

ISSN 1000-0933
CN 11-2031/Q

生态学报

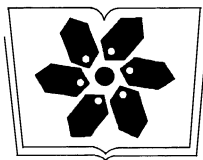
Acta Ecologica Sinica



第 32 卷 第 24 期 Vol.32 No.24 **2012**

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 32 卷 第 24 期

2012 年 12 月 (半月刊)

目 次

从文献计量角度分析中国生物多样性研究现状.....	刘爱原,郭玉清,李世颖,等 (7635)
CO ₂ 浓度升高和模拟氮沉降对青川箭竹叶营养质量的影响.....	周先容,汪建华,张 红,等 (7644)
陕西中部黄土高原地区空气花粉组成及其与气候因子的关系——以洛川县下黑木沟村为例.....	吕素青,李月从,许清海,等 (7654)
长三角地区 1995—2007 年生态资产时空变化.....	徐昔保,陈 爽,杨桂山 (7667)
基于智能体模型的青岛市林地生态格局评价与优化.....	傅 强,毛 锋,王天青,等 (7676)
青藏高原高寒草地生态系统服务功能的互作机制.....	刘兴元,龙瑞军,尚占环 (7688)
北京城市绿地的蒸腾降温功能及其经济价值评估.....	张 彪,高吉喜,谢高地,等 (7698)
武汉市造纸行业资源代谢分析.....	施晓清,李笑诺,赵吝加,等 (7706)
丽江市家庭能耗碳排放特征及影响因素.....	王丹寅,唐明方,任 引,等 (7716)
基于分布式水文模型和福利成本法的生态补偿空间选择研究.....	宋晓谕,刘玉卿,邓晓红,等 (7722)
设施塑料大棚风洞试验及风压分布规律.....	杨再强,张 波,薛晓萍,等 (7730)
湖南珍稀濒危植物——珙桐种群数量动态.....	刘海洋,金晓玲,沈守云,等 (7738)
云南岩陀及其近缘种质资源群体表型多样性.....	李萍萍,孟衡玲,陈军文,等 (7747)
沙埋和种子大小对柠条锦鸡儿种子萌发、出苗和幼苗生长的影响.....	杨慧玲,梁振雷,朱选伟,等 (7757)
栗山天牛天敌花绒寄甲在栎林中的种群保持机制.....	杨忠岐,唐艳龙,姜 静,等 (7764)
基于相邻木排列关系的混交度研究.....	娄明华,汤孟平,仇建习,等 (7774)
三种回归分析方法在 Hyperion 影像 LAI 反演中的比较.....	孙 华,鞠洪波,张怀清,等 (7781)
红松和蒙古栎种子萌发及幼苗生长对升温与降水综合作用的响应.....	赵 娟,宋 媛,孙 涛,等 (7791)
新疆杨边材贮存水分对单株液流通量的影响.....	党宏忠,李 卫,张友焱,等 (7801)
火干扰对小兴安岭毛赤杨沼泽温室气体排放动态影响及其影响因素.....	顾 韩,牟长城,张博文 (7808)
不同潮汐和盐度下红树植物幼苗秋茄的化学计量特征.....	刘滨尔,廖宝文,方展强 (7818)
腾格里沙漠东南缘沙质草地灌丛化对地表径流及氮流失的影响.....	李小军,高永平 (7828)
西双版纳人工雨林群落结构及其林下降雨侵蚀力特征.....	邓 云,唐炎林,曹 敏,等 (7836)
西南高山地区净生态系统生产力时空动态.....	庞 瑞,顾峰雪,张远东,等 (7844)
南北样带温带区栎属树种种子化学组成与气候因子的关系.....	李东胜,史作民,刘世荣,等 (7857)
模拟酸雨对龙眼叶片 PS II 反应中心和自由基代谢的影响.....	李永裕,潘腾飞,余 东,等 (7866)
沈阳市城郊表层土壤有机污染评价.....	崔 健,都基众,马宏伟,等 (7874)
降雨对旱作春玉米农田土壤呼吸动态的影响.....	高 翔,郝卫平,顾峰雪,等 (7883)
冬季作物种植对双季稻根系酶活性及形态指标的影响.....	于天一,逢焕成,任天志,等 (7894)
施氮量对小麦/玉米带田土壤水分及硝态氮的影响.....	杨蕊菊,柴守玺,马忠明 (7905)
微山湖鸟类多样性特征及其影响因素.....	杨月伟,李久恩 (7913)
新疆北部棉区作物景观多样性对棉铃虫种群的影响.....	吕昭智,潘卫林,张 鑫,等 (7925)
杭州西湖北里湖沉积物氮磷内源静态释放的季节变化及通量估算.....	刘静静,董春颖,宋英琦,等 (7932)
基于实码遗传算法的湖泊水质模型参数优化.....	郭 静,陈求稳,张晓晴,等 (7940)
气候环境因子和捕捞压力对南海北部带鱼渔获量变动的影响.....	王跃中,孙典荣,陈作志,等 (7948)
象山港南沙岛不同养殖类型沉积物酸可挥发性硫化物的时空分布.....	颜婷茹,焦海峰,毛玉泽,等 (7958)
专论与综述	
提高植物抗寒性的机理研究进展.....	徐呈祥 (7966)
植被对多年冻土的影响研究进展.....	常晓丽,金会军,王永平,等 (7981)
凋落物分解主场效应及其土壤生物驱动.....	查同刚,张志强,孙 阁,等 (7991)
街尘与城市降雨径流污染的关系综述.....	赵洪涛,李叙勇,尹澄清 (8001)
期刊基本参数:CN 11-2031/Q * 1981 * m * 16 * 374 * zh * P * ¥70.00 * 1510 * 40 * 2012-12	

封面图说: 永兴岛海滩植被——永兴岛是中国西沙群岛的主岛,也是西沙群岛及南海诸岛中最大的岛屿。国务院 2012 年 6 月批准设立的地级三沙市,管辖西沙群岛、中沙群岛、南沙群岛的岛礁及其海域,三沙市人民政府就驻西沙永兴岛。永兴岛岛上自然植被密布,野生植物有 148 种,占西沙野生植物总数的 89%,主要树种有草海桐(羊角树)、麻枫桐、野枇杷、海棠树和椰树等。其中草海桐也称为羊角树,是多年生常绿亚灌木植物,它们总是喜欢倚在珊瑚礁岸或是与其他滨海植物聚生于海岸沙滩,为典型的滨海植物。

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

DOI: 10.5846/stxb201203080315

李永裕, 潘腾飞, 余东, 邱栋梁. 模拟酸雨对龙眼叶片 PS II 反应中心和自由基代谢的影响. 生态学报, 2012, 32(24): 7866-7873.

Li Y Y, Pan T F, Yu D, Qiu D L. Effects of simulated acid rain stress on the PS II reaction center and free radical metabolism in leaves of longan. Acta Ecologica Sinica, 2012, 32(24): 7866-7873.

