

ISSN 1000-0933
CN 11-2031/Q

生态学报

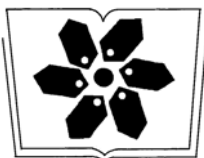
Acta Ecologica Sinica



第 33 卷 第 12 期 Vol.33 No.12 **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

(SHENGTAI XUEBAO)

第 33 卷 第 12 期 2013 年 6 月 (半月刊)

目 次

前沿理论与学科综述

- 森林低温霜冻灾害干扰研究综述 李秀芬, 朱教君, 王庆礼, 等 (3563)
- 碱蓬属植物耐盐机理研究进展 张爱琴, 庞秋颖, 阎秀峰 (3575)

个体与基础生态

- 中国东部暖温带刺槐花期空间格局的模拟与预测 徐琳, 陈效速, 杜星 (3584)
- 长白山林线树种岳桦幼树叶功能型性状随海拔梯度的变化 胡启鹏, 郭志华, 孙玲玲, 等 (3594)
- 油松天然次生林居群遗传多样性及与产地地理气候因子的关联分析 李明, 王树香, 高宝嘉 (3602)
- 施氮对木荷 3 个种源幼苗根系发育和氮磷效率的影响 张蕊, 王艺, 金国庆, 等 (3611)
- 围封对内蒙古大针茅草地土壤碳矿化及其激发效应的影响 王若梦, 董宽虎, 何念鹏, 等 (3622)
- 干热河谷主要造林树种气体交换特性的坡位效应 段爱国, 张建国, 何彩云, 等 (3630)
- 生物降解对黑碳及土壤上苯酚脱附行为的影响 黄杰勋, 莫建民, 李非里, 等 (3639)
- 3 个树种对不同程度土壤干旱的生理生化响应 吴芹, 张光灿, 裴斌, 等 (3648)
- 冬小麦节水栽培群体“穗叶比”及其与产量和水分利用的关系 张永平, 张英华, 黄琴, 等 (3657)
- 不同秧苗素质和移栽密度条件下臭氧胁迫对水稻光合作用、物质生产和产量的影响 彭斌, 李潘林, 周楠, 等 (3668)
- 根域限制下水氮供应对膜下滴灌棉花叶片光合生理特性的影响 陶先萍, 罗宏海, 张亚黎, 等 (3676)
- 光照和生长阶段对菖蒲根系泌氧的影响 王文林, 王国祥, 万寅婧, 等 (3688)
- 植物病原菌拮抗性野生艾蒿内生菌的分离、筛选和鉴定 徐亚军, 赵龙飞, 陈普, 等 (3697)
- 不同生物型棉蚜对夏寄主葫芦科作物的选择 肖云丽, 印象初, 刘同先 (3706)
- 性别和温度对中华秋沙鸭越冬行为的影响 曾宾宾, 邵明勤, 赖宏清, 等 (3712)

种群、群落和生态系统

- 基于干扰的汪清林区森林生态系统健康评价 袁菲, 张星耀, 梁军 (3722)
- 洞庭湖森林生态系统空间结构均质性评价 李建军, 刘帅, 张会儒, 等 (3732)

景观、区域和全球生态

- 川西米亚罗林区不同海拔岷江冷杉生长对气候变化的响应 徐宁, 王晓春, 张远东, 等 (3742)
- 2001—2010 年内蒙古植被净初级生产力的时空格局及其与气候的关系 穆少杰, 李建龙, 周伟, 等 (3752)
- 地形因子对盐城滨海湿地景观分布与演变的影响 侯明行, 刘红玉, 张华兵, 等 (3765)
- 毛乌素沙地南缘植被景观格局演变与空间分布特征 周淑琴, 荆耀栋, 张青峰, 等 (3774)
- 贵州白鹇湖沉积物中孢粉记录的 5.5 kaB. P. 以来的气候变化 杜荣荣, 陈敬安, 曾艳, 等 (3783)

典型河谷型城市春季温湿场特征及其生态环境效应..... 李国栋,张俊华,王乃昂,等 (3792)

秦岭南北近地面水汽时空变化特征..... 蒋 冲,王 飞,喻小勇,等 (3805)

露天矿区景观生态风险空间分异..... 吴健生,乔 娜,彭 建,等 (3816)

基于 Holdridge 和 CCA 分析的中国生态地理分区的比较 孔 艳,江 洪,张秀英,等 (3825)

资源与产业生态

中国农业生态效率评价方法与实证——基于非期望产出的 SBM 模型分析 潘 丹,应瑞瑶 (3837)

舟山市东极大黄鱼养殖系统能值评估..... 宋 科,赵 晟,蔡慧文,等 (3846)

不同基因型玉米间混作优势带型配置..... 赵亚丽,康 杰,刘天学,等 (3855)

气候与土壤对烤后烟叶类胡萝卜素和表面提取物含量的影响..... 陈 伟,熊 晶,陈 懿,等 (3865)

城乡与社会生态

成都市沙河主要绿化树种固碳释氧和降温增湿效益 张艳丽,费世民,李智勇,等 (3878)

期刊基本参数:CN 11-2031/Q * 1981 * m * 16 * 326 * zh * P * ¥90.00 * 1510 * 33 * 2013-06



封面图说: 长白山南坡的岳桦林——长白山岳桦林位于海拔约 1700—2000m 之间的山坡。这种阔叶林分布在针叶林带的上面,成为山地森林的上缘种类,在世界山地森林中实属罕见。岳桦能够顽强地抗御长白山潮湿、寒冷、强风等恶劣气候因素,在严酷的环境条件下形成纯林,是与其独特的生长发育机理密切相关的。岳桦的枝干颇具韧性,在迎风处,由于风吹雪压,树干成片地向背风侧倾斜,这种特性使它能不畏风雪,顽强生存。随着海拔的升高,岳桦林也逐渐矮化,这是岳桦林保护自身生存,适应大自然的结果。

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/stxb201211121587

李秀芬, 朱教君, 王庆礼, 张金鑫, 祝成瑶, 刘雪峰, 刘利民. 森林低温霜冻灾害干扰研究综述. 生态学报, 2013, 33(12): 3563-3574.

