SPAD、 F_v/F_0 、 q_P 的影响大于处理方式的影响。同时,处理方式和酸雨强度的交互作用对茶的 F_v/F_m 、 A_{max} 、AQY、LSP、LCP、 P_n 、 T_r 和 R_d 都有显著影响($p<0.05$),而对 SPAD、 F_v/F_0 、 Y_{ield} 、 $Cond$ 、 C_i 和 q_P 的影响不显著($p>0.05$)。

表 2 酸雨梯度、处理方式及二因素交互作用对茶幼苗光合特征参数的双因素方差分析

Table 2 Multivariate analysis of variance for the effects of pH value of simulated acid rain, acid rain stress conditions, and their interactions on photosynthetic parameters of *Camellia sinensis* seedlings

参数	酸雨 pH 值		处理方式		酸雨 pH 值×处理方式	
	F	Sig.	F	Sig.	F	Sig.
SPAD	1.835	0.174	1.550	0.226	0.100	0.982
F_v/F_m	23.273	0.000 *	46.000	0.000 *	3.929	0.005
F_v/F_0	28.323	0.000 *	8.283	0.001	1.234	0.303
Y_{ield}	10.877	0.000 *	16.045	0.000 *	1.422	0.230

续表2

参数	酸雨 pH 值		处理方式		酸雨 pH 值×处理方式	
	<i>F</i>	Sig.	<i>F</i>	Sig.	<i>F</i>	Sig.
q_p	11.890	0.001	9.064	0.000*	2.122	0.130
P_n	22.689	0.000*	14.689	0.000*	10.053	0.002
Cond	12.125	0.025	12.589	0.215	2.109	0.125
C_i	10.256	0.017	12.563	0.306	1.093	0.303
T_r	6.678	0.006	10.956	0.001	5.983	0.012
A_{max}	7.247	0.001	8.924	0.000*	4.768	0.000*
AQY	4.065	0.020	14.475	0.000*	2.440	0.031
LCP	3.163	0.047	12.000	0.000*	6.379	0.000*
LSP	15.410	0.000*	16.096	0.000*	2.601	0.022
R_d	4.746	0.011	14.738	0.000*	4.809	0.000*

注: * $P < 0.05$.

4 结论 (Conclusions)

4.1 酸雨对茶树幼苗叶片相对叶绿素含量的影响

植物生长量和叶绿素含量反映了植物光合产物积累的情况,并与植物的光合能力大小有关(殷秀敏等,2010).本研究结果表明,处理方式对茶的相对叶绿素含量影响并不显著,土壤处理下茶叶叶绿素合成量最大,地上处理次之,全淋处理下值最小,这与汪赛(2014)对茶的研究结果略有不同,可能与测量环境有关.全淋处理对植物的负面影响最大,可能与植物生理自身的复杂性有关,全淋处理会将叶片和茎干中淋洗出的矿质元素以及分泌的次生代谢物质带入土壤,所以情况比地上和地下单独处理更为复杂.而土壤处理下,土壤酸化程度虽然最大,但由于土壤的本身性质对酸雨有缓冲的作用,其根系对于酸雨的缓冲能力不同于叶片等地上结构对于酸雨的缓冲能力.酸雨进入土壤后逐渐被植株体吸收,尤其 N、S 对于植物生长有促进作用,因此,综合看来,土壤处理的毒害作用反倒最小.

4.2 酸雨对茶树幼苗叶片叶绿素荧光的影响

叶绿素荧光分析技术常用于检测植物光合机构对环境胁迫的响应(张雷明等,2003).研究发现,随着酸雨强度的增加,植物的 PSII 最大光化学效率和实际原初光能捕获效率有下降的趋势(金清,2010).而本研究发现,轻、中度酸雨环境下,土壤处理和地上处理能促进茶幼苗的光合作用过程,使 F_v/F_m 、 F_v/F_0 、 Y_{ield} 和 q_p 升高,而重度酸雨环境下,3种处理方式都会使 F_v/F_m 、 F_v/F_0 、 Y_{ield} 和 q_p 降低,说明适度酸雨胁迫能促进茶叶片的光合作用,而胁迫程度增强会抑制植物的光合作用.但3种处理方式对茶幼苗叶绿素荧光特性的影响大小却不同,土壤

处理对茶光合作用的正面影响最大,而全淋处理对其负面影响却最大,这是土壤处理的施肥作用与全淋处理的直接和间接双重伤害造成的.叶绿素荧光参数光化学淬灭系数(q_p)可反映叶片对激发能利用的情况.在中度酸雨环境里,土壤处理下茶幼苗的 q_p 值下降幅度最大,表明其可以充分利用光能,减少热耗散,促进光合作用的进行.而重度酸雨环境里,3种处理方式下茶幼苗的 q_p 值也都低于对照组,这是因为酸雨胁迫程度过大,光合机构受到了破坏,植物热耗散能力减弱,更多的光能被反射回去(刘昊,2009).