模拟酸雨对龙眼叶片 PS II 反应中心和 自由基代谢的影响

李永裕¹, 潘腾飞¹, 余 东², 邱栋梁^{1,*}

(1. 福建农林大学园艺学院, 福州 350002; 2. 福建省农业科学院果树研究所, 福州 350013)

摘要: 酸雨对植物光合机构的伤害机理一直是生态研究的热点之一, 为了探讨叶面酸化导致的 PS II 反应中心损伤和光合机构自由基累积之间的内在联系, 以 1 年生龙眼 (*Dimocarpus longana* Lour.) 实生小苗为研究对象, 采用盆栽试验, 研究了模拟酸雨胁迫对龙眼叶片叶绿素荧光参数和自由基代谢的影响。结果表明: 酸雨胁迫改变了龙眼叶片的快速叶绿素荧光诱导动力学曲线形状, 伤害 PS II 反应中心; pH2.5 酸雨胁迫 5d 后最大光化学效率 (F_v/F_m)、PS II 反应中心活性 ($1/F_0 - 1/F_M$)、反应中心含量 (RC/CS_0) 急剧下降; 有活性反应中心的关闭程度 (V_j)、失活反应中心的比例 (Non- Q_A 和 Non- Q_B) 显著增加, Q_A 迅速还原; 放氧复合体 (OEC) 被破坏; PS II 受体侧电子传递体数 (S_m)、电子转化效率 (ψ_0) 和电子传递速率 (φ_{E_0}) 明显降低, 叶面酸化导致光系统线性电子传递受损。pH2.5 酸雨胁迫 5d 后叶片超氧阴离子自由基 ($O_2^{\cdot-}$)、过氧化氢 (H_2O_2) 和丙二醛 (MDA) 含量显著增加; 抗坏血酸 (AsA) 和谷胱甘肽 (GSH) 转化为氧化型, 还原型减少; 超氧化物歧化酶 (SOD)、抗坏血酸过氧化物酶 (APX)、单脱氢抗坏血酸还原酶 (MDAR)、脱氢抗坏血酸还原酶 (DHAR) 和谷胱甘肽还原酶 (GR) 活性下降, 叶绿体内自由基不能被及时清除, 过多的自由基损伤光合器官, 导致龙眼叶片 PS II 受伤害。模拟酸雨胁迫伤害龙眼叶片 PS II 反应中心供体侧和受体侧的电子传递体, 造成同化力不足, 清除自由基能力下降, 导致叶绿体自由基累积, 光合机构受到伤害。

关键词: 龙眼; 酸雨; PS II 反应中心; 电子传递; 叶绿素荧光; 自由基代谢

Effects of simulated acid rain stress on the PS II reaction center and free radical metabolism in leaves of longan

LI Yongyu¹, PAN Tengfei¹, YU Dong², QIU Dongliang^{1,*}

1 College of Horticulture, Fujian Agriculture and Forestry University, Fuzhou 350002, China

2 Fruit Science Institute, Fujian Academy of Agricultural Sciences, Fuzhou 350013, China

Abstract: Injury mechanism of acid rain on the photosynthetic apparatus of plants has been one of the hot spots of the ecological research. To elucidate the relationship between the damage of reaction center and the accumulation of free radicals in photosynthetic system due to foliar acidification, one-year old longan (*Dimocarpus longana* Lour. cv. Wulongling) seedlings grown in pots were used to study the effects of simulated acid rain stress on chlorophyll fluorescence parameters, free radical metabolism and their recovery. The results showed that, under acid rain stress, the curve of chlorophyll fluorescence was quickly changed and PS II reaction center was damaged. Maximum photochemistry efficiency of PS II (F_v/F_m), the activity of PS II reaction center ($1/F_0 - 1/F_M$) and the density of active reaction center (RC/CS_0) decreased significantly after 5d stress with acid rain of pH2.5. The closure degree of active reaction center (V_j) and the

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (30400061); 福建省自然科学基金资助项目 (2011J01082, 2007J0244); 福建农林大学园艺学院青年学术骨干培养基金 (FAFU2012YYPY03)

收稿日期: 2012-03-08; 修订日期: 2012-10-10

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: qiudl1970@yahoo.com.cn

percentage of inactive reaction center (Non- Q_A and Non- Q_B) increased, whereas the Q_A was reduced rapidly. The oxygen releasing complexes were destructed, and the number of electron transducer of PS II receptor (S_m), the electronic conversion efficiency (ψ_o), the transduction rate of electron (φ_{Eo}) all decreased significantly. These results displayed that foliar acidification inhibited the linear electronic transduction of PS II reaction center. The results of free radical metabolism of longan indicated the contents of $O_2^{\cdot-}$, H_2O_2 and MDA increased significantly after 5d stress with acid rain of pH2.5. AsA and GSH converted to oxidized form, the contents of reduced form decreased, and the activities of SOD, APX, MDAR, DHAR and GR all reduced significantly. The inability of scavenging the free radicals in chloroplast in time resulted in the attack of photosynthetic organs by the redundant free radicals and thus the damage of PS II of longan leaves. Taken together, we concluded that acid rain stress damaged the oxidation and reduction sides of the reaction centers of PS II of the leaves in longan, and further decreased the linear electronic transduction to result in the shortage of assimilatory power which weakened the scavenging of free radicals, the accumulation of free radicals in chloroplasts destructed photosynthetic apparatus more.

Key Words: longan; acid rain; PS II reaction center; electron transduction; chlorophyll fluorescence; free radical metabolism

随着人口的增长和工业化进程的快速推进,酸雨已成为危害地球生态系统、威胁人类生存的主要环境问题之一,受到世界各国的广泛关注。我国已成为酸雨的重灾区之一,而且呈逐年加重的趋势^[1-2]。酸雨对植物的伤害机理以及植物对其抗性机制一直是生态研究的热点之一^[3],国内外的相关研究集中在酸雨胁迫影响植物光合作用中代谢酶的活性上^[3-7],关于植物光合机构光反应对酸雨胁迫响应的研究仍较少,酸雨胁迫影响植物的 PS II 反应中心^[8-9],使 PS II 反应中心的供体侧和受体侧遭受破坏^[10],并改变叶片叶绿素荧光参数^[11-12],使 PS II 活性和表观光合速率下降^[10, 13],但酸雨胁迫如何伤害植物光合机构,PS II 反应中心原初光化学反应和线性电子传递对酸雨逆境的响应研究,以及酸雨胁迫破坏植物 PS II 反应中心线性电子传递和自由基累积伤害光合机构之间是否存在内在联系仍需进一步讨论。龙眼 (*Dimocarpus longana* Lour.) 是我国重要的名特优果树,其种植面积和产量均居世界首位,龙眼的生产和开发对促进我国农村经济发展和提高农民收入有重要意义,但目前龙眼生产受到酸雨的严重危害,酸雨显著降低龙眼叶片的光合作用,导致光合细胞器解体,对叶片气体交换和碳同化造成显著影响,同时影响龙眼的开花和坐果^[14-17]。邱栋梁等^[8]研究了模拟酸雨胁迫下龙眼叶片光合作用暗反应启动后的光能捕获、转化及利用情况,表明酸雨通过损害 PS II 抑制光合作用,本文应用叶绿素荧光的 JIP-test 理论,研究了模拟酸雨对龙眼叶片 PS II 光化学转换效率、PS II 活性和含量、PSII 供体侧放氧蛋白复合体活性、PSII 受体侧电子受体还原状态以及电子传递速率等与 PS II 光化学活性相关过程的影响,并检测了叶片自由基代谢情况,分析光系统电子传递受损和自由基累积伤害光合机构间的内在联系,旨在探明酸雨伤害植物光合的作用机理。

1 材料和方法

1.1 试验材料与试验设计

供试植物为 1 年生龙眼实生小苗,以沙培方式种植于 6L 左右的花盆中,每盆 3 株,间隔 1d 施 1 次全营养液(表 1),维持龙眼小苗正常生长。

按闽南天然酸雨中硫酸根与硝酸根离子含量的摩尔比 $n(SO_4^{2-}):n(NO_3^-)=5:1$ ^[19],参照邱栋梁等^[16]的方法,以 $V(H_2SO_4):V(HNO_3)=5:1$ 调配稀的混合酸,再用混合酸调节蒸馏水的 pH 值配成 pH2.5 的模拟酸雨,并以 pH5.6 的蒸馏水为对照。