Li X F, Zhu J J, Wang Q L, Zhang J X, Zhu C Y, Liu X F, Liu L M. Research on the disturbance of frost damage to forests. Acta Ecologica Sinica, 2013, 33(12): 3563-3574.

森林低温霜冻灾害干扰研究综述

李秀芬¹, 朱教君², 王庆礼², 张金鑫², 祝成瑶¹, 刘雪峰¹, 刘利民^{1,*}

(1. 沈阳农业大学, 沈阳 110866; 2. 中国科学院沈阳应用生态研究所, 沈阳 110016)

摘要: 在全球变暖的背景下, 森林低温霜冻灾害的发生并没有减少趋势, 低温霜冻灾害的发生可能对林木的组织或整个幼树、幼苗产生致命伤害, 进而成为林木生长发育, 天然或人工更新的一个主要限制因子。森林低温霜冻灾害的发生和危害程度取决于林木生长复杂多变的物理环境和树木的耐冻性, 前者又受大尺度环流形势及局地尺度小气候特征的影响。借助于 3S 技术建立复杂地形下低温和光照的空间分布模型, 并结合林木的耐冻性, 构建低温霜冻危害评估的概率模型, 将有助于提高霜冻灾害的监测和危害评估水平。森林低温霜冻的防御应考虑将物理与生物防霜方法相结合, 前者通过建防护林和采取合适的采伐措施, 来改善林内地表的辐射平衡; 后者则通过生物技术手段来增强林木的耐冻性。需结合霜冻灾害的监测和危害评估模型, 对各种不同防霜措施的防霜效果进行定量评估。

关键词: 森林; 低温霜冻灾害; 干扰; 防御措施

Research on the disturbance of frost damage to forests

LI Xiufen¹, ZHU Jiaojun², WANG Qingli², ZHANG Jinxin², ZHU Chengyao¹, LIU Xuefeng¹, LIU Limin^{1,*}

1 Shenyang Agricultural University; Shenyang 110866, China

2 Institute of applied Ecology, Chinese Academy of Sciences, Shenyang 110016, China

Abstract: The occurrence of frost damage in forest did not show any decrease trends in the condition of global climate warming, the growing season frost could lead severely damage to the tissues of trees and the whole seedlings. Thus, the frost is becoming one of the major limiting factors for tree growth and regeneration. The occurrence and degree of frost damage to the trees are related to the coupling effect of two factors- the complex environment condition and the cold hardiness of trees, and the former was affected by the large-scale atmospheric circulation and regional microclimate. It will help improve the monitoring and assessment of the frost influences to the forest by coupling the cold hardiness of trees, the spatial the distribution model, which was built based on the factors of radiation and low temperature in a complex topographical condition using 3S technologies, and the probability model. Both physical and biotechnological measures should be taken into account for forest protection under frost impact. The former can balance the energy of near ground surface in forests through establishing protective forest and suitable cutting measures, and later aims at improving the cold hardiness of trees by biotechnological measures. It is therefore, the evaluation for effects of different kinds of frost-prevention measures should combining with the monitoring and evaluation models of frost damage.

Key Words: forests; low temperature and frost damage; disturbance; defensive measures

低温霜冻是一种时间尺度很短的农业气象灾害^[1]。近几十年来, 全球变暖已成为人们共识, 但全球变暖

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(31200432); 辽宁省教育厅项目(2010096)

收稿日期: 2012-11-12; 修订日期: 2013-03-04

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

并不意味着霜冻发生几率和潜在危险的减弱,甚至霜冻害的发生有增加的趋势^[2-5]。原因其一是由于气候变暖是一种长期、缓慢、非直线的过程,不同地区的变暖趋势也各不一样,如 20 世纪 80 年代我国北方地区变暖,而南方长江流域反倒变冷,使得在该地区发生霜冻害的可能性增加^[6-8];其二是由于气候变暖使得植物在春季提早发芽开花,秋季休眠期推迟,从而降低了植物的抗寒力,之后遇到温度剧降的天气,很容易发生霜冻灾害^[9-10]。如,2008 年 12 月上中旬,由于气温异常偏高,莱芜地区果树不能正常进入休眠期,当 2008 年 12 月 21 日到 2009 年 1 月 23 日期间寒潮侵袭时,使尚未进入深休眠期的果树遭受了严重冻害^[11];再如,由于气候变暖,生长在北温带区域的欧洲赤松(*Pinus sylvestris*)延迟了冷锻炼并且提早解除了冷锻炼,增加了在秋季和春季时遭受霜冻的风险^[12]。其三是由于近十几年来低温霜冻等极端天气更显多变,使初终霜日变得非常不稳定,从而使得农林业遭受低温灾害的危险性加大^[13-14]。

以往对低温霜冻灾害方面研究多以农作物为对象,而以林木为研究对象的相对较少。实际上,在生长季内由低温霜冻引起的灾害可能对林木的组织或整个幼树、幼苗产生致命伤害^[15-17]。在世界上许多地区,霜冻已成为林木生长发育,天然或人工更新的一个主要限制因子^[18-20],霜冻的发生使森林群体的更新和建立变得困难,最终在影响林业生产发展的同时还降低了原有森林生态系统的服务功能^[21-22]。因此,研究森林低温霜冻灾害问题对于保护现有的森林资源和指导林区的经营管理具有重要意义。本文在极端低温气候事件频发的气候背景下,从低温霜冻对苗木的危害、影响低温霜冻灾害发生因素及降低危害的管理措施等方面对过去几十年的相关研究进行总结,以期提出问题,为今后国内外相关研究提供一定参考。

