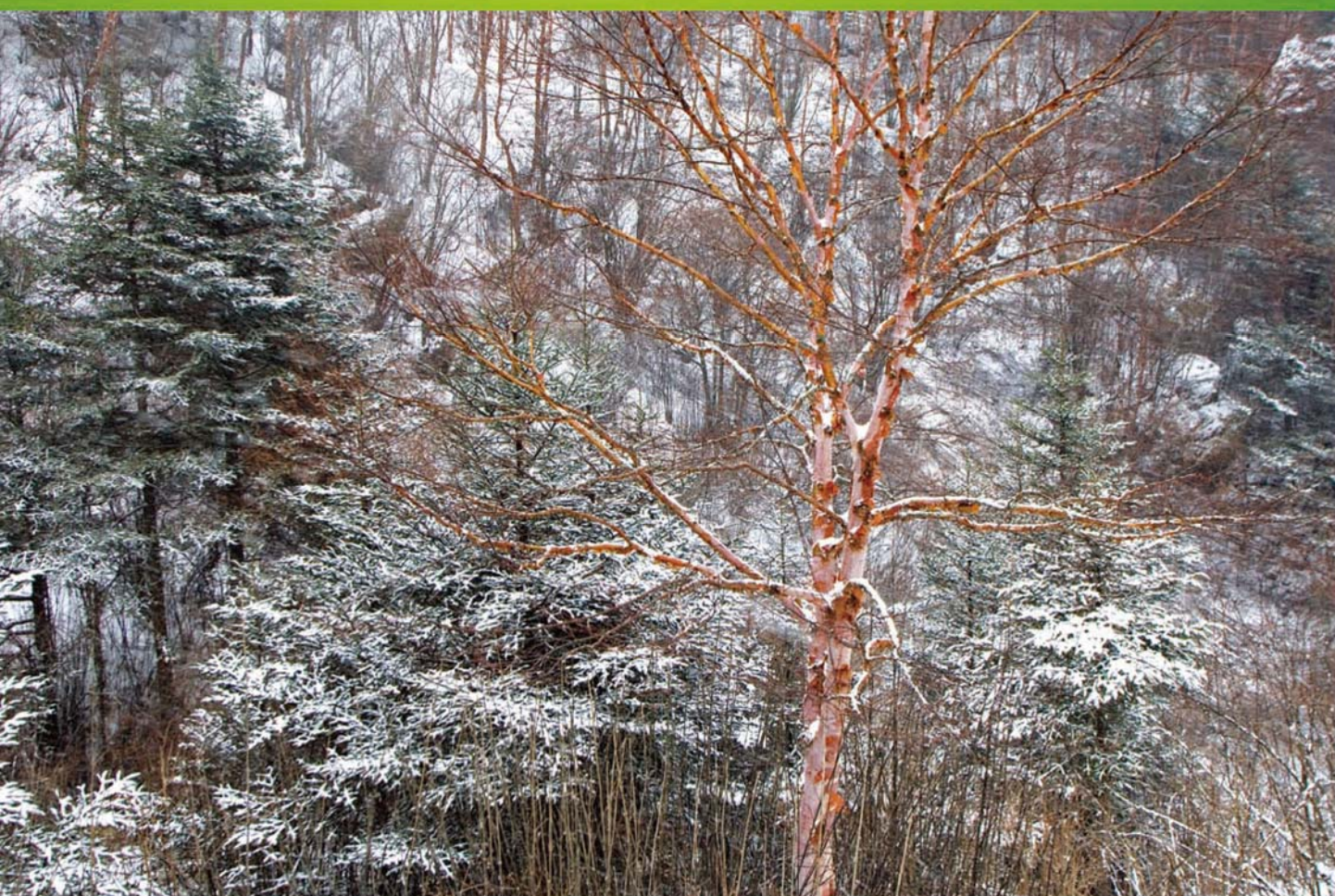


ISSN 1000-0933
CN 11-2031/Q

生态学报

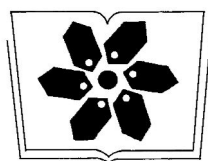
Acta Ecologica Sinica



第34卷 第8期 Vol.34 No.8 **2014**

中国生态学学会
中国科学院生态环境研究中心
科学出版社

主办
出版



中国科学院科学出版基金资助出版

生态学报

(SHENGTAI XUEBAO)

第 34 卷 第 8 期 2014 年 4 月 (半月刊)

目 次

前沿理论与学科综述

- 海洋浮游纤毛虫生长率研究进展..... 张武昌,李海波,丰美萍,等 (1897)
- 城市森林调控空气颗粒物功能研究进展..... 王晓磊,王 成 (1910)
- 雪地生活跳虫研究进展..... 张 兵,倪 珍,常 亮,等 (1922)

个体与基础生态

- 黄河三角洲贝壳堤岛叶底珠叶片光合作用对 CO_2 浓度及土壤水分的响应.....
..... 张淑勇,夏江宝,张光灿,等 (1937)
- 米楮人促更新林与杉木人工林叶片及凋落物溶解性有机物的数量和光谱学特征.....
..... 康根丽,杨玉盛,司友涛,等 (1946)
- 利用不同方法测定红松人工林叶面积指数的季节动态..... 王宝琦,刘志理,戚玉娇,等 (1956)
- 环境变化对兴安落叶松氮磷化学计量特征的影响 平 川,王传宽,全先奎 (1965)
- 黄土塬区不同土地利用方式下深层土壤水分变化特征 程立平,刘文兆,李 志 (1975)
- 土壤水分胁迫对拉瑞尔小枝水分参数的影响..... 张香凝,孙向阳,王保平,等 (1984)
- 遮荫处理对臭柏幼苗光合特性的影响..... 赵 顺,黄秋娴,李玉灵,等 (1994)
- 漓江水陆交错带典型立地根系分布与土壤性质的关系..... 李青山,王冬梅,信忠保,等 (2003)
- 梭梭幼苗的存活与地上地下生长的关系..... 田 媛,塔西甫拉提·特依拜,李 彦,等 (2012)
- 模拟酸雨对西洋杜鹃生理生态特性的影响..... 陶巧静,付 涛,项锡娜,等 (2020)
- 岩溶洞穴微生物沉积碳酸钙——以贵州石将军洞为例..... 蒋建建,刘子琦,贺秋芳,等 (2028)
- 桂东北稻区第七代褐飞虱迁飞规律及虫源分析..... 齐会会,张云慧,蒋春先,等 (2039)

种群、群落和生态系统

- 鄱阳湖区灰鹤越冬种群数量与分布动态及其影响因素..... 单继红,马建章,李言阔,等 (2050)
- 雪被斑块对川西亚高山两个森林群落冬季土壤氮转化的影响..... 殷 睿,徐振锋,吴福忠,等 (2061)
- 小秦岭森林群落数量分类、排序及多样性垂直格局 陈 云,王海亮,韩军旺,等 (2068)
- 2012 年夏季挪威海和格陵兰海浮游植物群落结构的色素表征 王肖颖,张 芳,李娟英,等 (2076)
- 云南花椒园中昆虫群落特征的海拔间差异分析..... 高 鑫,张立敏,张晓明,等 (2085)
- 人工湿地处理造纸废水后细菌群落结构变化..... 郭建国,赵龙浩,徐 丹,等 (2095)
- 极端干旱区尾间湖生态需水估算——以东居延海为例 张 华,张 兰,赵传燕 (2102)

景观、区域和全球生态

- 秦岭重点保护植物丰富度空间格局与热点地区…………… 张殷波,郭柳琳,王 伟,等 (2109)
- 太阳辐射对黄河小浪底人工混交林净生态系统碳交换的影响…………… 刘 佳,同小娟,张劲松,等 (2118)
- 黄土丘陵区油松人工林生态系统碳密度及其分配 …………… 杨玉姣,陈云明,曹 扬 (2128)
- 湘潭锰矿废弃地不同林龄栎树人工林碳储量变化趋势…………… 田大伦,李雄华,罗赵慧,等 (2137)

