

ISSN 1000-0933
CN 11-2031/Q

生态学报

Acta Ecologica Sinica



第31卷 第23期 Vol.31 No.23 **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 23 期

2011 年 12 月 (半月刊)

目 次

不同海拔高度高寒草甸光能利用效率的遥感模拟·····	付 刚,周宇庭,沈振西,等 (6989)
天山雪岭云杉大气花粉含量对气温变化的响应·····	潘燕芳,阎 顺,穆桂金,等 (6999)
春季季风转换期间孟加拉湾的初级生产力·····	刘华雪,柯志新,宋星宇,等 (7007)
降水量对川西北高寒草甸牦牛粪分解速率的影响 ·····	吴新卫,李国勇,孙书存 (7013)
基于 SOFM 网络对黄土高原森林生态系统的养分循环分类研究·····	陈 凯,刘增文,李 俊,等 (7022)
不同油松种源光合和荧光参数对水分胁迫的响应特征 ·····	王 琰,陈建文,狄晓艳 (7031)
盐生境下硅对坪用高羊茅生物学特性的影响 ·····	刘慧霞,郭兴华,郭正刚 (7039)
高温胁迫对不同种源希蒙得木叶片生理特性的影响·····	黄激激,张念念,胡庭兴,等 (7047)
黄土高原水土保持林对土壤水分的影响 ·····	张建军,李慧敏,徐佳佳 (7056)
青杨雌雄群体沿海拔梯度的分布特征·····	王志峰,胥 晓,李霄峰,等 (7067)
大亚湾西北部春季大型底栖动物群落特征·····	杜飞雁,林 钦,贾晓平,等 (7075)
湛江港湾浮游桡足类群落结构的季节变化和影响因素·····	张才学,龚玉艳,王学锋,等 (7086)
台湾海峡鲈鱼种群遗传结构·····	张丽艳,苏永全,王航俊,等 (7097)
洱海入湖河流苴河下游氮磷季节性变化特征及主要影响因素·····	于 超,储金宇,白晓华,等 (7104)
转基因鱼试验湖泊铜锈环棱螺种群动态及次级生产力·····	熊 晶,谢志才,蒋小明,等 (7112)
河口湿地植物活体-枯落物-土壤的碳氮磷生态化学计量特征 ·····	王维奇,徐玲琳,曾从盛,等 (7119)
EDTA 对铅锌尾矿改良土壤上玉米生长及铅锌累积特征的影响 ·····	王红新,胡 锋,许信旺,等 (7125)
不同包膜控释尿素对农田土壤氮挥发的影响·····	卢艳艳,宋付朋 (7133)
垄作栽培对高产田夏玉米光合特性及产量的影响·····	马 丽,李潮海,付 景,等 (7141)
DCE 不同施用时间对小麦生长期 N_2O 排放的影响 ·····	纪 洋,余 佳,马 静,等 (7151)
氮肥、钙肥和盐处理在冬小麦融冻胁迫适应中的生理调控作用 ·····	刘建芳,周瑞莲,赵 梅,等 (7161)
东北有机及常规大豆对环境影响的生命周期评价 ·····	罗 燕,乔玉辉,吴文良 (7170)
土壤施硒对烤烟生理指标的影响·····	许自成,邵惠芳,孙曙光,等 (7179)
不同种植方式对花生田间小气候效应和产量的影响·····	宋 伟,赵长星,王月福,等 (7188)
西花蓟马的快速冷驯化及其生态学代价·····	李鸿波,史 亮,王建军,等 (7196)
温度对麦长管蚜体色变化的影响·····	邓明明,高欢欢,李 丹,等 (7203)
不同番茄材料对 B 型烟粉虱个体发育和繁殖能力的影响 ·····	高建昌,郭广君,国艳梅,等 (7211)
基于生态系统受扰动程度评价的白洋淀生态需水研究·····	陈 贺,杨 盈,于世伟,等 (7218)
两种典型养鸡模式的能值分析 ·····	胡秋红,张力小,王长波 (7227)
四种十八碳脂肪酸抑藻时-效关系分析的数学模型设计 ·····	何宗祥,张庭廷 (7235)
流沙湾海草床重金属富集特征·····	许战州,朱艾嘉,蔡伟叙,等 (7244)
基于 QuickBird 的城市建筑景观格局梯度分析 ·····	张培峰,胡远满,熊在平,等 (7251)
景观空间异质性及城市化关联——以江苏省沿江地区为例·····	车前进,曹有挥,于 露,等 (7261)
基于 CVM 的太湖湿地生态功能恢复居民支付能力与支付意愿相关研究·····	于文金,谢 剑,邹欣庆 (7271)
专论与综述	
北冰洋海域微食物环研究进展·····	何剑锋,崔世开,张 芳,等 (7279)
城市绿地的生态环境效应研究进展·····	苏泳娴,黄光庆,陈修治,等 (7287)
城市地表灰尘中重金属的来源、暴露特征及其环境效应 ·····	方凤满,林跃胜,王海东,等 (7301)
研究简报	
三峡库区杉木马尾松混交林土壤 C、N 空间特征 ·····	林英华,汪来发,田晓堃,等 (7311)
广州小斑螟发生与环境因子的关系·····	刘文爱,范航清 (7320)

期刊基本参数:CN 11-2031/Q * 1981 * m * 16 * 336 * zh * P * ¥ 70.00 * 1510 * 39 * 2011-12



封面图说:黄河的宁夏段属于中国的半荒漠地区,这里气候干燥、降水极少(250mm 以下)、植被缺乏、物理风化强烈、风力作用强劲、其蒸发量超过降水量数十倍。人们从黄河中提水引水灌溉土地,就近形成了荒漠中的绿洲。有水就有生命,有水就有绿色。这种独特的条件形成了人与沙较量的生态关系——不是人逼沙退就是沙逼人退。

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

刘建芳, 周瑞莲, 赵梅, 赵彦宏, 王艳芳. 氮肥、钙肥和盐处理在冬小麦融冻胁迫适应中的生理调控作用. 生态学报, 2011, 31(23): 7161-7169.

Liu J F, Zhou R L, Zhao M, Zhao Y H, Wang Y F. The role of the fertilizing with nitrogen, calcium and sodium chloride in winter wheat leaves adaptation to freezing-thaw stress. Acta Ecologica Sinica, 2011, 31(23): 7161-7169.

