

ISSN 1000-0933
CN 11-2031/Q

生态学报

Acta Ecologica Sinica



第33卷 第5期 Vol.33 No.5 2013

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 (SHENTAI XUEBAO)

第33卷 第5期 2013年3月 (半月刊)

目 次

前沿理论与学科综述

- 氮沉降对森林土壤有机质和凋落物分解的影响及其微生物学机制 王晶苑, 张心昱, 温学发, 等 (1337)
工业大麻对重金属污染土壤的治理研究进展 梁淑敏, 许艳萍, 陈 裕, 等 (1347)
最佳管理措施评估方法研究进展 孟凡德, 耿润哲, 欧 洋, 等 (1357)
灌木年轮学研究进展 芦晓明, 梁尔源 (1367)

个体与基础生态

- 华北落叶松夜间树干液流特征及生长季补水格局 王艳兵, 德永军, 熊 伟, 等 (1375)
土壤干旱胁迫对沙棘叶片光合作用和抗氧化酶活性的影响 裴 斌, 张光灿, 张淑勇, 等 (1386)
湖北石首麋鹿昼间活动时间分配 杨道德, 李竹云, 李鹏飞, 等 (1397)
三种杀虫剂亚致死浓度对川硬皮肿腿蜂繁殖和搜寻行为的影响 杨 桦, 杨 伟, 杨春平, 等 (1405)

种群、群落和生态系统

- 三沙湾浮游动物生态类群演替特征 徐佳奕, 徐兆礼 (1413)
滇西北高原纳帕海湿地湖滨带优势植物生物量及其凋落物分解 郭绪虎, 肖德荣, 田 昆, 等 (1425)
安徽新安江干流滩涂湿地草本植物区系及物种多样性 杨文斌, 刘 坤, 周守标 (1433)
湿地芦苇根结合好气细菌群落时空分布及其与水质因子的关系 熊 薇, 郭逍宇, 赵 霖 (1443)
三种温带树种叶片呼吸的时间动态及其影响因子 王兆国, 王传宽 (1456)
不同土壤水分条件下杨树人工林水分利用效率对环境因子的响应 周 洁, 张志强, 孙 阁, 等 (1465)
不同生态区域沙地建群种油蒿的钙组分特征 薛苹苹, 高玉葆, 何兴东 (1475)
藏北高寒草甸植物群落对土壤线虫群落功能结构的影响 薛会英, 胡 锋, 罗大庆 (1482)
铜尾矿废弃地土壤动物多样性特征 朱永恒, 沈 非, 余 健, 等 (1495)
环丙沙星对土壤微生物量碳和土壤微生物群落碳代谢多样性的影响 马 驿, 彭金菊, 王 芸, 等 (1506)
基于生态水位约束的下辽河平原地下水生态需水量估算 孙才志, 高 翳, 朱正如 (1513)

景观、区域和全球生态

- 佛山市高明区生态安全格局和建设用地扩展预案 苏泳娴, 张虹鸥, 陈修治, 等 (1524)
不同护坡草本植物的根系特征及对土壤渗透性的影响 李建兴, 何丙辉, 谌 芸 (1535)
京沪穗三地近十年夜间热力景观格局演变对比研究 孟 丹, 王明玉, 李小娟, 等 (1545)
窟野河流域河川基流量变化趋势及其驱动因素 雷泳南, 张晓萍, 张建军, 等 (1559)
模拟氮沉降条件下木荷幼苗光合特性、生物量与 C、N、P 分配格局 李明月, 王 健, 王振兴, 等 (1569)
铁炉渣施加对稻田甲烷产生、氧化与排放的影响 王维奇, 李鹏飞, 曾从盛, 等 (1578)

资源与产业生态

- 食用黑粉菌侵染对茭白植株抗氧化系统和叶绿素荧光的影响 闫 宁, 王晓清, 王志丹, 等 (1584)

- 佛手低温胁迫相关基因的差异表达 陈文荣,叶杰君,李永强,等 (1594)
美洲棘薺马对不同蔬菜寄主的偏好性 朱亮,石宝才,官亚军,等 (1607)
茉莉酸对棉花单宁含量和抗虫相关酶活性的诱导效应 杨世勇,王蒙蒙,谢建春 (1615)
造纸废水灌溉对毛白杨苗木生长及养分状况的影响 王烨,席本野,崔向东,等 (1626)
基于数据包络分析的江苏省水资源利用效率 赵晨,王远,谷学明,等 (1636)

研究简报

- 太岳山不同郁闭度油松人工林降水分配特征 周彬,韩海荣,康峰峰,等 (1645)
基于 TM 卫星影像数据的北京市植被变化及其原因分析 贾宝全 (1654)
薇甘菊萎焉病毒感染对薇甘菊光合特性和 4 种酶活性的影响 王瑞龙,潘婉文,杨娇瑜,等 (1667)
第七届现代生态学讲座、第四届国际青年生态学者论坛通知 (I)
中、美生态学会联合招聘国际期刊主编 (i)

期刊基本参数:CN 11-2031/Q * 1981 * m * 16 * 338 * zh * P * ¥ 90.00 * 1510 * 34 * 2013-03



封面图说:美丽的油松松枝——油松又称红皮松、短叶松。树高可达 30m,胸径达 1m。其树皮下部灰褐色,裂成不规则鳞块;针叶 2 针一束,暗绿色,较粗硬;球果卵形或卵圆形,长 4—7cm,有短柄,与枝几乎成直角。油松适应性强,根系发达,树姿雄伟,枝叶繁茂,有良好的保持水土和美化环境的功能,是中国北方广大地区最主要的造林树种之一,在华北地区无论是山区或平原到处可见,人工林很多,一般情况下在山区生长最好。在山区生长的油松,多在阴坡、半阴坡,土壤湿润和较肥沃的地方。

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/stxb201208151148

闫宁,王晓清,王志丹,张艳丽,薛惠民,郭得平. 食用黑粉菌侵染对茭白植株抗氧化系统和叶绿素荧光的影响. 生态学报, 2013, 33(5): 1584-1593.

Yan N, Wang X Q, Wang Z D, Zhang Y L, Xue H M, Guo D P. Antioxidative system and chlorophyll fluorescence of *Zizania latifolia* Turcz. plants are affected by *Ustilago esculenta* infection. Acta Ecologica Sinica, 2013, 33(5): 1584-1593.

食用黑粉菌侵染对茭白植株抗氧化系统 和叶绿素荧光的影响

闫 宁, 王晓清, 王志丹, 张艳丽, 薛惠民, 郭得平*

(浙江大学农业与生物技术学院园艺系, 杭州 310058)

摘要:研究了茭白(*Zizania latifolia* Turcz.)受食用黑粉菌(*Ustilago esculenta*)侵染后的生长、抗氧化特性和叶绿素荧光的变化。结果表明,食用黑粉菌侵染导致植株的株高、叶长、叶宽、叶片厚度、根长、茎鲜重、根鲜重和地上部鲜重下降,但分蘖数提高;同时提高了茭白叶片的抗坏血酸过氧化物酶(APX)、过氧化氢酶(CAT)、过氧化物酶(POD)、谷胱甘肽还原酶(GR)、超氧化物歧化酶(SOD)的活性和过氧化氢(H₂O₂)含量,但却引起超氧自由基(O₂⁻)产生速率和丙二醛(MDA)含量降低。食用黑粉菌侵染提高了叶片的PSⅡ实际光化学效率(Φ_{PSII})和电子传递速率(ETR),同时降低了非光化学猝灭(NPQ),但对PSⅡ最大光化学量子产率(F_v/F_m)的影响不大。

关键词:茭白;食用黑粉菌;抗氧化酶;超氧自由基;过氧化氢;丙二醛;叶绿素荧光

Antioxidative system and chlorophyll fluorescence of *Zizania latifolia* Turcz. plants are affected by *Ustilago esculenta* infection

YAN Ning, WANG Xiaoqing, WANG Zhidan, ZHANG Yanli, XUE Huimin, GUO Deping*

Department of Horticulture, College of Agriculture and Biotechnology, Zhejiang University, Hangzhou 310058, China

Abstract: A smut fungus *Ustilago esculenta* causes enlargement of infected culms of *Zizania latifolia*, a perennial aquatic grass. The swollen culm is used as a vegetable in China and some southeastern countries. Interaction between the fungus and the host plant plays a vital role in the enlargement of infected culms. *U. esculenta* is a biotrophic endophyte that completes its life cycle in host tissues. In our previous studies, we have observed that *Z. latifolia* plants infected by *U. esculenta* showed higher net photosynthetic rate and chlorophyll content, which is different from the results obtained after induction by pathogens. However, in this plant-fungus association, detailed biochemical, physiological or morphological changes, and the role of reactive oxygen species (ROS) and their scavenging system as well as photosystem (PS) II efficiency during this interactive process, have not been studied. To ascertain the actual relationship between *U. esculenta* and *Z. latifolia*, we determined the antioxidative system and chlorophyll fluorescence in leaves of *Z. latifolia*.