龙眼幼苗培养 4 个月后长成约 0.5 m 高的小苗,待新梢老熟后,用 pH2.5 模拟酸雨于每天 10:00 和 16:00 喷淋龙眼小苗,每天处理两次,雾状喷施,以滴水为度,每个处理 10 盆共 30 株,连续酸雨处理 5d,后停止酸雨处理,进行正常田间管理;对照植株喷淋等量 pH5.6 的蒸馏水;分别于模拟酸雨胁迫前 1d(CK),模拟

酸雨胁迫后 1、3 和 5d, 每日的 12:00, 选取幼苗顶端向下第 2 至第 4 片复叶采样。采样前先测定叶片叶绿素 a 快速荧光诱导动力学曲线, 然后用直径约 0.9cm 打孔器随机采集龙眼叶圆片(避开叶脉), 叶圆片直接进行超氧阴离子和过氧化氢的测定, 另取一部分叶圆片用液氮速冻后置于-80℃冰箱中备用。模拟酸雨胁迫后 1d、3d 和 5d 的数据探讨酸雨对龙眼叶片 PS II 反应中心的伤害, 停止酸雨胁迫后 5d(R5) 和 10d(R10) 的数据探讨龙眼自身修复 PS II 反应中心的能力。荧光诱导动力学曲线重复测定 10 个叶片, 生理生化指标测定重复 5 次。

表 1 全营养液配方^[18]

Table 1 Full strength nutrient solution

化学试剂	浓度 (mmol/L)	化学试剂	浓度 (μmol/L)	化学试剂	浓度 (mmol/L)	化学试剂	浓度 (μmol/L)
KNO ₃	6	H ₃ BO ₃	25	Ca(NO ₃) ₂	4	ZnSO ₄	2
MgSO ₄	1	(NH ₄) ₆ Mo ₇ O ₂₄	0.065	(NH ₄) ₂ H ₂ PO ₄	2	Fe ²⁺ -EDTA	40
MnCl ₂	2	CuSO ₄	0.5				

1.2 测定指标及方法

1.2.1 叶绿素荧光诱导动力学曲线和参数的测定

快速叶绿素荧光诱导动力学曲线的测定参考李鹏民^[20]、王利等^[10]的方法, 叶片经过 15min 暗适应后, 采用 Handy PEA(Hansatech, 英国)测定叶片快速叶绿素荧光诱导动力学曲线(O-J-I-P 曲线), 测定时的饱和脉冲光 3000 μmol·m⁻²·s⁻¹, 曝光时间 1s, 随后对 O-J-I-P 曲线进行 JIP-test 分析, 并计算 PS II 最大光化学效率 $F_v/F_m = (F_m - F_o) / F_o$, PS II 有活性的反应中心含量(RC/CS₀)、PS II 有活性反应中心的关闭程度(V_J)、PS II 反应中心活性(1/F_o-1/F_m)、PS II 失活反应中心的比例(Non-Q_A 和 Non-Q_B)、放氧复合体被破坏程度(OEC percentage)、Q_A 还原速率(M_o)、PS II 受体侧电子传递体数(S_m)、电子转化效率(ψ_o)和电子传递速率(φ_{Eo})。PS II 反应中心相关荧光参数的计算如下^[21-22]:

$$V_J \equiv (F_{2ms} - F_o) / (F_m - F_o)$$

$$M_o \equiv 4(F_{300\mu s} - F_o) / (F_m - F_o)$$

$$S_m \equiv (\text{Area}) / (F_m - F_o)$$

$$N \equiv S_m / S_s = S_m \cdot M_o \cdot (1/V_J)$$

$$S_s = V_J / M_o$$

$$\phi_{Po} \equiv TR_o / ABS = (1 - F_o / F_m)$$

$$\psi_o \equiv ET_o / TR_o = (1 - V_J)$$

$$\phi_{Eo} \equiv ET_o / ABS = (1 - F_o / F_m) \cdot \psi_o$$

$$RC/CS_o = \phi_{Po} \cdot (V_J / M_o) \cdot (ABS/CS_o)$$

PS II 反应中心失活比例(Non-Q_A 和 Non-Q_B) 参照 Appenroth 等^[21] 和 Strasser 等^[22] 的方法计算;

放氧复合体(OEC)破坏程度参照 Appenroth 等^[21] 的方法计算。

1.2.2 自由基含量测定

叶片超氧阴离子(O₂⁻)含量测定参照 Han 等^[18] 的方法, 过氧化氢(H₂O₂)含量参照 Orendi 等^[23] 的方法。

1.2.3 膜脂过氧化程度测定

叶片丙二醛(MDA)含量的测定参照 Hodges 等^[24] 的方法。

1.2.4 AsA-GSH 循环酶活性测定

酶液提取方法: 参照 Knörzer 等^[25] 的方法, 有所改进。取 3 片龙眼叶圆片, 液 N₂ 研磨, 迅速加入 1.8mL 50mmol/L Tris-HCl pH 7.0 提取缓冲液(内含 20% 甘油, 1 mmol/L AsA, 1 mmol/L DTT, 1 mmol/L GSH, 5

mmol/L $MgCl_2$) 匀浆, $4^{\circ}C$, 15000 g 下离心 30min, 取上清液直接进行酶活性分析。超氧化物歧化酶(SOD)、抗坏血酸过氧化物酶(APX)、单脱氢抗坏血酸还原酶(MDAR)、脱氢抗坏血酸还原酶(DHAR)和谷胱甘肽还原酶(GR)活性参照 Li 等^[26]的方法测定。

1.2.5 抗氧化物质含量测定

抗坏血酸含量测定参照 Chen 和 Cheng^[27]的方法, 谷胱甘肽含量测定参照 Griffith^[28]的方法。

1.3 数据分析方法

试验数据用 SAS 软件分析, 方差分析、显著性测验采用 Tukey 法进行, 以 $P < 0.05$ 表示显著性差异, $P < 0.01$ 表示极显著性差异, 采用 SigmaPlot 10.0 软件对数据进行绘图。

2 结果与分析

2.1 酸雨胁迫下龙眼叶片的叶绿素 *a* 快速荧光诱导曲线

酸雨胁迫改变了龙眼叶片的荧光诱导曲线形状, 荧光诱导曲线上升平缓, 没有显著的 J-I-P 特征点(图 1), 最小荧光产量(F_o)上升, 最大荧光产量(F_m)下降, 胁迫 5d, 最大光化学效率(F_v/F_m)下降了 35.87% ($P < 0.01$), 显示龙眼叶片的光合机构受到严重伤害, 恢复 5d 与胁迫 5d 荧光曲线的差异不显著, 恢复 10d 后 F_v/F_m 有所恢复, 并达到差异显著水平(表 2)。

2.2 酸雨胁迫对龙眼叶片 PS II 反应中心的影响

表 3 显示, pH2.5 酸雨胁迫 5d, 龙眼叶片 PS II 有活性反应中心含量(RC/CS_o)比对照降低了 22.14% ($P < 0.01$), 反应中心活性($1/F_o - 1/F_m$)降低了 50% ($P < 0.01$), 失活的反应中心包括非 Q_A 还原反应中心和非 Q_B 还原反应中心; 酸雨胁迫 3d, PS II 反应中心关闭程度(V_j)比对照增加了 40.41% ($P < 0.01$), 其最大荧光产量保持在 J 点水平(图 1), 显示酸雨胁迫 3d 造成 PS II 反应中心迅速失活。酸雨胁迫解除后, 恢复 10d, PS II 反应中心活性($1/F_o - 1/F_m$)恢复到对照的 75% (表 3)。