氮肥、钙肥和盐处理在冬小麦融冻胁迫适应中的生理调控作用

刘建芳, 周瑞莲*, 赵梅, 赵彦宏, 王艳芳

(鲁东大学生命科学学院, 烟台 264025)

摘要: 采用盆栽法种植冬小麦(烟农 19 号), 在出苗 7 d 后分别用氮肥(60 mmol/L NH_4CO_3)、钙肥(100 mmol/L CaCl_2) 和 NaCl (100 mmol/L) 处理, 生长 30 d 后开始冻融处理(15℃, 0℃, -15℃, 0℃, 15℃ 各处理 3h)。结果表明, 在融冻和冻融胁迫过程中冬小麦叶片细胞膜透性变化和膜脂过氧化程度与温度变化呈显著负相关($R = -0.89^{**}$, $R = -0.85^{**}$)。与对照相比, 经氮肥、钙肥和盐处理的冬小麦叶片细胞膜透性和丙二醛含量较低, 而 SOD、CAT 和 POD 活力均较高, 这表明施肥能降低细胞膜脂过氧化作用, 提高细胞膜抗氧化能力。但不同肥料和盐处理在冬小麦融冻胁迫中对渗透调节物质的调节作用存在差异。施氮肥使冬小麦叶片脯氨酸和可溶性蛋白质含量分别高于对照 44.3% 和 23.6%, 可溶性糖含量低于对照(-17.3%); 而钙肥和盐处理却使冬小麦叶片可溶性糖含量高于对照(57.5% 和 37.1%)。研究表明, 氮肥通过调节氮代谢提高脯氨酸和蛋白质含量, 钙肥通过促进糖代谢提高可溶性糖含量。因此, 冬季给冬小麦幼苗施一定的混合肥, 不仅可促使植物细胞积累较多的渗透调节物质防止细胞结冰, 激活体内保护酶系统防止细胞膜脂过氧化, 而且施肥还可促使来年春季幼苗的快速返青健壮生长。通过合理施肥改善植物的代谢提高作物的抗融冻能力, 这可能是目前投资少, 见效快的有效途径。

关键词: 融冻胁迫; 抗氧化酶; 渗透调节物质; 膜脂过氧化

The role of the fertilizing with nitrogen, calcium and sodium chloride in winter wheat leaves adaptation to freezing-thaw stress

LIU Jianfang, ZHOU Ruilian*, ZHAO Mei, ZHAO Yanhong, WANG Yanfang

School of Life Science, Ludong University, Yantai 264025, China

Abstract: Warmer winters and extreme climate fluctuations induced by increasing global temperatures result in freeze-thaw cycle stress. Helping winter wheat cope with this stress is a key to maintaining stable agricultural development. The goal of this study is to reveal the role of different fertilizer applications in enhancing winter wheat tolerance to freeze-thaw as evidenced by physiological and biochemical parameters.

In late fall, winter wheat was sown in pots and grown for 7 days, then fertilized with either nitrogen (60 mmol/L NH_4CO_3), calcium (100 mmol/L CaCl_2) or salt (100 mmol/L NaCl) for 30 days or given no fertilizer (control). After 30 days, seedlings were transferred to growth-chambers and subjected to a freeze-thaw cycle using a regimen of 3 hours at each of 15℃, 0℃, -15℃, 0℃, and 15℃. When the temperature decreased from 15℃ to -15℃, the leaves froze and membrane permeability increased by 62.3% and lipid peroxidation product by 40%. When the temperature was increased from -15℃ to 15℃, the leaves thawed and membrane permeability and lipid peroxidation declined. The changes in membrane permeability and lipid peroxidation of winter wheat leaves exhibited a significant negative correlation ($R = -0.89^{**}$, $R = -0.85^{**}$) with thaw-freeze stress. The activity of catalase (CAT) increased with the temperature drop

基金项目: 国家 973 课题资助(2009CB421303); 国家自然科学基金资助项目(30972422)

收稿日期: 2010-10-26; **修订日期:** 2011-04-11

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: zhourl@hotmail.com

from 15°C to -15°C, but the activities of superoxide dismutase (SOD) and peroxidase (POD) were higher at 0°C.

However, compared to the controls, the membrane permeability and MDA content in the leaves of winter wheat treated with different fertilizers and salt were lower, but the activities of SOD, CAT and POD were higher, indicating that fertilizer application reduces membrane lipid peroxidation and enhances membrane antioxidant capacity. There were differences between nitrogen and calcium fertilizers and salt in regulation of osmolytes in the leaves of winter wheat under thaw-freeze-thaw stress. During thaw-freeze-thaw stress (temperature drop from 15°C to -15°C and increase from -15°C to 15°C), the leaves of winter wheat with N fertilizer had 44.3% higher proline and 23.6% higher soluble protein content but 17.3% lower soluble sugar content than controls. The leaves with calcium fertilizer had 57.5% higher soluble sugar content and leaves with NaCl had 37.1% higher soluble sugar content than controls. This indicates that nitrogen fertilizer may be increasing proline and soluble protein content through improved nitrogen metabolism, and the increase in soluble sugar content with calcium fertilizer and salt may be through improved glucose metabolism.

This study suggests it may be efficient and cost-effective to provide winter wheat seedlings both kinds of fertilizers in winter. These fertilizers can not only increase several types of osmolytes to prevent formation of ice within plant cells but also enhance the activities of antioxidant enzymes to prevent membrane lipid peroxidation in response to freeze-thaw stress. The application of fertilizers in winter thus make seedlings more tolerant to freeze-thaw stress and strengthen growth the next spring.

Key Words: freeze-thaw; antioxidant enzyme; osmolytes; lipid peroxidation

在全球气候变暖条件下,冻融作用的扰动可能将进一步打破和改变作物已有的生活模式,进而通过改变其代谢过程使体内正常的代谢循环受抑制,有毒有害物质积累致作物死亡。因此,冻融作用下生物的生命特征和适应机制研究将成为生命科学和地球科学交叉的一个前沿领域^[1]。而在全球气候变暖导致的暖冬和极端天气频繁出现情况下,首当其冲受害的作物就是冬小麦,越冬时交替冻融造成冬小麦严重减产已受到世界农业科学家的关注^[2]。因此,提高冬小麦的抗冻性不仅关系到冬小麦产量和农业的可持续发展,而且还关系到冬小麦产粮区的分布和扩建。目前提高冬小麦抗冻性有两条途径:转基因技术和改善农业耕作措施。前者耗时,投入大,见效慢;后者省时,简捷,易推广,见效快。施肥是常用的农业措施,关于施肥与作物产量关系的研究较多。施氮肥可提高植物叶片叶绿素含量、代谢酶活力和净光合速率等使作物产量增加^[3];施氮肥还可通过提高小麦氮化合物含量而使籽粒蛋白质含量及其组分含量、干面筋含量均提高^[4-5]。钙肥利于植物吸收养分和水分,增强植物的抗逆能力,提高土壤 pH 值和改善土壤结构^[6-7]。低盐浓度 Na⁺可作为渗透调节物质维持植物体内渗透平衡^[8]。越来越多的研究表明施肥与作物的抗寒力成正相关。增施氮肥可降低植株电导率、提高叶绿素的含量、抑制叶绿素的分解、提高可溶性糖、脯氨酸的含量,从而提高植物抗寒性^[9]。研究发现,钙肥处理能维持低温胁迫下植株叶片较高的光合速率、1,5-二磷酸核酮糖羧化酶活性及叶绿素 a、b 与类胡萝卜素含量^[10],降低叶片细胞膜透性和丙二醛 (MDA) 含量,维持较高抗氧化酶活性 (SOD、CAT、POD)^[11],可溶性蛋白、热稳定蛋白、可溶性糖含量的提高在增强植株抗冻性方面起着重要的作用^[12]。上述研究表明,施氮肥和钙肥可提高 1 年生作物抵抗零度以上的低温,但施肥是否可提高冬性作物冬小麦抵御零度以下低温和冬季融冻—冻融胁迫,目前尚未见报道。本文采用盆栽人工模拟法,即在苗期对经不同肥料处理的冬小麦进行融冻—冻融胁迫处理,并在处理的过程中分别测定抗逆生理指标。通过对比不同肥料处理的冬小麦在融冻—冻融胁迫过程中抗逆生理指标变化,探讨施肥在提高冬小麦抗融冻—冻融胁迫的可行性,揭示肥料在冬小麦适应融冻胁迫中的生理调控作用,为未来采取合理的农业耕作措施改良提高冬性作物抗融冻能力提供理论依据。