The experiment was carried out at Zhejiang University, Hangzhou. *Z. latifolia* plants (cv. "Zhejiao No. 2", a double-harvest variety) were used in this study. There were 16 pots (10 plants each pot) in each treatment. These plants were regularly watered to keep a 10 cm-layer of water above soil. Pesticides were sprayed for the prevention of pests and diseases if needed.

In this study, the response of *Z. latifolia* plants to *U. esculenta* infection was investigated, and activities of antioxidant

基金项目:国家公益性行业(农业)科研专项(200903017-03)

收稿日期:2012-08-15; 修订日期:2013-01-08

*通讯作者 Corresponding author. E-mail: dpguo@zju.edu.cn

enzymes, superoxide radical (O_2^-) formation rate, hydrogen peroxide (H_2O_2) content, malondialdehyde (MDA) content, and chlorophyll fluorescence were determined. Our results showed that plant height, leaf length, leaf width, leaf thickness, root length, biomass of culm, root and aboveground were reduced, but tiller number was increased by *U. esculenta* infection. Meanwhile, *U. esculenta* infection caused increase in activities of ascorbate peroxidase (APX), catalase (CAT), peroxidase (POD), glutathione reductase (GR), superoxide dismutase (SOD) and H_2O_2 content, but decrease in O_2^- formation rate and MDA content ($P < 0.05$). The decrease of O_2^- formation rate in *U. esculenta* infected plants might be due to the higher SOD activity, which transformed O_2^- to H_2O_2 and O_2 . In this study, we also observed that quantum efficiency of PS II (Φ_{PSII}) and electron transport rate (ETR) were slightly increased ($P > 0.05$), but non-photochemical quenching (NPQ) was decreased by *U. esculenta* infection ($P > 0.05$). It is observed that maximum quantum efficiency of PS II (F/F_m) was not altered by *U. esculenta* infection, indicating that *U. esculenta* infection may not be a biotic stress for *Z. latifolia* plants. Therefore, based on the changes of the plant growth indices, PS II efficiency and membrane lipid peroxidation in infected plants, we found the interactive relationship between *U. esculenta* and *Z. latifolia* was neither pathogenic nor mutualistic.

Key Words: *Zizania latifolia* Turcz.; *Ustilago esculenta*; antioxidant enzymes; superoxide radical (O_2^-); hydrogen peroxide (H_2O_2); malondialdehyde (MDA); chlorophyll fluorescence

植物与微生物之间的互作是生物科学的研究热点领域之一。植物可以通过氧爆发迅速产生大量的活性氧(Reactive oxygen species, ROS),如超氧自由基(O_2^-)和过氧化氢(H_2O_2),以应对病原菌的早期侵染^[1]。同时,植物体内的ROS代谢系统平衡受病原菌侵染而破坏,引起膜质过氧化,破坏膜结构^[2-3]。丙二醛(MDA)产生是植物细胞膜质过氧化的一个重要指标,它能与植物细胞内的各种成分发生反应,从而导致蛋白质、核酸等的氧化破坏和叶绿素降解^[4]。ROS产生虽然可以加重侵染导致的有害氧化胁迫效应,但也可参与植物对抗病原菌的防卫反应,而ROS清除酶(抗氧化酶)活性提高是这些防卫反应的基础。其中,抗坏血酸过氧化物酶(APX)、过氧化氢酶(CAT)、过氧化物酶(POD)和超氧化物歧化酶(SOD)等在植物的抗病防御过程中起着重要的保护作用^[5-8]。这些抗氧化酶的协调作用能有效地清除ROS,防止膜质过氧化,从而使细胞免受或减轻其伤害。

叶绿素荧光参数可以快速反映植物叶片光化学效率的变化,在了解叶片光合作用过程中光系统对光能的吸收、传递、耗散和分配等方面具有独特作用^[9-10]。因此,叶绿素荧光技术被广泛用来研究病原菌侵染对植物光化学效率的影响。研究表明,病原菌侵染会导致植物叶片的光系统II(PS II)受到伤害,表现为 F/F_m 下降;同时,PS II实际光化学效率下降,表现为 Φ_{PSII} 下降;而NPQ增加,说明植物叶片吸收的光能用于光化学猝灭的比例增加,相应用于光化学反应的比例减少,即光化学效率降低^[11-13]。例如,拟南芥被白锈菌(*Albugo candida*)侵染后, Φ_{PSII} 的降低和NPQ的上升与可见症状出现的时间和程度紧密相关^[11]。被葡萄生单轴霉菌(*Plasmopara viticola*)侵染的葡萄叶片的 F/F_m 和 Φ_{PSII} 均降低^[12]。同样,Aldea等^[13]发现尾孢属(*Cercospora*)和叶点霉属(*Phyllosticta*)真菌侵染会导致植物叶片 Φ_{PSII} 降低。当植物光合作用被抑制后,叶片的过剩激发能就会增加,植物如果不能及时清除这些过剩激发能,就会导致ROS产生,进而引起PS II的光破坏^[14]。

茭白膨大茎是我国的一种重要水生蔬菜,是由食用黑粉菌(*Ustilago esculenta*)(又称茭白黑粉菌)侵染茭白植株后诱导产生的^[15-17],两者的互作是真菌与植物互作一种非常有趣且重要的形式。虽然食用黑粉菌侵染导致茭白茎的过度膨大,但未对生长造成明显影响,也未导致叶片失绿或者坏死,与内生真菌相似^[18]。已有研究报道了茭白肉质茎膨大期间SOD、POD、CAT等几种酶的活性变化^[19-20],表明肉质茎膨大期间食用黑粉菌的活动可造成茎组织氧化胁迫程度逐渐加重^[21]。然而,迄今为止,食用黑粉菌侵染后茭白叶片的抗氧化特性、叶绿素荧光参数变化未见报道。

植物体中存在的抗氧化酶在清除 ROS 中发挥了重要作用^[1],而 MDA 含量可反映 ROS 导致的膜质过氧化程度^[4];叶绿素荧光参数可以反映植物叶片 PS II 光化学效率的变化^[9-10]。研究发现,植物受病原菌侵染后表现出 ROS 的大量形成(即氧迸发)^[1],膜质过氧化加重^[2-3]和光系统 II (PS II) 破坏^[11-13];然而,内生真菌侵染后,植物表现出膜质过氧化减轻^[22-25],且 PS II 未受破坏等现象^[26-27]。食用黑粉菌与茭白植株互作的机制目前不太清楚,它如何影响茭白叶片 ROS 的产生和抗氧化酶的活性?如何影响茭白叶片光能的吸收、传递、耗散和分配?本研究拟通过测定茭白叶片的抗氧化酶活性、O₂⁻ 产生速率、H₂O₂ 含量、MDA 含量和叶绿素荧光等生理指标的变化,了解食用黑粉菌-茭白植株互作的性质和意义,也为深入研究真菌-植物互作的生理生化机制提供基础。

1 材料与方法

1.1 试验材料

本试验在浙江大学紫金港校区温室进行。试验材料为茭白(*Zizania latifolia* Turcz.),品种为“浙茭 2 号”(双季茭)。茭白植株种植于桶(30 cm×30 cm)内。试验所用的土壤为砂壤土,土壤有机质含量为 11.9 g/kg、碱解氮含量为 92.5 mg/kg、速效磷含量为 25.6 mg/kg、速效钾含量为 75.9 mg/kg。桶内保持 10 cm 左右的水层。试验期间,及时进行施肥和病虫害防治。