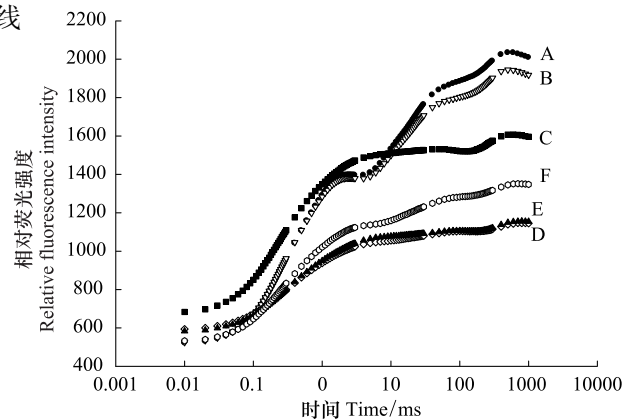


图 1 酸雨胁迫下龙眼叶片快速荧光诱导曲线

Fig. 1 The fluorescence induction kinetics curve of longan leaves under acid rain stress

A: CK; B: 1d; C: 3d; D: 5d; E: R5d; F: R10d

表 2 酸雨胁迫对龙眼叶片 PS II 的最大光化学效率的影响

Table 2 Effects of acid rain stress on F_o , F_m , F_v and F_v/F_m in longan leaves

	处理时间 Time of treatment/d					
	CK	1	3	5	R5	R10
F_o	$485 \pm 37c$	$489 \pm 46c$	$666 \pm 82a$	$587 \pm 71ab$	$575 \pm 34b$	$516 \pm 63bc$
F_m	$2029 \pm 168a$	$1941 \pm 202a$	$1606 \pm 215b$	$1146 \pm 199c$	$1155 \pm 113c$	$1351 \pm 304bc$
F_v/F_m	$0.76 \pm 0.02a$	$0.75 \pm 0.05a$	$0.59 \pm 0.06b$	$0.49 \pm 0.08c$	$0.50 \pm 0.05c$	$0.62 \pm 0.07b$

同一行中不同的小写字母表示数值之间存在显著性差异 ($P < 0.05$)

表 3 酸雨胁迫对龙眼叶片 RC/CS_o 、 $1/F_o - 1/F_m$ 、Non- Q_A 、Non- Q_B 和 V_j 的影响

Table 3 Effects of acid rain stress on RC/CS_o , $1/F_o - 1/F_m$, Non- Q_A , Non- Q_B , V_j in longan leaves

	处理时间 Time of treatment/d					
	CK	1	3	5	R5	R10
RC/CS_o	$178 \pm 9a$	$172 \pm 10ab$	$170 \pm 23ab$	$139 \pm 24c$	$140 \pm 15c$	$146 \pm 27bc$
$(1/F_o - 1/F_m) \times 10^3$	$1.6 \pm 0.1a$	$1.5 \pm 0.2a$	$0.9 \pm 0.2c$	$0.8 \pm 0.2c$	$0.9 \pm 0.1c$	$1.2 \pm 0.1b$
Non- Q_A	$0.00 \pm 0.0b$	$0.04 \pm 0.01b$	$0.31 \pm 0.1a$	$0.36 \pm 0.1a$	$0.35 \pm 0.1a$	$0.24 \pm 0.1a$
Non- Q_B	$0.00 \pm 0.0d$	$0.02 \pm 0.01d$	$0.23 \pm 0.1b$	$0.39 \pm 0.1a$	$0.35 \pm 0.1a$	$0.2 \pm 0.1bc$
V_j	$0.59 \pm 0.06d$	$0.61 \pm 0.08cd$	$0.82 \pm 0.06a$	$0.74 \pm 0.04b$	$0.75 \pm 0.06b$	$0.69 \pm 0.03bc$

同一行中不同的小写字母表示数值之间存在显著性差异 ($P < 0.05$)

2.3 酸雨胁迫对龙眼叶片 PS II 供体侧和受体侧变化的影响

酸雨胁迫对龙眼叶片 PS II 供体侧放氧蛋白复合体和受体侧 (Q_A 和 Q_B) 影响的研究表明 (表 4), 龙眼叶片受 pH2.5 模拟酸雨胁迫 5d, 放氧复合体 (OEC) 被伤害程度 15.29%, 酸雨逆境解除后, 叶片 OEC 比例仍保持在胁迫水平; PS II 受体侧的电子传递体 (S_m) 比对照减少了 19.30% ($P < 0.01$), 叶片捕获激发能的电子转化效率 (ψ_o) 显著下降 57.78%, PS II 电子传递速率 (φ_{Eo}) 下降 66.96% ($P < 0.01$), Q_A 被迅速还原, 因此, 胁迫 3d, Q_A 还原速率 (M_o) 比对照提高了 57.04% ($P < 0.01$), 引起 Q_A^- 的大量积累, 这和 V_j 的变化趋势一致 (表 3)。酸雨胁迫解除后, 恢复 10d, 叶片电子传递速率 (φ_{Eo}) 恢复到对照的 61%。

表 4 酸雨胁迫对龙眼叶片 OEC 比例、 S_m 、 ψ_o 、 φ_{Eo} 和 M_o 的影响

Table 4 Effects of acid rain stress on OEC percentage, S_m , ψ_o , φ_{Eo} , M_o in longan leaves

	处理时间 Time of treatment/d					
	CK	1	3	5	R5	R10
OEC 比例 percentage	1.00±0.00a	0.97±0.06a	0.88±0.07b	0.85±0.07b	0.86±0.05b	0.87±0.07b
S_m	28.96±4.3a	28.36±4.5a	25.32±4.7bc	23.37±3.2c	25.16±4.8bc	26.53±4.7b
ψ_o	0.41±0.06a	0.38±0.08ab	0.17±0.06d	0.26±0.04cd	0.25±0.06cd	0.30±0.03bc
φ_{Eo}	0.31±0.05a	0.28±0.07a	0.10±0.05c	0.13±0.04bc	0.12±0.04bc	0.19±0.03b
M_o	1.22±0.17d	1.33±0.24c	1.92±0.23a	1.53±0.13b	1.56±0.16b	1.52±0.13b

同一行中不同的小写字母表示数值之间存在显著性差异 ($P < 0.05$)

2.4 酸雨胁迫对龙眼叶片 O_2^- 和 H_2O_2 产生速率及 MDA 含量的影响

从图 2 可以看出, 随着 pH2.5 酸雨胁迫天数的延长, 龙眼叶片中 O_2^- 和 H_2O_2 产生速率在不断增加, pH2.5 酸雨胁迫 5d 时叶片中的 O_2^- 和 H_2O_2 产生速率比对照分别增加了 35.44% ($P < 0.01$) 和 37.58% ($P < 0.01$), MDA 含量比对照增加了 70.90% ($P < 0.01$), 酸雨胁迫加重了叶片膜脂过氧化程度。停止酸雨胁迫, 恢复 10d 后, 叶片 O_2^- 和 H_2O_2 含量仍保持较高水平, MDA 含量在停止酸雨处理 5d 后达到最大, 比对照增加 86.21% ($P < 0.01$)。

2.5 酸雨胁迫对龙眼叶片 AsA 和 GSH 含量以及抗氧化相关酶活性的影响

数据显示 (表 5 和表 6), 龙眼小苗受 pH2.5 酸雨胁迫初期, 叶片 AsA 和 GSH 含量应激上升, 后加速下降, 和 APX、MDAR、DHAR、GR 酶活性变化趋势一致; 酸雨胁迫 5d, 龙眼叶片 AsA 含量比对照降低了 42.17%, DAsA 含量上升 42.96%, DAsA/AsA 比率提高 147.77%; GSH 含量比对照下降 36%, GSSG 含量升高 69.57%, GSH/GSSG 比率下降 62.38%; SOD 活性下降了 81.80% ($P < 0.01$), APX 活性下降 49.67% ($P < 0.01$), MDAR 活性下降 63.07% ($P < 0.01$), DHAR 活性下降 23.14% ($P < 0.01$), GR 活力减少 54.55% ($P < 0.01$)。酸雨逆境下, 叶片抗化血酸和谷胱甘肽的类型大部分转化为氧化型, 还原型减少, 清除自由基的能力降低, 叶绿体内 H_2O_2 无法被及时清除。酸雨胁迫停止, 恢复 10d 后, 各项指标有所恢复。

