

ISSN 1000-0933
CN 11-2031/Q

生态学报

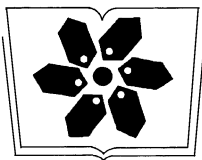
Acta Ecologica Sinica



第 32 卷 第 14 期 Vol.32 No.14 **2012**

中国生态学学会
中国科学院生态环境研究中心
科学出版社

主办
出版



中国科学院科学出版基金资助出版

生态学报

(SHENGTAI XUEBAO)

第 32 卷 第 14 期

2012 年 7 月 (半月刊)

目 次

海滨沙地砂引草对沙埋的生长和生理适应对策.....	王 进,周瑞莲,赵哈林,等 (4291)
外源 K ⁺ 和水杨酸在缓解融雪剂对油松幼苗生长抑制中的效应与机理 ...	张 营,李法云,严 霞,等 (4300)
钱塘江中游流域不同空间尺度环境因子对底栖动物群落的影响.....	张 勇,刘朔孺,于海燕,等 (4309)
贡嘎山东坡非飞行小型兽类物种多样性的垂直分布格局.....	吴永杰,杨奇森,夏 霖,等 (4318)
基于斑块的红树林空间演变机理分析方法.....	李春干,刘素青,范航清,等 (4329)
亚热带六种天然林树种细根养分异质性.....	熊德成,黄锦学,杨智杰,等 (4343)
浙江省植被 NDVI 动态及其对气候的响应	何 月,樊高峰,张小伟,等 (4352)
亚热带 6 种天然林树种细根呼吸异质性.....	郑金兴,熊德成,黄锦学,等 (4363)
亚高山/高山森林土壤有机层氨氧化细菌和氨氧化古菌丰度特征	王 奥,吴福忠,何振华,等 (4371)
耕作方式对紫色水稻土轻组有机碳的影响.....	张军科,江长胜,郝庆菊,等 (4379)
火烧对长期封育草地土壤碳固持效应的影响.....	何念鹏,韩兴国,于贵瑞,等 (4388)
闽江河口潮汐湿地二氧化碳和甲烷排放化学计量比.....	王维奇,曾从盛,仝 川,等 (4396)
2010 年夏季珠江口海域颗粒有机碳的分布特征及其来源	刘庆霞,黄小平,张 霞,等 (4403)
新疆冷泉沉积物葡萄糖利用细菌群落多样性的稳定同位素标记分析.....	楚 敏,王 芸,曾 军,等 (4413)
土壤微生物群落多样性解析法:从培养到非培养.....	刘国华,叶正芳,吴为中 (4421)
伊洛河河岸带生态系统草本植物功能群划分	郭屹立,卢训令,丁圣彦 (4434)
濒危植物蒙古扁桃不同地理种群遗传多样性的 ISSR 分析	张 杰,王 佳,李浩宇,等 (4443)
强潮区较高纬度移植红树植物秋茄的生理生态特性.....	郑春芳,仇建标,刘伟成,等 (4453)
冬季高温对白三叶越冬和适应春季“倒春寒”的影响	周瑞莲,赵 梅,王 进,等 (4462)
中亚热带细柄阿丁枫和米槠群落细根的生产和死亡动态.....	黄锦学,凌 华,杨智杰,等 (4472)
欧美杨水分利用效率相关基因 <i>PdEPF1</i> 的克隆及表达	郭 鹏,金 华,尹伟伦,等 (4481)
再力花地下部水浸提液对几种水生植物幼苗的化感作用.....	缪丽华,王 媛,高 岩,等 (4488)
无致病力青枯雷尔氏菌对烟草根系土壤微生物脂肪酸生态学特性的影响.....	郑雪芳,刘 波,蓝江林,等 (4496)
基于更新和同化策略相结合的遥感信息与水稻生长模型耦合技术的研究.....	王 航,朱 艳,马孟莉,等 (4505)
温度和体重对克氏双锯鱼仔鱼代谢率的影响.....	叶 乐,杨圣云,刘 敏,等 (4516)
夏季西南印度洋叶绿素 a 分布特征.....	洪丽莎,王春生,周亚东,等 (4525)
大沽排污河生态修复河道水质综合评价及生物毒性影响.....	王 敏,唐景春,朱文英,等 (4535)
李肖叶甲成虫数量及三维空间格局动态.....	汪文俊,林雪飞,邹运鼎,等 (4544)
专论与综述	
基于景观格局的城市热岛研究进展	陈爱莲,孙然好,陈利顶 (4553)
沉积物质量评价“三元法”及其在近海中的应用	吴 斌,宋金明,李学刚,等 (4566)
问题讨论	
中国餐厨垃圾处理的现状、问题和对策	胡新军,张 敏,余俊锋,等 (4575)
研究简报	
稻秸蓝藻混合厌氧发酵沼液及其化学物质对尖孢镰刀菌西瓜专化型生长的影响.....	刘爱民,徐双锁,蔡 欣,等 (4585)
佛山市农田生态系统的生态损益.....	叶延琼,章家恩,秦 钟,等 (4593)

期刊基本参数:CN 11-2031/Q * 1981 * m * 16 * 314 * zh * P * ¥70.00 * 1510 * 33 * 2012-07



封面图说: 噶龙山南坡的高山湖泊——喜马拉雅山南坡的噶龙山光照强烈、雨量充沛,尽管是海拔 4500 多米的高寒地区,山上的草甸依然泛着诱人的翠绿色,冰川和雪山的融水汇集在山梁的低洼处形成了一个又一个的高山湖泊,由于基底的差别和水深的不同,使得纯净清澈的冰雪融水在湖里呈现出不同的颜色,湖面或兰或绿,颜色或深或浅,犹如一块块通透透明的翡翠镶嵌在绿色的绒布之中。兰天下面,白云落在山间,通往墨脱的公路像丝带一样随随便便地缠绕着,一幅美丽的自然生态画卷就这样呈现在你的面前。

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

DOI: 10.5846/stxb201107030994

周瑞莲, 赵梅, 王进, 张萍, 朱露英, 赵彦宏. 冬季高温对白三叶越冬和适应春季“倒春寒”的影响. 生态学报, 2012, 32(14): 4462-4471.

Zhou R L, Zhao M, Wang J, Zhang P, Zhu L Y, Zhao Y H. The effect of artificial warming during winter on white clover (*Trifolium repens* Linn): overwintering and adaptation to coldness in late spring. Acta Ecologica Sinica, 2012, 32(14): 4462-4471.

冬季高温对白三叶越冬和适应春季“倒春寒”的影响

周瑞莲*, 赵梅, 王进, 张萍, 朱露英, 赵彦宏

(鲁东大学生命科学学院, 烟台 264025)

摘要:暖冬和春季“倒春寒”已严重影响着多年生植物生长发育。选择建植 3a 的白三叶 (*Trifolium repens* Linn) 为试验材料, 在入冬采用搭建塑料大棚模拟暖冬方法, 通过在建棚前、建棚后、冬季融冻胁迫、春季揭棚后和“倒春寒”过程中测定棚外和棚内白三叶植株高度和叶片抗逆生理指标的变化以揭示未来暖冬对白三叶生存和生态园林持续发展的影响。结果表明, 冬季棚外气温均温低于 0 °C, 白三叶叶片经历了冻融胁迫, 棚内温度高于 0 °C, 叶片始终未结冻。搭棚前, 棚内外试验地白三叶生长势无差异。搭棚后 100d 棚内白三叶株高是棚外的 3 倍, 但揭棚后 3 个月棚内外白三叶株高一致。另外, 冬季虽然棚内外白三叶叶片细胞膜透性、丙二醛 (MDA)、脯氨酸、可溶性糖含量和抗氧化酶活力 (SOD、CAT、POD) 均随气温下降而增高与气温变化呈负相关, 但棚外白三叶叶片上述生理指标均高于棚内。在春季揭棚后 2d, 冬季棚内生长的白三叶不仅叶片细胞膜透性和 MDA 含量急剧增加并高于揭棚前和棚外白三叶, 而且叶片 SOD 和 CAT 活性和可溶性糖和脯氨酸含量急剧增加也明显高于棚外白三叶。在春季“倒春寒”时, 冬季棚内外不同温度下生长的白三叶叶片细胞膜透性快速升高、脯氨酸和可溶性糖含量、POD 和 SOD 活性均上升, 两处理间无显著差异。研究表明, 冬季零度以上低温可延缓冬季白三叶绿叶期和单个叶片的寿命, 可使白三叶安全渡过春季“倒春寒”, 未来暖冬不会降低白三叶抗融冻能力和其返青生长势。而这与白三叶能快速应对环境温度变化, 通过调整生理代谢使叶片中快速积累渗透调节物和激活抗氧化酶防止氧自由基积累抑制膜脂过氧化, 保护细胞膜的完整性有直接关系。

