

ISSN 1000-0933
CN 11-2031/Q

生态学报

Acta Ecologica Sinica



第 31 卷 第 14 期 Vol.31 No.14 **2011**

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 31 卷 第 14 期

2011 年 7 月 (半月刊)

目 次

厦门市三个产业土地利用变化的敏感性·····	黄 静,崔胜辉,李方一,等 (3863)
黄河源区沙漠化及其景观格局的变化·····	胡光印,董治宝,逯军峰,等 (3872)
岩溶山区景观多样性变化的生态学意义对比——以贵州四个典型地区为例·····	罗光杰,李阳兵,王世杰,等 (3882)
基于城市地表参数变化的城市热岛效应分析·····	徐涵秋 (3890)
北京市土地利用生态分类方法·····	唐秀美,陈百明,路庆斌,等 (3902)
长白山红松臭冷杉光谱反射随海拔的变化·····	范秀华,刘伟国,卢文敏,等 (3910)
臭冷杉生物量分配格局及异速生长模型·····	汪金松,张春雨,范秀华,等 (3918)
渔山岛岩礁基质潮间带大型底栖动物优势种生态位·····	焦海峰,施慧雄,尤仲杰,等 (3928)
食物质量差异对树麻雀能量预算和消化道形态特征的影响·····	杨志宏,邵淑丽 (3937)
桂西北典型喀斯特区生态服务价值的环境响应及其空间尺度特征·····	张明阳,王克林,刘会玉,等 (3947)
隔沟交替灌溉条件下玉米根系形态性状及结构分布·····	李彩霞,孙景生,周新国,等 (3956)
不同抗病性茄子根系分泌物对黄萎菌的化感作用·····	周宝利,陈志霞,杜 亮,等 (3964)
镉在草-菇-土系统中的循环与生物富集效应·····	翁伯琦,姜照伟,王义祥,等 (3973)
鄱阳湖流域泥沙流失及吸附态氮磷输出负荷评估·····	余进祥,郑博福,刘娅菲,等 (3980)
柠条细根的分布和动态及其与土壤资源有效性的关系·····	史建伟,王孟本,陈建文,等 (3990)
土壤盐渍化对尿素与磷酸脲氮挥发的影响·····	梁 飞,田长彦 (3999)
象山港海域细菌的分布特征及其环境影响因素·····	杨季芳,王海丽,陈福生,等 (4007)
近地层臭氧对小麦抗氧化酶活性变化动态的影响·····	吴芳芳,郑有飞,吴荣军,等 (4019)
抑制剂和安全剂对高羊茅根中酶活性和菲代谢的影响·····	龚帅帅,韩 进,高彦征,等 (4027)
南苜蓿高效共生根瘤菌土壤的筛选·····	刘晓云,郭振国,李乔仙,等 (4034)
汉江上游金水河流域土壤常量元素迁移模式·····	何文鸣,周 杰,张昌盛,等 (4042)
基于地理和气象要素的春玉米生育期栅格化方法·····	刘 勤,严昌荣,梅旭荣,等 (4056)
日光温室切花郁金香花期与外观品质预测模型·····	李 刚,陈亚茹,戴剑锋,等 (4062)
冀西北坝上旱干区南瓜油葵间作的水分效应·····	黄 伟,张俊花,李文红,等 (4072)
专论与综述	
鸟类分子系统地理学研究进展·····	董 路,张雁云 (4082)
自然保护区空间特征和地块最优选择方法·····	王宜成 (4094)
人类活动是导致生物均质化的主要因素·····	陈国奇,强 胜 (4107)
冬虫夏草发生的影响因子·····	张古忍,余俊锋,吴光国,等 (4117)
自然湿地土壤产甲烷菌和甲烷氧化菌多样性的分子检测·····	余晨兴,全 川 (4126)
研究简报	
塔里木河上游典型绿洲不同连作年限棉田土壤质量评价·····	贡 璐,张海峰,吕光辉,等 (4136)
高山森林凋落物分解过程中的微生物生物量动态·····	周晓庆,吴福忠,杨万勤,等 (4144)
生物结皮粗糙特征——以古尔班通古特沙漠为例·····	王雪芹,张元明,张伟民,等 (4153)
不同海拔茶园害虫、天敌种群及其群落结构差异·····	柯胜兵,党凤花,毕守东,等 (4161)

期刊基本参数:CN 11-2031/Q * 1981 * m * 16 * 306 * zh * P * ¥ 70.00 * 1510 * 33 * 2011-07



封面图说:内地多呈灌木状的沙棘,在青藏高原就表现为高大的乔木,在拉萨河以及雅鲁藏布江沿岸常常可以看到高大的沙棘林和沼泽塔头湿地相映成趣的美丽景观。

彩图提供:陈建伟教授 国家林业局 E-mail: cites.chenjw@163.com

吴芳芳,郑有飞,吴荣军,王锦旗. 近地层臭氧对小麦抗氧化酶活性变化动态的影响. 生态学报, 2011, 31(14): 4019-4026.

Wu F F, Zheng Y F, Wu R J, Wang J Q. Concentration of O_3 at the atmospheric surface affects the changes characters of antioxidant enzyme activities in *Triticum aestivum*. Acta Ecologica Sinica, 2011, 31(14): 4019-4026.

近地层臭氧对小麦抗氧化酶活性变化动态的影响

吴芳芳,郑有飞*,吴荣军,王锦旗

(南京信息工程大学,江苏省气象灾害重点实验室,南京 210044)

摘要:利用开顶式气室(OTCs)模拟了地表 O_3 浓度升高的大田试验条件,测定了小麦各生长期(返青期、拔节期、孕穗期、抽穗期、灌浆期、成熟期)叶片抗氧化酶的活性。通过2a的重复试验,得到相似结果。试验表明,过氧化氢酶(CAT)和过氧化物酶(POD)活性在小麦的生长进程中,先升高后降低。 O_3 浓度升高使CAT酶和POD酶活性的峰值期提前,POD酶峰值期明显提前所需的 O_3 浓度比CAT酶高, O_3 诱导小麦生长前期的CAT、POD酶活性升高,后期则起抑制作用。POD酶对低浓度 O_3 的胁迫响应时间较晚。当 O_3 浓度提高到150 nL/L时,超氧化物歧化酶(SOD)活性随小麦生长期的变化,由原来的双峰曲线变为单峰曲线,高浓度 O_3 使SOD酶活性在抽穗期后持续显著降低。 O_3 不明显改变抗坏血酸过氧化物酶(APX)对胁迫的响应时间,但一定浓度范围内 O_3 能诱导APX酶活性升高。不同浓度的 O_3 对SOD酶和APX酶的作用效应和强度显著不同,CAT酶和POD酶对 O_3 比较敏感。