1 低温霜冻及其对苗木的危害

1.1 霜冻

霜冻是指发生在冬春和秋冬之交,日平均温度在 0℃ 以上,由于冷空气的侵袭或夜间强烈辐射冷却降温,使土壤表面、近地面的气温或植物体温降到 0℃ 以下,使植株原生质受到破坏,导致植株受害或死亡的一种短时间低温灾害现象^[22]。按霜冻发生的时期可分为早霜冻和晚霜冻;按霜冻的成因,可分为平流霜冻、辐射霜冻和平流辐射霜冻三类^[13]。出现霜冻时,2m 以下的贴地层常出现强烈的逆温现象,百叶箱内的气温往往比地面温度和植物的叶面温度要高出好几度。因此当百叶箱气温还在 2—3℃ 时,地面温度已降到 0℃ 以下,植物已经遭受霜冻危害了^[23-24]。

1.2 霜冻对林木的危害

霜冻对植物的危害主要是低温冻害。当温度降低到 0℃ 以下时,植物细胞间隙的水分首先结冰,形成冰晶,细胞间溶液浓度增高,细胞内未结冰水向细胞间隙移动,细胞内失水,膨压下降,造成质壁分离,原生质失水凝固失活,当气温继续下降时,细胞内结冰,在细胞内外冰晶的机械挤压下,细胞壁和原生质遭到破坏,细胞死亡,冻害发生^[13,22]。

树木能够忍耐低温的程度,称为耐冻性。树木耐冻性的内部机制取决于树木体内的物质构成。有时树体组织即使冻结了,但因水分减少,细胞液中亲水胶质,细胞间隙冰块的增长,不致到达破坏的程度;或因细胞内的糖浓度高,细胞内不发生冻结,细胞不会被冻死。因此,从夏季到冬季,树木体内含水率的降低和树木细胞内糖浓度的增加,都有助于树木耐冻性的提高^[24]。

树木的耐冻性随树木的不同部位、树种以及季节而有显著差异^[25-26]。一般认为,树木的繁殖器官(花和蕾)是最不耐冻的,常在 -2—0℃ 时即受害。日本酒井的研究发现^[24],日本柳杉(*Cryptomeria japonica*)苗干的上部比基部耐冻,苗的上部最耐冻,最不耐冻的是顶芽。吴静等^[20]对紫椴(*Tilia amurensis*)受霜冻危害的芽解剖指出,芽中心部位最易受害,树木节处也是受害多发点。

树种不同,其耐冻性差异也极为明显,热带、亚热带的树种大多不耐冻,例如橡胶树 5℃ 时即能受害^[24]。生长在我国华南沿海的红树林,其耐寒耐冻能力普遍较差,据林鹏等^[27]对 6 种红树植物进行低温控制试验表明,白骨壤(*Avicennia marina*)出现严重受害的温度为 0—2℃,海莲(*Bruguiera sexangula*)略高于 0℃,而秋茄(*Kandelia candel*)、桐花树(*Aegiceras corniculatum*)、木榄(*Bruguiera gymnorhiza*)、尖瓣海莲(*Bruguiera*

sexangula var. *rhynchopetala*) 则均低于 -2°C 。徐大平等^[28]对目前南方推广种植速度最快的 5 个珍贵树种的寒害调查结果指出,檀香(*Santalum album*) 在极端低温 1°C 以上,可确保安全越冬;当极端温度低于 -2°C 时,植株冻害明显并出现枯顶。降香黄檀(*Dalbergia odorifera*) 可忍耐短暂 -2°C 低温。而对于大果紫檀(*Pterocarpus macrocarpus*) 来说, 2.5°C 就是其受害的低温阈值。常绿乔木白木香(*Aquilaria sinensis*) 对温度适应性较强,能耐短期霜冻,在最低温度 -3°C 以上地区能安全越冬。

而生长在温带、寒温带的树种都很耐冻,如冷杉(*Abies*)、红皮云杉(*Picea koraiensis*)、落叶松(*Larix*)、赤松(*Pinus densiflora*) 等,在冬季一般都可忍耐零下几十度的低温而安全越冬。如花旗松(*Pseudotsuga menziesii*) 可忍耐 -27°C ,西加云杉(*Picea sitchensis*) 为 -40°C ,而白桦(*Betula platyphylla*) 可忍受 -45°C 的低温^[29]。据陶大立等^[25]对长白山 51 种树木 1 年生枝条休眠期(12—2 月)的耐冻性测定结果指出,中黑桦(*Betula dahurica*)、东北赤杨(*Alnus mandshurica*) 等 6 个树种可无损活过 -196°C ;红松(*Pinus koraiensis*)、水曲柳(*Fraxinus mandshurica*)、山杨(*Populus davidiana*)、长白落叶松(*Larix olgensis*) 可忍耐 -55 — -60°C 甚至更低的温度。树木的耐冻性在初冬时急剧增大,初春时又急剧减小,冬季时具有最大而且稳定的耐冻性。因此,树木冻害危险不在于冬季最低温度而主要发生在秋季后期耐冻性还不十分高的情况下,或者是春天树液已经开始流动,耐冻性已经逐渐丧失的时候,这时如遇到较强冷空气侵袭,出现霜冻,树木就会受到冻害^[23-24]。