关键词: 白三叶; 暖冬; 抗融冻性; 倒春寒; 生理机理

The effect of artificial warming during winter on white clover (*Trifolium repens* Linn): overwintering and adaptation to coldness in late spring

ZHOU Ruilian*, ZHAO Mei, WANG Jin, ZHANG Ping, ZHU Luying, ZHAO Yanhong

College of Life Sciences, Ludong University, Yantai 264025, China

Abstract: Perennial plants that normally experience dormancy during winter may be subjected to more cycles of freeze-thaw caused by warming winter. We explored the physiological mechanisms of adaptation of white clover, *Trifolium repens* Linn, to freeze-thaw stress. In late fall of 2009, uniform plots of white clover grown in a natural environment (NE) were covered with a plastic house (pH) to simulate the effect of a warmer winter or left uncovered (control). During the winter and following spring, growth capacity and physiological indices related to resistance to adverse environment were measured in leaves of white clover grown in both conditions. In the winter of 2009, the average temperature ranged from below zero (−10 °C) to 7 °C in the NE during which leaves experienced thawing-freezing-thawing-freezing, and above zero (from 1 °C to 7 °C) in the pH where leaves were never frozen. In late fall of 2009, all white clover was of uniform height. But in spring 2010, plants grown in the PH (26 cm) were 3 times taller than those in the NE (8 cm). This difference in height disappeared by June 2010. In winter, the relative membrane permeability, MDA (malondialdehyde), proline, and soluble

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

收稿日期: 2011-07-03; 修订日期: 2012-03-13

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

sugar contents, and the activities of catalase (CAT) and superoxide dismutase (SOD) and peroxidase (POD) increased with decreasing temperature in leaves of white clover grown in both NE and PH. The physiological index values in the white clover grown in the NE experiencing freezing-thaw stress was greater than those in leaves grown in PH (no freezing). In spring, two days after removing the plastic housing, the relative membrane permeability and content of MDA in the leaves of white clover rose quickly to 127% of values before removing the PH, and even higher than that in the leaves of white clover grown in the NE. Activities of SOD and CAT in white clover after removing the PH also increased quickly to 33% and 84.6% higher than in white clover grown in NE. In addition, during late spring coldness, plants in both treatments showed the same trend of increasing proline and soluble sugar content and activities of POD and SOD in response to lower temperature. Our results suggest that *Trifolium repens* has a high capacity to activate antioxidant enzyme activity to control lipid peroxidation and increase osmolytes in response to freezing temperature and that these mechanisms play a key role in surviving warm winter. While a warming winter delays the greening period, it does not retard white clover growth in spring, making white clover an excellent plant to withstand climate changes that include warmer winters.

Key Words: white clover; warming winter; resistance to freeze-thaw; late spring coldness; physiological mechanisms

一些研究表明,暖冬常因农作物得不到抗冻锻炼导致抗冻力降低,而在春季“倒春寒”中生长受阻、产量下降^[1-3]。因此暖冬和春季“倒春寒”已成为影响植物生长发育、威胁冬小麦产量和分布的重要限制因子^[4-5],这已受到世界农业科学家的关注^[5-7]。而白三叶是一种喜温暖湿润气候,抗逆性较强的植物,冬季可在-40℃低温条件下安全越冬^[8]。同时白三叶具有很长的保绿期,在沈阳可达230d左右,而成为目前广为应用的园林绿化种,在我国生态园林建设中起重要作用^[9]。虽然白三叶对季节性冬季冷冻具有很强的抵抗能力,但白三叶是否能应对未来暖冬非节律性变温引起的融冻型冻害而维持生存,及其维持生存的生理调控机制尚不清楚。而培育抗逆性更强的白三叶新品种是稳定生态园林、延长草坪寿命、减少建设投资的重要举措。而揭示白三叶抵御极端天气的生理生态幅和对未来暖冬引起的融冻型的适应机制则是抗冻育种的关键。

对白三叶抗冻生理机理研究发现,随着温度降低白三叶叶片电导率和MDA均呈升高趋势,SOD活性急剧增加^[10-11]。随着低温时间的延长和低温程度的加重,白三叶品种MDA积累速度也快速增加,但抗寒性强的品种比抗寒性弱的品种含量低^[12]。并且当温度降到-5℃时,叶片内SOD和POD两种保护酶活性会急剧升高,清除活性氧自由基,从而避免细胞膜伤害^[12-13]。在低温胁迫下,白三叶叶片中脯氨酸含量也随着温度的下降而急剧上升^[11,13]。在冰冻过程中,白三叶根部的蔗糖和脯氨酸含量都提高,对细胞进行渗透调节使细胞免受低温伤害^[14-15]。白三叶叶片、根和匍匐茎会积累大量的淀粉和可溶性糖,以抵抗冬季冷冻胁迫,维持自身生长的需要^[15]。

目前对白三叶抗冻力研究多是在人工控温条件下进行。这种采用短时快速降温的方法虽然可以了解白三叶对非节律性变温的响应,但很难真实的反应出白三叶对自然节律性温变的生理适应机理。因此,本文通过对烟台地区生长的白三叶,采用在冬季自然环境条件下搭建塑料大棚模拟暖冬的方法,通过在建棚前、建棚后、冬季融冻胁迫、春季揭棚后和“倒春寒”过程中,对白三叶植株高度、叶片细胞膜透性、MDA含量、抗氧化酶活力(SOD、POD、CAT)、渗透调节物含量(脯氨酸、可溶性糖)的分析,揭示冬季高温对白三叶越冬和适应春季“倒春寒”的影响,以及其抗冻和对春季“倒春寒”适应的生理调控机制。

1 材料与方法

1.1 试验区自然状况

试验在烟台市芝罘区鲁东大学校园绿化带上进行。鲁东大学地处东经119°34′—121°57′,北纬36°16′—38°23′,位于山东半岛东部。年平均气温11.8℃,最热月为8月(24.6℃),历年极端最高气温38.4℃。最冷月为1月,月平均气温-1.5℃,历年极端最低气温-13.8℃;冬季降雪频繁,地面常有积雪,最低气温-10℃左右。秋分过后,昼夜温差逐渐加大,幅度高于10℃以上,全年无霜期210d。

1.2 试验材料的处理

试验于 2009 年冬季和 2010 年春季实施,试验材料取自位于鲁东大学校园内一个绿化带,该绿化带于 2006 年建植。在绿化带上选取生长均匀的地块为样地,试验前将样地围起来做标记以保证试验期间不被干扰,同时剔除生长过弱和过强的白三叶及杂草以确保试验材料均匀一致。将选好的白三叶草地划分为两部分,一部分在自然条件下生长(低温处理-对照),另一部分白三叶草地用塑料布搭建大棚罩起来营造高温(高温处理-暖冬)。

搭棚:2009 年入冬日平均气温在零度以上变化(最高温/最低温 8℃/2℃),进入 12 月后,尤其在 12 月中旬以后,日均温降到接近零度(3℃/-2℃),并且在 12 月 18 日(-4℃/-6℃),12 月 27 日(0℃/-4℃)和 1 月 5 日(-4℃/-9℃)出现降雪,气温急剧下降,日最高温度降到零度以下。整个冬季气温呈波动式下降趋势,最高温度达 13℃,最低温度-10℃(图 1)。监测数据显示气温在 11 月底开始大幅度下降,因此试验处理选在 11 月 30 日,对样地白三叶一部分进行高温搭棚处理,以期达到模拟暖冬的效果。