1.2 试验设计

本试验选用长势良好、大小一致的植株。食用黑粉菌侵染的茭白植株和对照植株各 16 桶,每桶种植 1 墩(约 10 株)。对照植株为从“浙茭 2 号”材料中自然分化出来的未受食用黑粉菌侵染的植株^[17,28]。移栽后第 1 周(叶片长 15 cm)开始测定,剪取植株从上往下数的第 3 片叶,用于抗氧化特性和叶绿素荧光的测定。以后每隔 1 周测定 1 次,共测定 6 次,每次测定至少重复 6 次。

1.3 测定指标与方法

1.3.1 形态学指标的测定

移栽后第 6 周,测定植株的株高、叶长、叶宽、叶片厚度、叶数、分蘖数和根长,同时测定每株茭白的茎重量、根系重量(R)和地上部重量(S),并计算根冠比(R/S)。

1.3.2 抗氧化特性的测定

取 0.2 g 叶片加入 3 mL 磷酸缓冲液提取,提取液包含 50 mmol/L 磷酸钠(pH 7.8),0.2 mmol/L EDTA,2 mmol/L 还原型抗坏血酸和 2% 聚乙烯吡咯烷酮。12 000 g 离心 20 min,上清液用于抗氧化特性的测定。抗坏血酸过氧化物酶(APX)、过氧化氢酶(CAT)、过氧化物酶(POD)、谷胱甘肽还原酶(GR)、超氧化物歧化酶(SOD)活性的测定参照 Lee 和 Lee^[29]的方法。超氧自由基(O₂⁻)产生速率的测定参照王爱国和罗广华^[30]的方法。叶片组织 H₂O₂ 含量测定参照 Brennan 和 Frenkel^[31]的方法。MDA 含量测定参照 Stewart 和 Bewley^[32]的方法。

1.3.3 叶绿素荧光的测定

PS II 最大光化学量子产量(F_v/F_m)、PS II 实际光化学效率($\Phi_{PS\ II}$)、非光化学淬灭(NPQ)和电子传递速率(ETR)等参数用 M-Series Imaging-PAM 荧光成像系统(Walz, Effeltrich, Germany)测定,测定前植株叶片在室温(25℃)条件下先暗适应 30 分钟。暗适应之后,用 0.5 μmol/m² 的光强来测定 F_o (PS II 反应中心处于完全开放时的荧光产量),用 2800 μmol·m⁻²·s⁻¹ 的光强来测定 F_m (PS II 反应中心完全关闭时的荧光产量)。PS II 最大光化学量子产量(F_v/F_m)测定时选定整个叶面积为 AOI(Area of Interest),计算 F_v/F_m 的平均值。 F_v/F_m 的具体的计算方法是: $F_v/F_m = (F_m - F_o)/F_m$ 。Kinetics 测定时的作用光强度设置为 146 μmol · m⁻² · s⁻¹,20 s 一个脉冲,如此循环持续 5 min 后,得到 $\Phi_{PS\ II}$ 、NPQ 和 ETR 值。 $\Phi_{PS\ II}$ 、NPQ 和 ETR 值是通过软件 Imaging-WIN 输出的。具体的计算方法是: $\Phi_{PS\ II} = (F_m' - F_s)/F_m'$, $NPQ = F_m'/F_m - 1$,而 $ETR = (F_m' - F_s)/F_m' \times PAR \times 0.5 \times 0.84$ 。其中, F_o 是 PS II 反应中心处于完全开放时的荧光产量, F_m 是 PS II 反应中心完全关闭时的荧光产量, F_m' 是作用光打开时的最大荧光产量, F_s 是稳态的荧光产量。

1.4 统计分析

试验结果用 Excel 整理,所有数据在 $P < 0.05$ 水平下进行 t 检验。试验中所有的分析过程在 SPSS17.0 统计分析程序中完成。

2 结果与分析

2.1 生长指标

对照植株的株高、叶长、叶宽、叶片厚度、根长、茎鲜重、根鲜重、地上部鲜重显著高于侵染植株的($P < 0.05$),但叶数、根冠比(R/S)与侵染植株的无显著差异($P > 0.05$),同时分蘖数显著低于侵染植株($P < 0.05$) (表 1)。对照植株的株高、叶长、叶宽、叶片厚度、根长、茎鲜重、根鲜重、地上部鲜重分别比侵染植株的高 63.5%、39.0%、63.6%、28.6%、46.8%、36.7%、53.9%,但其分蘖数仅是侵染植株的 57.4%。

表 1 食用黑粉菌侵染对茭白植株生长的影响

Table 1 Growth of *Zizania latifolia* plants after infection by *Ustilago esculenta*

处理	株高 Plant height/cm	叶长 Leaf length/cm	叶宽 Leaf width/cm	叶片厚度 Leaf thickness/mm	叶数 Leaf number	分蘖数 Tiller number
对照 Control	157±8.17a	117±7.72a	2.83±0.31a	0.27±0.02a	6.33±0.52a	22.8±2.32b
侵染 Infected	96.2±7.33b	84.2±5.91b	1.73±0.16b	0.21±0.02b	6.50±0.55a	39.7±3.39a
处理	根长 Root length/cm	茎鲜重 Culm fresh weight/g	根鲜重 Root fresh weight/g	地上部鲜重 Aboveground fresh weight/g	根冠比 R/S	
对照 Control	51.0±2.65a	5.68±0.36a	23.4±0.82a	44.0±1.47a	0.53±0.02a	
侵染 Infected	37.3±2.08b	3.87±0.25b	15.2±0.53b	28.3±1.35b	0.54±0.01a	

同一列中右侧字母不同表示差异显著($P < 0.05$)

2.2 抗氧化特性

2.2.1 抗氧化酶活性

从图 1 可以看出,随着移栽时间的增加,侵染植株和对照植株的抗氧化酶活性均呈升高趋势。移栽后第 1 周,侵染植株叶片的 APX、CAT、POD、GR 和 SOD 活性高于对照植株的,但差异不显著($P > 0.05$)。移栽后第 2 周到第 6 周,侵染植株叶片的 APX、CAT、POD、GR 和 SOD 活性显著高于对照植株的($P < 0.05$)。

2.2.2 O_2^- 产生速率和 H_2O_2 含量

从结果看出,移栽后,对照植株和侵染植株的 O_2^- 产生速率和 H_2O_2 含量均呈增加趋势,且对照植株叶片的 O_2^- 含量显著高于侵染植株的($P < 0.05$) (图 2)。从第 1 周到第 6 周,对照植株叶片的 O_2^- 产生速率分别比对照植株高 20.2%、18.1%、18.9%、14.6%、12.5%、18.1%。移栽后第 1 周,侵染植株叶片的 H_2O_2 含量高于对照植株的,但差异不显著($P > 0.05$);移栽后第 2 周到第 6 周,侵染植株叶片的 H_2O_2 含量显著高于对照植株的($P < 0.05$) (图 2)。

2.2.3 MDA 含量

试验结果表明,移栽后,对照植株和侵染植株的 MDA 含量呈增加趋势,且对照植株叶片的 MDA 含量显著高于侵染植株($P < 0.05$) (图 3)。从第 1 周到第 6 周,对照植株叶片的 MDA 含量分别比侵染植株的高 12.9%、20.8%、19.3%、16.1%、16.2%、18.5%。

2.3 叶绿素荧光

F_v/F_m 是 PS II 最大光化学量子产量,表示最大光化学效率,它在非胁迫条件下变化极小,是反映 PS II 光化学效率的稳定指标。本试验结果表明,侵染植株叶片的 F_v/F_m 和对照植株几乎无差异($P > 0.05$) (图 4)。

Φ_{PSII} 是 PS II 实际光化学效率,它是叶片用于光合电子传递的能量占所吸收光能的比例,常用来表示植物光合作用的电子传递量子产额。本实验结果显示,侵染植株叶片的 Φ_{PSII} 大于对照植株的,但差异不显著($P > 0.05$) (图 4)。