3 讨论

模拟酸雨胁迫植物的试验表明, 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的膜脂发生过氧化, 出现坏死斑点^[29-30], 降低叶片净光合速率, 破坏植物光合系统^[8], 进一步的研究发现, 植物叶

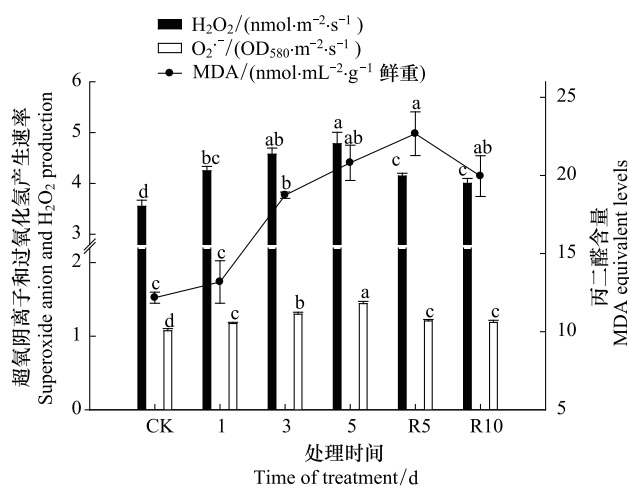


图 2 酸雨胁迫对龙眼叶片 O_2^- 和 H_2O_2 产生速率及 MDA 含量的影响

Fig. 2 Effects of acid rain stress on contents of O_2^- , H_2O_2 and MDA in longan leaves

片光合作用的下降进程先于叶绿素含量下降,光合作用降低不能简单理解为叶绿素下降所致^[6, 31],酸雨导致叶绿体自由基增多,攻击光合机构^[16],改变叶片 PS II 的反应中心和叶绿素荧光参数,降低光反应过程中的光化学转换效率^[8]。但模拟酸雨逆境下,自由基累积伤害植物叶片光合机构和 PS II 反应中心受损之间的内在联系仍不清楚。

表 5 酸雨胁迫对龙眼叶片 AsA 和 GSH 含量的影响

Table 5 Effects of acid rain stress on contents of AsA and GSH in longan leaves

	处理时间 Time of treatment/d					
	0	1	3	5	R5	R10
AsA ($\mu\text{g/g}$ 鲜重)	$8.5 \pm 0.4\text{b}$	$9.4 \pm 0.3\text{a}$	$7.5 \pm 0.3\text{c}$	$4.9 \pm 0.2\text{e}$	$5.4 \pm 0.1\text{de}$	$6.0 \pm 0.3\text{d}$
DAsA ($\mu\text{g/g}$ 鲜重)	$17.7 \pm 0.07\text{cd}$	$16.8 \pm 0.14\text{d}$	$18.7 \pm 0.48\text{c}$	$25.1 \pm 0.35\text{a}$	$24.8 \pm 0.62\text{ab}$	$23.8 \pm 0.39\text{b}$
DAsA/AsA	$2.08 \pm 0.11\text{e}$	$1.80 \pm 0.05\text{e}$	$2.49 \pm 0.04\text{d}$	$5.09 \pm 0.16\text{a}$	$4.58 \pm 0.09\text{b}$	$3.97 \pm 0.13\text{c}$
GSH ($\mu\text{mol/m}^2$)	$196 \pm 21\text{a}$	$199 \pm 7\text{a}$	$164 \pm 17\text{ab}$	$125 \pm 17\text{b}$	$139 \pm 19\text{b}$	$158 \pm 17\text{ab}$
GSSG ($\mu\text{mol/m}^2$)	$9.0 \pm 1.4\text{b}$	$9.8 \pm 1.4\text{b}$	$11.4 \pm 1.4\text{ab}$	$15.3 \pm 2.3\text{a}$	$14.5 \pm 1.4\text{a}$	$12.1 \pm 1.4\text{ab}$
GSH/ GSSG	$21.9 \pm 1.9\text{a}$	$20.6 \pm 2.5\text{a}$	$14.5 \pm 1.3\text{b}$	$8.2 \pm 0.2\text{d}$	$9.6 \pm 0.8\text{cd}$	$13.1 \pm 0.6\text{bc}$

同一行中不同的小写字母表示数值之间存在显著性差异 ($P < 0.05$)

表 6 酸雨胁迫对龙眼叶片 SOD、APX、MDAR、DHAR、GR 活性的影响

Table 6 Effects of acid rain stress on activity of SOD, APX, MDAR, DHAR, GR in longan leaves under acid rain stress

	处理时间 Time of treatment/d					
	0	1	3	5	R5	R10
SOD ($10^5 \cdot \text{units} \cdot \text{m}^{-2}$)	2.03 ± 0.20	1.75 ± 0.08	1.30 ± 0.18	0.75 ± 0.05	1.25 ± 0.13	1.54 ± 0.19
APX ($\mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$)	$58.7 \pm 2.9\text{b}$	$70.3 \pm 2.6\text{a}$	$55.0 \pm 3.5\text{b}$	$27.2 \pm 3.3\text{c}$	$33.7 \pm 3.9\text{c}$	$35.6 \pm 3.2\text{c}$
MDAR ($\mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$)	$8.65 \pm 0.8\text{a}$	$9.14 \pm 0.5\text{a}$	$6.78 \pm 0.7\text{b}$	$3.19 \pm 0.5\text{d}$	$4.86 \pm 0.4\text{cd}$	$5.16 \pm 0.8\text{bc}$
DHAR ($\mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$)	$2.63 \pm 0.2\text{a}$	$3.81 \pm 0.1\text{bc}$	$3.05 \pm 0.2\text{b}$	$2.02 \pm 0.1\text{d}$	$2.28 \pm 0.1\text{cd}$	$2.44 \pm 0.2\text{cd}$
GR ($\mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$)	$1.15 \pm 0.1\text{ab}$	$1.38 \pm 0.1\text{a}$	$0.98 \pm 0.1\text{b}$	$0.48 \pm 0.1\text{d}$	$0.66 \pm 0.1\text{cd}$	$0.87 \pm 0.1\text{bc}$

同一行中不同的小写字母表示数值之间存在显著性差异 ($P < 0.05$)

已有的研究表明,龙眼叶片受 pH2.5 的酸雨胁迫后净光合速率 (P_n)、气孔导度 (C_s)、蒸腾速率 (T_r) 急剧下降^[8]。叶绿体内囊体膜内建立合适的跨膜质子梯度是进行正常光合作用的基础,酸雨可能影响了龙眼叶片细胞内细胞质以及亚细胞器内细胞质的 pH 值,直接导致跨膜质子梯度降低甚至消失,这将严重影响 PS II 的光化学活性,对叶绿素荧光动力学曲线的 JIP-test 分析显示, F_v/F_m 、 RC/CS_o 、 $1/F_o - 1/F_m$ 等都随着胁迫时间延长而显著变小(表 2 和表 3),说明酸雨主要影响了 PS II 的含量和活性,破坏光系统结构和功能,干扰光能的吸收和利用,导致龙眼叶片净光合速率 (P_n) 下降,产生大量活性氧。而非 Q_A 还原反应中心比例提高(表 3)说明光系统对所吸收光能直接以热耗散形式释放掉^[32]。