因此,近地层 O_3 浓度增加,改变了CAT、POD和SOD酶活性变化的时序特征,抗氧化酶对 O_3 胁迫的响应特征取决于小麦的生育期、 O_3 的浓度和熏气时间。

关键词:小麦; O_3 ;抗氧化酶;OTCs;时序特征

Concentration of O_3 at the atmospheric surface affects the changes characters of antioxidant enzyme activities in *Triticum aestivum*

WU Fangfang, ZHENG Youfei*, WU Rongjun, WANG Jinqi

Key Laboratory of Meteorological Disaster(KLME), Nanjing University of Information Science & Technology, Nanjing 210044, China

Abstract: Using ozone treatments in OTCs (open top chambers), the effect of increase atmospheric surface level ozone (O_3) contents on antioxidant enzymes activities of winter wheat leaves (*Triticum aestivum*) was investigated, in the growing/development (G/D) periods including reviving, jointing, booting, heading, filing and mature stages. Two experiments were performed in two years by doing each experiment in one year, using six OTCs in each. The chambers were equivalent, but two were fed with air while the other four with ozone at different concentration, in that two chambers with 100nL/L and the other two with 150nL/L. Winter wheat were grown to all life stage in OTCs. From reviving to mature stages, the plants were treated for 8 h (8:00–16:00) in every sunny day with different dose of O_3 , respectively. The activities of winter wheat leaves (the second and the 5th from the top). Catalase (CAT), peroxidase (POD), superoxide dismutase (SOD) and ascorbate peroxidase (APX) were measured. Antioxidant enzymes of each treatment was assayed in triplicate. The data were initially compared by analysis of variance and differences between means were detected using the Duncans Multiple Range Tests. Values of $P < 0.05$ indicated significance. Quite similar results were obtained during two years' experiments, suggesting that as a G/D stage is progressing, the activities of leaves catalase (CAT) and peroxidase (POD) increased firstly but consequently declined. Under the increased O_3 stress, CAT and POD activities raised and their peak values

基金项目:国家自然科学基金项目(40775072);江苏省高校自然科学研究项目(09KJA170004);南京信息工程大学项目(20080312)

收稿日期:2010-05-12; **修订日期:**2010-10-25

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: zhengyf@nuist.edu.cn

appeared earlier, but POD needed higher O_3 concentration than CAT's, The activeness of CAT and POD is induced in the later G/D period. Subjected to low concentration of O_3 , POD activity was found to remain unaffected in longer time compared to CAT. When the O_3 concentration was increased to 150 nL/L, the relationship of superoxide dismutase (SOD) activities against wheat growth stages was altered from double hump to single hump style. SOD activity was found to be obviously decreased in the advance G/D period under higher O_3 stress. No obvious influence was found for the time response of ascorbate peroxidase caused by O_3 stress, but in a certainly range, while O_3 concentration could induce APX activity. The effects and influenced strength are significantly different between superoxide dismutase and ascorbate peroxidase against O_3 doses. CAT and POD are more sensitive to O_3 than SOD and APX. Taking together, the elevated O_3 concentration in atmospheric surface layer, impinges on the time series features of CAT, POD and SOD. O_3 stresses could induce oxidative stress. Antioxidant enzymes activities were upregulated under low concentration and short time ozone fumigation. Otherwise, enhance O_3 irradiation and prolong fumigation time the activities of antioxidant enzymes were inhibited. The effects on antioxidant enzymes activities are relate to (G/D) periods of winter wheat, dose of O_3 and the exposure time. Various antioxidant enzymes have different O_3 -sensitive, representing that the threshold of subjected to O_3 , the responses time to O_3 stress and the variation scope of antioxidant enzymes activities are different.

Key Words: *Triticum aestivum*; open top chambers; O_3 stress; antioxidant enzymes; time series feature

近地层臭氧(O_3)是光化学烟雾最主要的产物,占总氧化剂的90%以上,是大气污染物的主要成分之一。一些发达地区以及工业区周围的农村, O_3 污染问题十分严重,近地层臭氧浓度可达100—200 nL/L^[1],联合国政府间气候变化专门委员会(IPCC)第四次工作报告指出,近地层 O_3 浓度从1986到2002年间增加了15%,并且每年以1.4%的速度在增加^[2]。近地层 O_3 浓度增加造成了农作物减产和森林衰退^[3]。 O_3 对植物的生物学效应不仅取决于环境中的 O_3 浓度,而且取决于植物所吸收的 O_3 量以及植物抗氧化能力的大小^[1]。植物气孔导度、叶片结构以及生长环境中光照、湿度、温度等因素影响植物对 O_3 吸收^[3]。 O_3 对作物的抑制作用与作物的生长期有关,因为作物不同生理时期对 O_3 的吸收量不同。进入作物体内的 O_3 产生叶内伤害^[4],氧化胁迫诱导作物体内抗氧化酶活性升高^[5]。抗氧化酶如过氧化氢酶、超氧化物歧化酶、过氧化物酶、抗坏血酸过氧化物酶的活性可以作为作物抗氧化能力的指标,一定程度上反应了作物被氧化伤害的程度^[6]。抗氧化酶活性同时受到作物生理过程和生长环境的共同作用。在不同生长阶段,作物在适应 O_3 环境的过程中,受到的 O_3 伤害有何不同?本文利用小麦抗氧化酶活性的变化描述不同生长时期小麦对 O_3 的敏感差异性特征。探讨田间小麦对 O_3 的敏感阶段和适应阶段,研究小麦抗氧化酶活性对 O_3 胁迫的响应时序性特征,旨在丰富作物的抗 O_3 胁迫生理,有利于指导农业生产以及生态系统管理,同时还有利于正确估计由 O_3 污染而带来的农业损失。

1 材料与方法

1.1 供试材料

冬小麦(*Triticum aestivum* cv),品种为扬麦16号。

1.2 试验设计

试验在南京信息工程大学农业气象试验园(N 32°14', E 118°42')进行。采用OTC-1型开顶式气室^[7]种植小麦。试验用 O_3 由高纯度 O_2 经WJ-H-Y5型高频 O_3 发生器生成,然后与背景大气混合,分别配制成 O_3 浓度为100 nL/L (T_{100})和150 nL/L (T_{150})的混合气体,再分别用轴流风机输入OTC-1型开顶式气室内,以自然条件下通入空气设为对照(CK)。共3个处理,每1处理3次重复。气室主体为边长1.15 m、高2.15 m的正八棱柱体,聚乙烯塑料膜室壁。本试验中对OTC-1开顶式气室内 O_3 的布气装置进行了改进:用与垂直主供气管相接的8根水平布气管,每根管下侧面平均分布气孔,气孔与水平面呈45°夹角,布气装置的高度可以根据冬小麦的高度调整,这样可以更真实模拟气流状况,使曝气更均匀。采用新西兰aeroQUAL公司的S200型 O_3 检