资源与产业生态

- 湘南某矿区蔬菜中 Pb、Cd 污染状况及健康风险评估 …………… 吴燕明,吕高明,周 航,等 (2146)

城乡与社会生态

- 北京市主要建筑保温材料生命周期与环境经济效益评价 …………… 朱连滨,孔祥荣,吴 宪 (2155)
- 城市地表硬化对银杏生境及生理生态特征的影响…………… 宋英石,李 锋,王效科,等 (2164)

期刊基本参数:CN 11-2031/Q * 1981 * m * 16 * 276 * zh * P * ¥90.00 * 1510 * 29 * 2014-04



封面图说: 冷杉红桦混交林雪——冷杉是松科的一属,中国是冷杉属植物最多的国家,约 22 种 3 个变种。冷杉常常在高纬度地区至低纬度的亚高山至高山地带的阴坡、半阴坡及谷地形成纯林,或与性喜冷湿的云杉、落叶松、铁杉和某些松树及阔叶树组成针叶混交林或针阔混交林。冷杉具有较强的耐阴性,适应温凉和寒冷的气候,土壤以山地棕壤、暗棕壤为主。川西、滇北山区的冷杉林往往呈混交状态,冷杉红桦混交林为其中重要的类型。雪被对冷杉林型冬季土壤氮转化影响的研究对揭示高山森林对气候变化的响应及其适应机制提供重要的理论支持。

彩图及图说提供: 陈建伟教授 北京林业大学 E-mail: cites.chenjw@163.com

DOI: 10.5846/stxb201306091531

陶巧静,付涛,项锡娜,李波,吴月燕,周伟军.模拟酸雨对西洋杜鹃生理生态特性的影响.生态学报,2014,34(8):2020-2027.

Tao Q J, Fu T, Xiang X N, Li B, Wu Y Y, Zhou W J. Effects of simulated acid rain on the physiological and ecological characteristics of *Rhododendron hybridum*. Acta Ecologica Sinica, 2014, 34(8): 2020-2027.

模拟酸雨对西洋杜鹃生理生态特性的影响

陶巧静^{1,2}, 付 涛¹, 项锡娜^{1,3}, 李 波^{1,2}, 吴月燕^{1,*}, 周伟军²

(1. 浙江万里学院 生物与环境学院, 宁波 315100; 2. 浙江大学 农业与生物技术学院, 杭州 310058;

3. 上海海洋大学 水产与生命学院, 上海 201306)

摘要:采用盆栽方法,研究了不同 pH 值条件下的模拟酸雨对西洋杜鹃生长及其叶片主要生理生化特征的影响。结果表明:在酸雨胁迫下,随着酸雨胁迫的增强,西洋杜鹃叶片受害程度逐渐加重;叶片丙二醛含量逐渐升高;可溶性蛋白含量先升后降;过氧化氢酶(CAT)、过氧化物酶(POD)和超氧化物歧化酶(SOD)活性均呈先升后降的单峰曲线变化,其中 pH 值为 4.3 的处理下西洋杜鹃叶片 CAT 和 SOD 活性最高,pH 值为 3.0 的处理下其 POD 活性最高;其叶绿素含量逐渐下降;叶片净光合速率(P_n)、蒸腾速率(Tr)、气孔导度(G_s)及水分利用率(WUE)均呈先升后降的趋势,而胞间 CO_2 浓度(C_i)则持续下降,pH 值为 4.3 的处理下其 P_n 、 Tr 、 G_s 和 WUE 均达到最高。研究表明,大致可以认为 pH 值 ≤ 3.0 是酸雨对西洋杜鹃造成隐形伤害的阈值,而酸雨灾害严重地区的降水 pH 值为 2.0—4.0 左右,说明西洋杜鹃可以在酸雨灾害较重的地区生长,可作为酸雨灾害严重地区园林绿化及植被构建的物种之一。

关键词:模拟酸雨;西洋杜鹃;生理生态特性;光合;抗氧化酶

Effects of simulated acid rain on the physiological and ecological characteristics of *Rhododendron hybridum*

TAO Qiaojing^{1,2}, FU Tao¹, XIANG Xina^{1,3}, LI Bo^{1,2}, WU Yueyan^{1,*}, ZHOU Weijun²

1 College of Biology and Environment, Zhejiang Wanli University, Ningbo 315100, Zhejiang, China

2 College of Agriculture and Biotechnology, Zhejiang University, Hangzhou 310058, Zhejiang, China

3 College of Fisheries and Life, Shanghai Ocean University, Shanghai 201306, China

Abstract: Acid rain has become a serious worldwide environmental problem, and it negatively affects both crops in agricultural areas and garden plants in city environments. The aim of this study was to evaluate the tolerance of *Rhododendron hybridum* to acid rainwater to determine whether it is suitable for use as a landscaping plant in areas affected by acid rain. We conducted a series of pot experiments to study the effects of simulated acid rain on the growth and the physiological and ecological characteristics of *R. hybridum*. We used 3-year-old trees of *R. hybridum* var. "Zijinguan" as the experimental materials. The leaves were sprayed with simulated acid rain (pH=2.0, 3.0, 4.3, or 5.6) or tap water (pH=6.5) as the control. The plants were sprayed once every 7 days, until the leaves were saturated with the liquid, for 2 months. We evaluated the plants before the start of the experiment, after 1 month, and at the end of the experiment. We measured the chlorophyll (Chl) content, malondialdehyde (MDA) content, and soluble protein content, and determined catalase (CAT), peroxidase (POD), and superoxide dismutase (SOD) activities in the leaves. At the end of the experiment, we evaluated the degree of leaf injury and photosynthetic indicators including net photosynthetic rate (P_n), transpiration rate (Tr), stomatal conductance (G_s), intercellular CO_2 concentration (C_i), and water use efficiency

基金项目:浙江省重大科技专项重点农业项目(2009C12092);宁波市科技创新创业重点项目(2010C92021)

收稿日期:2013-06-09; 修订日期:2013-12-03

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: wyy2000@zww.edu.cn

(*WUE*). The results showed that under simulated acid rain stress, the leaves of *R. hybridum* were damaged more severely as the pH of the rainwater decreased. In the pH=2.0 rainwater treatment, there was a high rate of leaf abscission, some of the leaves turned red, many leaves were curled and withered, and the leaf injury was up to 33%. In the pH=3.0 treatment, the negative effects were smaller than those of the pH=2.0 treatment; there was 16% leaf injury, some of the leaves were yellow and wilted, and there was a moderate rate of leaf abscission. When the pH of the rain water was higher than 4.3, the damage was minimal and plants were able to grow normally. There were stronger effects of simulated acid rain on Chl content in *R. hybridum* leaves as the pH value decreased, and the negative effects of low-pH rainwater became greater over time. The Chl contents of plants in the pH=3.0 and pH=2.0 rainwater treatments were significantly lower than those of leaves of control plants. In all of the acid rain treatments, the MDA content of *R. hybridum* leaves gradually increased during the experimental period; the soluble protein content first increased and then decreased. The activities of CAT, POD, and SOD showed a single-peak curve, first increasing and then decreasing during the experimental period. The highest CAT and SOD activities were detected in leaves of plants in the pH=4.3 rainwater treatment while the highest POD activity was detected in leaves of those in the pH=3.0 rainwater treatment. The Chl content gradually decreased in all of the acid rain treatments. The *Pn*, *Tr*, *Gs*, and *WUE* showed trends to first increase, and then decrease, during the acid rain treatments. The *Ci* steadily decreased in all of the acid rain treatments over the 2-month experimental period. The maximum values for *Pn*, *Tr*, *Gs*, and *WUE* were in plants in the pH=4.3 treatment. Based on the above results, we conclude that a rainwater pH of 3.0 is the threshold for damage to *R. hybridum*. The pH of rain in areas badly affected by acid has an approximate range of 2.0 to 4.0. Our results show that *R. hybridum* can grow and be used as a landscaping and vegetation construction plant in some acid rain-hit areas.