1 试验材料与方法

1.1 实验材料

本研究选择烟台市农科院所选育的抗旱抗冻能力较强的冬小麦 (*Triticum aestivum*) 烟农 19 品种为研究

对象。

1.2 试验设计

试验于 2009 年冬季在山东烟台市鲁东大学生物院试验地进行。生物院试验地土壤为棕壤。试验取生物院试验地地表有机质含量高的 15 cm 处土壤。将过土壤筛(孔径 5 mm)的土壤完全混匀后分装入直径 20 cm 的塑料盆中,每盆 5 kg 土,每盆种籽粒饱满、均匀一致的种子 100 粒,共种 60 盆。待种子萌发生长 7 d 后将 60 盆分为 4 组开始处理,对照组(浇蒸馏水)、氮肥组(60 mmol/L NH_4CO_3)、钙肥组(100 mmol/L CaCl_2)、盐处理组(100 mmol/L NaCl)。本文中采用 NaCl 处理以期了解盐是否对冬小麦抗融冻胁迫有促进作用。每盆每隔两天浇水处理一次直到冻融胁迫处理。盆栽冬小麦置生物院内自然环境下生长 30 d。

融冻胁迫处理:将不同肥料和盐处理的冬小麦放到低温控制箱中,然后箱中温度依次调置到 15、0、-15、0、15℃。为了既能使叶片有充分时间结冻和解冻,又节省时间,每个温度处理 3 h。在每个温度处理 3 h 后随即采用随机取样法,从各处理的冬小麦中剪取叶片。一部分叶片立即测细胞膜透性,其余部分立刻用液氮固定用于渗透调节物质(脯氨酸、蛋白质、可溶性糖含量)、抗氧化酶(SOD、POD、CAT)活力和丙二醛(MDA)含量的分析,同时观察每一时期叶片形态变化。所有测定至少重复 5 次。

1.3 测定方法

1.3.1 细胞膜透性及丙二醛含量的测定

根据 Lutts 等^[13]方法并稍加修改的相对电导率法测定细胞膜透性,根据侯福林^[14]植物生理学实验教程测定丙二醛含量。

1.3.2 抗氧化酶活性的测定

酶的提取是在 4℃ 条件下进行,称取待测的样叶于预冷研钵中,加入酶提取液(pH 7.8 磷酸缓冲液),冰浴上研磨成匀浆,在 15000 r/min 4℃ 条件下离心 15 min,上清液用于酶的活力和丙二醛含量的测定。SOD 活性采用氮蓝四唑(NBT)光还原法测定^[15],以每克植物鲜重抑制 NBT 光化还原 50% 为一个酶活单位;POD 活性测定采用愈创木酚法^[16],以每克植物鲜重每分钟氧化 1 μmol 愈创木酚为一个酶活单位;CAT 活性测定采用过氧化氢—碘量法^[17],以每克植物鲜重每分钟分解 1 μmol H_2O_2 为一个酶活单位。

1.3.3 渗透调节物质含量的测定

磺基水杨酸法测定游离脯氨酸含量^[18]并稍加修改;考马斯亮蓝法测定可溶性蛋白质含量^[19];恩酮法测定可溶性糖含量^[19]。

1.4 数据处理

实验数据采用 3 个以上重复的平均值 $\pm$ 标准差(mean $\pm$ SD, standard deviation),用 SPSS 11.5 软件进行数据分析。

2 结果与分析

2.1 融冻胁迫过程中不同类型肥料处理的冬小麦叶片细胞膜透性和 MDA 含量变化

研究表明,随温度由 15℃ 降至 -15℃,叶片冻结,对照和处理组(氮肥、钙肥和盐处理)冬小麦叶片细胞膜透性和 MDA 含量增加,其中细胞膜透性平均增加 62.3%,MDA 含量平均增加 40%。但处理组叶片细胞膜透性和 MDA 含量均低于对照,而处理组间差异不显著($P>0.05$) (图 1)。在温度由 -15℃ 升至 15℃,叶片解冻,对照和处理组叶片细胞膜透性和 MDA 含量下降,且处理组均低于对照,差异显著($P<0.05$)。叶片解冻后(15℃)细胞膜透性略高于融冻胁迫前(15℃)的。结果表明,在融冻胁迫过程中冬小麦叶片细胞膜透性变化和膜脂过氧化程度与温度变化呈显著负相关($R=-0.89^{**}$, $R=-0.85^{**}$),不同肥料和盐处理均可抑制融冻胁迫过程中的膜脂过氧化减少细胞膜受损程度。

2.2 融冻胁迫过程中不同类型肥料处理的冬小麦叶片抗氧化酶活力的变化

本研究中 15℃ 为融化阶段,0℃ 为冰融交汇阶段,-15℃ 为冻结阶段。实验结果表明,随温度由 15℃ 降至 0℃,不同处理冬小麦叶片细胞中 SOD 活力快速增高达 52%,随温度继续下降至 -15℃ 叶片中 SOD 活力下降

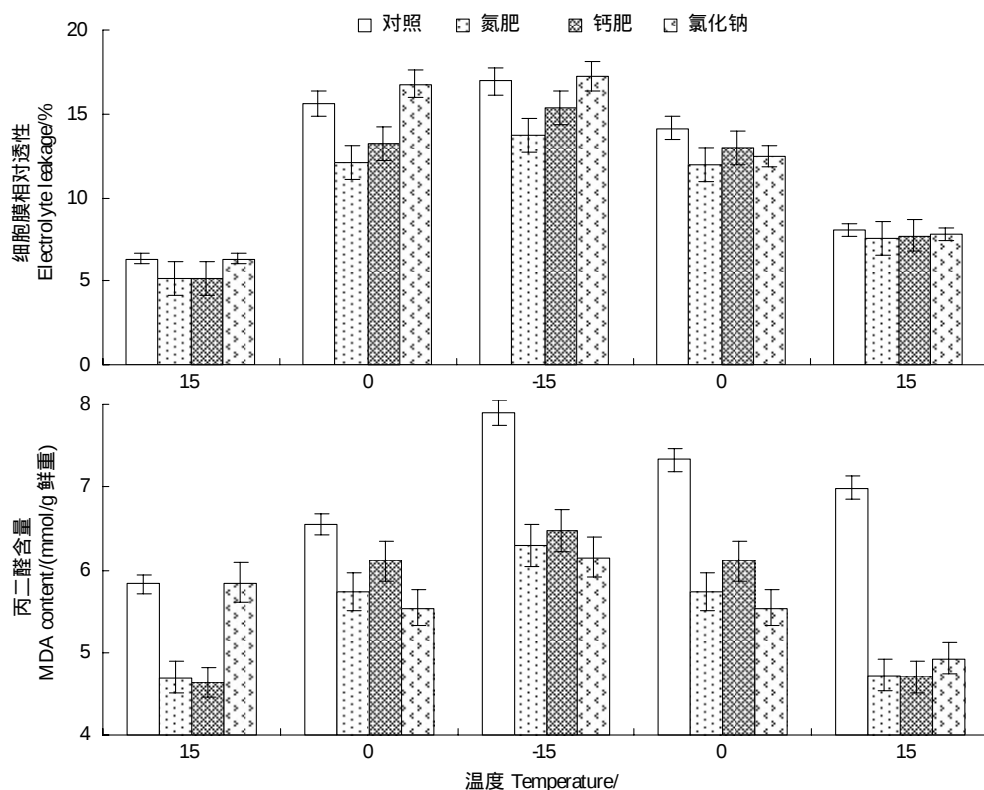


图1 融冻胁迫过程中冬小麦叶片细胞膜透性和MDA含量的变化

Fig. 1 Changes in electrolyte leakage and MDA content in the leaves of winter wheat during thaw-freeze stress