2 影响林木低温霜冻的环境因素

2.1 天气条件

霜冻的形成与空气湿度和天空云量有密切关系。在空气湿度大的天气条件下不易发生霜冻危害,这是因为空气中水汽增多,增强了大气逆辐射,夜间地面辐射冷却减弱,对地面起到保暖的作用,使得近地面层夜间温度的降低要比干旱天气下缓慢得多。而当天空总云量和低云量较少,夜间碧空无云或少云时,地面辐射散热快,气温下降剧烈,易出现霜冻^[30-31]。辐射霜冻就是在日平均温度比较低,天空晴朗无云或少云,空气湿度小,无风或微风的天气条件下形成的。这类霜冻在分布上往往带有明显的局地性,即受地形差异的影响较大^[32]。此外,在北方冷空气暴发南下的天气下所造成的霜冻危害较为严重,并且迎风坡和山岗等开阔地段受害较重,而在封闭的地形条件下则要轻些。平流霜冻就是由这种天气条件所引发,其特点是危害持续时间长,并伴随有偏北大风。这类霜冻的强度和范围决定于冷空气的强度和它所影响地域的宽广程度,在我国,每年霜冻出现的早晚和第一次严重霜冻的出现,都与较强冷空气暴发南下有关^[30, 33]。

虽然低温是造成树木生长季内树苗生长胁迫和危害的最主要原因,但低温和高光照强度的相互作用更能增强这种危害^[34-35]。这是因为霜冻以后林木受到早晨阳光直射,温度迅速回升,蒸腾强烈,受冻细胞来不及从邻近组织吸收所需的水分,因而使受冻细胞失去水分平衡,导致受冻部分死亡、枯萎。这种过程是急性的,故当天即可表现出来^[36]。因此在霜冻夜晚后的晴朗早晨,幼苗最容易遭受由低温和强光相结合的危害^[37]。此外,较强的光照将会加剧低温引起植物光合作用的降低、光合色素的降解和膜脂过氧化作用。同时,叶片吸收的过量光能如果不能及时耗散掉,就会导致活性氧积累而损害光合器官^[38-39]。低温和光照随地形呈空间变化,在山地更是如此。构建低温和强光的空间分布模型是定量研究低温和强光相互作用的重要手段^[37],其中直接辐射的空间分布模型可借助地面和光线间的几何关系建立起来^[40]。

2.2 地形条件

一般来说,温度随海拔高度的增加而降低,但在地貌复杂的山地地形中,初春和秋末的最低温度一般出现在平地或低洼地^[11, 31]。这是由于夜间平地或低洼地周围坡地上的冷空气向下注泻,并沉积起来继续辐射冷却,温度降到最低,使其附近出现了逆温现象,形成所谓“冷湖”;而在冷空气沉积的顶部附近的坡地上温度最高,形成所谓的“暖带”。在暖带中霜害最轻,生长季最长,林木发育最早。在暖带以下,特别是在冷湖中,初霜最早,终霜最晚,林木受霜冻害机会最多,霜冻害程度也最重。

不同坡度、坡位和坡向遭受低温的危害也是不同的,许多研究^[20, 37, 41-42]表明,低温灾害通常发生在坡度较小的平缓地或平地,而坡陡的地方不易发生;同一坡面,坡下部的危害高于坡上部,即山脚处霜冻最重,山腰其

次,山顶最轻甚至没有出现。当其它因子都相等时,不同坡向的山坡一天中的最低温度是不同的,其遭受霜冻危害的程度也是不同的^[24,33,43]。北坡接受的太阳辐射少,又直接受西北冷风的吹袭,所以北坡的霜冻重于南坡。东坡和东南坡比西坡和西南坡为重,这是由于早晨太阳直射东坡,温度回升快,使受冻的植物因迅速解冻而严重脱水,难以复原而死亡^[19,42]。同一山坡,迎风坡面的霜冻较重,背风坡面的霜冻较轻。然而也有研究表明坡向对温度影响的差异不明显^[43]。此外,在靠近较大水体的地方,例如大中型水库边、山塘鱼塘周围、沿河两岸的附近等,也不易发生霜冻,这是因为水体对附近地区的小气候有一定的调节作用,使白天温度不易升高,夜间温度不易降低^[44]。

许多学者对地形与低温霜冻的关系进行了定量研究^[43-45],在分析局部和地区尺度低温空间分布变化的基础上,建立了许多小尺度和大尺度地区的低温空间变化模型。例如,Laughlin 和 Kalma^[45]基于线性回归的方法建立了波动地形下的低温空间分布模型。在这个模型中低温变量可通过海拔,冷空气的排出和汇集这三个自变量来进行描述;Blennow^[43]拓展了这个模型,使其包含了平地对冷空气的停滞作用以及遮蔽物减少所造成的影响等。之后,Blennow 等^[41]又建立了瑞典农业大学南部 22hm² 实验林的低温空间变化模式;后来,Blennow 和 Lindkvist^[37]对瑞典南部具有不同海拔高地、山峰和狭谷的复杂地区的低温和光照分别进行了两个尺度(大尺度面积为 625km²,小尺度面积为 9hm²)的研究,建立了低温-高光照的空间变化模型并且用于解释该地区由于低温所造成的树苗死亡。

2.3 下垫面性质

土壤和地表覆盖物比热不同导致近地面空气温度的变化也不同^[46-47],因此不同下垫面霜冻发生的强度和持续时间也不同。研究表明,没有植被或植被较少的裸地容易遭受霜冻的危害^[41,48]。因此,森林在采伐过程中,保留一些树木设置为防护林或采用间伐而不进行皆伐的作业方式,其目的是保护树木免受霜冻害。其中,低密度的防护林可以使霜冻的危险减少 50% 或更高,而高密度防护林的防护效果会更佳^[49-51]。Granberg 等^[52]研究表明,与皆伐林地相比,防护林内的空气动力影响有利于防护林内温度的提高,且不同密度防护林对温度的影响是不同的^[47,53]。Feldhake^[54]通过对针叶林中牧草的生育期及霜冻危害的研究也表明,针叶林下的牧草生育期被延长,受霜冻危害的时间推迟就是这个原理。