揭棚:2010 年春季(3 月份)气温开始回升,最高气温 15℃,最低气温-6℃,气温呈波动式上升。随 3 月 17 日降雪,最低气温降至零度以下(7℃/-1℃),出现“倒春寒”现象。4 月份气温明显回升,日最低温在 0℃以上。为了让暖冬中生长的白三叶经历春季“倒春寒”,试验在 3 月 11 日给暖冬处理的白三叶揭棚。

1.3 取样和实验方法

1.3.1 取样

为了能检测白三叶在冬季融冻-冻融胁迫和春季“倒春寒”过程中叶片的生理变化。叶片样品的采集时间安排在冬季下雪前后和春季揭棚前后及春季“倒春寒”时期。叶片采集时间均在 8:00 进行。随机从白三叶种群中用尖刀减取植株中上部叶片,然后将叶片分为两组,一组用锡箔纸将叶片包裹立即放入液氮中固定,然后存放于-80℃的超低温冰箱中用于抗氧化物酶、渗透调节物质和 MDA 的测定,另一组带回实验室用于叶片细胞膜透性测定。

1.3.2 生长势和叶片细胞膜透性的测定

植株生长势的测定采用量尺测量自地面植株自然高度,每次每个处理至少测量 20 株。从带回到实验室的新鲜叶片中取 1 g,用电导率法测定叶片细胞膜相对透性^[16],每个处理重复 3 次以上。

1.3.3 酶液提取

酶的提取是在 4℃条件下进行的。从液氮固定的材料中随机称取一定量的样叶于预冷研钵中,加入酶提取液(磷酸缓冲液,pH 值=7.8),冰浴上研磨成匀浆,在 15000r/min 4℃条件下离心 15 min,上清液用于酶的测定。每个处理的酶液提取重复两次。

1.3.4 生理指标测定

采用硫代巴比妥酸(TBA)比色法测定丙二醛(MDA)含量^[17];采用氯化硝基四氮唑蓝(NBT)光还原法测定 SOD 活性^[18];采用愈创木酚法测定 POD 活性^[19];采用过氧化氢碘量法测定 CAT 活性^[20];采用茚三酮法测定游离脯氨酸^[19];采用蒽酮比色法测定可溶性糖含量^[19]。每个指标做 5 次重复。

1.4 数据处理

本研究所有数据均采用 Microsoft Excel2003 整理完成,并用 SPSS 11.5 软件对试验数据进行差异显著性分析。

2 结果与分析

2.1 冬春季气温变化

2009 年整个冬季气温呈波动式下降趋势,最高温度达 13℃,最低温度-10℃(图 1)。

2009 年冬季 11 月 28 日搭棚处理后,自然环境和棚内温度差异变大,尤其在冬季 12 月 5 日、12 月 27 日、1 月 5 日和 1-21 日降雪后,自然环境温度降至零度以下,但棚内温度则一直维持在零度以上。因而冬季自然环境中生长的白三叶叶片经历了结冻—解冻—结冻的融冻循环胁迫,其中 11 月 30 至 12 月 5 日,12 月 7 日

至 27 日, 1 月 1 日至 5 日为融冻阶段, 12 月 5 日至 7 日, 12 月 27 日至 1 月 1 日为冻融阶段。棚内白三叶叶片未经历融冻胁迫。2010 年春季揭棚前, 自然环境和棚内温度相差 5℃。揭棚后, 3 月 17 日降雪使棚内棚外白三叶经历了“倒春寒”。

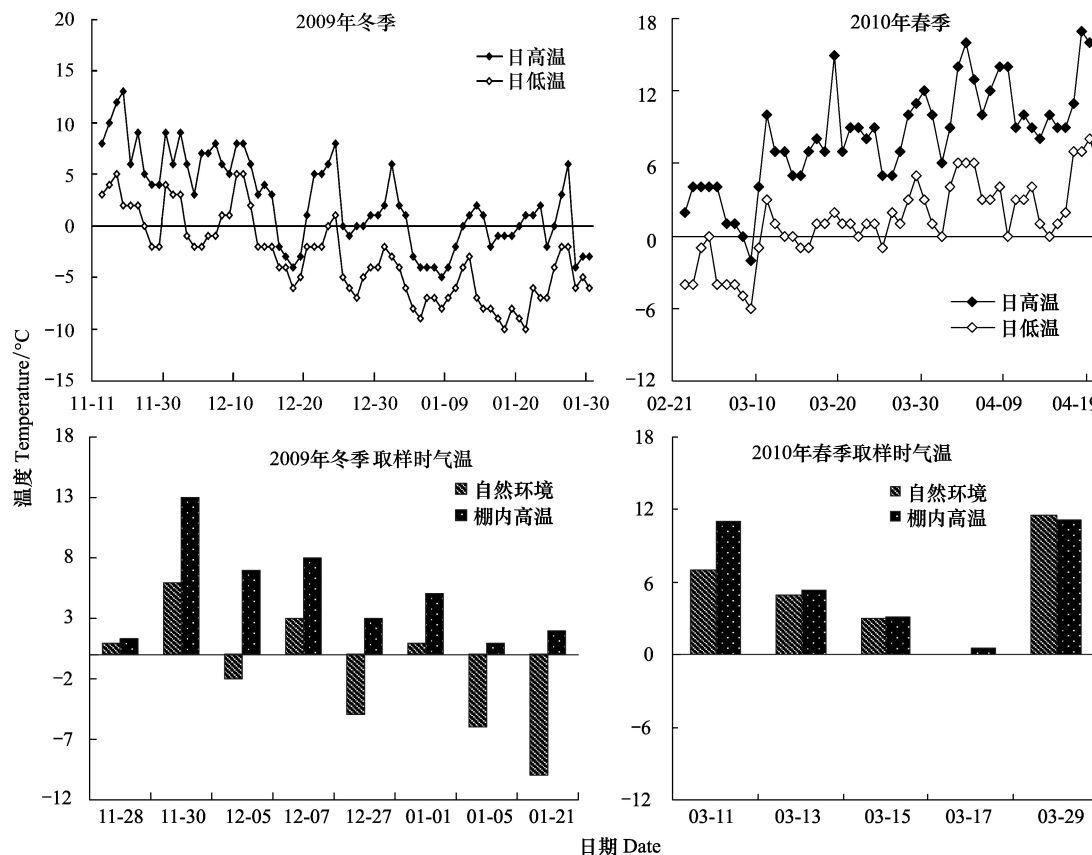


图 1 2009 年冬季和 2010 年春季日最高气温和最低气温及塑料大棚和室外气温比较

Fig. 1 Daily changes in maximum and minimum temperature during winter of 2009 and spring of 2010 and comparison of temperature in plastic house and natural environment

2.2 棚外和棚内冬春季白三叶生长势比较

2009 年冬季搭棚前试验地白三叶株高基本相同(表 1)。搭棚后 50d, 棚内白三叶株高净增长幅度(13.6cm)比棚外白三叶(1.9cm)高 11.7 cm。搭棚后约 100d, 棚内白三叶比棚外高 12.5cm。棚内白三叶叶大株高, 棚外白三叶叶小株矮。但揭棚后, 棚内白三叶在突然遇到降温, 一部分老叶开始发黄, 生长势下降(表 2)。揭棚后的两个月里, 冬季棚内生长的白三叶生长缓慢, 株高净增量(7.6 cm)仅是棚外白三叶生长量(17.5 cm)的 43%。但揭棚后 3 个月, 棚内外的白三叶株高几乎相等。

表 1 2009 年冬季棚外低温和棚内高温条件下生长的白三叶株高的比较/cm

Table 1 Comparison of plant height of white clovers grown in the field and plastic house in winter, 2009

处理方式 Treatment	时间(月/日)/ Time (month/ day)			
	11-28	12-15	12-30	01-15
棚外低温 Low temperature in Natural environment	5.3±0.4a	6.3±0.6b	6.9±0.5b	7.2±0.9b
棚内高温 High temperature in Plastic house	5.7±0.5a	10.7±0.8b	15.4±0.8c	19.3±0.6 d