测仪对气室内 O_3 浓度进行监测。

1.3 田间采样

试验是在 9 个完全相同的气室内进行的, 2008 年 OTC-1 试验, 冬小麦于 2007 年 11 月 12 日播种, 2008 年 3 月 7 日(返青期)始通入 O_3 。2009 年 OTC 试验, 冬小麦于 2008 年 10 月 20 日播种, 2009 年 2 月 18 日(返青期)始通入 O_3 。每天熏气 8h, 即 8:00—16:00(雨天停止熏气), 直至收获前 5 d。田间水肥供应适量而充分, 其他农田管理措施均相同, 无病虫害及杂草的影响。在小麦各生育时期, 其中 2008 年试验取样时间为返青期(3 月 10 日), 拔节期(3 月 24 日), 孕穗期(4 月 2 日), 抽穗期(4 月 17 日), 灌浆期(4 月 29 日), 成熟期(5 月 8 日); 2009 年试验取样时间为返青期(2 月 18 日), 拔节期(3 月 4 日), 孕穗期(4 月 2 日), 抽穗期(4 月 17 日), 灌浆期(4 月 23 日), 成熟期(5 月 15 日); 采取小麦旗叶至实验室, 立即测定过氧化氢酶(CAT)、过氧化物酶(POD)、超氧化物歧化酶(SOD)和抗坏血酸过氧化物酶(APX)的活性。

1.4 抗氧化酶活性的测定

过氧化物酶(POD)活性测定采用愈创木酚法, 以每分钟 OD_{470} 变化量为酶活性单位; 过氧化氢酶(CAT)活性测定采用紫外吸收法, 每分钟 ΔA_{240} 下降 0.01 为一个酶活力单位; 超氧化物歧化酶(SOD)活性测定采用 NBT 光化还原法, 抑制 NBT 光化学还原 50% 的酶量为一个酶活性单位。抗坏血酸过氧化物酶(APX)活性采用紫外吸收法, 每秒钟 A_{290} 变化量为一个酶活性单位^[8]。

1.5 数据统计

试验数据采用 DPS 软件 Duncan 氏多重极差检验法, 进行差异显著性分析。

2 结果与分析

2.1 臭氧浓度增加小麦过氧化氢酶活性变化的时序特征

如图 1 所示, 小麦叶片过氧化氢酶(CAT)活性在小麦的生长进程中, 呈先升高后降低的趋势。对照组 CAT 酶活性在孕穗期达最大; O_3 浓度升高后的处理即 T_{100} 和 T_{150} , CAT 酶活性在拔节期达最大, CAT 酶活性的峰值期比对照提前了一个生育期。在相同生育期中不同 O_3 浓度间 CAT 酶活性不同, 只有在返青期 T_{100} 和 T_{150} 没有显著差异, 其它时期均达极显著水平($P < 0.01$)。在生育期前期(返青期, 拔节期) O_3 浓度增加促进了 CAT 酶活性的升高, O_3 对 CAT 酶活性的促进作用 T_{100} 比 T_{150} 更明显($P < 0.01$), 在拔节期之后, O_3 对 CAT 酶活性起抑制作用, O_3 对 CAT 酶活性的抑制作用 T_{150} 比 T_{100} 更显著($P < 0.01$)。结果说明, 在小麦的生长进程中, 叶片 CAT 酶活性的变化有一定的时序性, O_3 浓度增加使 CAT 酶活性的峰值期提前。 T_{100} 和 T_{150} 处理对 CAT

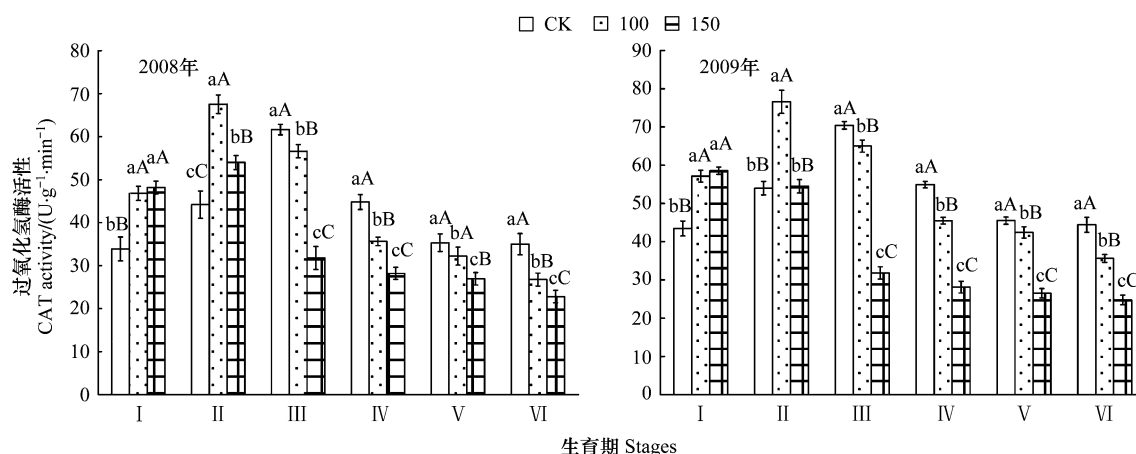


图 1 臭氧胁迫下小麦不同生长期过氧化氢酶的活性

Fig. 1 CAT activity in winter wheat varied growth stages (reviving, jointing, booting, heading, filing and mature stages), subjected to O_3 stress by different concentration with 100 nL/L and 150 nL/L

I, II, III, IV, V, VI 分别代表返青期, 拔节期, 孕穗期, 抽穗期, 灌浆期, 成熟期; 不同字母表示处理间经 Duncan 氏多重极差检验差异显著, 不同大写字母 $P < 0.01$, 不同小写字母 $P < 0.05$

酶活性变化的时序特征的影响效应一致,前期 O_3 诱导 CAT 酶活性,较低浓度 O_3 比高浓度 O_3 的诱导效应强,后期 O_3 抑制 CAT 酶活性,较高浓度 O_3 抑制效应较强。CAT 酶活性对 O_3 比较敏感,较低浓度 O_3 能明显诱导 CAT 酶活性, O_3 浓度较高时 CAT 酶活性在较短时间里出现较大幅度降低。小麦在不同生长期对 O_3 胁迫的敏感性不同。初期 CAT 酶活性的增加有利于清除 O_3 的氧化伤害,维持细胞正常功能,小麦发生了“防卫性”生理变化^[9]。小麦生长后期,CAT 酶活性显著降低,是因为 O_3 累积量增加,超过了小麦的防御能力,伤害变得不可逆^[10]。