Key Words: simulated acid rain; *Rhododendron hybridum*; physiological and ecological characteristics; photosynthesis; antioxidant enzymes

酸雨是指 pH 值小于 5.6 的雨水,也包括雪、雾、冰雹等其他形式的酸性降水^[1]。我国自 20 世纪 70 年代首次发现酸雨,近年来随着经济的发展,受酸雨影响的面积逐年扩大,危害越来越严重。目前,酸雨已成为威胁人类生存的三大环境问题之一,对植物的伤害也受到国内外学者的广泛关注。研究表明,酸雨会影响植物的株高和地径,破坏叶片的上皮细胞,增加细胞膜的透性,改变叶肉细胞中细胞器的结构,导致植物叶片产生可见伤害,还可以改变植物体内酶的活性,影响植物正常的光合生理功能^[2-6]。不同类型植物对不同酸度酸雨胁迫的反应敏感性不同。园林绿化植物是改善城市环境、维护生态平衡的重要物质基础,城市区域也往往是酸雨的频发区,因此研究酸雨对园林植物生长的伤害效应和有关生理过程的变化,将有助于了解生理代谢机制和反应敏感性,为工程应用和栽培管理提供依据。

西洋杜鹃(*Rhododendron hybridum*)简称西鹃,别名比利时杜鹃,是杜鹃花科的常绿小灌木,属杜鹃花中生态应用较广的一类,也是世界盆栽花卉生产的

主要种类之一^[7]。西洋杜鹃是宁波市重要的绿化植物,而宁波又是我国酸雨污染较严重的地区之一。目前关于模拟酸雨对园林植物影响的研究有较多报道,但酸雨对西洋杜鹃的影响国内外还少有研究,本文通过模拟酸雨对西洋杜鹃生理生态特性影响的研究,探讨其对酸雨的敏感性及耐受能力,以期为西洋杜鹃在宁波市以及其它相似环境地区的推广提供理论依据,为城市生态建设中绿化树种的选择提供参考。

1 材料与方法

1.1 试验材料

试验于 2012 年 10 月至 2012 年 12 月在浙江万里学院实验室内进行。试验材料来源于宁波市北仑区柴桥镇杜鹃花基地。选择一批生长一致、株高约 40—50 cm 的 3 年生西洋杜鹃“紫金冠”品种,移栽于高 25 cm、直径 20 cm 的塑料花盆中,采用人工基质培养(泥炭:砻糠=3:1,体积比)。每盆基质为 1450 g,含有机质 49.3 mg/kg,碱解氮 41.1 mg/kg,速

效磷 8.2 mg/kg,速效钾 85.2 mg/kg,pH 值 5.6,定植前基质中一次性施入缓释肥(N:P:K 为 17:17:7)1.5 kg/m³。每盆种植 1 株,常规管理,随机分成 5 个组,每组 3 个重复,进行模拟酸雨处理。

1.2 试验设计与方法

根据中国浙江地区酸雨主要以硫酸根为主的特点并参照有关宁波地区酸雨资料^[8-9],用分析纯 H₂SO₄和 HNO₃配制体积比 6:1 的酸雨母液,然后将适量母液用蒸馏水稀释成 pH 值分别为 2.0、3.0、4.3、5.6 的酸雨供试液,以自来水(pH 值 6.5)作为对照,用 PB-21 型 pH 计进行标定。酸雨喷洒采用小型喷雾器喷雾法,于定栽 3 周待植株恢复正常生长后(10 月 24 日)开始喷洒,每隔 7 d 喷 1 次,持续两个月,期间进行常规管理,每次均喷至叶片滴液为度。为防止相互干扰,不同处理梯度之间分开喷施酸雨,并用薄膜遮盖盆土防止酸雨渗透入土,喷施酸雨后浇水要隔天进行。

试验于 10 月 23 日处理前进行第 1 次测定作为初始值。采样时每个处理随机选取 3—4 株西洋杜鹃的中部功能叶片,分别测定杜鹃叶片的丙二醛含量(MDA)、可溶性蛋白含量、过氧化氢酶(CAT)、过氧化物酶(POD)、超氧化物歧化酶(SOD)活性以及叶绿素含量。分别于处理 30 d 胁迫中期(2012 年 11 月 24 号)和 60 d 胁迫晚期(2012 年 12 月 24 日)时进行第 2 次和第 3 次测定。第 3 次测定时还需观察各处理间叶片的形态特征、测定其受害百分率,并测定光合作用相关指标。以上各指标均重复取样 3 次进行测定。

1.3 测定指标及方法

1.3.1 叶片形态特征的观测

处理结束后,观察各处理西洋杜鹃叶片形态特征并采用混合采样法选取 50 张叶片,使用万深 LA-S 系列植物图像分析系统处理得到受害叶片面积占测

量叶片总面积的百分比,从而得出叶片受害百分率。

1.3.2 叶片光合特性的测定

采用 ECA-PB0402 光合测定仪于 2012 年 12 月下旬酸雨处理结束后测定植株中部功能叶片的光合速率、蒸腾速率、气孔导度、胞间 CO₂浓度和水分利用率等,测定时间为 10:00 至 14:00 阳光充足时。

1.3.3 西洋杜鹃生理生化特性测定

使用 SPAD-502 叶绿素仪直接测定植株中部功能叶片的叶绿素含量。丙二醛含量的测定采用硫代巴比妥酸比色法^[10];可溶性蛋白的测定采用考马斯亮蓝 G-250 染色法^[11]。过氧化氢酶(CAT)活性的测定采用紫外吸收法^[12];过氧化物酶(POD)活性的测定采用愈创木酚比色法^[13];超氧化物歧化酶(SOD)的测定采用氮蓝四唑(NBT)法^[14]。

试验数据采用 Excel 和 DPS 9.50 软件进行统计分析。

2 结果与分析

2.1 模拟酸雨对西洋杜鹃叶片形态的影响

表 1 为西洋杜鹃叶片在不同 pH 值模拟酸雨胁迫下形态特征的变化。结果表明,对照与 pH 值 5.6 的处理差异不大,其叶片生长正常,叶色浓绿,叶片脱落少,属于自然现象。pH 值 4.3 的处理部分叶片仍为绿色,但叶尖出现极少量卷曲,说明模拟酸雨开始对其产生影响,但仍能正常生长。随着酸度加大,模拟酸雨对西洋杜鹃的伤害明显增加,pH 值 3.0 的处理已出现叶片泛黄、部分卷曲萎焉现象,至 pH 值 2.0 的处理其叶片明显变红、卷曲,叶缘枯萎,落叶很多,生长受阻。另外,随着模拟酸雨酸性的增加,西洋杜鹃叶片的受害百分率也明显增大。对照与 pH 值 5.6 的处理其叶片基本无受害,pH 值 4.3 的处理有极小量的受害,pH 值 3.0 和 pH 值 2.0 的处理叶片明显受害,分别达到了 15.6%和 32.5%。

表 1 不同模拟酸雨处理对西洋杜鹃叶片形态的影响

Table 1 Effect of simulated acid rain on morphological characteristics of *Rhododendron hybridum* leaves

pH 处理 pH Treatment	叶片颜色 Leaf color	叶片形状 Leaf shape	叶片脱落 Leaf abscission	叶片受害百分率/% Leaf injury percentage
2.0	变红	卷曲、叶缘枯萎	较多	32.53±0.38 a
3.0	泛黄	卷曲萎焉	一般	15.63±0.15 b
4.3	正常,绿色	极少量卷曲	较少	3.50±0.21 c
5.6	正常,浓绿	正常	少	0.57±0.12 d
ck(6.5)	正常,浓绿	正常	少	1.03±0.18 d

表中数据为平均值±标准误,不同小写字母表示不同处理间差异显著($P \leq 0.05$)