土壤含水量不同近地面林木遭受低温霜冻危害的程度也有所不同,干燥的土壤和沙土地,发生霜冻的频率要高于土壤潮湿的粘土地,这是因为干燥的土壤和沙土地面其地表热容量和导热率小,白天升温快,夜间冷却也快,易形成霜冻;而潮湿的土壤和粘土地不仅其热容量和导热率大,同时还能增加近地面层空气湿度,减少地面热量散失,故地表面不易发生霜冻危害^[53]。此外,疏松的土壤能增加地面在夜间释放的热量,从而能减少近地面霜害的发生^[55]。据 Blennow^[43]研究表明,经过翻耕的地表近地面最低温度要比没有翻耕的地表高 1.6℃ 左右。

3 霜冻灾害的防御措施

3.1 加强霜冻灾害监测预报

霜冻灾害及时准确预报是采取防御的首要前提。因此,分析和研究霜冻灾害的分布特征、强度特点、变化规律及其发生的气象条件,将有助于提高该地区对异常灾害的预测能力,为有效防御霜冻灾害提供科学依据^[56]。霜冻的天气预报包括天气形势预报和气象要素预报两部分内容,任何一个地区的气象要素变化,都和天气形势的演变紧密关联。因此,正确判断天气形势变化,是正确预报气象要素变化的依据^[33]。

有关霜冻发生天气形势特征的研究表明,霜冻天气的发生是由寒潮或强冷空气南下影响所造成的。杨克明等^[56]利用实测资料和历史天气图资料探讨了我国东北地区初霜冻出现前 24h 的环流形势特征和天气演变过程,指出东北地区初霜冻发生在亚洲中高纬呈一槽两脊或两槽一脊环流形势下,由新地岛或亚洲北部地区的不稳定小槽强烈发展带来一次强冷空气活动所造成的,霜冻区通常分布在 500hPa 北风急流中心南侧区域;吴兴国^[57]通过 1957—1999 年 42 个冬季出现在广西区域内的重大霜冻天气过程特征分析,得出了广西特大寒害有 22—24a 的重现期,横槽转竖、寒潮爆发和冷高压持续加强影响是形成广西重大霜冻天气过程的 2 种

主要原因,而后者尤需特别关注,这与覃丽等^[58]的分析结果较为一致。它一旦发生,霜冻天气过程就具有强度大、范围广、持续时间长、灾害重的特点。张健等^[59]指出影响黑龙江秋季初霜冻发生早晚的同期影响因子有欧亚和亚洲经向环流指数,阿留申低压指数,东亚大槽强度指数等。

霜冻发生的气象要素预报主要指霜冻的单站预报方法,此方法是根据本站观测资料来预测未来一段时间内一定天气条件下的夜间地面最低温度。常采用的方法有露点法、地面温度曲线法和米哈列夫斯基法。其中露点法是一种普遍的、极为简单的方法。通过观测 21:00 的空气露点温度,并预计当晚云和风的变化,即可作出霜冻预报。如果露点在 2℃ 以下,当晚天气无云无风,则夜间会有霜冻发生。这种方法的根据是:在露点温度低(表示空气干燥)、无云无风的天气条件下,辐射冷却将会是很强烈的,容易出现霜冻,且 21:00 温度越低,霜冻强度也越强。地面温度曲线法是目前我国气象站普遍使用的一种方法。这个方法的依据是:一个地方某一时期内的一定天气类型之下,夜间地面温度的下降速度是很接近的,日落时地面温度与夜间地面最低温度之差接近一个常数。如果事先确定了某种天气类型夜间地面温度下降的标准曲线,即能根据日落时的地面温度,利用这条曲线来预报当晚的最低温度(即霜冻强度)以及霜冻的起止时间。米哈列夫斯基法是考虑到霜冻与温度、湿度和云量的关系,利用当地 13:00 的干球温度和湿球温度,并作空气湿度订正来预报当晚的最低温度^[24,33]。

3.2 物理防御方法

物理防御霜冻是一种传统的方法,其中包括熏烟法、灌水法、覆盖法、直接加热空气法、空气混合法和架设风障,营造防护林法等,这些方法都是通过提高植株生长的环境温度来防止低温灾害发生。其中,熏烟一般可提高温度 1—2℃,有时达 3℃ 左右。在霜冻出现的前一天下午灌水效果最好,一般可增温 2—3℃^[60];覆盖法常比其他方法具有更好的防护效应,如对经济价值高的树木或果树,冬季可进行包扎或覆盖,以防冻害。风障和防护林对平流霜冻常有较好的防御作用。在山坡地建造防霜林、防霜堤,以拦截坡地冷空气下泄,可有效保护坡下植物,免受霜冻危害^[24,33]。

此外,营造混交林且在采伐作业时不采取皆伐而进行间伐的方式对霜冻也有一定的防御效果,许多研究指出^[43,49-52]间伐林内的最低温度要明显高于皆伐地,对林内幼苗能够起到一定的保护作用。陈祥伟等^[19,42],通过对相同立地条件下混交林和纯林内水曲柳和紫椴受害程度调查分析,发现营造混交林对霜冻能够起到一定的控制作用,表现为混交林内紫椴和水曲柳的霜冻指数及各受害等级的株数比例均低于纯林。说明混交林对防止霜冻具有明显效果。

3.3 低温锻炼

低温锻炼对提高植物抗低温逆境能力具有十分重要的作用^[26, 61-63]。而低温驯化是低温诱导植物抗冷性增加的过程,并且从当前的研究结果看这种方法对提高植物抗冷性效果显著。