2.2 臭氧浓度增加小麦过氧化物酶活性变化的时序特征

如图 2 所示,小麦过氧化物酶(POD)活性,在小麦生长进程中均表现为先升高后降低的趋势,呈单峰曲线变化。POD 活性峰值的大小以及 POD 峰值出现的时间早晚受 O_3 浓度影响。对照和 T_{100} 处理,POD 峰值均出现在灌浆期; T_{150} 处理,POD 峰值出现在孕穗期,比对照和 T_{100} 提前了 2 个生育期约 20d。从图中还可看出, O_3 持续作用下,POD 活性呈现出前期有所促进后期有所抑制的趋势。 T_{100} 处理对 POD 的促进或抑制作用在一些生育期中没有达到极显著差异水平。 T_{150} 比 T_{100} 的作用效果明显,从返青期到孕穗期极显著地增加了 POD 活性,在抽穗期 POD 活性急剧降低,降幅达 69.15%,抽穗期以后 POD 活性一直维持在较低水平没有显著变化。结果表明,地表 O_3 浓度增加改变了 POD 活性变化的时序特征,当 O_3 浓度增加为 150 nL/L 时,能较早诱导 POD 活性升高,表现为 POD 峰值出现时间明显提前。在小麦不同的生长时期, O_3 发挥的生理作用不同^[11],前期 O_3 促进 POD 活性升高,后期则起抑制作用。 O_3 浓度越高作用效应越明显。100 nL/L 和 150 nL/L 的 O_3 作用效应的不同,说明 POD 能耐受较低浓度的 O_3 作用较长时间,而对高浓度 O_3 耐受力差,150 nL/L 的 O_3 作用下,抽穗期开始出现了不可恢复的永久性伤害。

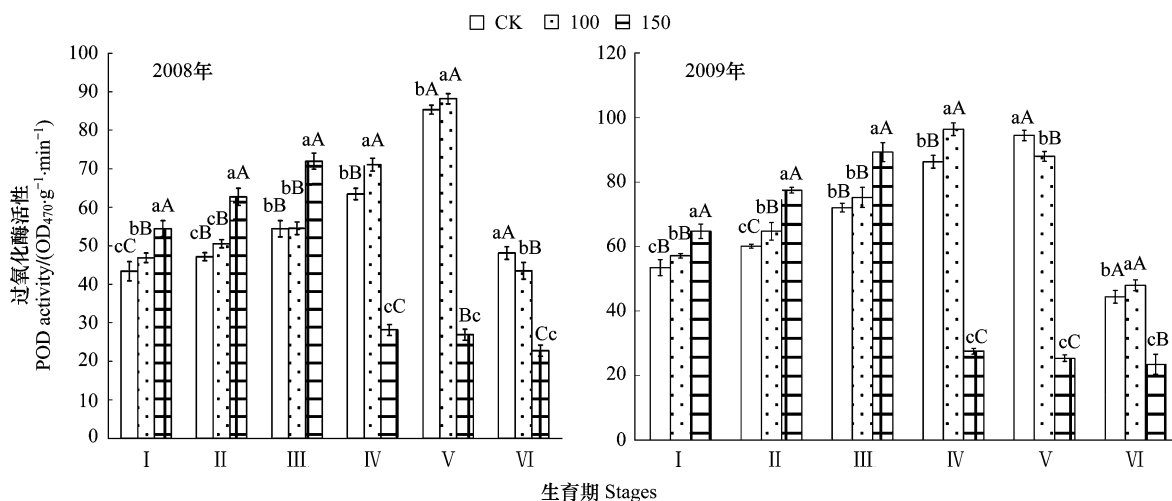


图 2 臭氧胁迫下小麦不同生长期过氧化物酶的活性

Fig. 2 POD activity in winter wheat varied growth stages (reviving, jointing, booting, heading, filing and mature stages), subjected to O_3 stress by different concentration with 100 nL/L and 150 nL/L

I, II, III, IV, V, VI 分别代表返青期,拔节期,孕穗期,抽穗期,灌浆期,成熟期;不同字母表示处理间经 Duncan 氏多重极差检验差异显著,不同大写字母 $P < 0.01$,不同小写字母 $P < 0.05$

2.3 臭氧浓度增加小麦超氧化物歧化酶活性变化的时序特征

如图 3 所示,在小麦的生长进程中,超氧化物歧化酶(SOD)活性变化的时序特征, T_{100} 和对照,呈双峰曲线,孕穗期达最大峰值,灌浆期出现第 2 峰值, T_{150} 呈单峰曲线变化,孕穗期达最大之后逐渐降低。 O_3 持续作用下,在小麦不同生育期的作用效应不同,返青期和拔节期, T_{100} 和 T_{150} 均促进 SOD 活性升高,并且促进效应差异不明显。 T_{100} 的促进效应持续的时间长,从返青到灌浆期。 T_{150} 则在孕穗期对 SOD 酶没有促进作用,抽穗期后起显著抑制作用。 T_{150} 比 T_{100} 在较早的时期里表现出抑制效应。结果说明, O_3 的浓度值以及小麦生理发育状况共同影响 SOD 酶活性。在小麦生长前期, O_3 促进了 SOD 酶活性升高,在小麦生育后期,小麦对低浓度 O_3

(100 nL/L)有相对长时间的适应变化,SOD 酶活性有恢复性上升的过程,出现第 2 峰值;高浓度 O_3 (150 nL/L)因 O_3 的累积量高,对小麦伤害较大,SOD 酶活性持续显著降低。小麦营养生长期, O_3 胁迫刺激了叶片抗氧化酶 SOD 活性的增强以抵御氧化伤害。小麦营生殖生长期(抽穗期), O_3 不是 SOD 酶活性调节的主要因素, O_3 浓度间差异不显著,而 SOD 酶活性较上一个生长期急剧降低,主要是由于小麦的生长适应调节的结果。在生殖生长期(灌浆期)低浓度 O_3 使 SOD 酶活性恢复性上升,而高浓度 O_3 氧化胁迫积累较多,超过了小麦的生理适应调节,呈不可逆下降。SOD 酶活性的变化反映了小麦的氧化伤害过程,小麦的生理发育状况、 O_3 浓度以及 O_3 的熏气时间共同影响小麦的抗性变化。