此外,模拟酸雨伤害龙眼叶片 PS II 的供体侧和受体侧,造成光系统反应中心的线性光合电子传递受损。放氧复合体 (OEC) 是 PS II 反应中心氧化端最主要的结构单元,OEC 的破坏程度会对植物光合作用中的水裂解和电子传递产生影响。酸雨胁迫改变了龙眼叶片 OEC 的结构和功能(表 3),从而减弱了 PS II 供体侧的电子传递,使 PS II 反应中心氧化端的电子传递受到影响。受体侧的数据表明, S_m 和 ϕ_{E_o} 在酸雨胁迫后下降,显示叶面酸化使 PS II 受体侧的电子传递下降,这与叶面酸化使 M_o 和 V_j 逐渐增加所反映的事实一致;同时,非 Q_B 还原中心含量上升(表 3),显示酸雨胁迫伤害了龙眼叶片 PS II 反应中心的还原端,还原侧电子传递受阻,导致 Q_A 还原态迅速积累,引起 PS II 还原侧与供体侧电子传递体的电荷重组现象,而电荷重组会导致三线态氧分子产生,这可能是龙眼叶片活性氧大量产生的原因之一。

但是,由于酸雨胁迫导致龙眼叶片光合能力下降,NADPH 和 ATP 生成不足,因此与清除活性氧相关的酶活性及底物还原状态都出现明显下降(表 5 和表 6),大量产生的活性氧不能被有效清除,叶片不能维持正常的活性氧代谢水平,导致叶片出现严重的活性氧累积,进而伤害光合机构,引起龙眼叶片净光合速率的进一步

下降。因此,可以推测酸雨胁迫导致龙眼叶片叶绿体内囊体膜跨膜质子梯度降低甚至消失,严重影响 PS II 活性和含量,降低光合能力,造成同化力不足,引起清除活性氧相关的酶活性及物质含量下降,大量产生的活性氧不能被有效清除,损伤光合机构;而酸雨伤害 PS II 供体侧和受体侧的电子传递体,造成同化力不足,是导致自由基累积伤害光合机构的重要原因,随着酸雨胁迫程度加深,单位面积上有活性的反应中心的密度(RC/CS_0)显著变小。停止酸雨胁迫后,龙眼叶片电子传递得到一定修复,叶绿体中清除自由基的效率增强,PS II 反应中心的密度和活性恢复到对照的 75%—80%。

References:

- [1] Larssen T, Lydersen E, Tang D, He Y, Gao J, Liu H, Duan L, Seip H M, Vogt R D, Mulder J. Acid rain in China. *Environmental Science & Technology*, 2006, 40(2): 418-425.
- [2] Hou Q, Zhao Y. An analysis on characteristics of regional acid rain over China in 2007. *Advances in Climate Change Research*, 2009, 5(1): 7-11.
- [3] Yao Z, Jiang H, Yu S, Lu M. Effects of simulated acid rain on water physiological characteristics of *Myrica rubra* seedlings. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2011, 22(8): 1967-1974.
- [4] Neves N R, Oliva M A, da Cruz Centeno D, Costa A C, Ribas R F, Pereira E G. 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. *Science of the Total Environment*, 2009, 407(12): 3740-3745.
- [5] Liu T W, Wu F H, Wang W H, Chen J, Li Z J, Dong X J, Patton J, Pei Z M, Zheng H L. Effects of calcium on seed germination, seedling growth and photosynthesis of six forest tree species under simulated acid rain. *Tree Physiology*, 2011, 31(4): 402-413.
- [6] Wang Y, Deng S, Jiang J, Shang H, Lin B, Sun Y, Hu X. Effects of acid rain on photosynthesis and antioxidant enzyme activity of *H. mitabilis* L. seedlings. *Journal of Nuclear Agricultural Sciences*, 2011, 25(3): 588-593.
- [7] Feng L, Yao F, Wang X, Yang Q, Yang H, Ding H. Effects of simulated acid rain with lower S/N ratio on gas exchange and membrane of three dominant species in subtropical forests. *Acta Ecologica Sinica*, 2011, 31(7): 1911-1917.
- [8] Qiu D L, Liu X H, Guo S Z. Effects of simulated acid rain stress on gas exchange and chlorophyll a fluorescence parameters in leaves of longgan. *Acta Phytocologica Sinica*, 2002, 26(4): 441-446.
- [9] Xie Y, Yang W, Yang Y, Cai X, Zhou J. Effects of exogenous nitric oxide on photosynthetic characteristic of *Indocalanus barbatus* under a simulated acid rain stress condition. *Acta Ecologica Sinica*, 2007, 27(12): 5193-5201.
- [10] Wang L, Yang H, Zhang Z, Fan W, Jiang Q, Ran K. Effects of rhizosphere acidity on activity of photosystem II and photosynthetic rate in *Malus hupehensis* Leaves. *Scientia Silvae Sinicae*, 2011, 47(10): 167-171.
- [11] Jin Q, Jiang H, Yu S, Yin X. Effects of acid rain stress on gas exchange and chlorophyll fluorescence of *Castanopsis sclerophylla* seedlings. *Chinese Journal of Plant Ecology*, 2010, 34(9): 1117-1124.
- [12] Yin X, Yi L, Yu S, Jiang H, Liu M. Effects of acid rain stress on gas exchange and chlorophyll fluorescence in leaves of *Schima superba* seedlings. *Ecology and Environmental Sciences*, 2010, 19(7): 1556-1562.
- [13] Xie Y, Yang W, Lu M, Cai X, Zhou J. Effects of silicon on photosynthetic characteristics of *Indocalanus barbatus* under simulated acid rain stress. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2008, 19(6): 1179-1184.
- [14] Pan T F, Li Y Y, Zheng S, Ma C L, Qiu D L. The activation and regulation of Ca-CaM signaling system on the activity of Ca^{2+} -ATPase and H^{+} -ATPase in leaves of longan under stimulated acid rain stress. *Bioinformatics and Biomedical Engineering*, 2008, 3967-3972.
- [15] Li Y, Pan T, Kang K, Lin L, Qiu D. Effects of La and Ce on longan (*Dimocarpus longana* Lour.) pollen germination rate and fruit setting under acid rain stress. *Journal of the Chinese Rare Earth Society*, 2006, 24(Z1): 187-191.
- [16] Qiu D, Liu X, Wang X. Injury effects of simulated acid rain on chloroplasts of longan leaves. *Chinese Journal of Applied and Environmental Biology*, 2002, 8(2): 154-158.
- [17] Qiu D, Liu X. Effect of simulated acid rain on the chlorophyll a fluorescence characteristic of longan (*Dimocarpus longana* Lour.) leaves. *Acta Horticulturae Sinica*, 2000, 27(3): 177-181.
- [18] Han S, Tang N, Jiang H X, Yang L T, Li Y, Chen L S. CO_2 assimilation, photosystem II photochemistry, carbohydrate metabolism and antioxidant system of citrus leaves in response to boron stress. *Plant Science*, 2009, 176(1): 143-153.
- [19] Tang D, Wang W, Pang Y, Liu H, Wang S, Wang L. Contribution of NO_x to acid rain in Minnan area. *Research of Environment Sciences*, 1996, 9(5): 38-40.
- [20] Li P. Application of chlorophyll a fluorescence transient in study of plant physiology under stress conditions. Taian: Shandong Agricultural University, 2007.
- [21] Appenroth K J, Stoeckel J, Srivastava A, Strasser R J. Multiple effects of chromate on the photosynthetic apparatus of *Spirodela polyrrhiza* as probed