植物在幼苗期,可塑性较大。因此,在种子萌发到幼苗时期,进行低温锻炼,对于提高植株的耐寒冻性效果更显著^[64-65]。低温锻炼的方法是将树木幼苗从正常适合温度下,移到逐渐降低温度的环境中,进行生长。相关的研究指出,幼苗经这样的低温锻炼处理后,幼苗组织中的膜脂类组成成分及成分分配比有了改变,表现在不饱和脂类和不饱和脂酸成分增多、膜相变的温度降低以及细胞内 ATP 酶含量增高、体内抗寒物质如糖类及氨基酸类保护物质有所增加,因而增强了抗寒能力^[66-68]。左永忠等^[69]以华北落叶松(*Larix principis-rupprechtii*)幼苗为材料进行了低温驯化。结果指出,冷驯化后的幼苗光合性能提高,RNA 和可溶性蛋白质增加,提高了植物的抗寒性。李亚青等^[70]通过对低温驯化后的白皮松(*Pinus bungeana*)生理指标分析后指出,抗寒锻炼后白皮松的抗冻性有所提高。Søgaard 等^[64]以挪威云杉(*Picea abies*)和 Beck 等^[71]以欧洲赤松为试材进行的低温驯化研究均指出,低温驯化显著提高了苗木抵御深秋霜冻和冬季休眠期的抗冻能力。生长于热带亚热带潮间带的红树植物,对低温的适应具有温度地带性,同一树种,种源地温度越高抗寒冻性越强^[72]。如,海莲(*Bruguiera sexangula*)、海桑(*Sonneratia caseolaris*)及无瓣海桑(*Sonneratia apetala*)在向北引种后,其抗寒性均有所增强。红树植物经过低温驯化后其抗寒能力可明显提高^[73-74]。

在苗木的低温驯化试验中,低温处理时间上限和低温阈值的设置是关键因素,且不同次数低温周期处理的苗木其忍耐低温的能力也不同,低温驯化周期多,相对的抗冻能力就越强^[65, 71-75]。

另外,选用抗霜品种也是防御霜冻的重要措施。一些育种学家长期致力于抗霜育种。目标是育出既能抗霜,又具有优良性状,遇霜害年受害很轻,没有霜害年也能获得高产优质产品的新品种。这方面的研究已经取得了一些突破性的进展^[76]。

3.4 化学物质及施肥处理

化学药剂或某些激素在诱导植物抗寒力方面的应用已引起高度重视。人们陆续发现一些与抗逆性相关的新激素,人工合成的具有植物激素功能的植物生长调节剂也在不断出现。目前,使用最多的植物延缓剂或广谱杀菌剂是多效唑(PP333)。PP333 通过调节、改变内源激素的平衡,使赤霉素(GA3)、吲哚乙酸(IAA)含量降低,ABA、乙烯含量增加,这样抑制了植物生长,进而提高植物的耐冻能力^[77]。多胺(PA)是一种新型的植物抗冷激素,因为在低温下,许多植物体内有多胺的积累。如冷锻炼期间,柑桔(*Citrus iunos*)叶片中有多胺的累积;冷胁迫期间柠檬(*Citrus limon*)果皮、葡萄(*Vitis vinifera*)果实和胡椒(*Piper nigrum*)以及冷锻炼期间小麦(*Triticum aestivum*)和拟南芥(*Arabidopsis thaliana*)叶片中都有多胺的累积。虽然多胺促进冷胁迫抗性的确切机制还不清楚,但其确实能提高植物的抗冷性^[78]。脱落酸(ABA)的喷施也可以降低植物遭受霜冻害的危险^[79],例如 ABA 的类似物处理小麦细胞的培养物 4d,耐结冰能力由-8—-7℃ 提高到-30℃^[76]。细胞分裂素(CTK)在提高植物抗逆性方面与 ABA 的功能相似^[80]。水杨酸(SA)作为生物体内的信号传递分子,在植物的抗病性及其它抗逆性等方面起重要作用^[81],但对抗寒性方面的研究甚少。但据王丽等^[82]研究指出,喷施 SA 全球红葡萄(*Eriobotrya japonica*)幼苗叶片的抗寒能力高于未喷施的叶片。化学物质处理的方法简便易行,费用也不多,因此,生产中容易被接受。

此外,合理的施肥措施也能增强苗木的抗寒能力。例如,在苗期多施钾肥少施氮肥,一般对抗寒有益。人工向植物渗入可溶性糖,喷施有机液肥使细胞液浓度升高^[1],都可以使植物的抗寒能力增强。

3.5 生物技术

3.5.1 生防菌防霜的应用

近几十年来,国内外大量研究证明^[83-85],在自然界广泛存在着冰核活性细菌(简称 INA 细菌),它可在-3—-2℃ 诱发植物细胞水结冰而发生霜冻;无 INA 细菌存在的植物,一般能耐-7—-6℃ 的低温,这一发现为研究和防御植物霜冻开辟了一条新途径^[86-87]。植物遭遇低温灾害的轻重程度和植物体上 INA 细菌数量多少有很大关系,冰核细菌是诱发和加重植物遭受低温危害的重要因素,因此研究用化学、物理和生防方法防除 INA 细菌减轻农林作物霜冻危害,是防御霜冻研究的重要组成部分^[88]。我国从 1986 年起开展 INA 细菌的研究,明确了我国生物冰核的种类和优势种,在冰核细菌分子生物学和应用方面也做了积极探索。在林业方面,Baca 等^[89]指出从杨树分离的细菌中有 75% 的株系在-5℃ 时具有冰核活性;Lindow^[90]在包括窄叶杨(*Populus angustifolia*)等杨树在内的 95 种植物上发现有 74 种存在 INA 细菌;Kam^[91]指出在杨树上,丁香假单胞菌(*Populus angustifolia*)能加重杨树的冻害。在国内,曾大鹏等^[92-93]先从北方杨树(*Populus spp*)上分离到大量 INA 细菌的基础上又报道了中国北方杨树冰核细菌的分布、种类鉴定及在田间引起的杨树冻害等。