4.3 酸雨对茶树幼苗叶片光合特性的影响

模拟酸雨喷洒试验表明:叶面环境酸化对植物叶片具有直接伤害作用,它会使受试植物叶片膜脂发生过氧化(Yoshida,2004;李志国等,2007),降低叶片光合速率,破坏植物光合系统(邱栋梁,2002;马博英,2006).在重度酸雨环境下,3种处理方式使得茶叶片净光合速率和气孔导度下降,同时胞间 CO_2 浓度升高,由此可推测,茶幼苗叶片的净光合速率的下降主要不在气孔,而是叶肉细胞光合活性的下降.Farquhar 等(1982)指出:在光合速率和气孔导度同向变化而胞间 CO_2 浓度以相反方向变化时,说明气孔不是限制光合作用的主要原因.在重度酸雨处理下,3种处理都使得茶的光补偿点升高了,说明重度酸雨减弱了茶幼苗对弱光的适应能力,同时提高了茶的暗呼吸速率,使得茶的有机物的消耗增多,不利于茶树的生长.中度酸雨胁迫下,3种处理方式提高了茶幼苗的最大净光合速率和表观量子数,降低了暗呼吸速率,说明 pH 4.0 的酸雨处理有利于茶树的生长,同时土壤处理降低了茶幼苗的光补偿点和光饱和点,增强茶幼苗对弱光的利用能

力,使其能在林荫下生长良好。

从研究的总体来看,中度酸雨对茶树植株的光合作用有一定的促进作用,而重度酸雨会起到抑制植物的各项参数指标,可进一步说明茶树适宜于在偏酸性的土壤中生长。中度酸雨环境里,土壤处理有利于茶树的光合作用,可能是由于组成细胞质的蛋白质是两性电解质,在弱酸性环境下,氨基酸带正电荷,易于吸附外界溶液中的阴离子,且在酸性环境下 NO_3^- 和 SO_4^{2-} 易于溶解(潘瑞炽,2008)。酸雨进入土壤后逐渐被植株体吸收,其中 N、S 对于植物生长有促进作用。而重度酸雨环境里,酸雨酸度超过茶树幼苗的正常忍受范围,所以对照组长势最好,而全淋处理由于地上部分的茎叶受到酸雨的淋洗,导致杜英的气孔无法进行正常的气孔开闭,这样导致进行光合作用的能力降低,同时酸雨酸度超过土壤酸雨的缓冲能力,导致土壤酸化,进而影响植物根系对水分和营养元素的吸收,直接和间接作用的双重作用导致全淋处理条件下杜英长势最差。同时土壤处理方式最有利于茶幼苗的光合作用进行,可以作为茶幼苗的种植的一个方法尝试。酸雨浓度和处理方式的交互作用对 F_v/F_m 、 A_{\max} 、AQY、LSP、LCP、 P_n 、 T_r 和 R_d 都有显著影响 ($p < 0.05$),而对其他各测量指标均无显著影响。说明酸雨对植物的影响要根据酸雨的酸度而定,如在重度酸雨条件下,植物不仅要受到酸雨对植物的直接影响,还要受到来自土壤酸化后有害植物物质的影响,而轻度酸雨条件下,由于土壤的理化性质起到对酸雨的缓冲作用,不但不抑制植物的生长,反而促进植物的生长。模拟自然方式的全淋处理并不单单是地上和土壤处理的简单结合,还要考虑树种以及当地的土壤类型等等。但由于本实验的局限性,仅是在受控条件下对茶幼苗进行了探究性研究,随着茶幼苗年龄的增大,在自然条件下,它对酸雨的适应机制是否会发生变化还需要做进一步深入研究。

责任作者简介: 伊力塔(1980—),男,博士,浙江农林大学副教授、研究生导师。主要研究领域为群落生态学、恢复生态学的研究工作。

参考文献(References):

Back J, Huttunen S, Turunen M. 1995. Effects of acid rain on growth and nutrient concentrations in Scots pine and Norway spruce seedlings grown in a nutrient-rich soil [J]. *Environmental Pollution*, 89: 177-187