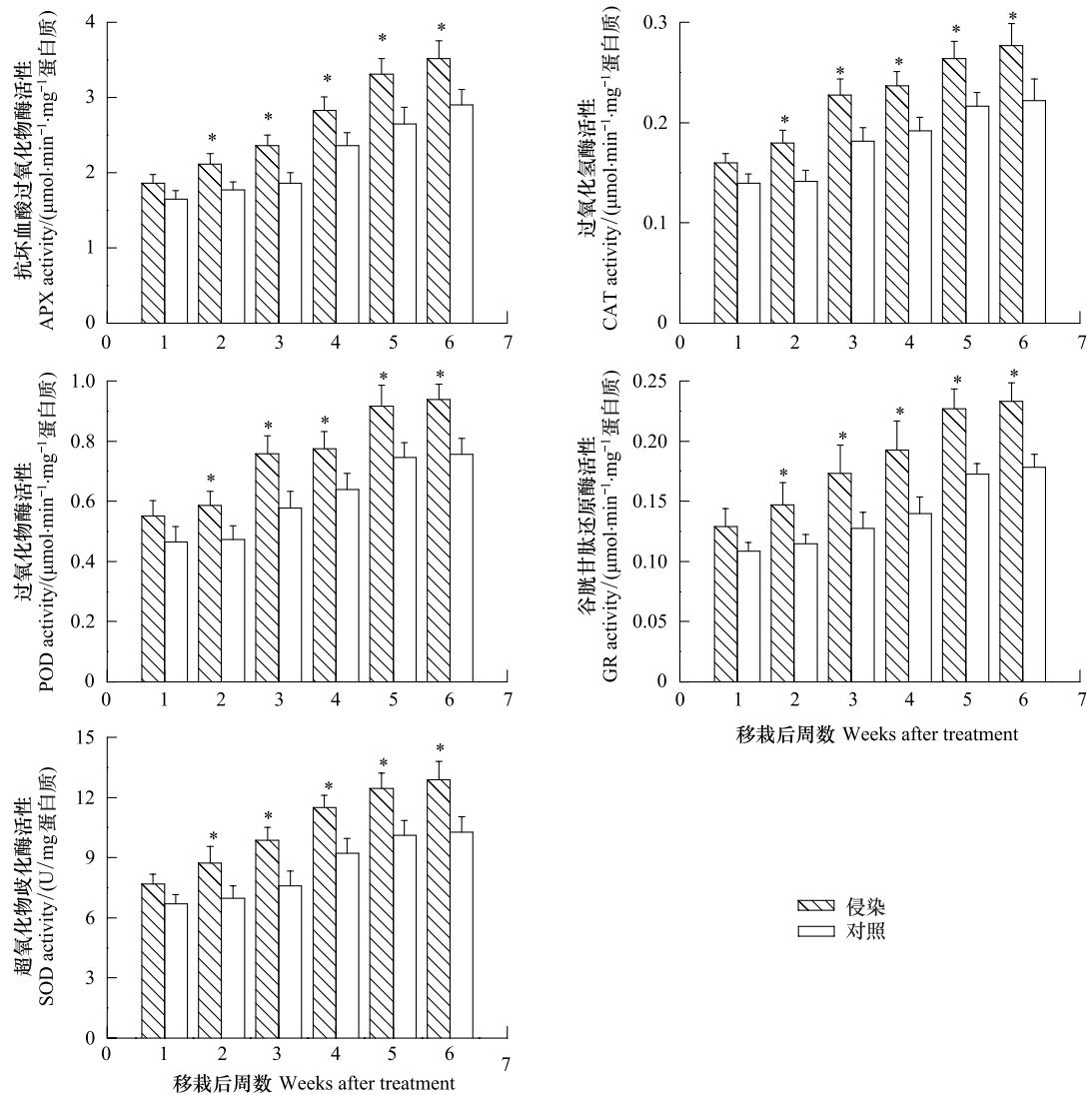


图1 食用黑粉菌侵染对茭白叶片抗氧化酶活性的影响

Fig. 1 Antioxidant enzyme activities in leaves of *Zizania latifolia* after infection by *Ustilago esculenta*

* 表示差异显著($P < 0.05$)

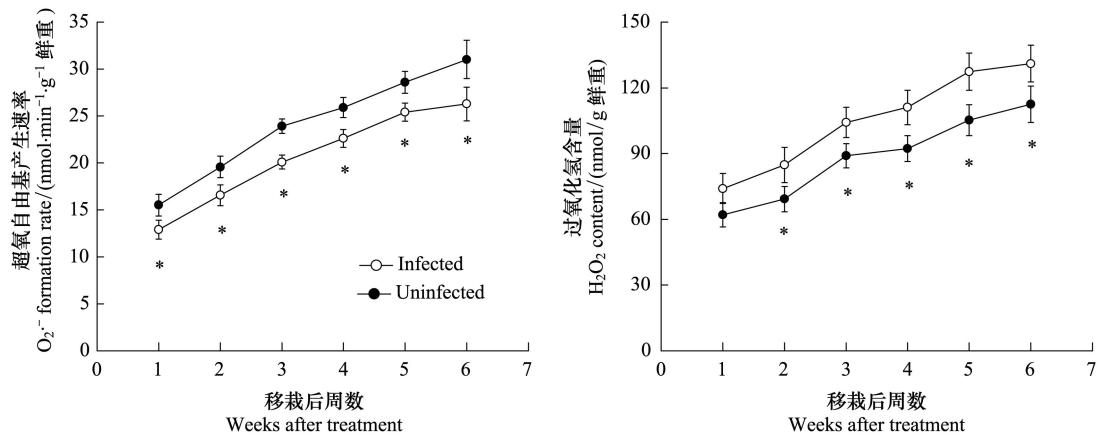
NPQ 是非光化学猝灭,反映了 PS II 天线色素吸收的光能不能用于光合电子传递而以热的形式耗散掉的部分。本实验结果表明,对照植株叶片的 *NPQ* 大于侵染植株的,但差异不显著($P > 0.05$)(图 4)。同时,侵染植株叶片的电子传递速率(*ETR*)大于对照植株的,但差异不显著($P > 0.05$)(图 4)。

3 讨论

3.1 食用黑粉菌侵染对茭白植株生长的影响

本研究的结果表明,食用黑粉菌(*U. esculenta*)侵染抑制了茭白植株的生长,表现为株高、叶长、叶宽、叶片厚度、根长、茎重量、根重量、地上部重量降低($P < 0.05$)(表 1),这一结果和很多植物受病原菌侵染后表现的症状相似^[33-34],但不同于某些内生真菌对植物生长的促进作用,如印度梨形孢(*Piriformospora indica*)和丛枝菌根(AM)真菌中的摩西球囊菌(*Glomus mosseae*)侵染导致玉米株高增加^[35],菌刺孢属(*Mycocentrospora*)内生真菌侵染雪莲花(*Saussurea involucrata*)显著提高了植物的株高、根数和生物量^[27]。

有趣的是,我们观察到食用黑粉菌侵染显著提高了茭白的分蘖数($P < 0.05$)(表 1)。这一结果与内生真菌 *Acremonium lolii* 侵染可导致多年生黑麦草(*Lolium perenne*)分蘖数增加的现象一致^[36]。食用黑粉菌侵染促

图2 食用黑粉菌侵染对茭白叶片超氧自由基(O_2^-)产生速率和过氧化氢(H_2O_2)含量的影响Fig. 2 O_2^- formation rate and H_2O_2 content in leaves of *Zizania latifolia* after infection by *Ustilago esculenta** 表示差异显著($P < 0.05$)