棚外低温: 自然生境生长越冬; 棚内高温: 塑料大棚中越冬

2.3 冬春季白三叶叶片细胞膜透性和 MDA 含量的变化

冬季随气温波动式下降, 在降雪前棚内外生长的白三叶叶片细胞膜透性略呈下降趋势, 但变化较小(图

2)。但棚外白三叶叶片细胞膜透性高于棚内,且两者差异显著($P < 0.05$)。在降雪气温下降至零度以下(12月27日, -5°C),棚外白三叶叶片结冻(融冻阶段),叶片细胞膜透性增加128%。此时,虽然棚内温度下降,但因温度仍在零度以上(7°C),棚内白三叶叶片未结冻,叶片细胞膜透性仅增加24.9%。随雪后气温回升到 1°C (1月1日),棚外白三叶叶片解冻(冻融阶段),叶片细胞膜透性下降31.1%,由于棚内温度(8°C)变化不大,叶片细胞膜相对稳定。

表2 2010年春季揭棚后白三叶和棚外白三叶株高比较/cm

Table 2 Comparison of plant height of white clovers after removing plastic house in spring, and grown in the field, 2010

处理方式 Treatment	时间(月-日) Time (month-day)				
	03-11	03-14	04-14	05-14	06-14
棚外低温 Low temperature in Natural environment	$8.2 \pm 0.7a$	$8.7 \pm 0.9a$	$15.1 \pm 1.3b$	$25.7 \pm 2.0c$	$30.3 \pm 2.9d$
棚内高温 High temperature in Plastic house	$20.7 \pm 1.4a$	$21.3 \pm 2.1a$	$24.2 \pm 1.5b$	$28.3 \pm 2.4c$	$32.1 \pm 1.2d$

棚外低温: 自然生境生长越冬; 棚内高温: 塑料大棚中越冬, 棚内温度均在 0°C 以上

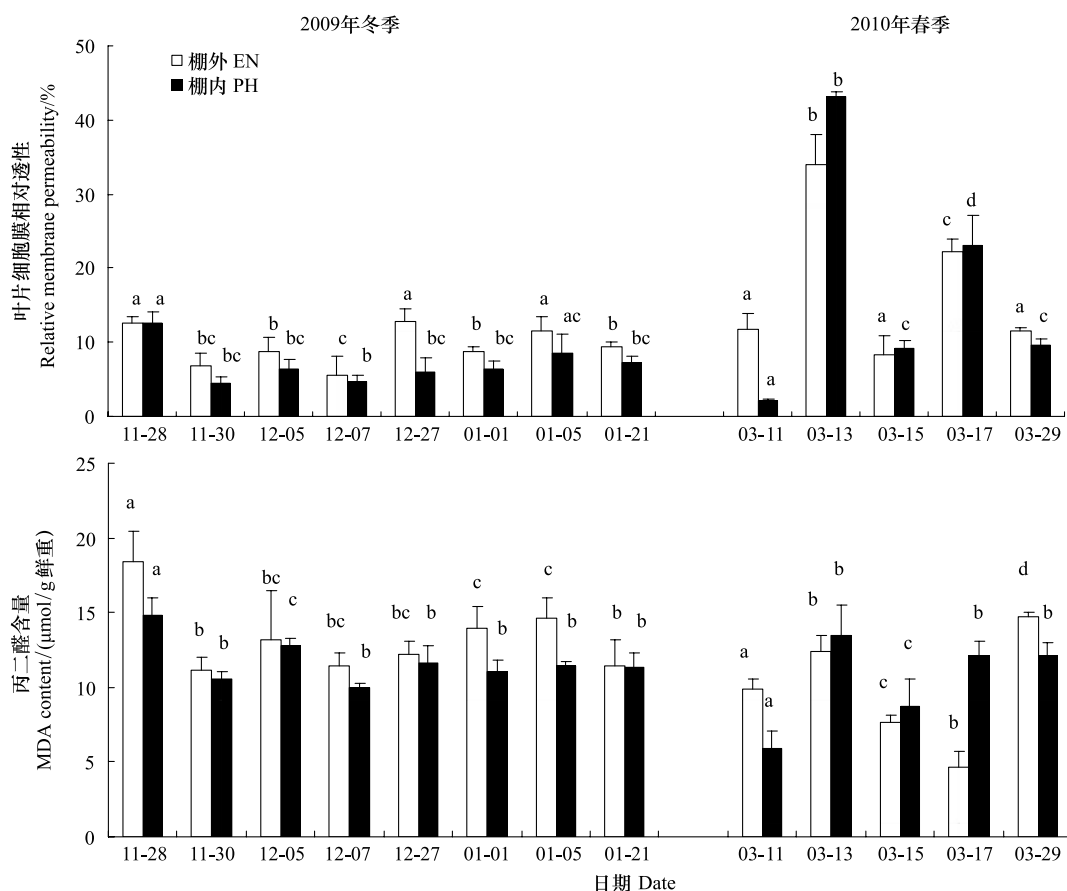


图2 冬季融冻胁迫和春季“倒春寒”过程中白三叶叶片细胞膜相对透性和MDA含量变化

Fig. 2 Changes in relative membrane permeability and MDA contents in the leaves of *Trifolium repens* during freezing-thaw cycle in winter and late spring cold in spring

在再次降雪气温下降至零度以下(1月5日, -10°C),棚外白三叶叶片冻结(融冻阶段),叶片细胞膜透性增加了32.3%。此时,棚内气温也急剧下降到 2°C ,叶片仍未结冰,叶片细胞膜透性仅升高了14.9%。冬季白三叶叶片细胞膜透性变化幅度与气温变化幅度成负相关($R^2 = -0.873$)。在春季,棚内白三叶叶片细胞膜透性在揭棚前比棚外白三叶低4.3倍;揭棚后2d,比揭棚前增加了18.4倍,比棚外还高26.93%;揭棚后4d,随着白三叶对外界环境的适应,叶片细胞膜透性急剧下降。而在春季“倒春寒”中,冬季棚内外不同温度下生

长的白三叶叶片细胞膜透性均快速升高,并且细胞膜透性几乎接近同一水平。结果表明,冬季在高温条件下保持较高生长势的白三叶,在应对春季“倒春寒”中叶片细胞膜仍表现出较高的柔韧性和弹性。

在整个冬季棚内棚外白三叶叶片 MDA 含量变化不十分显著(图 2)。棚外白三叶叶片 MDA 在融冻阶段略有升高,在冻融阶段略有下降。但棚内白三叶叶片 MDA 含量始终低于棚外白三叶。冬季棚内相对稳定的零上温度对白三叶低温胁迫强度较小可能是其叶片膜脂过氧化程度低的原因。棚内白三叶在春季揭棚前,叶片 MDA 含量比棚外白三叶低;揭棚后 2d 急剧升高,比揭棚前增加了 127%,比棚外的还高 8%;在春季“倒春寒”中,冬季棚内白三叶叶片 MDA 含量显著提高($P < 0.05$),而棚外白三叶叶片 MDA 含量则降低。

2.4 冬春季白三叶叶片渗透调节物含量的变化

冬季随气温波动式下降,棚内外白三叶叶片脯氨酸含量呈波动式上升,在融冻阶段增幅增大,在冻融阶段下降。但棚外白三叶叶片脯氨酸含量下降幅度大于棚内(图 3)。棚内白三叶叶片脯氨酸含量在整个冬季低于棚外白三叶,两者差异显著($P < 0.05$);在春季揭棚后,快速上升,并反超棚外白三叶 18.6%。在春季“倒春寒”中,冬季不同温度下生长的白三叶叶片均快速积累脯氨酸。在冬春季中白三叶叶片脯氨酸的积累与温度的变化成负相关($R^2 = -0.78$)。