2.2 模拟酸雨对西洋杜鹃光合特性的影响

图 1 为不同酸雨强度处理后对西洋杜鹃光合特性中多个指标的影响。由图可知 pH 值 5.6 的处理和对照差异不显著,净光合速率(P_n)、蒸腾速率(Tr)、气孔导度(G_s)及水分利用率(WUE)等指标均大于对照,但差异不显著;而 pH 值 4.3 的处理其净光合速率、蒸腾速率、气孔导度及水分利用率等光合特性均显著高于对照;随着酸度的进一步增强,胁迫增大,其光合特性也明显下降,pH 值 3.0 的处理显著

低于对照且 pH 值 2.0 的处理进一步降低。结果表明,弱酸性环境促进了西洋杜鹃的光合作用,其净光合速率、蒸腾速率、气孔导度及水分利用率等都显著提高,这可能是因为西洋杜鹃为了适应逆境作出的抗逆反应,从而增强了其光合特性;但酸性过强导致伤害过大,抑制了其光合作用。另外,西洋杜鹃的胞间 CO_2 浓度(C_i)随着酸性增加而减少,表明酸雨胁迫会造成一定的影响,且随酸性增强影响显著。

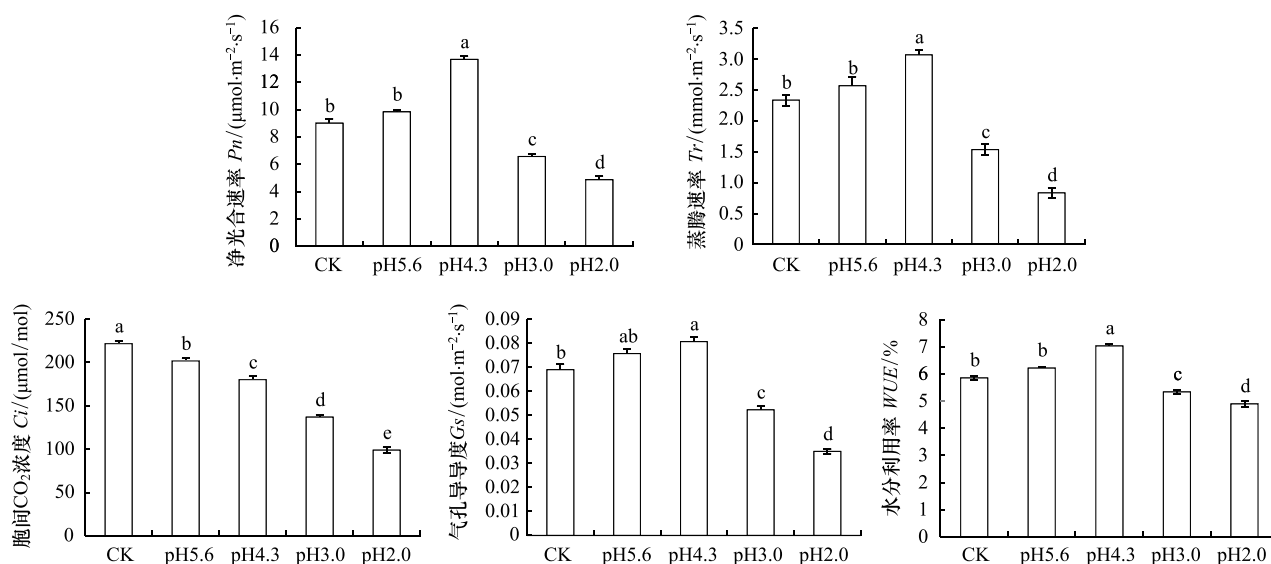


图 1 不同模拟酸雨处理对西洋杜鹃光合特性的影响

Fig.1 Effects of simulated acid rain on photosynthetic characteristics of *Rhododendron hybridum*

不同小写字母表示在 $P \leq 0.05$ 水平上具有显著差异

2.3 模拟酸雨对西洋杜鹃生理生化特性的影响

2.3.1 对叶绿素含量的影响

如图 2 所示,西洋杜鹃叶片的叶绿素含量随着

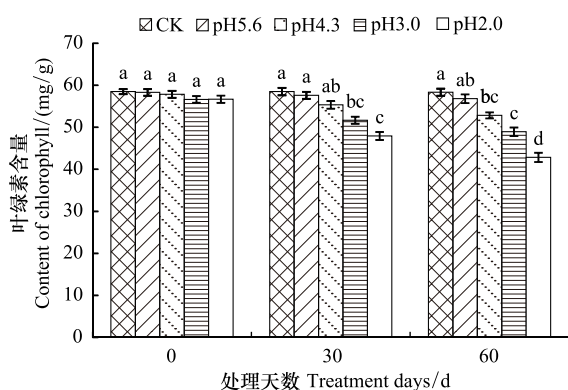


图 2 不同模拟酸雨处理对西洋杜鹃叶绿素含量的影响

Fig.2 Effects of simulated acid rain on chlorophyll content in *Rhododendron hybridum* leaves

模拟酸雨处理酸性的增强而减少,且随着处理时间的增加,各处理的叶绿素含量下降增大。对照与 pH 值 5.6 的处理差异不大,其处理前后的叶绿素含量变化也很小,pH 值 4.3 的处理从处理中期开始出现一定的差异,随着 pH 值的降低及处理时间的增加其差异更加显著。结果表明,模拟酸雨对西洋杜鹃叶片叶绿素的影响显著,这可能是因为模拟酸雨中的酸性离子影响了叶绿素的合成与分解。

2.3.2 对丙二醛含量的影响

由图 3 可知,随着酸性增强和处理时间的延长,西洋杜鹃叶片中的丙二醛含量逐渐增加且差异逐渐增大。处理 30 d 左右,pH 值 5.6,pH 值 4.3,pH 值 3.0 和 pH 值 2.0 处理的丙二醛含量分别比对照增加了 2.0%、5.5%、16.3%和 33.4%。处理 60 d 左右,pH 值 5.6,pH 值 4.3,pH 值 3.0 和 pH 值 2.0 处理的丙二

醛含量分别比对照增加 3.9%、9.3%、29.4% 和 51.9%。植物叶片中丙二醛含量的增加与膜透性破坏有关^[15],MDA 积累越多说明植物受伤害越重,其抗性就越差。结果表明随着模拟酸雨酸性的增强,西洋杜鹃叶片受害程度逐渐加深。

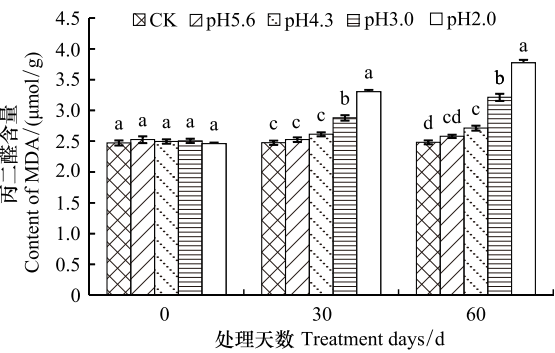


图3 不同模拟酸雨处理对西洋杜鹃叶片丙二醛含量的影响

Fig.3 Effects of simulated acid rain on MDA content in *Rhododendron hybridum* leaves

2.3.3 对可溶性蛋白含量的影响

在一定的胁迫条件下,植物体内蛋白质含量的提高是植物对逆境胁迫适应的一种表现,可作为植物相对抗性的一种指标^[16]。由图4可以看出,随着模拟酸雨酸性的增加,西洋杜鹃叶片中可溶性蛋白的含量呈先升后降的趋势,且随处理时间的延长其变化增大。与对照相比,处理30 d左右时 pH 值 5.6 和 pH 值 4.3 的处理其可溶性蛋白含量分别增加 2.4% 和 8.0%,而 pH 值 3.0 和 pH 值 2.0 的处理分别减少了 15.2% 和 19.5%;处理 60 d 左右时 pH 值 5.6, pH 值 4.3 的处理其可溶性蛋白含量增加了 6.6% 和 17.6%,而 pH 值 3.0 和 pH 值 2.0 处理则分别减少了