进茭白植株分蘖数的增加可能和其分泌的植物激素有关,如生长素、细胞分裂素等^[37-40],因为植物激素可以调节植物的形态建成^[41]。

3.2 食用黑粉菌侵染调节茭白植株体内的抗氧化平衡状态

本试验结果表明,食用黑粉菌侵染导致茭白叶片中APX、CAT活性增强($P < 0.05$)(图1)。高的APX活性会提高AsA的含量,有利于清除植株组织中的ROS;同时,CAT清除 H_2O_2 被认为可能是植物应对病原菌防卫反应的高效机制^[42]。已有报道也发现大麦和白粉菌(*Blumeria graminis* sp. *hordei*)的亲和互作中,CAT活性显著增加^[6]。同样,内生真菌*Acremonium lolii*侵染导致黑麦草叶片APX活性显著增加^[36]。SOD作为植物抗氧化体系的第一道防线,可以将超氧自由基(O_2^-)歧化产生 H_2O_2 和 O_2 ,抑制膜质过氧化作用^[32]。本研究中观察到侵染植株叶片中SOD活性高于对照植株的(图1),所以侵染植株的 O_2^- 含量低于对照植株(图2)。这与前人报道的丛枝菌根(AM)真菌侵染导致植株SOD活性增高的结果一致^[22-25]。肉质茎膨大过程中,CAT和SOD活性呈下降趋势,说明茭白肉质茎膨大是食用黑粉菌引起的茭白茎尖的感病过程^[19-20]。GR是AsA-GSH循环中的一种关键酶,在NADPH的作用下,催化氧化型谷胱甘肽(GSSG)还原为还原型谷胱甘肽(GSH)^[43]。本研究发现,食用黑粉菌侵染后,茭白叶片GR活性提高($P < 0.05$)(图1)。这种变化与早期报道的印度梨形孢(*P. indica*)-大麦互作中的GR活性提高的结果相一致,说明茭白叶片有较高水平的还原型谷胱甘肽,利于提高细胞的抗氧化能力^[8]。本研究观察到食用黑粉菌侵染后茭白叶片POD活性升高($P < 0.05$)(图1),这种增高既可能与食用黑粉菌大量繁殖带来氧化胁迫的保护性反应有关,又可能与细胞、组织的分化以及细胞膨大过程中木质素的形成有关^[19-20]。

在植物正常生命过程中,植物细胞存在ROS的产生和清除两个过程。病原菌侵染会促进ROS的产生、引起膜质过氧化等变化^[1-3]。植物体内的各种抗氧化酶在清除植物细胞产生的ROS中发挥重要作用^[5-8]。本研

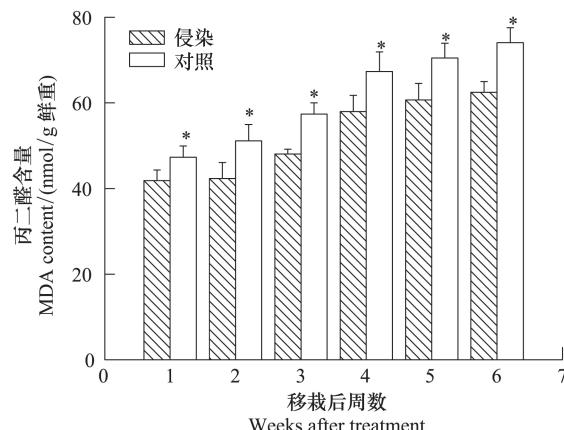


图3 食用黑粉菌侵染对茭白叶片丙二醛(MDA)含量的影响

Fig. 3 MDA content in leaves of *Zizania latifolia* after infection by *Ustilago esculenta** 表示差异显著($P < 0.05$)

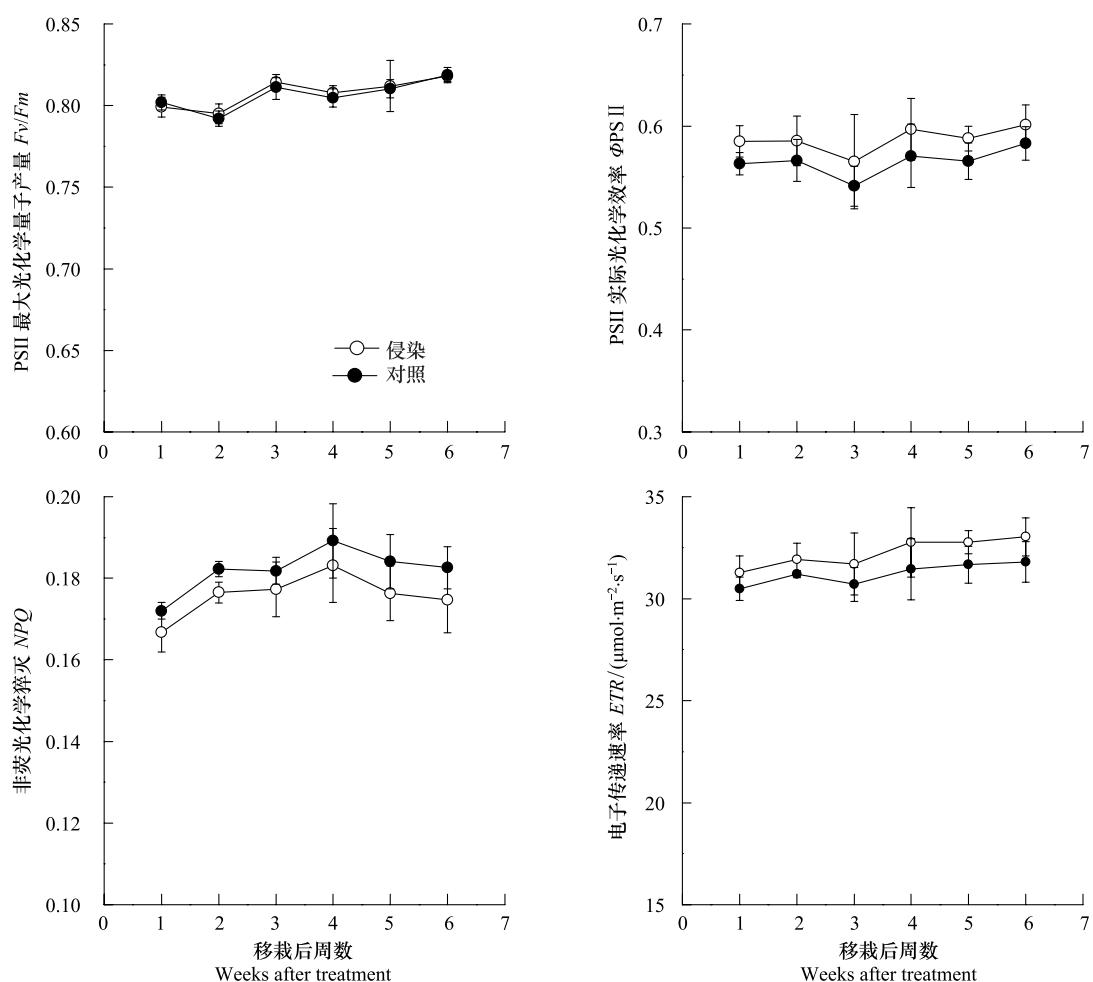


图4 食用黑粉菌侵染对茭白叶片叶绿素荧光的影响

Fig. 4 Chlorophyll fluorescence in leaves of *Zizania latifolia* after infection by *Ustilago esculenta*

究的结果显示,食用黑粉菌侵染降低了茭白叶片的超氧自由基(O_2^-)产生速率($P<0.05$)(图2),同时提高了抗氧化酶活性(图1),对有效清除侵染植株组织内的ROS十分有利,因此导致膜脂过氧化产物MDA含量降低(图3)($P<0.05$),表明ROS导致的膜质过氧化程度下降^[4,32]。另外,膜脂过氧化引起叶绿体超微结构的损伤,叶绿素的降解和光合酶活性下降,降低植物光合能力^[4,28]。另外,食用黑粉菌侵染提高了茭白叶片的H₂O₂含量($P<0.05$)(图2)。侵染植株中H₂O₂的升高可能与O₂⁻在SOD的作用下转化成H₂O₂和O₂有关^[32]。这与刘伟等^[21]报道的肉质茎膨大期间食用黑粉菌的快速繁殖造成H₂O₂含量快速上升,内生真菌*Gilmaniaella*侵染苍术(*Atractylodes lancea*)幼苗促进H₂O₂含量提高的结果一致^[44]。茭白肉质茎开始膨大后,抗氧化剂AsA和GSH不能有效清除肉质茎膨大产生的ROS,茎中的H₂O₂含量快速上升^[21],这可能与CAT和SOD活性下降有关^[19-20]。

与病原菌侵染的植物叶片表现出膜脂过氧化(MDA含量)升高的报道不同^[2-3],本研究表明,食用黑粉菌侵染减轻了茭白叶片的膜质过氧化程度,即MDA含量降低(图3),这与已报道的丛枝菌根(AM)真菌侵染植株^[22-25]和*Neotyphodium*属内生真菌侵染植株MDA含量下降的结果一致^[45]。