药剂防霜是研制或筛选防除 INA 细菌的药剂,使其具有杀灭 INA 细菌和破坏冰蛋白成冰活性的功能。例如,日本研制出的辛基苯偶酰二甲基铵(OBDA),能有效地使 INA 细菌的冰核活性失活,已用于茶树防霜。美国用一羧酸脂化丙烯酸聚合物(CRYOTED)喷洒叶面,形成薄膜,阻止 INA 细菌繁殖来防御果树和蔬菜霜冻。孟庆瑞等^[94]采用 Vali 结冻法和含菌平板培养法开展了 INA 细菌药剂筛选及防霜效果试验,最后筛选出了防除杏树上 INA 细菌的有效药剂。用药剂防霜是的关键在于研制出一种具有内吸性、既能杀灭冰核细菌又能破坏冰蛋白活性、持效期长、无毒无害的新农药,这样会大大提高药剂防霜的效果^[87,95]。

3.5.2 分子生物学防霜

随着近年来分子生物学的兴起,植物抗寒性研究进入分子生物学研究阶段。自 1970 年 Weiser 首先提出

低温诱导能调节植物基因表达发生改变,从而合成新的蛋白质的观点以来^[96],人们陆续在大量植物中观察到低温诱导蛋白的产生。植物低温诱导蛋白是在温度逆境下诱导产生的一系列蛋白,以脱水蛋白和多肽、热稳定蛋白为多。这类蛋白在低温诱导下的出现有利于提高植物的耐冷性,减少细胞冰冻失水,维持其可溶状态而阻止膜与蛋白的脱水伤害^[97]。从 1985 年 Guy 等首次报道低温改变菠菜基因表达方式以来^[98],迄今,已从多种植物材料中分离鉴定出一系列受低温诱导表达的基因^[99]。如,拟南芥中的冷调节基因 COR (cold-regulated)^[100],菠菜 (*Spinacia oleracea*) 的 CAP 基因^[101],小麦的 WCS 基因^[102]等。这些与低温锻炼相关的基因其共同特点是受低温诱导表达或增强表达,而在常温下停止表达或降低表达。

目前植物抗寒分子机理方面的研究主要集中在草本植物,对于木本植物的研究相对较少,主要进行了诸如抗寒相关基因克隆、转移及鉴定等的工作。如, Ukaji 等^[103]从山桑 (*Morus bombycis*) 幼茎中克隆到了桑树低温诱导蛋白基因 Wap27A 和 Wap27B,这些低温诱导基因在桑树体内的低温应答、增强抗性过程中扮演着重要角色。Puhakainen 等^[104]从白桦中克隆出低温诱导基因 *Bplti36*,并发现在短日照和低温处理下, *Bplti36* 转录水平显著上升,使 α -亚麻酸 (18:3) 含量增高,脂肪酸不饱和性增加,从而提高白桦的抗寒能力^[105]。Lin 等^[106]对甜杨 (*Populus suaveolens*) *PsG6PDH* 基因的原核表达实验表明,该基因在维持细胞渗透势、参与抗冻胁迫中起重要作用。Kayal 等^[107]从冈尼桉 (*Eucalyptus gunnii*) 分离的冷诱导基因 *EguCBF1a* 和 *EguCBF1b*,编码 CRT/DRE 结合因子,能够响应短日照和低温胁迫。林士杰等^[108]从怪柳 (*Tamarix chinensis*) cDNA 文库中分离得到冷适应蛋白基因 *ThCAP* 片段,并应用 RACE 技术获得其全长 cDNA 序列。Guo 等^[109]在转基因研究中,获得转基因 (35S:*ThCAP*) 山新杨 (*Populus davidiana* × *Populus bolleana*),转基因植株对低温的抵抗能力明显增强,证实 *ThCAP* 是一个重要的耐寒基因。甜杨冷诱导基因 *ICE1* 的编码产物 ICE,是在低温时诱导抗冻因子 CBF 家族表达的转录激活因子,可特异性结合 *CBF3* 启动子的 MYC 作用元件,启动 *CBF3* 基因的表达;然后 *CBF3* 转录激活因子再结合到其下游目的基因启动子的 DRE/CRT 序列上,诱导抗冻基因 *COR* 的表达,从而提高植株的抗冻性^[110]。

4 结论与展望

低温霜冻是一种时间尺度很短的农业气象灾害,在生长季内由低温霜冻引起的灾害可能对林木的组织或整个幼树、幼苗产生致命伤害,因而已成为林木生长发育,天然或人工更新的一个主要限制因子,最终在影响林业生产发展的同时还降低了原有森林生态系统的服务功能。霜冻对树木产生危害的直接原因是低温,引起低温的因素既有大尺度的环流形势,也有局地尺度的小气候特征,后者又受到地形、地势、坡度、坡向、植被覆盖及土壤含水量等诸多因素的影响。此外,低温和高光强互作能加重霜冻危害。树木的受害程度除与上述因素有关外,还取决于树木的耐冻性,而树木的耐冻性随季节、树种以及树木的不同部位而有显著差异。

林木多生长在地形复杂的山地,而引发低温霜冻灾害的因素又复杂多变,使得霜冻灾害的监测和危害评估较为困难。借助于 3S 技术来获取复杂地形下林内温度和光照等气象要素的分布情况,建立低温和光照的空间分布模型,并结合林木的耐冻性,建立起低温霜冻危害评估的概率模型,将有助于提高霜冻灾害的监测和危害评估水平。

霜冻灾害防御作为世界性技术难题已经被人们进行了很长时间的研究,并且也采取了许多成功有效的防御措施。但这些研究大多是针对农作物和经济林木,已有的霜冻防御措施也主要被应用在农业和经济林木区的苗圃地。而对用材林和天然林的研究很少,今后应加强这方面的研究。应考虑将物理与生物防霜方法相结合,物理防霜方法通过建防护林和采取合适的采伐措施,来改善林内地表的辐射平衡;而生物措施则通过生物技术手段来增强林木的耐冻性。结合霜冻灾害的监测和危害评估,对这些防霜措施的防霜效果进行定量评估。