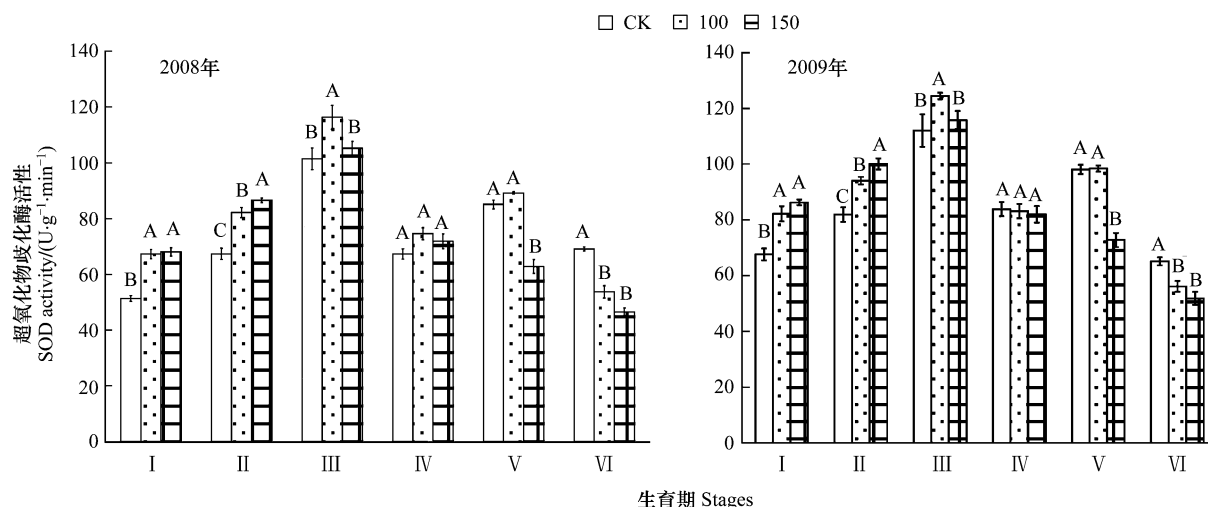


图3 臭氧胁迫下小麦不同生长期超氧化物歧化酶的活性

Fig. 3 SOD activity in winter wheat varied growth stages (reviving, jointing, booting, heading, filing and mature stages), subjected to O_3 stress by different concentration with 100nL/L and 150 nL/L

I, II, III, IV, V, VI 分别代表返青期,拔节期,孕穗期,抽穗期,灌浆期,成熟期。不同字母表示处理间经 Duncan 氏多重极差检验差异显著,不同大写字母 $P < 0.01$

2.4 臭氧浓度增加小麦抗坏血酸氧化酶活性变化的时序特征

如图 4 所示,小麦叶片抗坏血酸过氧化物酶 (APX) 活性随着小麦的生长和发育逐渐增加。不同 O_3 浓度

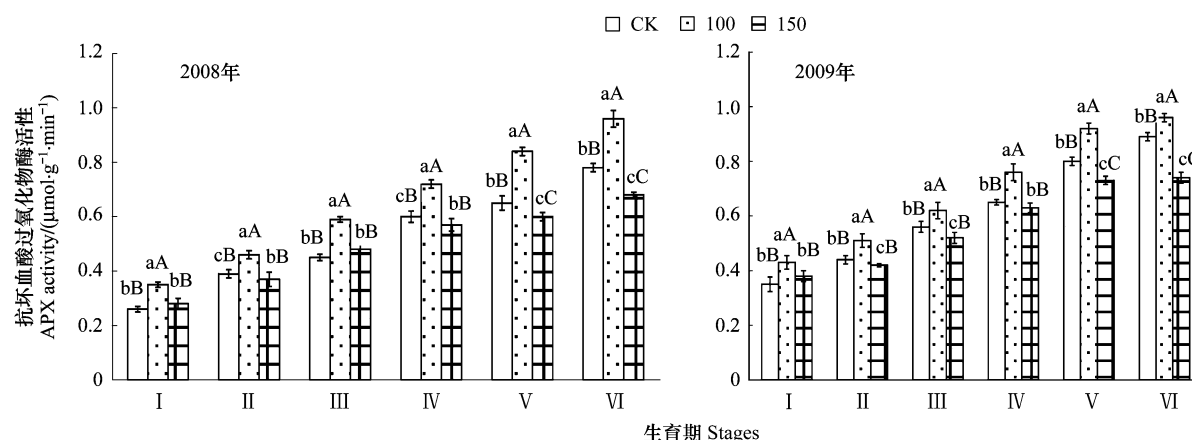


图4 臭氧胁迫下小麦不同生长期抗坏血酸过氧化物酶的活性

Fig. 4 APX activity in winter wheat varied growth stages (reviving, jointing, booting, heading, filing and mature stages), subjected to O_3 stress by different concentration with 100 nL/L and 150 nL/L

I, II, III, IV, V, VI 分别代表返青期,拔节期,孕穗期,抽穗期,灌浆期,成熟期;不同字母表示处理间经 Duncan 氏多重极差检验差异显著,不同大写字母 $P < 0.01$,不同小写字母 $P < 0.05$

持续作用下,小麦 APX 活性的时序变化特征相同。 T_{100} 从返青期到成熟期整个生育过程中 APX 活性都高于对照,显著促进了 APX 酶活性升高; T_{150} 在前期与对照差异不显著,在灌浆期以后 APX 活性显著低于对照,起抑制作用。结果表明,APX 的活性随着小麦的生长进程的推进而逐渐增加,在一定范围内增加 O_3 的浓度,能诱导 APX 活性升高,APX 酶是 H_2O_2 清除酶^[12],APX 活性升高可以消减 O_3 的氧化伤害。这种促进 APX 酶活性升高以刺激小麦产生的抗性,不能抵御太长时间和较高浓度的 O_3 伤害。当 O_3 浓度较大或作用时间较长时,APX 酶活性比对照低,抗氧化能力减弱。

2.5 不同抗氧化酶对 O_3 的敏感性差异

不同 O_3 浓度间抗氧化酶活性的相对变化值如表 1 所示,整个生长期 T_{100} 与 T_{150} 对 APX 的作用效应显著不同,低浓度 O_3 对 APX 酶活性有促进作用,而高浓度 O_3 却没有。CAT 酶活性在整个生长期中, T_{100} 与 T_{150} 的作用效应相同,但作用强度的差异比其它酶的大,CAT 酶活性对 O_3 比较敏感,较低浓度 O_3 能明显诱导 CAT 活性, O_3 浓度较高时 CAT 酶活性在较短时间里出现较大幅度降低。不同 O_3 浓度对 POD 酶的作用强度差异较大,并在抽穗期 T_{150} 表现出与 T_{100} 不同的抑制效应,说明 POD 酶对 O_3 浓度的反应也比较灵敏,但耐受时间比 CAT 酶长了一个生育期。 T_{100} 和 T_{150} 对 SOD 酶的作用强度差异性较小,在灌浆期出现作用效应的不同, T_{100} 与