3.3 食用黑粉菌侵染对茭白叶片叶绿素荧光的影响

F_v/F_m 反映PSⅡ反应中心的原初光能转化效率,是反应植物胁迫程度的常用指标^[9-10]。已有研究显示病害胁迫会使植物的PSⅡ受到伤害^[12],而丛枝菌根(AM)真菌中的聚生球囊菌(*G. fasciculatum*)和菌刺孢属(*Mycocentrospora*)内生真菌侵染并不显著改变植物叶片的 F_v/F_m ^[26-27]。本研究结果表明,食用黑粉菌侵染后,

茭白叶片的 F_v/F_m 并未发生明显改变 ($P > 0.05$) (图 4), 因此食用黑粉菌侵染对茭白来说并未形成生物胁迫, 植株没有产生类似病害的胁迫反应。据此, 食用黑粉菌-茭白的互作体系并不是病原菌-植物的致病关系, 而是类似于内生真菌与植物的互作关系, 是植物-真菌交叉适应的结果^[46]。

Φ_{PSII} 是 PS II 反应中心部分关闭时的光化学效率, 其值大小可以反映 PS II 反应中心的开放程度^[9-10]。病原菌侵染植物往往导致叶片 Φ_{PSII} 下降, 进而降低植物叶片的光化学效率^[11-13]。有研究发现, 核盘菌 (*Sclerotinia sclerotiorum*) 侵染黄瓜后, 抑制了 CAT 的活性, 导致 ROS 的积累, 直接伤害了光合机构 PSI 和 PS II 的功能。对 PSI 的伤害抑制了 PS II 电子向 PSI 的传递, 进一步加剧了 PS II 的伤害程度, 导致更多过剩激发能的发生^[47]。然而, 本研究结果表明, 食用黑粉菌侵染后, 茭白叶片的 Φ_{PSII} 、ETR 有所上升 ($P > 0.05$) (图 4), 这会导致 PS II 有效光量子产量的增加, 进而促进光合电子传递效率, 增加 ATP 和 NADPH 的形成, 最终导致光合速率的提高^[28]。此外, 食用黑粉菌侵染后, 茭白叶片的非光化学猝灭 (NPQ) 略有下降 ($P > 0.05$) (图 4), 即过剩激发能降低, 这反映了 PS II 天线色素吸收的光能用于光化学反应的量增加^[9-10], 即 Φ_{PSII} 和 ETR 升高(图 4)。另外, 食用黑粉菌侵染导致的电子传递速率 (ETR) 的升高可能导致 Rubisco 活性的升高, 最终促进光合速率增加^[28,48]。

在长期的自然进化过程中, 植物不断遭受外来有害微生物的侵袭, 威胁自身生长发育; 另一方面, 植物又不断地与有益微生物形成互利共生关系, 提高自身对外来胁迫的抵抗能力。研究结果表明, 食用黑粉菌-茭白形成的互作体系, 没有出现一般病原菌侵染造成植物叶片 PS II 破坏和膜质过氧化加重的现象, 因此不属于典型的病原菌和植物的致病关系。同时, 食用黑粉菌侵染对茭白生长是不利的, 表现为茭白的株高、叶长、叶宽、叶片厚度、根长、根重量、地上部重量等指标降低, 这也不同于共生真菌对植物生长的促进作用。可见, 食用黑粉菌与茭白之间的互作是介于植物病害与互利共生之间的一种互作关系^[49-50]。

4 结论

食用黑粉菌侵染抑制了茭白的生长, 表现为株高、叶长、叶宽、叶片厚度、根长、茎重量、根重量、地上部重量的降低, 但却显著增加了植株的分蘖数。同时, 食用黑粉菌侵染后, 茭白植株较高的抗氧化酶活性 (APX、CAT、POD、GR 和 SOD) 可以更好地清除植株体内的活性氧 (ROS), 引起 O_2^- 含量和膜质过氧化程度 (MDA 含量) 降低。侵染植株中 H_2O_2 的升高可能与 O_2^- 可以在 SOD 的作用下转化成 H_2O_2 和 O_2 有关。作为一种内生真菌, 食用黑粉菌侵染并未改变叶片 PS II 最大光化学量子产量 (F_v/F_m), 反而略微提高了叶片的 PS II 实际光化学效率 (Φ_{PSII})、电子传递速率 (ETR), 降低了叶片的非光化学猝灭 (NPQ)。

References:

- [1] De Gara L, De Pinto M C, Tommasi F. The antioxidant systems vis-à-vis reactive oxygen species during plant-pathogen interaction. *Plant Physiology and Biochemistry*, 2003, 41(10): 863-870.
- [2] El-Zahaby H M, Gullner G, Király Z. Effects of powdery mildew infection of barley on the ascorbate-glutathione cycle and other antioxidants in different host-pathogen interactions. *Phytopathology*, 1995, 85(10): 1225-1230.
- [3] Deighton N, Muckenschabel I, Goodman B A, Williamson B. Lipid peroxidation and the oxidative burst associated with infection of *Capsicum annuum* by *Botrytis cinerea*. *The Plant Journal*, 1999, 20(4): 485-492.
- [4] Chen S Y. Injury of membrane lipid peroxidation to plant cell. *Plant Physiology Communications*, 1991, 27(2): 84-90.
- [5] Fink W, Haug M, Deising H, Mendgen K. Early defense responses of cowpea (*Vigna sinensis* L.) induced by non-pathogenic rust fungi. *Planta*, 1991, 185(2): 246-254.
- [6] Vanacker H, Harbinson J, Ruisch J, Carver T L W, Foyer C H. Antioxidant defences of the apoplast. *Protoplasma*, 1998, 205(1/4): 129-140.
- [7] Alguacil M M, Hernández J A, Caravaca F, Portillo B, Roldán A. Antioxidant enzyme activities in shoots from three mycorrhizal shrub species afforested in a degraded semi-arid soil. *Physiologia Plantarum*, 2003, 118(4): 562-570.
- [8] Waller F, Achatz B, Baltruschat H, Fodor J, Becker K, Fischer M, Heier T, Hügelhoven R, Neumann C, Von Wettstein D, Franken P, Kogel K-H. The endophytic fungus *Piriformospora indica* reprograms barley to salt-stress tolerance, disease resistance, and higher yield. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2005, 102(38): 13386-13391.
- [9] Maxwell K, Johnson G N. Chlorophyll fluorescence-a practical guide. *Journal of Experimental Botany*, 2000, 51(345): 659-668.