- by OJIP chlorophyll a fluorescence measurements. *Environmental Pollution*, 2001, 115(1): 49-64.
- [22] Strasser R, Tsimill-Michael M, Srivastava A. Analysis of the chlorophyll a fluorescence transient // Papageorgiou G, Govindjee eds. *Advances in Photosynthesis and Respiration*. Netherlands: KAP Press, 2004: 1-47.
- [23] Orendi G, Zimmermann P, Baar C, Zentgraf U. Loss of stress-induced expression of catalase3 during leaf senescence in *Arabidopsis thaliana* is restricted to oxidative stress. *Plant Science*, 2001, 161(2): 301-314.
- [24] Hodges D M, DeLong J M, Forney C F, Prange R K. Improving the thiobarbituric acid-reactive-substances assay for estimating lipid peroxidation in plant tissues containing anthocyanin and other interfering compounds. *Planta*, 1999, 207(4): 604-611.
- [25] Knörzer O C, Durner J, Böger P. Alterations in the antioxidative system of suspension-cultured soybean cells (*Glycine max*) induced by oxidative stress. *Physiologia Plantarum*, 1996, 97(2): 388-396.
- [26] Li Q, Chen L S, Jiang H X, Tang N, Yang L T, Lin Z H, Li Y, Yang G H. Effects of manganese-excess on CO₂ assimilation, ribulose-1, 5-bisphosphate carboxylase/oxygenase, carbohydrates and photosynthetic electron transport of leaves, and antioxidant systems of leaves and roots in *Citrus grandis* seedlings. *BMC Plant Biology*, 2010, 10(1): 42-57.
- [27] Chen L S, Cheng L L. Both xanthophyll cycle-dependent thermal dissipation and the antioxidant system are upregulated in grape (*Vitis labrusca* L. cv. Concord) leaves in response to N limitation. *Journal of Experimental Botany*, 2003, 54(390): 2165-2175.
- [28] Griffith O W. Determination of glutathione and glutathione disulfide using glutathione reductase and 2-vinylpyridine. *Analytical Biochemistry*, 1980, 106(1): 207-212.
- [29] Yoshida K, Shibasaki R, Takami C, Takenaka C, Yamamoto K, Tezuka T. Response of gas exchange rates in *Abies firma* seedlings to various additional stresses under chronic acid fog stress. *Journal of Forest Research*, 2004, 9(3): 195-203.
- [30] Qiu D, Liu X, Wang Z, Chen L. Effects of simulated acid rain on leaf membrane permeability of litchi. *Journal of Fujian Agricultural University*, 2001, 30(1): 33-35.
- [31] Qiu D, Liu X. Effects of simulated acid rain on chloroplast activity in *Dimorcarpus longana* Lour. cv. wulongling leaves. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2002, 13(12): 1559-1562.
- [32] Matsubara S, Chow W S. Populations of photoinactivated photosystem II reaction centers characterized by chlorophyll a fluorescence lifetime *in vivo*. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2004, 101(52): 18234-18239.
- [33] Foyer C H, Shigeoka S. Understanding oxidative stress and antioxidant functions to enhance photosynthesis. *Plant physiology*, 2011, 155(1): 93-100.

参考文献:

- [2] 侯青, 赵艳霞. 2007 年中国区域性酸雨的若干特征. *气候变化研究进展*, 2009, 5(1): 7-11.
- [3] 姚兆斌, 江洪, 余树全, 鲁美娟. 模拟酸雨胁迫对杨梅幼苗水分生理特性的影响. *应用生态学报*, 2011, 22(8): 1967-1974.
- [6] 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.
- [7] 冯丽丽, 姚芳芳, 王希华, 杨庆松, 杨海波, 丁慧明. 低硫氮比酸雨对亚热带典型树种气体交换和质膜的影响. *生态学报*, 2011, 31(7): 1911-1917.
- [9] 谢寅峰, 杨万红, 杨阳, 蔡贤雷, 周坚. 外源一氧化氮对模拟酸雨胁迫下箬竹 (*Indocalanus barbatus*) 光合特性的影响. *生态学报*, 2007, 27(12): 5193-5201.
- [10] 王利, 杨洪强, 张召, 范伟国, 姜倩倩, 冉昆. 根区酸化对平邑甜茶叶片光系统 II 活性及光合速率的影响. *林业科学*, 2011, 47(10): 167-171.
- [11] 金清, 江洪, 余树全, 殷秀敏. 酸雨胁迫对苦槠幼苗气体交换与叶绿素荧光的影响. *植物生态学报*, 2010, 34(9): 1117-1124.
- [12] 殷秀敏, 伊力塔, 余树全, 江洪, 刘美华. 酸雨胁迫对木荷叶片气体交换和叶绿素荧光参数的影响. *生态环境学报*, 2010, 19(7): 1556-1562.
- [13] 谢寅峰, 杨万红, 陆美蓉, 蔡贤雷, 周坚. 模拟酸雨胁迫下硅对髯毛箬竹光合特性的影响. *应用生态学报*, 2008, 19(6): 1179-1184.
- [15] 李永裕, 潘腾飞, 康开权, 林淋淋, 邱栋梁. 镧、铈对酸雨胁迫下龙眼 (*Dimorcarpus longana* Lour.) 花粉萌发和坐果的影响. *中国稀土学报*, 2006, 24(Z1): 187-191.
- [16] 邱栋梁, 刘星辉, 王湘平. 模拟酸雨对龙眼叶绿体的伤害效应. *应用与环境生物学报*, 2002, 8(2): 154-158.
- [17] 邱栋梁, 刘星辉. 模拟酸雨对龙眼叶片叶绿素 a 荧光特性的影响. *园艺学报*, 2000, 27(3): 177-181.
- [19] 汤大钢, 王玮, 庞燕波. 氮氧化物在闽南地区酸雨中的贡献. *环境科学研究*, 1996, 9(5): 38-40.
- [20] 李鹏民. 快速叶绿素荧光诱导动力学在植物逆境生理研究中的应用[D]. 泰安: 山东农业大学, 2007.
- [30] 邱栋梁, 刘星辉, 王宝华, 陈烈. 模拟酸雨对荔枝叶片膜透性的影响. *福建农业大学学报*, 2001, 30(1): 33-35.
- [31] 邱栋梁, 刘星辉. 模拟酸雨对龙眼叶绿体活性的影响. *应用生态学报*, 2002, 13(12): 1559-1562.

ACTA ECOLOGICA SINICA Vol. 32, No. 24 December, 2012 (Semimonthly)