表 1 不同生长期不同 O_3 浓度作用下小麦抗氧化酶活性的相对变化

Table 1 Relative changes of antioxidant enzyme activities subjected to O_3 stress in winter wheat varied growth stages

过氧化氢酶活性的变化值 ΔCAT/(U·g ⁻¹ ·min ⁻¹)				过氧化物酶活性的变化值 ΔPOD/(OD ₄₇₀ ·g ⁻¹ ·min ⁻¹)		
2008	Δ1(%)	Δ2(%)	Δ3(%)	Δ1(%)	Δ2(%)	Δ3(%)
I	38.26	42.27	2.91	8.02	25.41	3.07
II	52.91	22.19	-20.09	7.17	33.02	-43.70
III	-8.18	-48.49	-43.90	0.20	32.22	-60.82
IV	-20.45	-37.13	-20.97	12.06	-55.62	-24.42
V	-8.84	-23.76	-16.37	3.33	-68.46	-18.03
VI	-23.58	-34.91	-14.81	-9.52	-52.65	-24.96
2009	Δ1(%)	Δ2(%)	Δ3(%)	Δ1(%)	Δ2(%)	Δ3(%)
I	31.46	34.78	2.52	6.92	21.09	13.25
II	41.84	0.94	-28.83	7.71	28.88	19.66
III	-7.70	-54.80	-51.03	4.40	23.88	18.65
IV	-17.19	-48.81	-38.18	11.68	-68.09	-71.43
V	-6.79	-41.73	-37.48	-6.87	-73.14	-71.15
VI	-19.82	-44.28	-30.51	8.04	-47.14	-51.07
超氧化物歧化酶活性的变化值 ΔSOD/(OD ₄₇₀ ·g ⁻¹ ·min ⁻¹)				抗坏血酸过氧化物酶活性的变化值 ΔAPX/(μmol·g ⁻¹ ·min ⁻¹)		
2008	Δ1(%)	Δ2(%)	Δ3(%)	Δ1(%)	Δ2(%)	Δ3(%)
I	31.01	32.49	0.92	34.62	7.69	-20.00
II	22.01	28.56	4.69	17.95	-5.13	-19.57
III	14.68	3.72	-8.93	31.11	6.67	-18.64
IV	10.81	6.72	-3.31	20.00	-5.00	-20.83
V	4.82	-26.18	-26.78	29.23	-7.69	-28.57
VI	-22.32	-32.68	-12.75	23.08	-12.82	-29.17
2009	Δ1(%)	Δ2(%)	Δ3(%)	Δ1(%)	Δ2(%)	Δ3(%)
I	21.54	27.58	4.96	22.86	8.57	-11.63
II	14.86	22.19	6.39	15.91	-4.55	-17.65
III	11.07	3.40	-6.90	10.71	-7.14	-16.13
IV	-0.83	-2.16	-1.33	16.92	-3.08	-17.11
V	0.34	-25.79	-26.04	15.00	-8.75	-20.65
VI	-13.81	-20.40	-7.64	7.87	-16.85	-22.92

$\Delta 1$: T_{100} 与 CK 的酶活性相对变化值, $\Delta 1 = |U_{T100} - U_{CK}| / U_{CK}$; $\Delta 2$: T_{150} 与 CK 的相对变化值, $\Delta 2 = |U_{T150} - U_{CK}| / U_{CK}$; $\Delta 3$: T_{150} 与 T_{100} 的相对变化值, $\Delta 3 = |U_{T150} - U_{T100}| / U_{T100}$; 其中 U_{CK} , U_{T100} , U_{T150} 为 3 次重复的平均值

T_{150} 的作用效应差异出现的时间比 POD 酶晚,说明 SOD 酶对 O_3 浓度的反应不灵敏,耐受时间比 POD 酶长。结果说明,不同酶对 O_3 的敏感性有差异,CAT 酶最敏感,其次是 POD 酶,再次是 SOD 酶,最后是 APX 酶。

3 结论与讨论

3.1 小麦抗氧化酶 CAT、POD、SOD 的活性,在小麦生长发育进程中呈现先升高后降低的变化规律。抗氧化酶活性的时序特征因 O_3 胁迫而发生改变,CAT 和 POD 酶活性的最大值出现的生育期明显提前,SOD 酶的时序特征曲线由双峰曲线变为单峰曲线。 O_3 在小麦较早的营养生长期诱导了 CAT 酶、POD 酶活性升高,后期则起显著抑制作用。 O_3 改变了小麦不同生育期的抗性,特别是 SOD 酶在小麦抽穗期后持续处于较低水平,指示抗氧化性的丧失,这会进一步影响到小麦后期的产量和品质构成。Oksanen 等研究也指出 O_3 浓度升高条件下,活性氧尤其是 H_2O_2 发挥着两种作用:短时间内浓度适度增高可成为启动抗逆机制的信号物质,而作用时间过长则损害细胞成分^[13]。 O_3 对抗氧化酶活性的时序特征的影响,对今后的农业管理有一定的指导意义。同时从抗氧化酶活性的时间序列特征可看出,每种酶对胁迫的响应时间不同。

3.2 小麦抗氧化酶活性的变化是 O_3 胁迫的累积效应。初期较小剂量的 O_3 短时间作用,植物产生大量活性氧和羟自由基,当植物体内活性氧累积超过正常水平,CAT、POD、SOD 等抗氧化酶由于底物浓度增加而被诱导加速生物合成,SOD 清除 $O_2^{\cdot-}$ 和 $OH^{\cdot}$ 形成 H_2O_2 ,CAT、POD 催化 H_2O_2 形成 H_2O ^[14]。这些酶活性增加,机体内抗氧化系统被诱导而加强生理活动,是对臭氧等逆境的胁迫响应,加速了活性氧清除,有效地阻止了它在体内过多地累积^[15]。当 O_3 浓度较大或作用时间较长时,胁迫加重,活性氧在体内过多地累积不能有效清除,引发了不可逆伤害,酶活性显著降低^[16]。 O_3 胁迫的消减存在一定的阈剂量,不同生理期由于生理抗性的差异, O_3 阈值不同。自由基学说认为,植物衰老过程是活性氧大量积累与代谢失调的过程^[17]。抗氧化酶活性变化与小麦衰老密切相关。在衰老过程中,活性氧大量产生,植物体可通过抗氧化保护酶系统中的 SOD、POD、APX 和 CAT 来调节活性氧产生与清除之间的平衡。SOD 是防御自由基危害的第一道防线,可以将过量的超氧自由基歧化,形成毒性较弱的 H_2O_2 和分子氧;而 POD、APX 和 CAT 则可以清除过量的 H_2O_2 ,减轻过量自由基积累对植物的伤害。SOD 活性迅速增加,这可能是植物抗氧化衰老的一种防卫响应,随着活性氧物质的增加,防御系统进一步启动,POD、APX 和 CAT 等保护酶活性进一步升高,起到协助清除活性氧物质的作用。但是,随着衰老的不可逆转,整个防御系统遭到破坏,SOD、POD 和 CAT 的活性随之降低。 O_3 浓度升高,小麦抗氧化酶活性的变化是臭氧浓度-作用时间-叶片衰老三因素的交互作用。