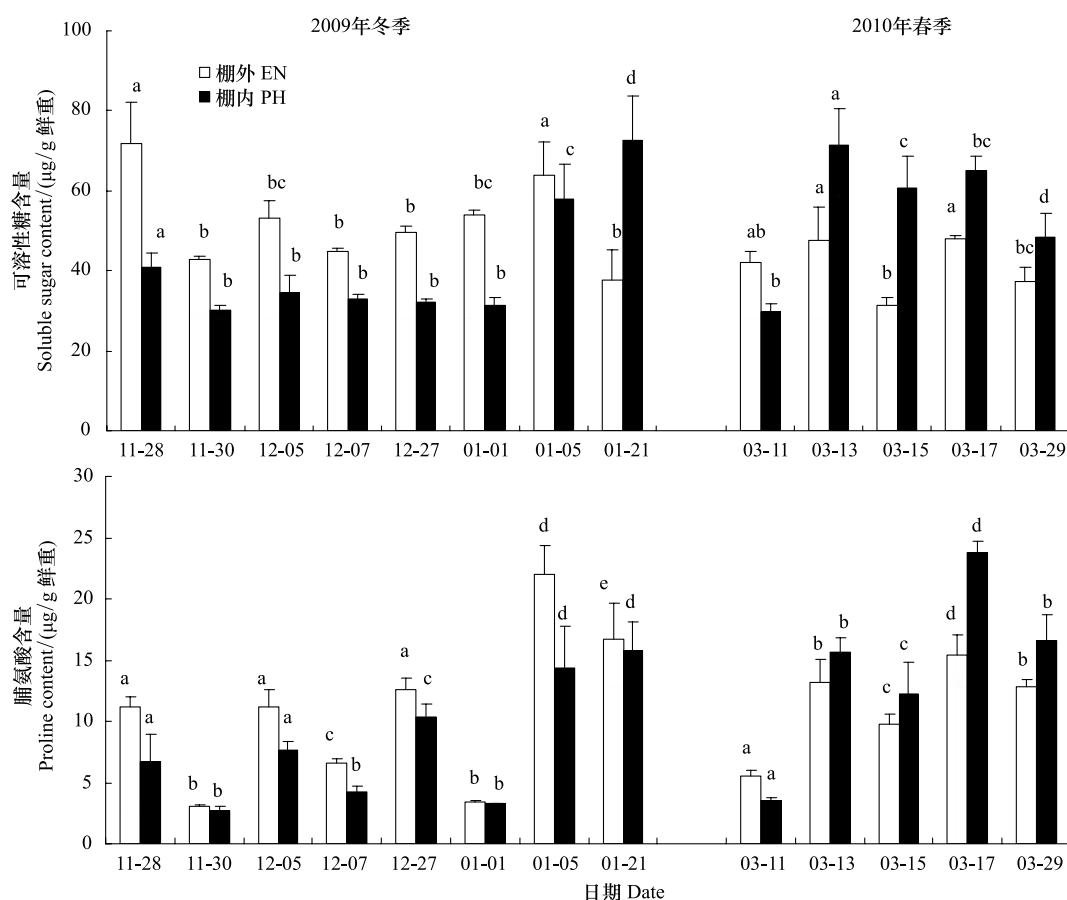


图 3 冬季融冻胁迫和春季“倒春寒”过程中白三叶叶片脯氨酸和可溶性糖含量的变化

Fig. 3 Changes in the contents of proline and soluble sugar in the leaves of *Trifolium repens* during freezing-thaw cycle in winter and late spring cold in spring

棚外白三叶叶片中可溶性糖含量随气温降低而略有增高,但变化差异不显著,但高于棚内白三叶(图 3)。棚内白三叶叶片可溶性糖在冬季几乎没有变化,但在春季揭棚后急剧增加,比揭棚前平均增加了 125%,并明显高于棚外白三叶。在春季“倒春寒”中,冬季不同温度下生长的白三叶叶片中可溶性糖含量均升高,随温度上升而下降。

2.5 冬春季白三叶叶片抗氧化酶活性的变化

2009 年入冬气温下降,棚内外白三叶叶片 SOD 活性都较低,例如,在融冻胁迫中(12 月 27 日, -5°C),棚外白三叶叶片结冰,叶片 SOD 活力增加 46.46%,棚内白三叶叶片未结冻,叶片 SOD 活性几乎没有变化,在冻融胁迫中(1 月 1 日),棚外白三叶叶片解冻,叶片 SOD 活性下降。冬季棚内白三叶叶片 SOD 活性变化不大。春季未揭棚时,棚外白三叶 SOD 活性比棚内高 177%,但揭棚后 2d,棚内白三叶叶片 SOD 活性快速增长,并比棚外白三叶高 33%。在春季“倒春寒”中,冬季生长在不同温度条件下的白三叶叶片 SOD 活性均上升,并随气温回升而下降,两者叶片 SOD 活力无显著差异。

冬季气温下降棚外白三叶叶片 POD 活性增高,棚内白三叶叶片 POD 活力呈下降趋势。在融冻阶段(12 月 7 日至 27 日, 1 月 1 日至 5 日),棚外白三叶叶片结冻,POD 活性分别升高了 26.43% 和 70.5%。此时,棚内白三叶叶片 POD 活力小幅增加。冬季棚内白三叶叶片中 POD 活性显著低于棚外白三叶($P < 0.05$)。春季揭棚前,棚内外白三叶叶片 POD 活力差异不显著。揭棚后,在遭遇“倒春寒”时,冬季在不同温度条件下生长的棚内外白三叶叶片 POD 活力分别增加了 83.3% 和 27.8%,在气温再次回升时(3 月 29 日),叶片 POD 活性都呈下降趋势。

搭棚前,搭棚处理地块上的白三叶和室外处理的白三叶叶片 CAT 活性一致。搭棚后,棚内外白三叶叶片 CAT 活力均随气温降低而呈波动式增高(图 4),均表现为在气温最低时叶片 CAT 活力最高。例如,在融冻阶段(12 月 7 日至 27 日, 1 月 1 日至 5 日)棚外叶片结冻,叶片 CAT 活力比冻前分别增加 37.3% 和 59.8%,在冻融阶段,叶片解冻,叶片 CAT 活性下降了 11.7%。棚外白三叶叶片中 CAT 活性明显比棚内白三叶高,两者差异显著($P < 0.05$)。但在春季揭棚后 2d,棚内白三叶叶片 CAT 活性急剧增加了 224%,且比棚外的高 84.6%。在春季“倒春寒”中,冬季在不同温度条件下生长的棚内外白三叶叶片 CAT 活性都呈下降趋势,在温度回升一段时间,两种处理下的白三叶叶片中 CAT 活性几乎相等。

3 讨论

暖冬常常使冬小麦得不到抗冻锻炼和疯长引起抗冻力下降,导致在春季经不起冷热交替胁迫而冻死^[1],这已受到世界农业科学家的关注^[3-6]。那么未来暖冬对在园林生态建设中起重要作用的白三叶生存是否构成严重威胁呢?本文在自然条件下模拟暖冬试验发现,冬季一直在 0°C 以上低温生活的棚内白三叶生长势明显高于一直在 0°C 以下低温生活的棚外白三叶。以至于在越冬后棚内白三叶叶大株高,棚外白三叶叶小株矮,前者株高(26 cm)是后者(8 cm)的 3 倍。另一方面,在春季,一直在 0°C 以下低温生长的棚外白三叶在春季最低温度上升至零度以上时,生长迅速恢复。而冬季一直在 0°C 以上温度生长的棚内白三叶在春季揭棚后突然面临生活温度下降,生长势迅速下降,部分老叶枯黄。但棚内外白三叶在春季“倒春寒”中均表现出较高的抗冻力,以至于在经历 3 个月生长后,棚内外白三叶株高无明显差异。研究表明,冬季 0°C 以下低温有利于提高白三叶抗冻力使其能安全越冬和渡过春季“倒春寒”,并随春季节律性升温而快速生长。但冬季 0°C 以上低温有利于延长白三叶生长和绿叶期,同时并不影响白三叶安全渡过春季“倒春寒”。白三叶对冬季和春季节律性和非节律性变温较强的适应能力与其植株上叶片具有程序替代性死亡的特点相关。一些研究也表明,植物在热胁迫和冷处理中细胞会发生程序性死亡,它是生物体在长期进化过程中形成的对生物一种保护机制,也是生物对环境的适应方式之一^[21-22]。在逆境条件下部分细胞的死亡可减少对有限营养成分的争夺,而且自身分解的产物可为周围细胞提供部分营养来源^[23]。因而暖冬中生长的叶片在春季冷热交替中程序替代性死亡即减少了对能量的消耗,又为新生叶萌动提供了营养,使白三叶总是保留对环境最适宜的叶片生存。白三叶叶片的这种程序替代死亡的特性是其生态幅广,抗融冻力强的物质基础和生长策略。