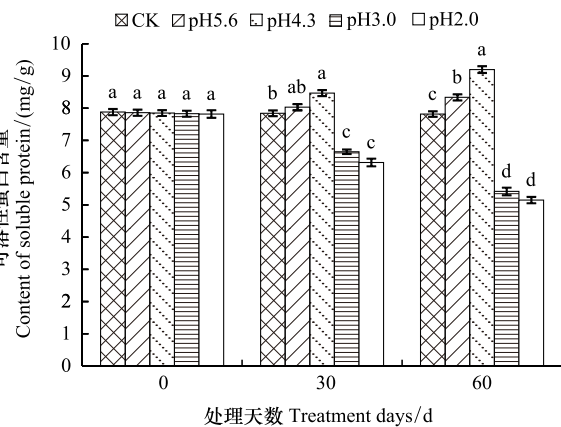


图4 不同模拟酸雨处理对西洋杜鹃可溶性蛋白含量的影响

Fig.4 Effects of simulated acid rain on soluble protein content in *Rhododendron hybridum* leaves

30.7%和 34.1%。西洋杜鹃在 pH 值 4.3 的模拟酸雨处理下明显提高了其可溶性蛋白含量表明其能对 pH 值 4.3 的模拟酸雨产生较大抗性,而 pH 值 3.0 和 pH 值 2.0 处理下其可溶性蛋白明显降低表明高强度的酸雨破坏了西洋杜鹃的组织结构,抑制了其蛋白质的合成。

2.3.4 对抗氧化酶活性的影响

CAT、POD、SOD 是生物体内重要的活性氧清除酶,在消除超氧化物自由基、减轻脂质过氧化作用和膜伤害方面起重要作用^[17]。如图5所示,pH 值 5.6 和 pH 值 4.3 处理的西洋杜鹃 CAT 活性比对照略有增加,但差异不显著,而 pH 值 3.0 和 pH 值 2.0 的处理与对照相比有所减少,且随着处理时间延长减少明显。SOD 酶活性的变化与 CAT 的变化相似,但变化更为明显,差异也更为显著(图5)。处理 30 d 左右时 pH 值 5.6 和 pH 值 4.3 的处理其 SOD 活性比对照分别增加 17.1% 和 25.4%,而 pH 值 3.0 和 pH 值 2.0 的处理却比对照分别下降 6.8% 和 11.5%;处理 60 d 左右时 pH 值 5.6 和 pH 值 4.3 的处理其 SOD 活性比 30 d 左右时略有减少,pH 值 3.0 和 pH 值 2.0 的处理与对照相比则下降更加明显,达到了 17.6% 和 25.4%。POD 酶活性的变化与 CAT、SOD 略有不同,表现为 pH 值 5.6 和 pH 值 4.3 的处理与对照差异不明显,而 pH 值 3.0 的处理其 POD 活性明显高于对照,pH 值 2.0 的处理则明显低于对照,且随时间增加变化增大(图5)。结果显示,在低酸度模拟酸雨下西洋杜鹃 CAT、POD、SOD 酶活性都增加了表明其抗性增强了,能适应酸雨胁迫,而强酸度胁迫下其 CAT、POD、SOD 酶活性降低表明该浓度模拟酸雨对西洋杜鹃造成了一些不可逆的伤害,破坏了酶的合成。

3 结论与讨论

研究表明,酸雨对许多植物叶片产生伤害的临界点在 pH 值 = 3.5,对植物生长和生物量影响的酸雨临界点在 pH 值 = 3.0—2.0,而植物的形态结构特点和生物学特性决定了其对酸雨所造成的伤害的自身恢复功能和抗性^[18-19]。从西洋杜鹃叶片结构上看,西洋杜鹃叶表被有较多的绒毛,表面较为光滑,可以减少模拟酸雨液滴在叶片上的接触与停留时间,减少酸性离子的侵入,提高了西洋杜鹃对酸雨的

抗性。另外,西洋杜鹃喜好偏酸性土壤。本实验也表明,随着酸雨酸度的增大,特别是在较重酸雨(pH

值 ≤ 3.0)胁迫下,西洋杜鹃的叶片才出现较多的黄斑及落叶等,说明西洋杜鹃对酸雨具有较高的抗性。

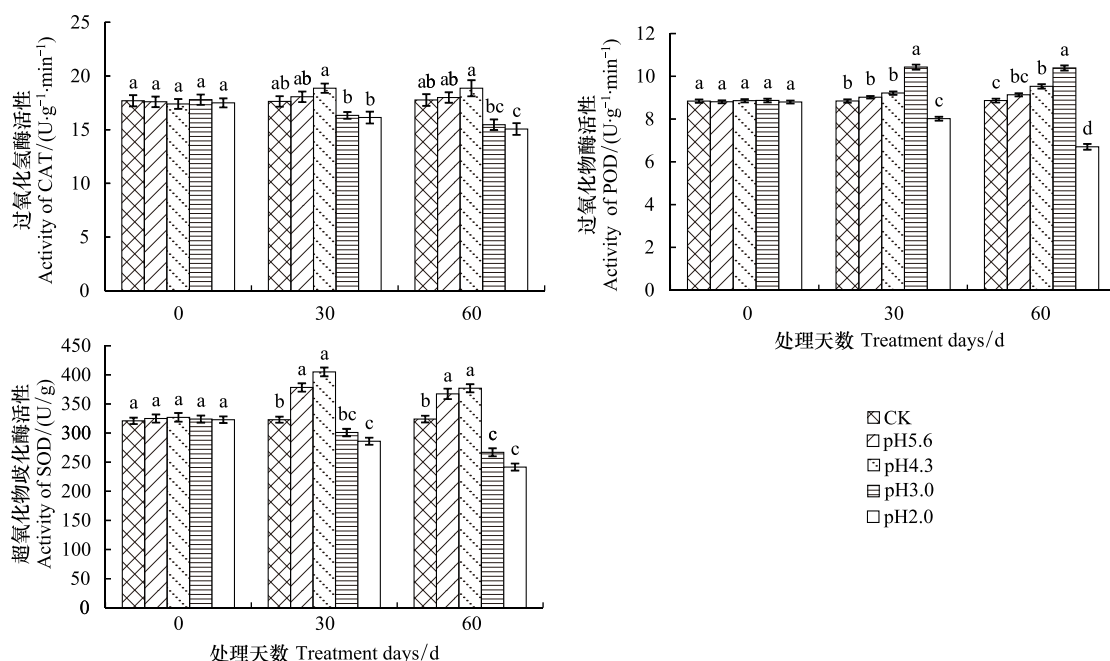


图5 不同模拟酸雨处理后西洋杜鹃抗氧化酶活性的变化

Fig.5 Change of antioxidant enzyme activities in *R. hybridum* leaves with different simulated acid rain treatments

酸雨伤害植物的主要机理在于酸雨降低了膜保护酶的活性以及膜保护物质的含量,使活性氧代谢平衡失调,相对过剩的活性氧或氧自由基启动并加强了膜质过氧化作用而使植物受害^[20-21]。本实验表明:在模拟酸雨胁迫下,西洋杜鹃叶片中MDA含量随胁迫强度的增加而增大,说明酸雨胁迫引起了西洋杜鹃的膜质过氧化加剧。通过对在酸雨胁迫下西洋杜鹃叶片中的CAT、POD、SOD活性的影响结果以及这3种保护酶活性与MDA含量之间的相关程度分析判断,造成西洋杜鹃膜质过氧化加剧的主要原因是由于酸雨胁迫产生的自由基离子使抗氧化酶系统的协调作用失衡,从而使CAT、POD和SOD清除活性氧的能力降低,导致了活性氧的进一步积累,最终造成细胞质膜透性增大,膜功能受损,甚至引发叶绿体结构破坏,使叶片叶绿素含量下降,进而影响光合代谢,致使净光合速率下降。同时应注意到,POD作为一种保护酶,在本实验中其活性的持续增强似乎并未起到有效缓解活性氧的伤害作用,其原因可能与它的双重作用有关,POD不仅参与消除羟基自由基也在逆境加强后及叶片衰老初期参与活性氧的生成和叶绿素的降解,并引发膜脂过氧化作用^[22]。