达48%,然后温度再升至15℃的冻融胁迫过程中,叶片SOD活力变化幅度不大。冬小麦叶片SOD活力在融冻胁迫(15℃降至-15℃)和冻融胁迫(-15℃升至15℃)过程中在0℃不同。0℃是细胞处于冰融交汇阶段叶片为半解冻状态。在融冻胁迫中(15℃降至0℃)叶片SOD活力上升是冬小麦细胞对第一次遇到结冰而做出的“应激反应”,以激活体内抗氧化防御系统,清除体内积累的毒素保护细胞膜,增强细胞膜韧性以适应融冻变化中细胞体积变化造成的机械损伤。而在冻融胁迫中(0℃升至15℃)细胞SOD活力保持稳定,这与细胞内具有很好的防御能力有关。

在融冻和冻融胁迫处理中,经氮肥和钙肥及盐处理的冬小麦叶片SOD活力分别比对照高15%、43%和27%,且处理间差异显著($P < 0.05$)。可见一定肥料的处理可提高冬小麦SOD活力,增强其抗冻性,尤其是钙肥。同时对照和处理组冬小麦叶片经融冻—冻融胁迫后(15℃)SOD活力明显高于处理前(15℃)。这表明融冻-冻融胁迫使冬小麦叶片抗氧化能力增强。

结果表明,对照和处理组冬小麦随温度由15℃降到-15℃时,叶片CAT活力增加,在温度由-15℃升到15℃时,叶片CAT活力仍保持增加趋势。但在融冻和冻融胁迫过程中,处理组冬小麦叶片CAT活力均比对照高,尤其是氮肥处理的冬小麦叶片CAT活力较对照高80%。可见,氮肥在提高冬小麦叶片CAT活性增强其抗氧化能力和抗冻力上具有重要生理调节作用。

在融冻-冻融胁迫过程中冬小麦叶片POD活性总体上呈“M”型变化趋势。温度从15℃降到0℃,对照和处理组冬小麦叶片POD活性迅速增加达152%,在温度-15℃时叶片POD活力最低。在温度从0℃升到15℃(冻融胁迫),叶片POD活力下降52%。对照组和处理组在融冻和冻融胁迫前后叶片POD活力差异不显著($P > 0.05$)。在融冻和冻融胁迫中,处理组冬小麦叶片POD活性均高于对照,尤其是氮肥处理。

2.3 融冻胁迫过程中不同类型肥料处理冬小麦叶片渗透调节物质的变化

对照和处理组冬小麦叶片脯氨酸含量在温度由15℃降至0℃(融冻过程)时增高,在-15℃叶片冻结时脯

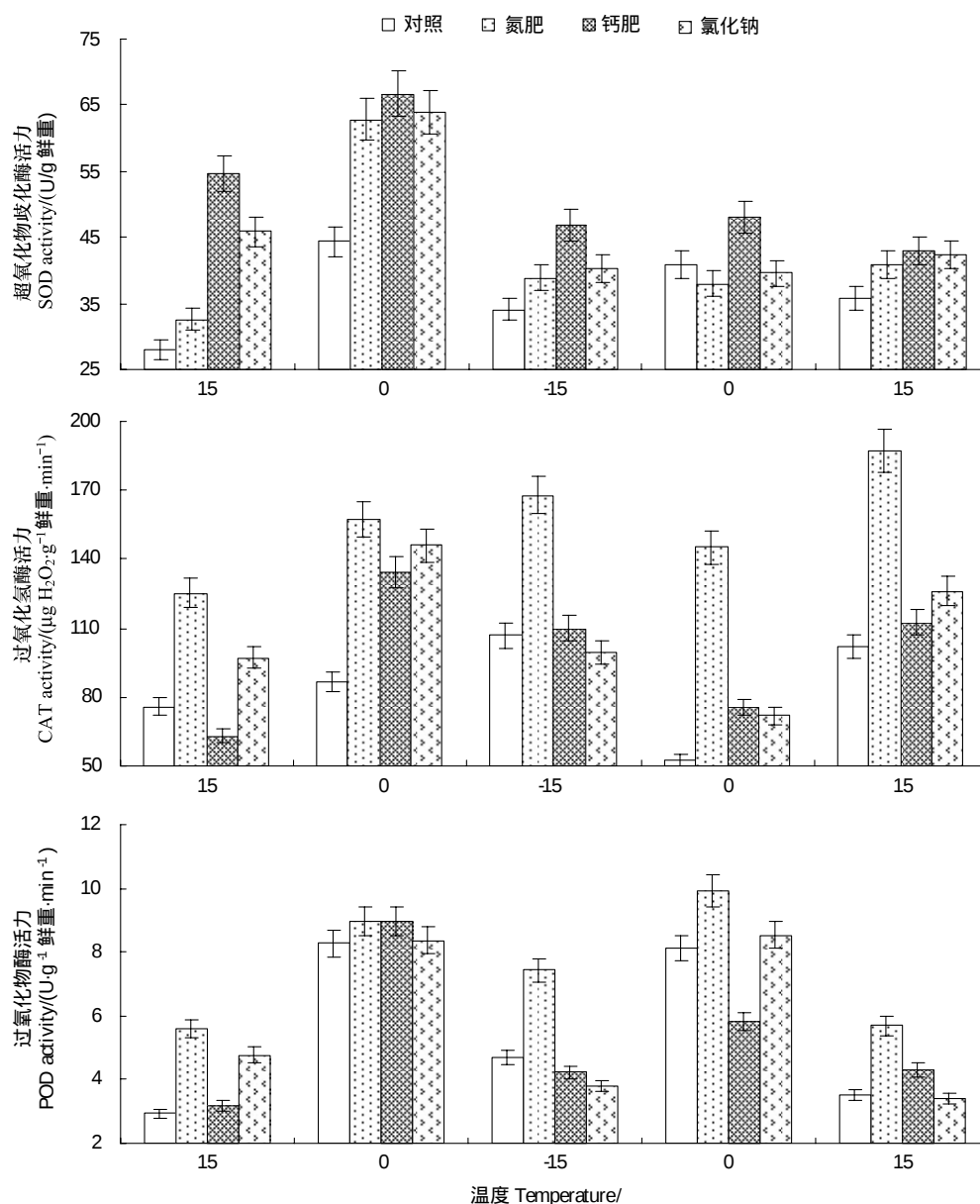


图2 融冻胁迫过程中冬小麦叶片 SOD、CAT 和 POD 活力的变化

Fig. 2 Changes in activities of superoxide dismutase (SOD), catalase (CAT) and peroxidase (POD) in the leaves of winter wheat during thaw-freeze stress