研究发现,逆境条件下细胞内积累的氧自由基是引起细胞膜脂过氧化导致细胞死亡的诱发因子,而抗氧化酶活力的增高与植物的抗逆性呈正相关^[24-25]。同时逆境下细胞中积累的渗透调节物质(脯氨酸、可溶性糖等),既可作为重要的渗透调节物质,还具有抗氧化作用,在抵御逆境伤害中发挥着重要的作用^[26-28]。

本研究还发现,冬季生活在棚外的白三叶叶片 MDA 含量、细胞膜透性、抗氧化酶活力及渗透调节物含

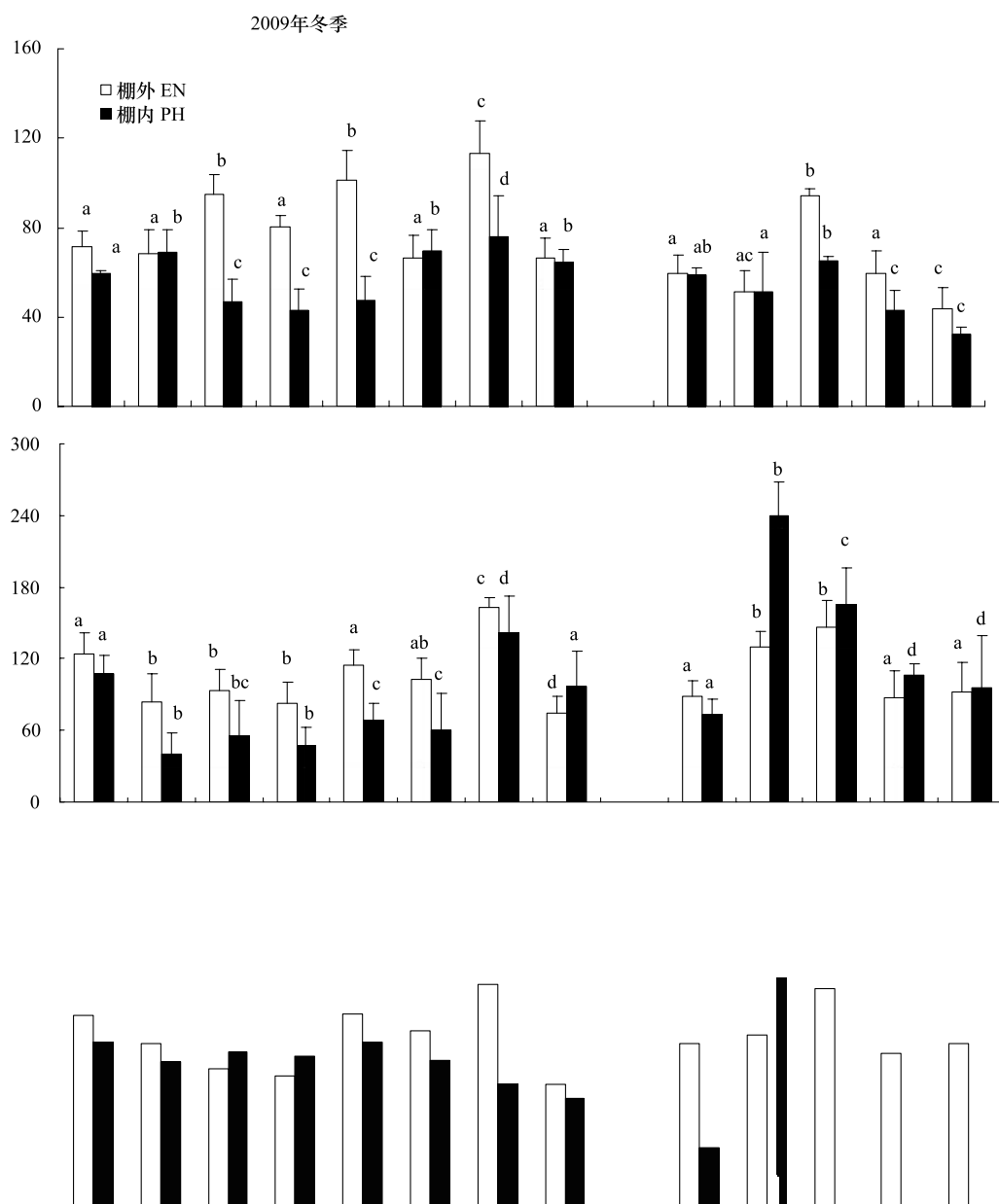


图4 冬季融冻胁迫和春季“倒春寒”时期白三叶抗氧化酶活性的变化

Fig. 4 Changes in activity of antioxidant enzymes (superoxide dismutase (SOD), peroxidase (POD), catalase (CAT)) in the leaves of *Trifolium repens* during freezing-thaw cycle in winter and late spring cold in spring

量均高于棚内白三叶。这与范玉贞和安莹在人工模拟条件下对白三叶的研究结果一致。发现,随温度降低叶片中 SOD 和 POD 活性增加^[12-13]。冬季棚外白三叶在多次降雪(下降到-10℃)中,叶片经历了融-冻-融-冻的冻融胁迫循环,细胞也经历了结冰体积增大,解冻细胞体积减小的反复伸缩作用,细胞膜结构遭到破坏,所以细胞膜透性较棚内白三叶高。在细胞膜伸缩过程中氧自由基的积累即可引起细胞膜脂过氧化导致膜脂过氧化产物(MDA)增多,又能激活抗氧化酶系统和促使脯氨酸积累,它们一起分解氧自由基防止膜脂过氧化。冬季棚内白三叶一直生活在零上低温,叶片没有经历冻结,叶片生理代谢稳定,膜脂过氧化程度低,细胞膜透性较低,同时抗氧化酶活力和脯氨酸含量均较低。因此,冬季白三叶叶片中膜脂过氧化程度和抗氧化酶活力等生理反应的强弱与温度变化幅度呈明显负相关。另外,本研究还发现,春季揭棚后,棚内白三叶在气温突然由

零上温度降至 0℃ 以下时,叶片细胞膜透性增加了 13.4 倍,MDA 含量急剧增加了 39.2%,同时叶片抗氧化酶系统被激活,SOD 和 CAT 活性增加,并高于棚外白三叶。这再次表明,白三叶叶片氧自由基引起的膜脂过氧化和抗氧化酶活力的增高与温度变化显负相关^[27-28]。而在揭棚后仅 4d,冬季棚内生长的白三叶叶片膜脂过氧化程度就迅速下降并和棚外的白三叶无明显差异。该研究表明,虽然冬季棚外白三叶叶片经历了融冻低温胁迫得到了冷适应使其抗膜脂过氧化能力和抗融冻能力提高,并能顺利越冬和抵御春季“倒春寒”,在春季快速生长。但是冬季没有经历融冻低温胁迫的棚内白三叶在春季“倒春寒”中也能通过快速提高抗氧化酶活力抑制膜脂过氧化维护细胞膜的完整性,同样能安全渡过“倒春寒”。可见,无论白三叶适应融冻胁迫循环,还是暖冬后适应“倒春寒”,叶片对低温的快速反应激活抗氧化酶系统,在维持细胞内氧自由基和清除剂间动态平衡和提高抗冻力上均有重要作用。