酸雨对植物膜系统的损伤必然会引起光合器官的伤害和功能的下降^[23-24]。叶绿体是植物光合作用的场所,也是细胞对胁迫生境最敏感的细胞器,其含量受各种胁迫条件的影响,在本实验中,西洋杜鹃叶绿素含量随模拟酸雨胁迫的增强而逐渐减少,表明模拟酸雨对西洋杜鹃叶片叶绿素的影响较大。实验也表明,气孔对环境变化的协同响应是西洋杜鹃在酸雨胁迫条件下叶片净光合速率变化的主导因子。对照和处理的叶片净光合速率和气孔导度之间均存在高度的线性相关性,而且在pH值 ≤ 3.0 时西洋杜鹃叶片 P_n 、 Tr 、 G_s 及 C_i 都明显降低,表明植物受胁迫明显加重。另外, G_s 的变化还影响其他参数的变化: G_s 的降低减少了 CO_2 的进入,同时还影响了叶片的 Tr , G_s 低则 Tr 低,进而也影响了西洋杜鹃叶片对水分的利用效率,这是导致西洋杜鹃光合速率降低的一个重要原因。而且西洋杜鹃在 P_n 下降过程中, G_s 下降并伴随着 C_i 降低,按照Farquhar等^[25]的理论,西洋杜鹃净光合速率降低属于气孔限制型。

可溶性蛋白质参与调节植物细胞的渗透势,在一定的逆境胁迫下,植物体内蛋白质含量的增加是植物对逆境适应的一种表现^[26]。试验中西洋杜鹃

可溶性蛋白的含量随酸雨强度增加先增后减,表明西洋杜鹃能适应一定程度的酸雨胁迫。酸雨减少了植物蛋白质的含量,其原因一方面可能是酸雨抑制了蛋白质的合成,另一方面可能是酸雨胁迫阻抑了植物的氮代谢^[27-28]。

综上所述,在本试验中西洋杜鹃在较重酸雨(pH 值 ≤ 3.0)胁迫下,其生理生化特性受到明显影响:叶片发黄、落叶增多,叶片 MDA 含量显著增加,可溶性蛋白含量、CAT 和 SOD 酶活性显著下降而 POD 活性明显增加,同时叶绿素含量减少,光合速率和水分利用率等均显著下降。因此综合各项生理评价指标认为 pH 值 ≤ 3.0 是酸雨对西洋杜鹃产生隐性伤害的临界点(或阈值)。西洋杜鹃喜半阴、凉爽、湿润的环境,喜好酸性土壤,是典型的酸性花卉,常作为盆栽在全国广泛栽培,但目前地栽较少,只有浙江宁波、福建漳平等地有地栽西洋杜鹃^[29]。据调查,我国华东各省的酸雨污染情况比较严峻,大部分地区降水的 pH 值小于 4.0,甚至达到 pH 值 2.0,且酸雨的范围也逐渐扩大^[30]。由此可见宁波虽处于酸雨受害较重区但仍适合西洋杜鹃栽培,因此西洋杜鹃可作为酸雨灾害较重地区园林绿化及植被构建的物种之一。

References:

- [1] Deng W, Liu R H, Xiong J W, Chen H B, Tian H W, Du Z X. Research progress of acid rain in china. *Meteorological and Environmental Sciences*, 2009, 32(1): 82-87.
- [2] Chen X L, He D J, Hong W, Liu Y S, Bian L L, Wang Y T. Research advance in acid rain injury mechanism to garden plants. *Subtropical Agriculture Research*, 2007, 2(2): 99-103.
- [3] Wang Y J, Deng S H, Jiang J, Shang H, Lin B, Sun Y Q, Hu X M. Effects of acid rain on photosynthesis and antioxidant enzyme activity of *H. mitabilis* L. seedlings. *Acta Agriculturae Nucleatae Sinica*, 2011, 25(3): 588-593.
- [4] Kováčik J, Klejdus B, Bačkor M, Štork F, Hedbavny J. Physiological responses of root-less epiphytic plants to acid rain. *Ecotoxicology*, 2011, 20(2): 348-357.
- [5] Liu J F, Yang C, Wang M Y. Effect of simulated acid rain on physiological characteristics in *Taxus chinensis* var. *Mairei*. *Chinese Journal of Tropical Crops*, 2012, 33(6): 1046-1050.
- [6] Lu M J, Jiang H, Li W, Yu S Q, Zeng B, Jiang F W, Li J, Jin Q. Effect of simulated acid rain on growth and photosynthetic physiology of *Machilus pauhoi*. *Acta Ecologica Sinica*, 2009, 29(11): 5986-5994.
- [7] Kuang Z Y, Zhang Y J. Cultivation techniques of Belgium azaleas in intelligent greenhouse. *Modern Agricultural Sciences and Technology*, 2007, (22): 33-33.
- [8] Li Y Q, Chen S Y, Xu N B, Zhu L B. Current situation of acid rain in Ningbo city. *Jiangsu Environmental Science and Technology*, 1997, (4): 28-31.
- [9] Li Z Y. Pollution Characteristic of Acid Precipitation in Zhejiang and its Multi-Dimension Analysis [D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2004.
- [10] Li H S. Principle and Technology of Plant Physiological and Biochemical Experiments. Beijing: Higher Education Press, 2000.
- [11] Kong X S, Yi X F. Experiment Technology of Plant Physiology. Beijing: China Agriculture Press, 2008: 160-162.
- [12] Shim I S, Momose Y, Yamamoto A, Kim D W, Usui K. Inhibition of catalase activity by oxidative stress and its relationship to salicylic acid accumulation in plants. *Plant Growth Regulation*, 2003, 39(3): 285-292.
- [13] Wu Y X, von Tiedemann A. Impact of fungicides on active oxygen species and antioxidant enzymes in spring barley (*Hordeum vulgare* L.) exposed to ozone. *Environmental Pollution*, 2002, 116(1): 37-47.
- [14] Vuleta A, Tucić B. Thermal dependence of the antioxidant enzymes superoxide dismutase, catalase, and peroxidase in foliage of *Iris pumila* L. *Archives of Biological Sciences*, 2009, 61(3): 441-446.
- [15] Filek M, Walas S, Mrowiec H, Rudolphy-Skórska E, Sieprawska A, Biesaga-Kościelniak J. Membrane permeability and micro-and macroelement accumulation in spring wheat cultivars during the short-term effect of salinity-and PEG-induced water stress. *Acta Physiologiae Plantarum*, 2012, 34(3): 985-995.
- [16] Fang Z H, Dong K H. Effects of NaCl stress on soluble protein contents and soluble carbohydrate contents of *Artemisia anethifolia*. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2010, 26(16): 147-149.
- [17] Wang W B, Kim Y H, Lee H S, Kim K Y, Deng X P, Kwak S S. Analysis of antioxidant enzyme activity during germination of alfalfa under salt and drought stresses. *Plant Physiology and Biochemistry*, 2009, 47(7): 570-577.
- [18] Qi Z M, Wang X D, Song G Y. The research progress of the effect of acid rain on plant. *World Science Technology Research and Development*, 2004, 26(2): 36-41.
- [19] Li Z G, Jiang W B, Weng M L, Jiang W. Physiologic responses and sensitivity of six garden plants to simulated acid rain. *Acta Horticulturae Sinica*, 2011, 38(3): 512-518.
- [20] Zhao D, Pan Y Z, Deng S H, Shang H, Wang F, Chen R. Effects of simulated acid rain on physiological and ecological characteristics of *Camellia sasanqua*. *Scientia Agricultura Sinica*, 2010, 43(15): 3191-3198.
- [21] Liu E U, Liu C P. Effects of simulated acid rain on the antioxidative system in *Cinnamomum philippinense* seedlings.