3.3 不同酶对 O_3 的敏感性不同,低浓度 O_3 能诱导 APX 酶活性在整个生育期中升高,而高浓度 O_3 却没有这样的作用。POD 酶对 O_3 敏感,对胁迫响应的时间较早。 O_3 作用使 SOD 酶在抽穗期后出现不可逆性的极显著下降,SOD 酶可指示小麦抗性转变的关键期。CAT 酶对 O_3 敏感,活性变化幅度较大,是环境 O_3 污染的指示酶,但 CAT 酶能耐受的 O_3 浓度较高, O_3 作用阈较宽。植物在长期进化过程中都形成了自己独特的抗氧化机制,使得各种酶活性变化呈现出不一致性。

References:

- [1] Tausz M, Grulke N E, Wieser G. Defense and avoidance of ozone under global change. *Environmental Pollution*, 2007, 147(3): 525-531.
- [2] Forster P, Ramaswamy V, Artaxo P, Bernsten T, Betts R, Fahey D W, Haywood J, Lean J, Lowe D C, Myhre G, J, Nganga J, Prinn R, Raga G, Schulz M, van Dorland R. Changes in atmospheric constituents and in radiative forcing//Solomon S, Qin D, Manning M, Chen Z, Marquis M, Averyt K B, Tignor M, Miller H L, eds. *Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge, New York; Cambridge University Press, 2007.
- [3] Matyssek R, Wieser G, Nunn A J, Kozovits A R, Reiter IM, Heerd C, Winkler J B, Baumgarten M, Haberer K H, Grams T E E, Werner H, Fabian P, Havranek W M. Comparison between AOT40 and ozone uptake in forest trees of different species, age and site conditions. *Atmospheric Environment*, 2004, 38(15): 2271-2281.
- [4] Wang C Y, Bai Y M, Guo J P. Impacts of ozone concentration changes on crops and vegetables in China. *Acta Meteor Sinica*, 2004, 18(1): 105-116.
- [5] Agarwal S, Sairam RK, Srivastava G C, Meena R C. Changes in antioxidant enzymes activity and oxidative stress by abscisic acid and salicylic acid

- in wheat genotypes. *Biologia Plantarum*, 2005, 49(4): 541-550.
- [6] Yan P, Li J W, Zeng L Y. Effect of salt and drought stress on antioxidant enzymes activities and SOD isoenzymes of liquorice (*Glycyrrhiza uralensis* Fisch). *Plant Growth regulation* 2006, 49(2/3): 157-165.
- [7] Wang C Y. The structure and function comparison between OTC-1 open top chamber with the similar one in home and overseas. *Chinese Journal of Environmental Engineering*, 1996, 4(1): 50-57.
- [8] Zou Q. *Experimental Manual on Plant Physiology*. 2nd ed. Beijing: Chinese Agriculture Press, 2000: 159-170.
- [9] Carrasco-Rodriguez J L, Asensi-Fabado A, Del Valle-tascon S. Effects of tropospheric ozone on potato plants protected by the antioxidant diphenylamine (DPA). *Water, Air, and Soil Pollution*, 2005, 161(1/4): 299-312.
- [10] Iriti M, Faoro F. Oxidative stress, the paradigm of ozone toxicity in plants and animals. *Water Air Soil Pollut*, 2008, 187(1/4): 285-301.
- [11] Chappelka A H, Chevone B I. Tree responses to ozone // Lefohn A S, ed. *Surface Level Ozone Exposures and Their Effects on Vegetation*. Chelsea: Lewis Publishers, 1992: 271-324.
- [12] Zheng Q W, Wang X K, Xie J Q, Feng Z Z, Feng Z W, Ni X W, Ouyang Z Y. Effects of exogenous ascorbate acid on membrane protective system of in siturice leaves under O₃ stress. *Acta Ecologica Sinica*, 2006, 26(4): 1131-1137.
- [13] Oksanen E, Hikiö E, Sober J, Karnosky D F. Ozone-induced H₂O₂ accumulation in field-grown aspen and birch is linked to foliar ultrastructure and peroxisomal activity. *New Phytologist*, 2003, 161(3): 791-799.
- [14] Urszula M, Henryk U. The oxidants and antioxidant enzymes in tomato leaves treated with o-hydroxyethylrutin and infected with *Botrytis cinerea*. *European Journal of Plant Pathology*, 2000, 106: 657-665.
- [15] Jin M H, Feng Z W, Zhang F Z. Effects of ozone on membrane lipid peroxidation and antioxidant system of rice leaves. *Chinese Journal of Environmental Science*, 2000, 25(3): 1-5.
- [16] Mulpuri V R, Jennifer R K, Keith R D. Ozone: a tool for probing programmed cell death in plants. *Plant Molecular Biology*, 2000, 44: 345-358.
- [17] Guan JF, Shu HR. Relationship between senescence and active oxygen metabolism in apple fruits. *Acta Horticulturae Sinica*, 1996, 23(4): 326-328.

参考文献:

- [7] 王春乙. OTC-1 型开顶式气室的结构和性能与国内外同类气室的比较. *环境科学进展*, 1996, 4(1): 50-57.
- [8] 邹琦. *植物生理学实验指导*. 北京: 中国农业出版社, 2000: 159-170.
- [12] 郑启伟, 王效科, 谢居清, 冯兆忠, 冯宗炜, 倪雄伟, 欧阳志云. 外源抗坏血酸对臭氧胁迫下水稻叶片膜保护系统的影响. *生态学报*, 2006, 26(4): 1131-1137.
- [15] 金明红, 冯宗炜, 张福珠. 臭氧对水稻叶片膜脂过氧化和抗氧化系统的影响. *环境科学*, 2000, 25(3): 1-5.
- [17] 关军锋, 束怀瑞. 苹果果实衰老与活性氧代谢的关系. *园艺学报*, 1996, 23(4): 326-328.