CONTENTS

A bibliometric study of biodiversity research in China	LIU Aiyuan, GUO Yuqing, LI Shiying, et al (7635)
Effects of elevated CO ₂ and nitrogen deposition on leaf nutrient quality of <i>Fargesia rufa</i> Yi	 ZHOU Xianrong, WANG Jianhua, ZHANG Hong, et al (7644)
Airborne pollen assemblages and their relationships with climate factors in the central Shaanxi Province of the Loess Plateau: a case in Xiaheimugou, Luochuan County	LÜ Suqing, LI Yuecong, XU Qinghai, et al (7654)
Spatial and temporal change in ecological assets in the Yangtze River Delta of China 1995—2007	 XU Xibao, CHEN Shuang, YANG Guishan (7667)
Evaluation and optimization of woodland ecological patterns for Qingdao based on the agent-based model	 FU Qiang, MAO Feng, WANG Tianqing, et al (7676)
Interactive mechanism of service function of alpine rangeland ecosystems in Qinghai-Tibetan Plateau	 LIU Xingyuan, LONG Ruijun, SHANG Zhanhuan (7688)
Preliminary evaluation of air temperature reduction of urban green spaces in Beijing	 ZHANG Biao, GAO Jixi, XIE Gaodi, et al (7698)
Resources metabolism analysis for the pulp and paper industry in Wuhan, China	 SHI Xiaoqing, LI Xiaonuo, ZHAO Linjia, et al (7706)
The characteristics and influential factors of direct carbon emissions from residential energy consumption: a case study of Lijiang City, China	WANG Danyin, TANG Mingfang, REN Yin, et al (7716)
Spatial targeting of payments for ecosystem services Based on SWAT Model and cost-benefit analysis	 SONG Xiaoyu, LIU Yuqing, DENG Xiaohong, et al (7722)
The wind tunnel test of plastic greenhouse and its surface wind pressure patterns	 YANG Zaiqiang, ZHANG Bo, XUE Xiaoping, et al (7730)
Population quantitative characteristics and dynamics of rare and endangered plant <i>Davidia involucrata</i> in Hunan Province	 LIU Haiyang, JIN Xiaoling, SHEN Shouyun, et al (7738)
Phenotypic diversity in populations of germplasm resources of <i>Rodgersia sambucifolia</i> and related species	 LI Pingping, MENG Hengling, CHEN Junwen, et al (7747)
Effects of sand burial and seed size on seed germination, seedling emergence and growth of <i>Caragana korshinskii</i> Kom. (Fabaceae) ...	 YANG Huiling, LIANG Zhenlei, ZHU Xuanwei, et al (7757)
Population-keeping mechanism of the parasitoid <i>Dastarcus helophoroides</i> (Coleoptera: Bothrideridae) of <i>Massicus raddei</i> (Coleoptera: Cerambycidae) in oak forest	YANG Zhongqi, TANG Yanlong, JIANG Jing, et al (7764)
Study of mingling based on neighborhood spatial permutation	LOU Minghua, TANG Mengping, QIU Jianxi, et al (7774)
Comparison of three regression analysis methods for application to LAI inversion using Hyperion data	 SUN Hua, JU Hongbo, ZHANG Huaiqing, et al (7781)
Response of seed germination and seedling growth of <i>Pinus koraiensis</i> and <i>Quercus mongolica</i> to comprehensive action of warming and precipitation	ZHAO Juan, SONG Yuan, SUN Tao, et al (7791)
Impacts of water stored in sapwood <i>Populus bolleana</i> on its sap flux	DANG Hongzhong, LI Wei, ZHANG Youyan, et al (7801)
Dynamics of greenhouse gases emission and its impact factors by fire disturbance from <i>Alnus sibirica</i> forested wetland in Xiaoxing'an Mountains, Northeast China	GU Han, MU Changcheng, ZHANG Bowen (7808)
Different tide status and salinity alter stoichiometry characteristics of mangrove <i>Kandelia candel</i> seedlings	 LIU Biner, LIAO Baowen, FANG Zhanqiang (7818)
Effects of shrub encroachment in desert grassland on runoff and the induced nitrogen loss in southeast fringe of Tengger Desert	 LI Xiaojun, GAO Yongping (7828)
Community structure and throughfall erosivity characters of artificial rainforest in Xishuangbanna	 DENG Yun, [TANG Yanlin], CAO Min, et al (7836)
Temporal-spatial variations of net ecosystem productivity in alpine area of southwestern China	 PANG Rui, GU Fengxue, ZHANG Yuandong, et al (7844)

Relationships between chemical compositions of <i>Quercus</i> species seeds and climatic factors in temperate zone of NSTEC	LI Dongsheng, SHI Zuomin, LIU Shirong, et al (7857)
Effects of simulated acid rain stress on the PS II reaction center and free radical metabolism in leaves of longan	LI Yongyu, PAN Tengfei, YU Dong, et al (7866)
Assessment of organic pollution for surface soil in Shenyang suburbs	CUI Jian, DU Jizhong, MA Hongwei, et al (7874)
The impact of rainfall on soil respiration in a rain-fed maize cropland	GAO Xiang, HAO Weiping, GU Fengxue, et al (7883)
Effects of winter crops on enzyme activity and morphological characteristics of root in subsequent rice crops	YU Tianyi, PANG Huancheng, REN Tianzhi, et al (7894)
Dynamic changes of soil moisture and nitrate nitrogen in wheat and maize intercropping field under different nitrogen supply	YANG Ruiju, CHAI Shouxi, MA Zhongming (7905)
Characteristics of the bird diversity and the impact factors in Weishan Lake	YANG Yuewei, LI Jiuen (7913)
The effect of cropping landscapes on the population dynamics of the cotton bollworm <i>Helicoverpa armigera</i> (Lepidoptera, Noctuidae) in the northern Xinjiang	LU Zhaozhi, PAN Weilin, ZHANG Xin, et al (7925)
The seasonal variations of nitrogen and phosphorus release and its fluxes from the sediments of the Beili Lake in the Hangzhou West Lake	LIU Jingjing, DONG Chunying, SONG Yingqi, et al (7932)
Optimization of lake model salmo based on real-coded genetic algorithm	GUO Jing, CHEN Qiuwen, ZHANG Xiaoqing, et al (7940)
The influence of climatic environmental factors and fishing pressure on changes of hairtail catches in the northern South China Sea	WANG Yuezhong, SUN Dianrong, CHEN Zuozhi, et al (7948)
Seasonal and spatial distribution of acid volatile sulfide in sediment under different mariculture types in Nansha Bay, China	YAN Tingru, JIAO Haifeng, MAO Yuze, et al (7958)
Review and Monograph	
Research progress on the mechanism of improving plant cold hardiness	XU Chengxiang (7966)
Influences of vegetation on permafrost: a review	CHANG Xiaoli, JIN Huijun, WANG Yongping, et al (7981)
Home-field advantage of litter decomposition and its soil biological driving mechanism: a review	ZHA Tonggang, ZHANG Zhiqiang, SUN Ge, et al (7991)
Research progress on the relationship of pollutants between road-deposited sediments and its washoff	ZHAO Hongtao, LI Xuyong, YIN Chengqing (8001)

《生态学报》2013 年征订启事

《生态学报》是中国生态学学会主办的生态学专业性高级学术期刊,创刊于 1981 年。主要报道生态学研究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;新书评介和学术、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,300 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

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 32 卷 第 24 期 (2012 年 12 月)

ACTA ECOLOGICA SINICA

(Semimonthly, Started in 1981)

Vol. 32 No. 24 (December, 2012)

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	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
主 编	冯宗炜	Editor-in-chief	FENG Zong-Wei
主 管	中国科学技术协会	Supervised by	China Association for Science and Technology
主 办	中国生态学学会 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	Sponsored by	Ecological Society of China Research Center for Eco-environmental Sciences, CAS Add:18, Shuangqing Street, Haidian, Beijing 100085, China
出 版	科 学 出 版 社 地址:北京东黄城根北街 16 号 邮政编码:100717	Published by	Science Press Add:16 Donghuangchenggen North Street, Beijing 100717, China
印 刷	北京北林印刷厂	Printed by	Beijing Bei Lin Printing House, Beijing 100083, China
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	Distributed by	Science Press Add:16 Donghuangchenggen North Street, Beijing 100717, China Tel:(010)64034563 E-mail:journal@cspg.net
订 购	全国各地邮局	Domestic	All Local Post Offices in China
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	Foreign	China International Book Trading Corporation Add:P. O. Box 399 Beijing 100044, China
广告经营 许 可 证	京海工商广字第 8013 号		



ISSN 1000-0933
CN 11-2031/Q

国内外公开发行

国内邮发代号 82-7

国外发行代号 M670

定价 70.00 元