氨酸含量下降,在温度由 0℃ 升至 15℃ (冻融过程),脯氨酸含量再次下降(图 3)。值得注意的是在融冻和冻融胁迫过程中叶片在 0℃ 时脯氨酸含量最高,且处理组均明显高于对照,尤其是氮肥处理的冬小麦叶片脯氨酸含量始终高于对照和其它处理。这表明氮肥可通过提高脯氨酸含量增强细胞渗透调节能力而提高冬小麦的抗冻力。

在融冻和冻融胁迫中,叶片可溶性蛋白质含量的变化趋势与脯氨酸相反。叶片中可溶性蛋白质含量在温度由 15℃ 降至 -15℃,随叶片冻结而下降,在温度由 -15℃ 升至 15℃,叶片解冻而升高,对照和处理组平均增加 50%。而且不同处理间叶片蛋白质含量差异显著 ($P < 0.05$)。其中,氮肥处理的冬小麦叶片可溶性蛋白质含量始终高于对照,而钙肥和盐处理的均低于对照,这与融冻-冻融胁迫中脯氨酸含量变化相同。

对照和处理组冬小麦叶片可溶性糖含量在温度由 15℃ 降至 -15℃ 时下降(平均降幅为 16%),在温度由 -15℃ 升至 0℃ 而略有增加(平均增幅为 10%)。但融冻和冻融胁迫过程中不同处理间叶片可溶性糖含量差异

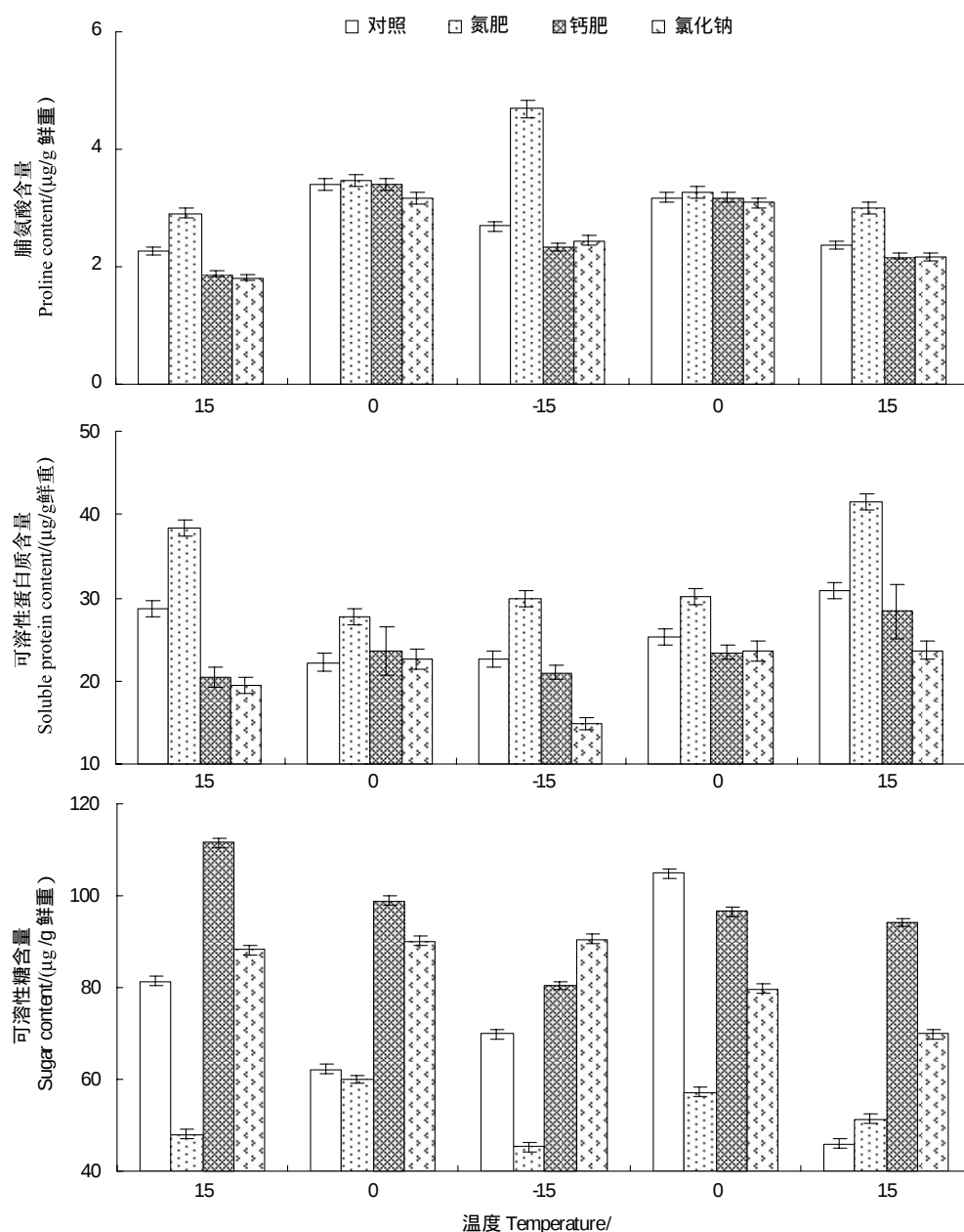


图3 融冻胁迫过程中冬小麦叶片脯氨酸、可溶性蛋白质和可溶性糖含量的变化

Fig. 3 Changes in the contents of proline, soluble protein and sugars in the leaves of winter wheat during thaw-freeze stress

显著 ($P < 0.05$)。钙肥和盐处理使冬小麦叶片可溶性糖含量增加且明显高于对照 (57% 和 37%), 而氮肥则低于对照 (17%)。这表明钙肥和盐处理可通过提高可溶性糖含量增强细胞渗透调节能力而提高冬小麦的抗融冻力。

3 结论与讨论

(1) 融冻胁迫过程中细胞膜透性和膜脂过氧化作用与抗氧化酶活力变化的关系

融冻阶段 (温度由 15°C 降至 0°C), 叶片开始结冰, 细胞处于冰融交汇阶段, 此时对照和处理组冬小麦叶片细胞膜透性平均增加 150%、MDA 增加 14%; CAT、SOD 和 POD 抗氧化酶活力平均分别增加 15%、41% 和 152%。冻融阶段 (-15°C 降至 15°C), 叶片完全解冻, 对照和处理组冬小麦叶片细胞膜和 MDA 平均下降 50% 和 21%, SOD 和 POD 活力平均下降 5% 和 52%, 而 CAT 活力增加 10%, 且抗氧化酶活力与温度下降成负相关。

表 1 冻融胁迫过程中不同肥料和盐处理冬小麦叶片抗氧化酶和渗透调节物质与温度的相关关系分析

Table 1 Analysis on correlation between activities of antioxidant enzymes, osmolyte contents in the leaves of winter wheat treated with the fertilizers of nitrogen and calcium and sodium chloride and temperature during freeze-thaw process

	对照 Control	氮肥 Nitrogen	钙肥 Calcium	氯化钠 NaCl
膜透性	-0.861 *	-0.921 **	-0.93 **	-0.875 *
CAT	-0.672	-0.399	-0.435	-0.086
SOD	-0.276	-0.178	-0.019	0.07
POD	-0.312	-0.574	-0.279	-0.178
脯氨酸	-0.492	-0.927 **	-0.399	-0.504
可溶性糖	-0.11	0.107	0.438	-0.28
蛋白质	0.823 *	0.757	0.444	0.714
丙二醛	-0.653	-0.938 **	-0.907 *	-0.888 *