- Water, Air, and Soil Pollution, 2011, 215(1/4): 127-135.
- [22] Ke S S, Yang M W. Effects of water stress on antioxidant system and lipid peroxidation in leaves of *Rhododendron fortunei*. *Acta Horticulturae Sinica*, 2007, 34(5): 1217-1222.
- [23] Wen K J, Liang C J, Wang L H, Hu G, Zhou Q. Combined effects of lanthanum and acid rain on growth, photosynthesis and chloroplast ultrastructure in soybean seedlings. *Chemosphere*, 2011, 84(5): 601-608.
- [24] Tian D L, Fu X P, Fang X, Xiang W H. Effect of simulated acid rain on photosynthetic characteristics in *Cinnamomum camphora* seedlings. *Scientia Silvae Sinicae*, 2007, 43(8): 29-35.
- [25] Farquhar G D, Sharkey T D. Stomatal conductance and photosynthesis. *Annual Reviews of Plant Physiology*, 1982, 33(1): 317-345.
- [26] Amini F, Ehsanpour A A. Soluble proteins, proline, carbohydrates and Na^+/K^+ changes in two tomato (*Lycopersicon esculentum* Mill.) cultivars under in vitro salt stress. *American Journal of Biochemistry and Biotechnology*, 2005, 1(4): 212-216.
- [27] Liang J, Mai B R, Zheng Y F, Li L, Tang X Y, Wu R J. Effects of simulated acid rain on the growth, yield and quality of rape. *Acta Ecologica Sinica*, 2008, 28(1): 275-283.
- [28] Liu T W, Fu B, Niu L, Chen, J, Wang W H, He J X, Pei Z M, Zheng H L. Comparative proteomic analysis of proteins in response to simulated acid rain in *Arabidopsis*. *Journal of Proteome Research*, 2011, 10(5): 2579-2589.
- [29] Zhang X B. Study on Growth Dynamics and Cultivation Technology of *Rhododendron Hybridum* Hort. in Guiyang [D]. Guiyang: Guizhou Normal University, 2006.
- [30] Xiao Y, Huang J C, Liu S X, Yang W Z, Guo D S, Zhu L Z. Inhibitory effects of simulated acid rain on the growth of 12 garden plant species and their physiological response to it. *Journal of Southwest Agricultural University: Natural Science Edition*, 2004, 26(3): 270-273, 276-276.
- [3] 王应军, 邓仕槐, 姜静, 尚鹤, 林波, 孙亚琴, 胡晓梅. 酸雨对木芙蓉幼苗光合作用及抗氧化酶活性的影响. *核农学报*, 2011, 25(3): 588-593.
- [5] 刘建福, 杨晨, 王明元. 模拟酸雨对南方红豆杉生理特性的影响. *热带作物学报*, 2012, 33(6): 1046-1050.
- [6] 鲁美娟, 江洪, 李巍, 余树全, 曾波, 蒋馥蔚, 李佳, 金清. 模拟酸雨对刨花楠幼苗生长和光合生理的影响. *生态学报*, 2009, 29(11): 5986-5994.
- [7] 邝作玉, 张严君. 比利时杜鹃花智能温室栽培技术. *现代农业科技*, 2007, (22): 33-33.
- [8] 李应群, 陈尚玉, 徐能斌, 朱丽波. 宁波市区酸雨现状. *江苏环境科技*, 1997, (4): 28-31.
- [9] 李震宇. 浙江降水污染的特征和多维分析 [D]. 杭州: 浙江大学, 2004.
- [10] 李合生. 植物生理生化实验原理和技术. 北京: 高等教育出版社, 2000.
- [11] 孔祥生, 易现峰. 植物生理学实验技术. 北京: 中国农业出版社, 2008: 160-162.
- [16] 方志红, 董宽虎. NaCl 胁迫对碱蒿可溶性糖和可溶性蛋白含量的影响. *中国农学通报*, 2010, 26(16): 147-149.
- [18] 齐泽民, 王玄德, 宋光煜. 酸雨对植物影响的研究进展. *世界科技研究与发展*, 2004, 26(2): 36-41.
- [19] 李志国, 姜卫兵, 翁忙玲, 姜武. 常绿阔叶园林 6 树种(品种)对模拟酸雨的生理响应及敏感性. *园艺学报*, 2011, 38(3): 512-518.
- [20] 赵栋, 潘远智, 邓仕魁, 尚鹤, 王芳, 陈睿. 模拟酸雨对茶梅生理生态特性的影响. *中国农业科学*, 2010, 43(15): 3191-3198.
- [22] 柯世省, 杨敏文. 水分胁迫对云锦杜鹃抗氧化系统和脂类过氧化的影响. *园艺学报*, 2007, 34(5): 1217-1222.
- [24] 田大伦, 付晓萍, 方晰, 项文化. 模拟酸雨对樟树幼苗光合特性的影响. *林业科学*, 2007, 43(8): 29-35.
- [27] 梁骏, 麦博儒, 郑有飞, 李璐, 唐信英, 吴荣军. 模拟酸雨对油菜(*Brassica napus* L.) 生长、产量及品质的影响. *生态学报*, 2008, 28(1): 275-283.
- [29] 张轩波. 比利时杜鹃生长规律及栽培技术研究——以贵阳市为例 [D]. 贵阳: 贵州师范大学, 2006.
- [30] 肖艳, 黄建昌, 刘少娟, 杨伟钊, 郭冬升, 朱凌志. 模拟酸雨对 12 种园林植物的伤害及敏感性反应. *西南农业大学学报: 自然科学版*, 2004, 26(3): 270-273, 276-276.
- 参考文献:**
- [1] 邓伟, 刘荣花, 熊杰伟, 陈海波, 田宏伟, 杜子璇. 当前国内外酸雨研究进展. *气象与环境科学*, 2009, 32(1): 82-87.
- [2] 陈笑玲, 何东进, 洪伟, 刘勇生, 卞莉莉, 王彦涛. 酸雨胁迫对园林植物伤害机理的研究进展. *亚热带农业研究*, 2007, 2(2): 99-103.

ACTA ECOLOGICA SINICA Vol.34, No.8 Apr., 2014 (Semimonthly)

CONTENTS

Frontiers and Comprehensive Review

- Growth rates of marine planktonic ciliates; a review ZHANG Wuchang, LI Haibo, FENG Meiping, et al (1897)
- Research status and prospects on functions of urban forests in regulating the air particulate matter
..... WANG Xiaolei, WANG Cheng (1910)
- A review of snow-living Collembola ZHANG Bing, NI Zhen, CHANG Liang, et al (1922)