综上所述,冬季冷适应可提高白三叶抗融冻胁迫能力,适应春季“倒春寒”和维持春季旺盛生长的能力。但是暖冬可明显延长白三叶绿叶期和提高生长势,并不影响白三叶安全渡过春季“倒春寒”。在“倒春寒”中下部老叶程序性替代死亡是其维护再生生长和顺利渡过“倒春寒”的生长策略,而叶片中快速激活抗氧化酶系统和积累渗透调节物抑制膜脂过氧化维护细胞膜的完整性,是其持续生长的生理对策和生理调控机制。因此,春季适时给土壤增施一定量的复合肥不仅可弥补暖冬引起白三叶过渡生长而导致的能量不足,还能提高白三叶生长势、种群寿命和抗冻力,这将是园林绿化和畜牧业种植上一个有效的管理措施。

References:

- [1] Dong Y, Liu C, Wang Y H, Zhou D H. The effects of warm-winter on the winter wheat growth and development and its strategy. *Crops*, 2008 (4): 95-96.
- [2] Bergjord A K, Bonesmo H, Skjelvåg A O. Modelling the course of frost tolerance in winter wheat: I. Model development. *European Journal of Agronomy*, 2008, 28(3): 321-330.
- [3] Wang Y H, Li J C, Wei F 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.
- [4] Tveito O E, Bjørndal I, Skjelvåg A O, Aune B. A GIS-based agro-ecological decision system based on gridded climatology. *Meteorological Applications*, 2005, 12(1): 57-68.
- [5] Zhou L, Wang H J, Zhu H W. Simulation study on the impact of climate warming on production of winter wheat in Huang-Huai-Hai Plain of China. *Journal of PLA University of Science and Technology: Natural Science Edition*. 2003, 4(2): 76-82.
- [6] Dai L Q, Li C Q, Yao S R, Zhang W Z. Variation analysis of freezing injury on winter wheat under climate warming in Heibei province. *Chinese Journal of Agrometeorology*, 2010, 31(3): 467-471.
- [7] Jones P D, Moberg A. Hemispheric and large-scale surface air temperature variations: An extensive revision and an update to 2001. *Journal of Climate*, 2003, 16(2): 206-223.
- [8] Wang W Y, Li F Y. The investigation of several main pests and control of white clover lawn. *Garden Science and Technology*, 2009, (2): 23-24.
- [9] Luo Q. Study on the value of *Trifolium repense* for turf use. *Pratacultural Science*, 2006, 23(9): 123-125.
- [10] Fan Y Z. A study on physiological characters of trifolium repens linn in the condition of cold stress. *Journal of Cangzhou Teachers College*, 2009, 25(3): 94-120.
- [11] Zhao M, Zhou R L, Liu J F, Zhong X S. The relationship between freeze-tolerance and changes in activities of antioxidant enzymes and osmolyte content in the leaves of white clover during early winter freeze-thaw cycles. *Acta Ecologica Sinica*, 2011, 31(2): 306-315.
- [12] An Y, Chen Y J, Zhao W, Jin B H, Qi X H. The effect of low temperature on the peroxidization of cytomembrane and the activity of protective enzyme of white clover. *Grassland and Turf*, 2009, (3): 8-11.
- [13] Fan Y Z. The response of whiter clover (*Trifolium repens* L.) to low temperature. *Jiangsu Agricultural Sciences*, 2009, (1): 231-233.
- [14] Rosnes K, Junttila O, Ernsten A, Sandli N. Development of cold tolerance in white clover (*Trifolium repens* L.) in relation to carbohydrate and free amino acid content. *Acta Agriculturae Scandinavica, Section B - Soil and Plant Science*, 1993, 43(3): 151-155.
- [15] Guinchard M P, Robin C H, Grieu P H, Guckert A. Cold acclimation in white clover subjected to chilling and frost: changes in water and carbohydrates status. *European Journal of Agronomy*, 1997, 6(3/4): 225-233.
- [16] Luttus S, Kinet J M, Bouharmont J. NaCl-induced senescence in leaves of rice (*Oryza sativa* L.) cultivars differing in salinity resistance. *Annals of Botany*, 1996, 78(3): 389-398.

- [17] Hou F L. Plant Physiology Experimental Course. Beijing: Science Press, 2005: 91-95.
- [18] Sundar D, Perianayagay B, Reddy A R. Localization of antioxidant enzymes in the cellular compartments of sorghum leaves. *Plant Growth Regulation*, 2004, 44(2): 157-163.
- [19] Zhang Z L, Qu W Q. The Experimental Guide for Plant Physiology. Beijing: Higher Education Press, 2003:123-276.
- [20] Drązkiewicz M, Skórzyńska-Polit E, Krupa Z. Copper-induced oxidative stress and antioxidant defence in *Arabidopsis thaliana*. *Biometals*, 2004, 17(4): 379-387.
- [21] Schuller D J, Poulos T L, Wilks A, Ortiz de Montellano P. Crystallization of recombinant human heme oxygenase-1. *Protein Science*, 1998, 7(8):1836-1838.
- [22] Migita C T, Matera K M, Ikeda-Saito M, Olson J S, Fujii H, Yoshimura T, Zhou H, Yoshida T. The oxygen and carbon monoxide reactions of heme oxygenase. *Journal of Biological Chemistry*, 1998, 273(2): 945-949.
- [23] Lin J S, Wang G X. Programmed cell death and adaptability. *Chinese Bulletin of Life Sciences*, 2002, 14(4):232-234.
- [24] Jaspers P, Kangasjärvi J. Reactive oxygen species in abiotic stress signaling. *Physiologia Plantarum*, 2010, 138(4): 405-413.
- [25] Jacquot J P. Oxidative stress and redox regulation in plants. *Advances in Botanical Research*, 2009, 52: 1-522.
- [26] Xie H, Yang L, Li Z G. The roles of proline in the formation of plant tolerance to abiotic stress. *Biotechnology Bulletin*, 2011, (2):23-27.
- [27] Benson E E, Bremner D. Oxidative stress in frozen plant: a free radical point of view//Fuller B J, Lane N, Benson E E, eds. *Life in the Frozen State*. Boca Raton: CRC Press, 2004: 206-241.
- [28] Stewart C R, Hanson A D. Proline accumulation as a metabolic response to water stress//Turner N C, Kramer P J, eds. *Adaptation of Plants to Water and High Temperature Stress*. New York: John Wiley and Sons, 1980: 173-189.

参考文献:

- [1] 董响,刘成,王映红,周德慧. 暖冬气候对小麦生长发育的影响及对策. *作物杂志*,2008,(4):95-96.
- [3] 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.
- [5] 周林,王汉杰,朱红伟. 气候变暖对黄淮海平原冬小麦生长及产量影响的数值模拟. *解放军理工大学学报:自然科学版*, 2003, 4(2): 76-82.
- [6] 代立芹,李春强,姚树然,张文宗. 气候变暖背景下河北省冬小麦冻害变化分析. *中国农业气象*, 2010,31(3): 467-471.
- [8] 王文跃,李福银. 白三叶草坪的几种主要害虫及防治. *园林科技*, 2009,(2): 23-24.
- [9] 罗镗. 白三叶坪用价值研究. *草业科学*, 2006,23(9):123-125.
- [10] 范玉贞. 白三叶草抗寒性生理的研究. *沧州师范专科学校学报*, 2009, 25(3): 94-120.
- [11] 赵梅,周瑞莲,刘建芳,钟旭生. 冬季融冻过程中白三叶叶片抗氧化酶活力和渗透调节物含量变化与抗冻性的关系. *生态学报*,2011,31(2):306-315.
- [12] 安莹,陈雅君,赵伟,金不换,齐孝辉. 低温对白三叶膜质过氧化及保护酶活性的影响. *草原与草坪*,2009,(3):8-11.
- [13] 范玉贞. 白车轴草对低温胁迫的响应. *江苏农业科学*,2009,(1):231-233.
- [17] 侯福林. 植物生理学实验教程. 北京:科学出版社,2005:91-95.
- [19] 张志良,瞿伟菁. 植物生理学实验指导. 北京:高等教育出版社,2003:123-176.
- [23] 林久生,王根轩. 细胞程序性死亡与生态适应. *生命科学*, 2002,14(4):232-234.
- [26] 谢虹,杨兰,李忠光. 脯氨酸在植物非生物胁迫耐性形成中的作用. *生物技术通报*,2011,(2):23-27.