+表示正相关, -表示负相关; *表示在 0.05 显著水平上, **表示在 0.01 显著水平上

在融冻胁迫循环中,融冻阶段叶片结冰,一方面引起细胞体积增大导致细胞代谢紊乱诱发产生活性氧自由基,加剧膜脂过氧化程度,引发细胞膜透性增大。冷冻引发细胞脱水、氧自由基累积导致膜系统损伤^[20-23]。另一方面,细胞结冰诱发积累的氧自由基激活了抗氧化酶系统,抑制了细胞膜脂过氧化。在冻融阶段,叶片由结冰固体状态转为半解冻状态,经历了融冻胁迫的细胞已具有较强的抗氧化能力(如 CAT 活力一直较高),故在冻融阶段细胞内膜脂过氧化程度下降。研究表明,冻融胁迫循环中叶片中抗氧化酶通过抑制细胞中膜脂过氧化,保护细胞膜完整性而在冻融胁迫中起重要作用。

同时研究发现,在融冻循环胁迫过程中,处理组冬小麦叶片细胞膜透性和 MDA 含量均低于对照,而抗氧化酶活力均高于对照,如 SOD 和 CAT。说明不同肥料和低浓度盐中的矿物离子均可通过激活细胞中的抗氧化酶系统,抑制细胞膜脂过氧化,保护细胞膜的完整性从而提高了冬小麦抗冻融胁迫的能力。因此,在入冬适量增施肥料可快速激活细胞抗氧化酶系统而提高冬小麦对融冻胁迫的适应能力。

(2) 融冻胁迫过程中细胞膜透性和膜脂过氧化作用与渗透调节物质的关系

一些研究发现,脯氨酸既可以作为低温保护物质缓解因冰冻脱水造成的渗透胁迫^[24],它还具有抗氧化作用清除氧自由基防止膜脂过氧化,稳定细胞膜结构^[25]。本研究发现,融冻阶段(15℃降至 0℃),叶片结冰,对照和处理组冬小麦叶片细胞膜透性和 MDA 含量增加的同时伴随着脯氨酸含量增加。冻融阶段(温度由-15℃升至 15℃),叶片完全解冻,细胞膜透性和 MDA 含量下降,脯氨酸含量也下降。在整个融冻—冻融胁迫过程中叶片脯氨酸含量的变化与温度成负相关。在融冻胁迫中细胞中积累的脯氨酸不仅作为渗透调节物防止细胞结冰失水,而且还参与抑制细胞膜脂过氧化作用。

同时本研究还发现在融冻—冻融胁迫期间,与对照相比,施氮肥使冬小麦叶片脯氨酸和可溶性蛋白质含量增加(增幅 44.3% 和 23.6%),可溶性糖含量降低(降幅-17.3%);而钙肥和盐处理却使冬小麦叶片脯氨酸和蛋白质含量降低(降幅-26.1%, -14.1%),可溶性糖含量增加(增幅 57.5% 和 37.1%)。研究表明,不同肥料在提高细胞抗冻能力上的生理调节作用不同。一些研究发现给大豆子叶供 N 素能提高子叶中蛋白质含量^[26]。施氮肥使冬小麦叶片积累较多的氮素加速氮代谢提高脯氨酸和蛋白质含量,但却因碳素不足而抑制糖代谢速率降低了可溶性糖的含量。而钙肥和盐处理可能通过矿物离子促进碳代谢合成较多的可溶性糖,降低冰点,缓冲原生质过度脱水,保持原生质体不遇凝固,增加细胞渗透压维护融冻—冻融胁迫中细胞膜的完整性和抗冻力^[27]。

综上所述,冬小麦叶片的抗冻能力依赖于细胞中的抗氧化酶有效地抑制膜脂过氧化保护细胞膜的完整性,细胞中积累的渗透调节物防止细胞结冰和机械拉伤。而施肥可明显提高在融冻胁迫中冬小麦叶片中抗氧化酶活力,降低细胞膜脂过氧化,维护细胞膜完整性。但不同肥料对冬小麦叶片细胞代谢的调节作用不同导致积累的渗透调节物种类各异。施氮肥使冬小麦叶片积累较多的氮素加速氮代谢提高脯氨酸和蛋白质含量,但却因碳素不足而抑制糖代谢速率降低了可溶性糖的含量。而钙肥和盐处理可能通过矿物离子促进碳代谢

合成较多的可溶性糖。为此在冬季为冬性作物施一定的混合肥不仅是目前提高作物抗融冻能力,投资少,见效快的有效途径,也是维持农业高产稳产的关键。

References:

- [1] Yang S Z, Jin H J. Physiological and ecological effects of freezing and thawing processes on microorganisms in seasonally froze ground and in permafrost. *Acta Ecologica Sinica*, 2008, 28(10): 5065-5074.
- [2] Wang Y H, Li J C, Wei J Z, Yin J, Qu H J, Wang C Y, Zhi S J. Analysis of the type of freezing damage to wheat and its lethal reason. *Journal of Anhui Agricultural Sciences*, 2006, 34(12): 2789-2791.
- [3] Yan F X, Wang K C, Luo Q Y, Luo C H. Effects of $\text{NH}_4^+\text{-N}/\text{NO}_3^-\text{-N}$ ratio in applied supplementary fertilizer on nitrogen metabolism, photosynthesis and growth of *Isatis indigotica*. *China Journal of Chinese Materia Medica*, 2009, 34(16): 2039-2042.
- [4] Jang H Z, Yang B J, Tan F Q, Zhang H Q, Ren Z L. Effect of different nitrogen fertilizer amount and application period on wheat quality. *Journal of Triticeae Crops*, 2009, 29(4): 658-662.
- [5] Zhang A P, Yang S Q, Yang S J, Li Y H, Liu R L, Yang Z L. Effect of N rates on yield of spring wheat fertilizer N recovery and N balance. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2009, 25(17): 137-142.
- [6] Jian L C, Wang H. Ca^{2+} Signaling in plant cell response and adaptation to low temperature, drought and salt stresses. *Chinese Bulletin of Botany*, 2008, 25(3): 255-267.
- [7] Jiang T H, Zhan X H, Xu Y C, Zhou L X, Zong L G. Roles of calcium in stress-tolerance of plants and its ecological significance. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2005, 16(5): 971-976.
- [8] Tian X Y, Liu Y J, Guo Y C. Effects of salt stress on Na^+ , K^+ , proline, soluble sugar and protein of NHC. *Pratacultural Science*, 2008, 25(10): 34-38.
- [9] Yuan X J, Zhang T T, Liu J X. Effect of nitrogen fertilizer on chilling resistance and green period of *elemochloa ophiuroides*. *Pratacul Turral Science*, 2007, 24(12): 98-102.
- [10] You J H, Lu J M, Yang W J. Effects of Ca^{2+} on photosynthesis and related physiological indexes of wheat seedlings under low temperature stress. *Acta Agronomica Sinica*, 2002, 28(5): 693-696.
- [11] Yang C X, Li X L, Gao D S. Effect of Ca^{2+} on membrane lipid peroxidation and activity of protective enzymes in nectarine flowers and young fruit under chilling stress. *Deciduous Fruits*, 2004, 36(6): 1-3.
- [12] Chen G L, Gao H B, Nie L C, Shang Q M, Liu Z X. Effect of calcium on growth and cold resistance of grafted eggplant seedlings. *Plant Nutrition and Fertilizer Science*, 2002, 8(4): 478-482.
- [13] Lutts S, Kinet J M, Bouharmont J. NaCl-induced senescence in leaves of rice (*Oryzasativa* L) cultivars differing in salinity resistance. *Annals of Botany*, 1996, 78(3): 389-398.
- [14] Hou F L. *Plant Physiology Experimental Course*. Beijing: Science Press, 2005: 91-91.
- [15] Sundar D, Perianayagay B, Reddy R A. Localization of antioxidant enzymes in the cellular compartments of sorghum leaves. *Plant Growth Regulation*, 2004, 44(2): 157-163.
- [16] Zhang Z L, Zai W Q. *The Experimental Guide for Plant Physiology*. Beijing: Higher Education Press, 2003: 123-276.
- [17] Drązkiewicz M, Skórzyńska-Polit E, Krupa Z. Copper-induced oxidative stress and antioxidant defence in *Arabidopsis thaliana*. *Biometals*, 2004, 17(4): 379-387.
- [18] Zhang Z A, Zhng M S, Wei R H. *The Experimental Guide for Plant Physiology*. Beijing: China Agricultural Science and Technology Press, 2004.
- [19] Zou Q, Zhao S J, Wang Z. *The Experimental Guide for Plant Physiology*. Beijing: China Agriculture Press, 2000: 189-190.
- [20] Uemura M, Joseph R A, Steponkus P L. Cold acclimation of *arabidopsis thaliana* (effect on plasma membrane lipid composition and freeze-induced lesions). *Plant Physiology*, 1995, 109(1): 15-30.
- [21] Li R Q, Wang J B. *Cells and Physiology of Plant Stress*. Wuhan: Wuhan University Press, 2002: 164-165.
- [22] Zhou R L, Zhao H L. Protecting enzyme system of herbage and its functions in the cold growing process in alpine and cold region. *Acta Botanica Boreali-Occidentalia Sinica*, 2002, 22(03): 566-573.
- [23] Ma Y X, Cai T J, Song L P, Yu X L. Changes in contents of MDA and osmoregulatory substances during snow cover for *Pyrola dahurica*. *Acta Ecologica Sinica*, 2007, 27(11): 4596-4602.
- [24] Vitémvás P, Prášil I T. WCS120 protein family and frost tolerance during cold acclimation, deacclimation and reacclimation of winter wheat. *Plant Physiology Biochemistry*, 2008, 46(11): 970-976.
- [25] Taschler D, Beikircher B, Neuner G. Frost resistance and ice nucleation in leaves of five woody timberline species measured in situ during shoot

expansion. *Tree Physiology*, 2004, 24(3): 331-337.

- [26] Zhou R L, Zhao H L, Yang S D, Westgate E M. Response of seed composition of soybean genotypes to over-supplying amino N. *Scientia Agricultura Sinica*, 2008, 41(10): 3033-3041.
- [27] Kamata T, Uemura M. Solute accumulation in heat seedlings during cold acclimation; contribution to increased freezing tolerance. *Cryo Letters*, 2004, 25(5): 311-322.

参考文献:

- [1] 杨思忠, 金会军. 冻融作用对冻土区微生物生理和生态的影响. *生态学报*, 2008, 28(10): 5065-5074.
- [2] 王永华, 李金才, 魏凤珍, 尹钧, 屈会娟, 王成雨, 郅胜军. 小麦冻害类型与小麦受冻致死原因分析. *安徽农业科学*, 2006, 34(12): 2789-2791.
- [3] 晏枫霞, 王康才, 罗庆云, 罗春红. 氮素形态对菰蓝氮代谢、光合作用及生长的影响. *中国中药杂志*, 2009, 34(16): 2039-2042.
- [4] 江洪芝, 晏本菊, 谭飞泉, 张怀琼, 任正隆. 氮肥施用量及施用时期对小麦品质性状的影响. *麦类作物学报*, 2009, 29(4): 658-662.
- [5] 张爱平, 杨世琦, 杨淑静, 李友宏, 刘汝亮, 杨正礼. 不同供氮水平对春小麦产量、氮肥利用率及氮平衡的影响. *中国农学通报*, 2009, 25(17): 137-142.
- [6] 简令成, 王红. Ca^{2+} 在植物细胞对逆境反应和适应中的调节作用. *植物学通报*. 2008, 25(3): 255-267.
- [7] 蒋廷惠, 占新华, 徐阳春, 周立祥, 宗良纲. 钙对植物抗逆能力的影响及其生态学意义. *应用生态学报*, 2005, 16(5): 971-976.
- [8] 田晓艳, 刘延吉, 郭迎春. 盐胁迫对 NHC 牧草 Na^+ 、 K^+ 、Pro、可溶性糖及可溶性蛋白的影响. *草业科学*, 2008, 25(10): 34-38.
- [9] 袁学军, 张婷婷, 刘建秀. 氮肥对假俭草抗寒性和青绿期影响的研究. *草业科学*, 2007, 24(12): 98-102.
- [10] 由继红, 陆静梅, 杨文杰. 钙对低温胁迫下小麦幼苗光合作用及相关生理指标的影响. *作物学报*, 2002, 28(5): 693-696.
- [11] 杨春祥, 李宪利, 高东升. 钙对低温胁迫下油桃花果膜脂过氧化和保护酶活性的影响. *落叶果树*, 2004, 36(6): 1-3.
- [12] 陈贵林, 高洪波, 乜兰春, 尚庆茂, 刘中笑. 钙对茄子嫁接苗生长和抗冷性的影响. *植物营养与肥料学报*, 2002, 8(4): 478-482.
- [14] 侯福林. 植物生理学实验教程. 北京: 科学出版社, 2005: 91-91.
- [16] 张志良, 瞿伟菁. 植物生理学实验指导. 北京: 高等教育出版社, 2003: 123-276.
- [18] 张治安, 张美善, 蔚荣海. 植物生理学实验指导. 北京: 中国农业科学技术出版社, 2004.
- [19] 邹琦, 赵世杰, 王忠. 植物生理学实验指导. 北京: 中国农业出版社, 2000: 189-190.
- [21] 利容千, 王建波. 植物逆境细胞及生理学. 武汉: 武汉大学出版社, 2002: 164-165.
- [22] 周瑞莲, 赵哈林. 高寒山区草本植物的保护酶系统及其在低温生长中的作用. *西北植物学报*, 2002, 22(3): 566-573.
- [23] 马玉心, 蔡体久, 宋丽萍, 喻晓丽. 兴安鹿蹄草 (*Pyrola dahurica* (H. Andr.) Kom.) 雪盖前后丙二醛及渗透调节物质含量的变化. *生态学报*, 2007, 27(11): 4596-4602.
- [26] 周瑞莲, 赵哈林, 杨树德. Westgate E M. 子叶供氮对不同基因型大豆种子组分的影响. *中国农业科学*, 2008, 41(10): 3033-3041.