- [10] Baker N R. Chlorophyll fluorescence: a probe of photosynthesis *in vivo*. Annual Review of Plant Biology, 2008, 59(1) : 89-113.
- [11] Chou H M, Bundoock N, Rolfe S A, Scholes J D. Infection of *Arabidopsis thaliana* leaves with *Albugo candida* (white blister rust) causes a reprogramming of host metabolism. Molecular Plant Pathology, 2000, 1(2) : 99-113.
- [12] Cséfalvay L, Di Gaspero G, Matouš K, Bellin D, Ruperti B, Olejníčková J. Pre-symptomatic detection of *Plasmopara viticola* infection in grapevine leaves using chlorophyll fluorescence imaging. European Journal of Plant Pathology, 2009, 125(2) : 291-302.
- [13] Aldea M, Hamilton J G, Resti J P, Zangerl A R, Berenbaum M R, Frank T D, DeLucia E H. Comparison of photosynthetic damage from arthropod herbivory and pathogen infection in understory hardwood saplings. Oecologia, 2006, 149(2) : 221-232.
- [14] Aro E M, Virgin I, Andersson B. Photoinhibition of photosystem II. Inactivation, protein damage and turnover. Biochimica et Biophysica Acta (BBA) - Bioenergetics, 1993, 1143(2) : 113-134.
- [15] Yang H C, Leu L S. Formation and histopathology of galls induced by *Ustilago esculenta* in *Zizania latifolia*. Phytopathology, 1978, 68(11) : 1572-1576.
- [16] Chan Y S, Thrower L B. The host-parasite relationship between *Zizania caduciflora* Turcz. and *Ustilago esculenta* P. Henn. I. structure and development of the host and host-parasite combination. New Phytologist, 1980, 85(2) : 201-207.
- [17] Zhang J Z, Chu F Q, Guo D P, Hyde K D, Xie G L. Cytology and ultrastructure of interactions between *Ustilago esculenta* and *Zizania latifolia*. Mycological Progress, 2012, 11(2) : 499-508.
- [18] Arnold A E, Maynard Z, Gilbert G S, Coley P D, Kursar T A. Are tropical fungal endophytes hyperdiverse? Ecology Letters, 2000, 3(4) : 267-274.
- [19] Chen L J, Guo D P, Zhu Z J, Sun Y Z. Study on the biochemical changes during stem gall formation in *Zizania latifolia*. Journal of Nuclear Agricultural Sciences, 2004, 18(6) : 457-461.
- [20] Jiang J Z, Zhang Q, Cao B S, Zhu Q S. Primary study on changes of protective enzymes' activities in *Zizania* gall's swelling. Journal of Yangzhou University (Agricultural and Life Science Edition), 2004, 25(2) : 68-71.
- [21] Liu W, Huang J Z, Guo D P, Chen Z Y. Oxidative stress during stem enlargement of *Zizania latifolia* Turcz. Journal of Nuclear Agricultural Sciences, 2011, 25(4) : 0824-0827.
- [22] Zhu X C, Song F B, Xu H W. Influence of arbuscular mycorrhiza on lipid peroxidation and antioxidant enzyme activity of maize plants under temperature stress. Mycorrhiza, 2010, 20(5) : 325-332.
- [23] Abdel Latef A A H. Influence of arbuscular mycorrhizal fungi and copper on growth, accumulation of osmolyte, mineral nutrition and antioxidant enzyme activity of pepper (*Capsicum annuum* L.). Mycorrhiza, 2011, 21(6) : 495-503.
- [24] Abdel Latef A A H, He C X. Arbuscular mycorrhizal influence on growth, photosynthetic pigments, osmotic adjustment and oxidative stress in tomato plants subjected to low temperature stress. Acta Physiologae Plantarum, 2011, 33(4) : 1217-1225.
- [25] Abdel Latef A A H, He C X. Effect of arbuscular mycorrhizal fungi on growth, mineral nutrition, antioxidant enzymes activity and fruit yield of tomato grown under salinity stress. Scientia Horticulturae, 2011, 127(3) : 228-233.
- [26] Parúdi I, Bratek Z, Láng F. Influence of arbuscular mycorrhiza and phosphorus supply on polyamine content, growth and photosynthesis of *Plantago lanceolata*. Biologia Plantarum, 2003, 46(4) : 563-569.
- [27] Wu L Q, Lv Y L, Meng Z X, Chen J, Guo S X. The promoting role of an isolate of dark-septate fungus on its host plant *Saussurea involucrata* Kar. et Kir. Mycorrhiza, 2010, 20(2) : 127-135.
- [28] Xu X F, Yan N, Zhang J Z, Huang J Z, Guo D P. Research on morphological and photosynthetic characteristics of *Zizania latifolia*. Journal of Changjiang Vegetables, 2011, 27(16) : 31-33.
- [29] Lee D H, Lee C B. Chilling stress-induced changes of antioxidant enzymes in the leaves of cucumber: in gel enzymes activity assays. Plant Science, 2000, 159(1) : 75-85.
- [30] Wang A G, Luo G H. Quantitative relation between the reaction of hydroxylamine and superoxide anion radicals in plants. Plant Physiology Communications, 1990, 26(6) : 55-57.
- [31] Brennan T, Frenkel C. Involvement of hydrogen peroxide in the regulation of senescence in pear. Plant Physiology, 1977, 59(3) : 411-416.
- [32] Stewart R R C, Bewley J D. Lipid peroxidation associated with accelerated aging of soybean axes. Plant Physiology, 1980, 65(2) : 245-248.
- [33] Owera S A P, Farrar J F, Whitbread R. Growth and photosynthesis in barley infected with brown rust. Physiological Plant Pathology, 1981, 18(1) : 79-90.
- [34] Sadras V O, Quiroz F, Echarte L, Escande A, Pereyra V R. Effect of *Verticillium dahliae* on photosynthesis, leaf expansion and senescence of field-grown sunflower. Annals of Botany, 2000, 86(5) : 1007-1015.
- [35] Rai M K, Shende S, Strasser R J. JIP test for fast fluorescence transients as a rapid and sensitive technique in assessing the effectiveness of arbuscular mycorrhizal fungi in *Zea mays*: Analysis of chlorophyll *a* fluorescence. Plant Biosystems, 2008, 142(2) : 191-198.

- [36] Bonnet M, Camares O, Veisseire P. Effects of zinc and influence of *Acremonium lolii* on growth parameters, chlorophyll *a* fluorescence and antioxidant enzyme activities of ryegrass (*Lolium perenne* L. Cv Apollo). *Journal of Experimental Botany*, 2000, 51(346) : 945-953.
- [37] Yu Y N. Research on the growth stimulating substance of *Ustilago esculenta*. *Acta Botanica Sinica*, 1962, 10(4) : 339-350.
- [38] Chan Y S, Thrower L B. The host-parasite relationship between *Zizania caduciflora* Turcz. and *Ustilago esculenta* P. Henn. IV. growth substances in the host-parasite combination. *New Phytologist*, 1980, 85(2) : 225-233.
- [39] Lin Y L, Lin C H. Involvement of tRNA bound cytokinin on the gall formation in *Zizania*. *Journal of Experimental Botany*, 1990, 41(3) : 277-281.
- [40] Chung K R, Tzeng D D. Biosynthesis of indole-3-acetic acid by the gall-inducing fungus *Ustilago esculenta*. *Journal of Biological Sciences*, 2004, 4(6) : 744-750.
- [41] Wang Y H, Li J Y. Molecular basis of plant architecture. *Annual Review of Plant Biology*, 2008, 59(1) : 253-279.
- [42] Wu G, Shortt B J, Lawrence E B, León J, Fitzsimmons K C, Levine E B, Raskin I, Shah D M. Activation of host defense mechanisms by elevated production of H₂O₂ in transgenic plants. *Plant Physiology*, 1997, 115(2) : 427-435.
- [43] Noctor G, Foyer C H. Ascorbate and glutathione: keeping active oxygen under control. *Annual Reviews of Plant Physiology and Plant Molecular Biology*, 1998, 49(1) : 249-279.
- [44] Wang Y, Dai C C, Zhao Y W, Peng Y. Fungal endophyte-induced volatile oil accumulation in *Atractylodes lancea* plantlets is mediated by nitric oxide, salicylic acid and hydrogen peroxide. *Process Biochemistry*, 2011, 46(3) : 730-735.
- [45] Han R, Li X, Ren A Z, Gao Y B. Physiological ecological effect of endophyte infection on *Achnatherum sibiricum* under drought stress. *Acta Ecologica Sinica*, 2011, 31(8) : 2115-2123.
- [46] Shang Q M, Li X F, Zhang Z G. Molecular mechanisms of cross adaption in plants. *Acta Botanica Boreali-Occidentalia Sinica*, 2007, 27(9) : 1921-1928.
- [47] Bu J W, Yao G, Gao H Y, Jia Y J, Zhang L T, Chen D D, Wang X. Inhibition mechanism of photosynthesis in cucumber leaves infected by *Sclerotinia sclerotiorum* (Lib.) de Bary. *Acta Phytopathologica Sinica*, 2009, 39(6) : 613-621.
- [48] Bischof K, Hanelt D, Wiencke C. Effects of ultraviolet radiation on photosynthesis and related enzyme reactions of marine macroalgae. *Planta*, 2000, 211(4) : 555-562.
- [49] Cheplick G P, Cho R. Interactive effects of fungal endophyte infection and host genotype on growth and storage in *Lolium perenne*. *New Phytologist*, 2003, 158(1) : 183-191.
- [50] Schardl C L, Leuchtmann A, Spiering M J. Symbioses of grasses with seedborne fungal endophytes. *Annual Review of Plant Biology*, 2004, 55(1) : 315-340.