CONTENTS

Growth and physiological adaptation of <i>Messerschmidia sibirica</i> to sand burial on coastal sandy	WANG Jin, ZHOU Ruilian, ZHAO Halin, et al (4291)
Alleviation effect and mechanism of exogenous potassium nitrate and salicylic acid on the growth inhibition of <i>Pinus tabulaeformis</i> seedlings induced by deicing salts	ZHANG Ying, LI Fayun, YAN Xia, et al (4300)
Influence of different spatial-scale factors on stream macroinvertebrate assemblages in the middle section of Qiantang River Basin	ZHANG Yong, LIU Shuoru, YU Haiyan, et al (4309)
Species diversity and distribution pattern of non-volant small mammals along the elevational gradient on eastern slope of Gongga Mountain	WU Yongjie, YANG Qisen, XIA Lin, et al (4318)
A patch-based method for mechanism analysis on spatial dynamics of mangrove distribution	LI Chungan, LIU Suqing, FAN Huangqing, et al (4329)
Nutrient heterogeneity in fine roots of six subtropical natural tree species	XIONG Decheng, HUANG Jinxue, YANG Zhijie, et al (4343)
Variation of vegetation NDVI and its response to climate change in Zhejiang Province	HE Yue, FAN Gaofeng, ZHANG Xiaowei, et al (4352)
Heterogeneity in fine root respiration of six subtropical tree species	ZHENG Jinxing, XIONG Decheng, HUANG Jinxue, et al (4363)
Characteristics of ammonia-oxidizing bacteria and ammonia-oxidizing archaea abundance in soil organic layer under the subalpine/alpine forest	WANG Ao, WU Fuzhong, HE Zhenhua, et al (4371)
Effect of tillage systems on light fraction carbon in a purple paddy soil	ZHANG Junke, JIANG Changsheng, HAO Qingju, et al (4379)
Effects of prescribed fire on carbon sequestration of long-term grazing-excluded grasslands in Inner Mongolia	HE Nianpeng, HAN Xingguo, YU Guirui, et al (4388)
Stoichiometry of carbon dioxide and methane emissions in Minjiang River estuarine tidal wetland	WANG Weiqi, ZENG Congsheng, TONG Chuan, et al (4396)
Distribution and sources of particulate organic carbon in the Pearl River Estuary in summer 2010	LIU Qingxia, HUANG Xiaoping, ZHANG Xia, et al (4403)
The glucose-utilizing bacterial diversity in the cold spring sediment of Shawan, Xinjiang, based on stable isotope probing	CHU Min, WANG Yun, ZENG Jun, et al (4413)
Culture-dependent and culture-independent approaches to studying soil microbial diversity	LIU Guohua, YE Zhengfang, WU Weizhong (4421)
The classification of plant functional types based on the dominant herbaceous species in the riparian zone ecosystems in the Yiluo River	GUO Yili, LU Xunling, DING Shengyan (4434)
Genetic diversity of different eco-geographical populations in endangered plant <i>Prunus mongolica</i> by ISSR Markers	ZHANG Jie, WANG Jia, LI Haoyu, ZHANG Huirong, et al (4443)
Ecophysiological characteristics of higher-latitude transplanted mangrove <i>Kandelia candel</i> in strong tidal range area	ZHENG Chunfang, QIU Jianbiao, LIU Weicheng, et al (4453)
The effect of artificial warming during winter on white clover (<i>Trifolium repens</i> Linn): overwintering and adaptation to coldness in late spring	ZHOU Ruilian, ZHAO Mei, WANG Jin, et al (4462)
Estimating fine root production and mortality in subtropical <i>Altingia grilipes</i> and <i>Castanopsis carlesii</i> forests	HUANG Jinxue, LING Hua, YANG Zhijie, et al (4472)
The cloning and expression of WUE-related gene (<i>PdEPF1</i>) in <i>Populus deltoides</i> × <i>Populus nigra</i>	GUO Peng, JIN Hua, YIN Weilun, et al (4481)
The allelopathy of aquatic rhizome and root extract of <i>Thalia dealbata</i> to seedling of several aquatic plants	MIAO Lihua, WANG Yuan, GAO Yan, et al (4488)
Effect of the avirulent strain of <i>Ralstonia solanacearum</i> on the ecological characteristics of microorganism fatty acids in the rhizosphere of tobacco	ZHENG Xuefang, LIU Bo, LAN Jianglin, et al (4496)
Coupling remotely sensed information with a rice growth model by combining updating and assimilation strategies	WANG Hang, ZHU Yan, MA Mengli, et al (4505)
Effects of water temperature and body weight on metabolic rates of Yellowtail clownfish <i>Amphiprion clarkii</i> (Pisces: Perciformes) during larval development	YE Le, YANG Shengyun, LIU Min, et al (4516)
The distribution of chlorophyll a in the Southwestern Indian Ocean in summer	HONG Lisha, WANG Chunsheng, ZHOU Yadong, et al (4525)
Evaluation of the effects of ecological remediation on the water quality and biological toxicity of Dagou Drainage River in Tianjin	WANG Min, TANG Jingchun, ZHU Wenyong, et al (4535)
Quantitative dynamics of adult population and 3-D spatial pattern of <i>Ceoporus variabilis</i> (Baly)	WANG Wenjun, LIN Xuefei, ZOU Yunding, et al (4544)
Review and Monograph	
Studies on urban heat island from a landscape pattern view: a review	CHEN Ailian, SUN Ranhao, CHEN Liding (4553)
Sediment quality triad and its application in coastal ecosystems in recent years	WU Bin, SONG Jinming, LI Xuegang, et al (4566)
Discussion	
Food waste management in China: status, problems and solutions	HU Xinjun, ZHANG Min, YU Junfeng, et al (4575)
Scientific Note	
Effects of microchemical substances in anaerobic fermented liquid from rice straw and cyanobacteria on <i>Fusarium oxysporum</i> f. sp. <i>niveum</i> growth	LIU Aimin, XU Shuangsoo, CAI Xin, et al (4585)
Ecological benefit-loss analysis of agricultural ecosystem in Foshan City, China	YE Yanqiong, ZHANG Jiaen, QIN Zhong, et al (4593)

《生态学报》2012 年征订启事

《生态学报》是中国生态学学会主办的自然科学高级学术期刊,创刊于 1981 年。主要报道生态学研究原始创新性科研成果,特别欢迎能反映现代生态学发展方向的优秀综述性文章;研究简报;生态学新理论、新方法、新技术介绍;新书评介和学术、科研动态及开放实验室介绍等。

《生态学报》为半月刊,大 16 开本,280 页,国内定价 70 元/册,全年定价 1680 元。

国内邮发代号:82-7 国外邮发代号:M670 标准刊号:ISSN 1000-0933 CN 11-2031/Q

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

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

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

编辑部主任 孔红梅 执行编辑 刘天星 段 靖

生 态 学 报
(SHENGTAI XUEBAO)
(半月刊 1981 年 3 月创刊)
第 32 卷 第 14 期 (2012 年 7 月)

ACTA ECOLOGICA SINICA
(Semimonthly, Started in 1981)
Vol. 32 No. 14 (July, 2012)

编 辑	《生态学报》编辑部 地址:北京海淀区双清路 18 号 邮政编码:100085 电话:(010)62941099 www.ecologica.cn shengtaixuebao@rcees.ac.cn	Edited by	Editorial board of ACTA ECOLOGICA SINICA Add:18, Shuangqing Street, Haidian, Beijing 100085, China Tel:(010)62941099 www.ecologica.cn Shengtaixuebao@rcees.ac.cn
主 编	冯宗炜	Editor-in-chief	FENG Zong-Wei
主 管	中国科学技术协会	Supervised by	China Association for Science and Technology
主 办	中国生态学学会 中国科学院生态环境研究中心 地址:北京海淀区双清路 18 号 邮政编码:100085	Sponsored by	Ecological Society of China Research Center for Eco-environmental Sciences, CAS Add:18, Shuangqing Street, Haidian, Beijing 100085, China
出 版	科 学 出 版 社 地址:北京东黄城根北街 16 号 邮政编码:1000717	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