ACTA ECOLOGICA SINICA Vol. 31, No. 23 December, 2011 (Semimonthly)
CONTENTS

Satellite-based modelling light use efficiency of alpine meadow along an altitudinal gradient	FU Gang, ZHOU Yuting, SHEN Zhenxi, et al (6989)
Changes in the concentrations of airborne <i>Picea schrenkiana</i> pollen in response to temperature changes in the Tianshan Mountain area	PAN Yanfang, YAN Shun, MU Guijin, et al (6999)
Primary production in the Bay of Bengal during spring intermonsoon period	LIU Huaxue, KE Zhixin, SONG Xingyu, et al (7007)
Effect of rainfall regimes on the decomposition rate of yak dung in an alpine meadow of northwest Sichuan Province, China	WU Xinwei, LI Guoyong, SUN Shucun (7013)
SOFM-based nutrient cycling classification of forest ecosystems in the Loess Plateau	CHEN Kai, LIU Zengwen, LI Jun, et al (7022)
Characterization of the responses of photosynthetic and chlorophyll fluorescence parameters to water stress in seedlings of six provenances of Chinese Pine (<i>Pinus tabulaeformis</i> Carr.)	WANG Yan, CHEN Jianwen, et al (7031)
Effect of silicon supply on Tall Fescue (<i>Festuca arundinacea</i>) growth under the salinization conditions	LIU Huixia, GUO Xinghua, GUO Zhenggang (7039)
Effects of high-temperature stress on physiological characteristics of leaves of <i>Simmondsia Chinensis</i> seedlings from different provenances	HUANG Weiwei, ZHANG Niannian, HU Tingxing, et al (7047)
Soil moisture dynamics of water and soil conservation forest on the Loess Plateau	ZHANG Jianjun, LI Huimin, XU Jiajia (7056)
The distribution of male and female <i>Populus cathayana</i> populations along an altitudinal gradient	WANG Zhifeng, XU Xiao, LI Xiaofeng, et al (7067)
Analysis on the characteristics of macrobenthic community in the North-west Daya Bay of South China Bay in spring	DU Feiyan, LIN Qin, JIA Xiaoping, et al (7075)
The effects of season and environmental factors on community structure of planktonic copepods in Zhanjiang Bay, China	ZHANG Caixue, GONG Yuyan, WANG Xuefeng, et al (7086)
Population genetic structure of <i>Pneumatophorus japonicus</i> in the Taiwan Strait	ZHANG Liyan, SU Yongquan, WANG Hangjun, et al (7097)
Seasonal variation of nitrogen and phosphorus in Miju River and Lake Erhai and influencing factors	YU Chao, CHU Jinyu, BAI Xiaohua, et al (7104)
Population dynamics and production of <i>Bellamya aeruginosa</i> (Reeve) (Mollusca: Viviparidae) in artificial lake for transgenic fish, Wuhan	XIONG Jing, XIE Zhicai, JIANG Xiaoming, et al (7112)
Carbon, nitrogen and phosphorus ecological stoichiometric ratios among live plant-litter-soil systems in estuarine wetland	WANG Weiqi, XU Linglin, ZENG Congsheng, et al (7119)
Effects of EDTA on growth and lead-zinc accumulation in maize seedlings grown in amendment substrates containing lead-zinc tailings and soil	WANG Hongxin, HU Feng, XU Xinwang, et al (7125)
Effects of different coated controlled-release urea on soil ammonia volatilization in farmland	LU Yanyan, SONG Fupeng (7133)
Effects of ridge planting on the photosynthetic characteristics and yield of summer maize in high-yield field	MA Li, LI Chaohai, FU Jing, et al (7141)
Effect of timing of DCD application on nitrous oxide emission during wheat growing period	JI Yang, YU Jia, MA Jing, et al (7151)
The role of the fertilizing with nitrogen, calcium and sodium chloride in winter wheat leaves adaptation to freezing-thaw stress	LIU Jianfang, ZHOU Ruilian, ZHAO Mei, et al (7161)
Environment impact assessment of organic and conventional soybean production with LCA method in China Northeast Plain	LUO Yan, QIAO Yuhui, WU Wenliang (7170)
Effects of selenium added to soil on physiological indexes in flue-cured tobacco	XU Zicheng, SHAO Huifang, SUN Shuguang, et al (7179)
Influence of different planting patterns on field microclimate effect and yield of peanut (<i>Arachis hypogaea</i> L.)	SONG Wei, ZHAO Changxing, WANG Yuefu, et al (7188)
Rapid cold hardening of Western flower thrips, <i>Frankliniella occidentalis</i> , and its ecological cost	LI Hongbo, SHI Liang, WANG Jianjun, et al (7196)

- Effects of temperature on body color in *Sitobion avenae* (F.) DENG Mingming, GAO Huanhuan, LI Dan, et al (7203)
- Development and reproduction of *Bemisia tabaci* biotype B on wild and cultivated tomato accessions
..... GAO Jianchang, GUO Guangjun, GUO Yanmei, et al (7211)
- Study on ecological water demand based on assessment of ecosystem disturbance degree in the Baiyangdian Wetland
..... CHEN He, YANG Ying, YU Shiwei, et al (7218)
- Emergy-based analysis of two chicken farming systems: a perspective of organic production model in China
..... HU Qiuhong, ZHANG Lixiao, WANG Changbo (7227)
- Mathematical model design of time-effect relationship analysis about the inhibition of four eighteen-carbon fatty acids on toxic
Microcystis aeruginosa HE Zongxiang, ZHANG Tingting (7235)
- Enrichment of heavy metals in the seagrass bed of Liusha Bay XU Zhanzhou, ZHU Aijia, CAI Weixu, et al (7244)
- A gradient analysis of urban architecture landscape pattern based on QuickBird imagery
..... ZHANG Peifeng, HU Yuanman, XIONG Zaiping, et al (7251)
- Landscape spatial heterogeneity is associated with urbanization: an example from Yangtze River in Jiangsu Province
..... CHE Qianjin, CAO Youhui, YU Lu, et al (7261)
- CVM for Taihu Lake based on ecological functions of wetlands restoration, and ability to pay and willingness to pay studies
..... YU Wenjin, XIE Jian, ZOU Xinqing (7271)
- Review and Monograph**
- Progress in research on the marine microbial loop in the Arctic Ocean HE Jianfeng, CUI Shikai, ZHANG Fang, et al (7279)
- Research progress in the eco-environmental effects of urban green spaces
..... SU Yongxian, HUANG Guangqing, CHEN Xiuzhi, et al (7287)
- Source, exposure characteristics and its environmental effect of heavy metals in urban surface dust
..... FANG Fengman, LIN Yuesheng, WANG Haidong, et al (7301)
- Scientific Note**
- Spatial structures of soilcarbon and nitrogen of China fir and Masson pine mixed forest in the Three Gorger Reservoir Areas
..... LIN Yinghua, WANG Laifa, TIAN Xiaokun, et al (7311)
- The relationship between *Oligochroa cantonella* Caradja and environmental factors LIU Wenai, FAN Hangqing (7320)

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 23 期 (2011 年 12 月)

ACTA ECOLOGICA SINICA
(Semimonthly, Started in 1981)
Vol. 31 No. 23 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@csppg.net	Distributed by	Science Press Add:16 Donghuangchenggen North Street, Beijing 100717, China Tel:(010)64034563 E-mail:journal@csppg.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