ACTA ECOLOGICA SINICA Vol. 31, No. 14 July, 2011 (Semimonthly)

CONTENTS

The sensitivity of Xiamen's three industrial sectors to land use changes	HUANG Jing, CUI Shenghui, LI Fangyi, et al (3863)
Desertification and change of landscape pattern in the Source Region of Yellow River	 HU Guangyin, DONG Zhibao, LU Junfeng, et al (3872)
Comparison of ecological significance of landscape diversity changes in karst mountains: a case study of 4 typical karst area in Guizhou Province	 LUO Guangjie, LI Yangbing, WANG Shijie, et al (3882)
Analysis on urban heat island effect based on the dynamics of urban surface biophysical descriptors	 XU Hanqiu (3890)
Primary exploration on the ecological land use classification in Beijing	TANG Xiumei, CHEN Baiming, LU Qingbin, et al (3902)
Changes of spectral reflectance of <i>Pinus koraiensis</i> and <i>Abies nephrolepis</i> along altitudinal gradients in Changbai Mountain	 FAN Xiuhua, LIU Weiguo, LU Wenmin, et al (3910)
Biomass allocation patterns and allometric models of <i>Abies nephrolepis</i> Maxim	 WANG Jinsong, ZHANG Chunyu, FAN Xiuhua, et al (3918)
Niche analysis of dominant species of macrobenthic community at a tidal flat of Yushan Island	 JIAO Haifeng, SHI Huixiong, YOU Zhongjie, et al (3928)
The influence of different food qualities on the energy budget and digestive tract morphology of Tree Sparrows <i>passer montanus</i>	 YANG Zhihong, SHAO Shuli (3937)
The response of ecosystem service values to ambient environment and its spatial scales in typical karst areas of northwest Guangxi, China	 ZHANG Mingyang, WANG Kelin, LIU Huiyu, et al (3947)
Root morphology characteristics under alternate furrow irrigation	LI Caixia, SUN Jingsheng, ZHOU Xinguo, et al (3956)
Allelopathy of the root exudates from different resistant eggplants to verticillium wilt (<i>Verticillium dahliae</i> Kleb.)	 ZHOU Baoli, CHEN Zhixia, DU Liang, et al (3964)
Biological cycle and accumulation of lanthanum in the forage-mushroom-soil system	 WENG Boqi, JIANG Zhaowei, WANG Yixiang, et al (3973)
Evaluation of soil loss and transportation load of adsorption N and P in Poyang Lake watershed	 YU Jinxiang, ZHENG Bofu, LIU Yafei, et al (3980)
Effects of soil resource availabilities on vertical distribution and dynamics of fine roots in a <i>Caragana korshinskii</i> plantation	 SHI Jianwei, WANG Mengben, CHEN Jianwen, et al (3990)
Effects of soil salinization on ammonia volatilization characteristics of urea and urea phosphate	 LIANG Fei, TIAN Changyan (3999)
Distribution of marine bacteria and their environmental factors in Xiangshan Bay	 YANG Jifang, WANG Haili, CHEN Fusheng, et al (4007)
Concentration of O ₃ at the atmospheric surface affects the changes characters of antioxidant enzyme activities in <i>Triticum aestivum</i>	 WU Fangfang, ZHENG Youfei, WU Rongjun, et al (4019)
Effects of inhibitor and safener on enzyme activity and phenanthrene metabolism in root of tall fescue	 GONG Shuaishuai, HAN Jin, GAO Yanzheng, et al (4027)
Screening of highly-effective rhizobial strains on Alfalfa (<i>Medicago polymorpha</i>) in soil	 LIU Xiaoyun, GUO Zhenguo, LI Qiaoxian, et al (4034)
Geochemical evolution processes of soil major elements in the forest-dominated Jinshui River Basin, the upper Hanjiang River	 HE Wenming, ZHOU Jie, ZHANG Changsheng, et al (4042)
Integrating geographic features and weather data for methodology of rasterizing spring maize growth stages	 LIU Qin, YAN Changrong, MEI Xurong, et al (4056)
A model for predicting flowering date and external quality of cut tulip in solar greenhouse	 LI Gang, CHEN Yaru, DAI Jianfeng, et al (4062)
Moisture effect analysis of pumpkin and oil sunflower intercropping in semi-arid area of northwest Hebei Province	 HUANG Wei, ZHANG Junhua, LI Wenhong, et al (4072)
Review and Monograph	
Theoretical backgrounds and recent advances in avian molecular phylogeography	DONG Lu, ZHANG Yanyun (4082)
A review on spatial attributes of nature reserves and optimal site-selection methods	WANG Yicheng (4094)
Human activities are the principle cause of biotic homogenization	CHEN Guoqi, QIANG Sheng (4107)
Factors influencing the occurrence of <i>Ophiocordyceps sinensis</i>	ZHANG Guren, YU Junfeng, WU Guangguo, et al (4117)
Molecular detection of diversity of methanogens and methanotrophs in natural wetland soil	SHE Chenxing, TONG Chuan (4126)
Scientific Note	
Soil quality assessment of continuous cropping cotton fields for different years in a typical oasis in the upper reaches of the Tarim River	GONG Lu, ZHANG Haifeng, LÜ Guanghui, et al (4136)
Dynamics of microbial biomass during litter decomposition in the alpine forest	 ZHOU Xiaoqing, WU Fuzhong, YANG Wanqin, et al (4144)
The aerodynamic roughness length of biological soil crusts: a case study of Gurbantunggut Desert	 WANG Xueqin, ZHANG Yuanming, ZHANG Weimin, et al (4153)
Differences among population quantities and community structures of pests and their natural enemies in tea gardens of different altitudes	KE Shengbing, DANG Fenghua, BI Shoudong, et al (4161)

2009 年度生物学科总被引频次和影响因子前 10 名期刊★

(源于 2010 年版 CSTPCD 数据库)

排序 Order	期刊 Journal	总被引频次 Total citation	排序 Order	期刊 Journal	影响因子 Impact factor
1	生态学报	11764	1	生态学报	1.812
2	应用生态学报	9430	2	植物生态学报	1.771
3	植物生态学报	4384	3	应用生态学报	1.733
4	西北植物学报	4177	4	生物多样性	1.553
5	生态学杂志	4048	5	生态学杂志	1.396
6	植物生理学通讯	3362	6	西北植物学报	0.986
7	JOURNAL OF INTEGRATIVE PLANT BIOLOGY	3327	7	兽类学报	0.894
8	MOLECULAR PLANT	1788	8	CELL RESEARCH	0.873
9	水生生物学报	1773	9	植物学报	0.841
10	遗传学报	1667	10	植物研究	0.809

★《生态学报》2009 年在核心版的 1964 种科技期刊排序中总被引频次 11764 次,全国排名第 1;影响因子 1.812,全国排名第 14;第 1—9 届连续 9 年入围中国百种杰出学术期刊;中国精品科技期刊

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 31 卷 第 14 期 (2011 年 7 月)

ACTA ECOLOGICA SINICA
(Semimonthly, Started in 1981)
Vol. 31 No. 14 2011

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