Autecology & Fundamentals

- Photosynthetic responses to changes in CO₂ concentration and soil moisture in leaves of *Securinega suffruticosa* from shell ridge
islands in the Yellow River Delta, China ZHANG Shuyong, XIA Jiangbao, ZHANG Guangcan, et al (1937)
- Quantities and spectral characteristics of DOM released from leaf and litterfall in *Castanopsis carlesii* forest and *Cunninghamia
lanceolata* plantation KANG Genli, YANG Yusheng, SI Youtao, et al (1946)
- Seasonal dynamics of leaf area index using different methods in the Korean pine plantation
..... WANG Baoqi, LIU Zhili, QI Yujiao, et al (1956)
- Influence of environmental changes on stoichiometric traits of nitrogen and phosphorus for *Larix gmelinii* trees
..... PING Chuan, WANG Chuankuan, et al (1965)
- Soil water in deep layers under different land use patterns on the Loess Tableland ... CHENG Liping, LIU Wenzhao, LI Zhi (1975)
- Water parameters of the branch of *Larrea tridentata* under different soil drought stress
..... ZHANG Xiangning, SUN Xiangyang, WANG Baoping, et al (1984)
- Effects of shading treatments on photosynthetic characteristics of *Juniperus sabina* Ant. seedlings
..... ZHAO Shun, HUANG Qiuxian, LI Yuling, et al (1994)
- Root distribution in typical sites of Lijiang ecotone and their relationship to soil properties
..... LI Qingshan, WANG Dongmei, XIN Zhongbao, et al (2003)
- The survival and above/below ground growth of *Haloxylon ammodendron* seedling
..... TIAN Yuan, TASHPOLAT · Tiyp, LI Yan, et al (2012)
- Effects of simulated acid rain on the physiological and ecological characteristics of *Rhododendron hybridum*
..... TAO Qiaojing, FU Tao, XIANG Xina, et al (2020)
- Karst cave bacterial calcium carbonate precipitation: the Shijiangjun Cave in Guizhou, China
..... JIANG Jianjian, LIU Ziqi, HE Qiufang, et al (2028)
- Migration of the 7th generation of brown planthopper in northeastern Guangxi Zhuang Autonomous Region, and analysis of source
areas QI Huihui, ZHANG Yunhui, JIANG Chunxian, et al (2039)

Population, Community and Ecosystem

- The dynamics and determinants of population size and spatial distribution of Common Cranes wintering in Poyang Lake
..... SHAN Jihong, MA Jianzhang, LI Yankuo, et al (2050)
- Effects of snow pack on wintertime soil nitrogen transformation in two subalpine forests of western Sichuan
..... YIN Rui, XU Zhengfeng, WU Fuzhong, et al (2061)
- Numerical classification, ordination and species diversity along elevation gradients of the forest community in Xiaolinling
..... CHEN Yun, WANG Hailiang, HAN Junwang, et al (2068)
- Phytoplankton community structures revealed by pigment signatures in Norwegian and Greenland Seas in summer 2012
..... WANG Xiaoying, ZHANG Fang, LI Juanying, et al (2076)
- Analysis of differences in insect communities at different altitudes in *Zanthoxylum bungeanum* gardens, Yunnan, China
..... GAO Xin, ZHANG Limin, ZHANG Xiaoming, et al (2085)
- The bacterial community changes after papermaking wastewater treatment with artificial wetland
..... GUO Jianguo, ZHAO Longhao, XU Dan, et al (2095)

- Ecological water requirement estimation of the rump lake in an extreme arid region of East Juyanhai
..... ZHANG Hua, ZHANG Lan, ZHAO Chuanyan (2102)

Landscape, Regional and Global Ecology

- Spatial distribution patterns of species richness and hotspots of protected plants in Qinling Mountain
..... ZHANG Yinbo, GUO Liulin, WANG Wei, et al (2109)
- Impacts of solar radiation on net ecosystem carbon exchange in a mixed plantation in the Xiaolangdi Area
..... LIU Jia, TONG Xiaojuan, ZHANG Jinsong, et al (2118)
- Carbon density and distribution of *Pinus tabulaeformis* plantation ecosystem in Hilly Loess Plateau
..... YANG Yujiao, CHEN Yunming, CAO Yang (2128)
- Dynamics of carbon storage at different aged *Koelreuteria paniclata* tree in Xiangtan Mn mining wasteland
..... TIAN Dalun, Li Xionghua, LUO Zhaozhui, et al (2137)

Resource and Industrial Ecology

- Contamination status of Pb and Cd and health risk assessment on vegetables in a mining area in southern Hunan
..... WU Yanming, LV Gaoming, ZHOU Hang, on storage at different age (2146)

Urban, Rural and Social Ecology

- Life cycle assessment and environmental & economic benefits research of important building external insulation materials in Beijing ...
..... ZHU Lianbin, KONG Xiangrong, WU Xian (2155)
- Effects of urban imperious surface on the habitat and ecophysiology characteristics of *Ginkgo biloba*
..... SONG Yingshi, LI Feng, WANG Xiaoke, et al (2164)

《生态学报》2014 年征订启事

《生态学报》是由中国科学技术协会主管,中国生态学会、中国科学院生态环境研究中心主办的生态学高级专业学术期刊,创刊于 1981 年,报道生态学领域前沿理论和原始创新性研究成果。坚持“百花齐放,百家争鸣”的方针,依靠和团结广大生态学科工作者,探索生态学奥秘,为生态学基础理论研究搭建交流平台,促进生态学研究深入发展,为我国培养和造就生态学科人才和知识创新服务、为国民经济建设和发展服务。

《生态学报》主要报道生态学及各分支学科的重要基础理论和应用研究的原始创新性科研成果。特别欢迎能反映现代生态学发展方向的优秀综述性文章;研究简报;生态学新理论、新方法、新技术介绍;新书评价和学术、科研动态及开放实验室介绍等。

《生态学报》为半月刊,大 16 开本,280 页,国内定价 90 元/册,全年定价 2160 元。

国内邮发代号:82-7,国外邮发代号:M670

标准刊号:ISSN 1000-0933 CN 11-2031/Q

全国各地邮局均可订阅,也可直接与编辑部联系购买。欢迎广大科技工作者、科研单位、高等院校、图书馆等订阅。

通讯地址:100085 北京海淀区双清路 18 号 电 话:(010)62941099; 62843362

E-mail: shengtaixuebao@rcees.ac.cn 网 址: www.ecologica.cn

本期责任副主编 杨永兴

编辑部主任 孔红梅

执行编辑 刘天星 段 靖

生 态 学 报

(SHENGTAI XUEBAO)

(半月刊 1981 年 3 月创刊)

第 34 卷 第 8 期 (2014 年 4 月)

ACTA ECOLOGICA SINICA

(Semimonthly, Started in 1981)

Vol. 34 No. 8 (April, 2014)

编 辑 《生态学报》编辑部
地址:北京海淀区双清路 18 号
邮政编码:100085
电话:(010)62941099
www.ecologica.cn
shengtaixuebao@rcees.ac.cn

主 编 王如松

主 管 中国科学技术协会

主 办 中国生态学会
中国科学院生态环境研究中心
地址:北京海淀区双清路 18 号
邮政编码:100085

出 版 科 学 出 版 社
地址:北京东黄城根北街 16 号
邮政编码:100717

印 刷 北京北林印刷厂

发 行 科 学 出 版 社
地址:东黄城根北街 16 号
邮政编码:100717
电话:(010)64034563
E-mail: journal@ cspg. net

订 购 全国各地邮局

国外发行 中国国际图书贸易总公司
地址:北京 399 信箱
邮政编码:100044

广告经营 京海工商广字第 8013 号

许 可 证

Edited by Editorial board of
ACTA ECOLOGICA SINICA
Add: 18, Shuangqing Street, Haidian, Beijing 100085, China
Tel: (010) 62941099
www.ecologica.cn
shengtaixuebao@rcees.ac.cn

Editor-in-chief WANG Rusong

Supervised by China Association for Science and Technology

Sponsored by Ecological Society of China
Research Center for Eco-environmental Sciences, CAS
Add: 18, Shuangqing Street, Haidian, Beijing 100085, China

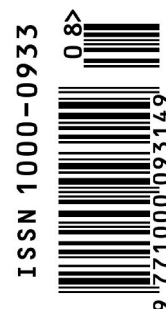
Published by Science Press
Add: 16 Donghuangchenggen North Street,
Beijing 100717, China

Printed by Beijing Bei Lin Printing House,
Beijing 100083, China

Distributed by Science Press
Add: 16 Donghuangchenggen North
Street, Beijing 100717, China
Tel: (010) 64034563
E-mail: journal@ cspg. net

Domestic All Local Post Offices in China

Foreign China International Book Trading
Corporation
Add: P.O.Box 399 Beijing 100044, China



ISSN 1000-0933
CN 11-2031/Q

国内外公开发刊

国内邮发代号 82-7

国外发行代号 M670

定价 90.00 元