- 白静,田有亮,郭连生.2007.侧柏等 3 树种光合、水分生理生态特征的研究[J].(内蒙古农业大学学报:自然科学版),28:31-35
- Bellani L M, Rinallo C, Muccifora S, et al. 1997. Effects of simulated acid rain on pollen physiology and ultrastructure in the apple [J]. *Environmental Pollution*, 95(3):357-362
- Chen S P, Bai Y F, Zhang L X. 2005. Comparing physiological responses of two dominant grass species to nitrogen addition in Xilin River Basin of China [J]. *Environmental and Experimental Botany*, 53(1):65-75
- 陈怡竹,李晓萍,夏丽,等.1995.叶绿素荧光技术在植物环境胁迫研究中的应用[J].热带亚热带植物学报,3(4):79-86
- 单运峰.1944.酸雨、大气污染与植物[M].北京:中国环境科学出版社
- 单运峰,冯宗炜.1988.模拟酸雨对马尾松和杉木幼树的影响[J].环境科学学报,8(3):307-314
- 樊后保,黄玉梓,李燕燕,等.2005.模拟酸雨对杉木种子萌发和幼苗生长的影响[J].江西农业大学学报,(6):875-879
- 樊后保,臧润国.1996.模拟酸雨对樟树种子萌发和幼苗生长的影响[J].浙江林学院学报,13(4):412-417
- Farquhar G D, Sharkey T D. 1982. Stomatal conductance and photosynthesis [J]. *Annual Reviews Plant Physiology*, 33:317-345
- 甘德欣,王明群,龙岳林.2006.风景园林学科创新型研究生课堂教学模式改革与探索[D].湖南农业大学学报(自然科学版),32(6):607-610
- Genty B, Briantais J M, Baker N R. 1989. The relationship between the quantum yield of photosynthesis electron transport and quenching of Chlorophyll fluorescence [J]. *Biochimica et Biophysica Acta*, 990: 87-92
- 胡文海,黄黎锋,肖宜安,等.2005.夜间低温对 2 种光强下榕树叶绿素荧光的影响[J].浙江林学院学报,22(1):20-23
- 金清,江洪,余树全,等.2010.酸雨胁迫对苦楝幼苗气体交换与叶绿素荧光的影响[J].植物生态学报,34(9):1117-1124
- 蒋蔚蔚,江洪,李巍,等.2008.不同起源时期的 3 种被子植物对酸雨胁迫响应的光合生理生态特征[J].植物生态学报,17(6):2374-2380
- 孔海云,张丽霞,王日为.2011.低温与光照对茶树叶片叶绿素荧光参数的影响[J].茶叶,37(2):75-78
- Kitao M, Utsugi H, Kuramoto S, et al. 2003. Light-dependent photosynthetic characteristics indicated by Chlorophyll fluorescence in five mangrove species native to Pohnpei Island [J]. *Micronesia Physiol Plant*, 117:376-382
- 李佳,江洪,余树全,等.2009.模拟酸雨胁迫对青冈幼苗光合特性和叶绿素荧光参数的影响[J].应用生态学报,20(9):2092-2096
- 李万超,江洪,曾波,等.2008.模拟酸雨对青冈和木荷幼苗光合响应特性的影响[J].西南大学学报(自然科学版),30(7):98-103
- 李志国,姜卫兵,翁忙玲,等.2007.模拟酸雨对木兰科树种叶片膜脂过氧化和抗氧化系统的影响[J].生态环境,16(3):779-784
- 林文雄,吴杏春,梁义元,等.2002.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,8(1):8-12
- 刘昊.2009.模拟酸雨对浙江省 12 种常绿阔叶树幼苗叶绿素荧光特性的影响[D].浙江林学院学报,26(1):32-37
- 马博英,徐礼根,蒋德安.2006.模拟酸雨对假俭草叶绿素荧光特性的影响[J].林业科学,11(11):8-11
- 邱栋梁,刘星辉,郭素枝.2002.模拟酸雨对龙眼叶片气体交换及叶绿

- 素 a 荧光参数的影响[J].植物生态学报,26(4):441-446
- Sant'Anna-Santos B F, Campos da Silva L, Azevedo A A, et al. 2006. Effects of simulated acid rain on the foliar micromorphology and anatomy of tree tropical species[J].Environmental and Experimental Botany,58:158-168
- Ulrich B.1980.An ecosystem hypothesis for the causes of silver fir (*Abies alba*) dieback[A].In: International conference on silver fir dieback[C].Kelheim, West Germany,228-236
- 汪赛.2012.不同酸雨处理对茶(*Camellia sinensis*)和青冈(*Quercus glauca*)的作用规律研究[D].临安:浙江农林大学学报
- 汪赛,伊力塔,余树全,等.2014.模拟酸雨对青冈光合及叶绿素荧光参数的影响[J].应用生态学报,25(7):2183-2192
- 许大全.1997.光合作用气孔限制分析中的一些问题[J].植物生理学通讯,33(4):241-244
- 殷秀敏,余树全,江洪,等.2010.酸雨胁迫对秃瓣杜英幼苗叶片叶绿素荧光特性和生长的影响[J].应用生态学报,21(6):1374-1380
- Yoshida K, Shibasaki R, Takami C R.2004. Esponse of gas exchange rates in *Abies firma* seedlings to various additional stresses under acid fog stress[J].The Japanese Forestry Research,9(3):195-203
- Yu F Y, Robert D G.2004. Variable chlorophyll fluorescence in response to water plus heat stress treatments in three coniferous tree seedlings [J].Journal of Forestry Research,15(1):24-28
- 张教林,曹坤芳.2003.夜间低温对2种热带雨林树种幼苗叶绿素荧光的影响[J].武汉植物学研究,21(4):356-360
- 张雷明,上官周平,毛明策,等.2003.长期施氮对旱地小麦灌浆期叶绿素荧光参数的影响[J].应用生态学报,14(5):695-698
- 张瑞华,徐坤,董灿兴.2008.光质对生姜叶片光合特性的影响[J].中国农业科学,41(11):3722-3727