参考文献:

- [4] 陈少裕. 膜脂过氧化对植物细胞的伤害. *植物生理学通讯*, 1991, 27(2) : 84-90.
- [19] 程龙军, 郭得平, 朱祝军, 孙耘子. 茭白肉质茎膨大发育的生化基础研究. *核农学报*, 2004, 18(6) : 457-461.
- [20] 江解增, 张强, 曹培生, 朱庆森. 茭白肉质茎膨大过程中保护酶活性变化初探. *扬州大学学报(农业与生命科学版)*, 2004, 25(2) : 68-71.
- [21] 刘伟, 黄建中, 郭得平, 陈子元. 茭白肉质茎膨大期间的氧化胁迫. *核农学报*, 2011, 25(4) : 0824-0827.
- [28] 徐晓峰, 闫宁, 张敬泽, 黄建中, 郭得平. 雄茭、灰茭、正常茭形态指标及光合特性研究. *长江蔬菜*, 2011, 25(16) : 31-33.
- [30] 王爱国, 罗广华. 植物的超氧物自由基与羟胺反应的定量关系. *植物生理学通讯*, 1990, 26(6) : 55-57.
- [37] 余永年. 茭白黑粉菌刺激生长物质的研究. *植物学报*, 1962, 10(4) : 339-350.
- [45] 韩荣, 李夏, 任安芝, 高玉藻. 干旱胁迫下内生真菌感染对羽茅的生理生态影响. *生态学报*, 2011, 31(8) : 2115-2123.
- [46] 尚庆茂, 李晓芬, 张志刚. 植物对逆境交叉适应的分子机制. *西北植物学报*, 2007, 27(9) : 1921-1928.
- [47] 部建雯, 姚广, 高辉远, 贾裕娇, 张立涛, 程丹丹, 王鑫. 核盘菌(*Sclerotinia sclerotiorum* (Lib.) de Bary)侵染抑制黄瓜光合作用的机理. *植物病理学报*, 2009, 39(6) : 613-621.

ACTA ECOLOGICA SINICA Vol. 33 ,No. 5 March ,2013(Semimonthly)
CONTENTS

Frontiers and Comprehensive Review

- The effect of nitrogen deposition on forest soil organic matter and litter decomposition and the microbial mechanism WANG Jingyuan, ZHANG Xinyu, WEN Xuefa, et al (1337)
Advances and the effects of industrial hemp for the cleanup of heavy metal pollution LIANG Shumin, XU Yanping, CHEN Yu, et al (1347)
A review for evaluating the effectiveness of BMPs to mitigate non-point source pollution from agriculture MENG Fande, GENG Runzhe, OU Yang, et al (1357)
Progresses in dendrochronology of shrubs LU Xiaoming, LIANG Eryuan (1367)

Autecology & Fundamentals

- The characteristics of nocturnal sap flow and stem water recharge pattern in growing season for a *Larix principis-rupprechtii* plantation WANG Yanbing, DE Yongjun, XIONG Wei, et al (1375)
Effects of soil drought stress on photosynthetic characteristics and antioxidant enzyme activities in *Hippophae rhamnoides* Linn. seedlings PEI Bin, ZHANG Guangcan, ZHANG Shuyong, et al (1386)
Diurnal activity time budget of Père David's deer in Hubei Shishou Milu National Nature Reserve, China YANG Daode, LI Zhuyun, LI Pengfei, et al (1397)
Sublethal effects of three insecticides on the reproduction and host searching behaviors of *Sclerodermus sichuanensis* Xiao (Hymenoptera: Bethyidae) YANG Hua, YANG Wei, YANG Chunping, et al (1405)

Population, Community and Ecosystem

- Seasonal succession of zooplankton in Sansha Bay, Fujian XU Jiayi, XU Zhaoli (1413)
Biomass production and litter decomposition of lakeshore plants in Napahai wetland, Northwestern Yunnan Plateau, China GUO Xuhu, XIAO Derong, TIAN Kun, et al (1425)
The flora and species diversity of herbaceous seed plants in wetlands along the Xin'anjiang River from Anhui YANG Wenbin, LIU Kun, ZHOU Shoubiao (1433)
Spatial-temporal variation of root-associated aerobic bacterial communities of *phragmites australis* and the linkage of water quality factors in constructed wetland XIONG Wei, GUO Xiaoyu, ZHAO Fei (1443)
Temporal dynamics and influencing factors of leaf respiration for three temperate tree species WANG Zhaoguo, WANG Chuankuan (1456)
Environmental controls on water use efficiency of a poplar plantation under different soil water conditions ZHOU Jie, ZHANG Zhiqiang, SUN Ge, et al (1465)
An analysis of calcium components of *Artemisia ordosica* plant on sandy lands in different ecological regions XUE Pingping, GAO Yubao, HE Xingdong (1475)
Effects of alpine meadow plant communities on soil nematode functional structure in Northern Tibet, China XUE Huiying, HU Feng, LUO Daqing (1482)
Soil fauna diversity of abandoned land in a copper mine tailing area ZHU Yongheng, SHEN Fei, YU Jian, et al (1495)
Effects of ciprofloxacin on microbial biomass carbon and carbon metabolism diversity of soil microbial communities MA Yi, PENG Jinju, WANG Yun, et al (1506)
Estimation of ecological water demands based on ecological water table limitations in the lower reaches of the Liaohe River Plain, China SUN Caizhi, GAO Ying, ZHU Zhengru (1513)

Landscape, Regional and Global Ecology

- The ecological security patterns and construction land expansion simulation in Gaoming SU Yongxian, ZHANG Hong'ou, CHEN Xiuzhi, et al (1524)
Root features of typical herb plants for hillslope protection and their effects on soil infiltration LI Jianxing, HE Binghui, CHEN Yun (1535)

- The dynamic change of the thermal environment landscape patterns in Beijing, Shanghai and Guangzhou in the recent past decade ...
..... MENG Dan, WANG Mingyu, LI Xiaojuan, et al (1545)
- Change trends and driving factors of base flow in Kuye River Catchment
..... LEI Yongnan, ZHANG Xiaoping, ZHANG Jianjun, et al (1559)
- Photosynthetic characteristics, biomass allocation, C, N and P distribution of *Schima superba* seedlings in response to simulated
nitrogen deposition LI Mingyue, WANG Jian, WANG Zhenxing, et al (1569)
- Effect of iron slag adding on methane production, oxidation and emission in paddy fields
..... WANG Weiqi, LI Pengfei, ZENG Congsheng, et al (1578)
- Resource and Industrial Ecology**
- Antioxidative system and chlorophyll fluorescence of *Zizania latifolia* Turcz. plants are affected by *Ustilago esculenta* infection
..... YAN Ning, WANG Xiaoqing, WANG Zhidan, et al (1584)
- Analysis of cold-regulated gene expression of the Fingered Citron (*Citrus medica* L. var. *sarcodactylis* Swingle)
..... CHEN Wenrong, YE Jiejun, LI Yongqiang, et al (1594)
- Hosts preference of *Echinothrips americanus* Morgan for different vegetables ... ZHU Liang, SHI Baocai, GONG Yajun, et al (1607)
- Induction effects of jasmonic acid on tannin content and defense-related enzyme activities in conventional cotton plants
..... YANG Shiyong, WANG Mengmeng, XIE Jianchun (1615)
- Effects of irrigation with paper mill effluent on growth and nutrient status of *Populus tomentosa* seedlings
..... WANG Ye, XI Benye, CUI Xiangdong, et al (1626)
- Water use efficiency of Jiangsu Province based on the data envelopment analysis approach
..... ZHAO Chen, WANG Yuan, GU Xueming, et al (1636)
- Research Notes**
- Characteristics of precipitation distribution in *Pinus tabulaeformis* plantations under different canopy coverage in Taiyue Mountain
..... ZHOU Bin, HAN Hairong, KANG Fengfeng, et al (1645)
- Driving factor analysis on the vegetation changes derived from the Landsat TM images in Beijing JIA Baoqun (1654)
- Effects of *Mikania micrantha* wilt virus infection on photosynthesis and the activities of four enzymes in *Mikania micrantha* H. B. K.
..... WANG Rui long, PAN Wanwen, YANG Jiaoyu, et al (1667)

《生态学报》2013 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研工作者,探索自然奥秘,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研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,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

(SHENTAI XUEBAO)

(半月刊 1981年3月创刊)

第33卷 第5期 (2013年3月)

ACTA ECOLOGICA SINICA

(Semimonthly, Started in 1981)

Vol. 33 No. 5 (March, 2013)

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

国内外公开发行

国内邮发代号 82-7

国外发行代号 M670

定价 90.00 元