近 20 年来,分子生物学的迅猛发展,对于揭示植物抗寒机理和提高抗寒力方面起了重要的作用,有关林木的抗寒研究也已逐渐深入到基因工程领域。目前虽然克隆了一些植物抗寒基因并通过基因工程手段使部分植物的抗寒性有所提高,但对于植物的低温应答和抗寒分子机制尚不清楚,尤其是冷信号是如何传递的,转

录因子又是如何调控各种抗寒基因的表达,各种抗寒基因又是如何发挥抗寒活性的等问题尚需深入研究。但运用分子生物学技术,加强林木抗寒性分子机理研究来提高林木抗寒力是防止林木霜冻害的一条有效途径,也将是今后重要的研究方向。

References:

- [1] Sun Z F. The frost damage and defense technology. Beijing: Agricultural Science and Technology Press, 2001.
- [2] Lin E D, Yang X. Impact of climate change on agriculture assessment and adaptation strategies. Beijing: Meteorological Press, 2002.
- [3] IPCC, 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 University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 2007, 996 pp.
- [4] Rammig A, Jönsson A M, Hickler T, Smith B, Bärning L, Sykes M T. Impacts of changing frost regimes on Swedish forests: Incorporating cold hardiness in a regional ecosystem model. *Ecological Modelling*. 2010, 221(4): 303-313.
- [5] Jönsson A M, Linderson M L, Stjernquist I, Schlyter P, Bärning L. Climate change and the effect of temperature backlashes causing frost damage in *Picea abies*. *Global and Planetary Change*, 2004, 44(1/4): 195-207.
- [6] Wang S W. Diagnostic studies on the climate change and variability for the period of 1880—1990. *Acta Meteorologica Sinica*, 1994, 52(3): 261-273.
- [7] Ma Z G. Variation of frost days and its relationship to regional warming in Northern China. *Acta Geographica Sinica*, 2003, 58: 31-37.
- [8] Ye D X, Zhang Y. Characteristics of frost changes from 1961 to 2007 over China. *Journal of Applied Meteorological Science*, 2008, 19(6): 661-665.
- [9] Zhong X L, Lin E D. A summary of impacts of climate changes on the ecosystems of china. *Chinese Journal of Ecology*, 2000, 19(5): 62-66.
- [10] Hänninen H. Climate warming and the risk of frost damage to boreal forest trees: identification of critical ecophysiological traits. *Tree Physiology*, 2006, 26(7): 889-898.
- [11] Wang Q Z, Wang C J, Bu Q L, Xu F X. 2009 in Laiwu fruit industry low temperature and frost disaster cause and defense countermeasure. *Acta Agriculturae Jiangxi*, 2010, 22(4): 96-98, 101.
- [12] Repo T, Hänninen H, Kellomäki S. The effects of long-term elevation of air temperature and CO₂ on the frost hardiness of Scots Pine. *Plant, Cell and Environment*, 1996, 19(2): 209-216.
- [13] Feng Y X, He W X. The study of frost. Beijing: Meteorological Press, 1996.
- [14] Zhao J F, Yang X G, Liu Z J. Influence of climate warming on serious low temperature and cold damage and cultivation pattern of spring maize in Northeast China. *Acta Ecologica Sinica*, 2009, 29(12): 6544-6551.
- [15] Viveros-Viveros H, Sáenz-Romero C, López-Upton J, Vargas-Hernández J J. Growth and frost damage variation among *Pinus pseudostrobus*, *P. montezumae* and *P. hartwegii* tested in Michoacán, México. *Forest Ecology and Management*, 2007, 253(1/3): 81-88.
- [16] Dittmar C, Fricke W, Elling W. Impact of late frost events on radial growth of common beech (*Fagus sylvatica* L.) in southern Germany. *European Journal of Forest Research*, 2006, 125(3): 249-259.
- [17] Prozherina N, Freiwald V, Rousi M, Oksanen E. Interactive effect of springtime frost and elevated ozone on early growth, foliar injuries and leaf structure of birch (*Betula pendula*). *New Phytologist*, 2003, 159(3): 623-636.
- [18] Lindkvist L, Chen D. Air and soil frost indices in relation to plant mortality in elevated complex clear-felled terrain. *Climate Research*, 1999, 12(1): 65-75.
- [19] Chen X W, Zhang C, Liu H, Liu K M. Frost injury in manchurian ash plantations. *Journal of Northeast Forestry University*, 1999, 27(2): 10-14.
- [20] Wu J, Wang Z Q, Liu X F. Frost injury to young tilia amurensis plantation. *Journal of Northeast Forestry University*, 2002, 30(6): 6-10.
- [21] Awaya Y, Tanaka K, Kodani E, Nishizono T. Responses of a beech (*Fagus crenata* Blume) stand to late spring frost damage in Morioka, Japan. *Forest Ecology and Management*, 2009, 257(12): 2359-2369.
- [22] Li M S, Wang D L, Yoshida H. New advances in the study of low temperature disaster in agriculture. Beijing: Chinese Agricultural Science and Technology Press, 2006.
- [23] Zhang Y D. Liaodong area meteorological disasters and disaster mitigation strategies. Beijing: Meteorological Press, 1992.
- [24] He Q T. Forest Meteorology of China. Beijing: China Forestry Press, 2001.
- [25] Tao D L, Jin Y H, Yang B F. Freezing tolerance of trees on Changbai Mountain. *Acta Ecologica Sinica*, 1989, 9(3): 283-284.
- [26] Cao H M, Shi Z M, Zhou X B, Lei P Z, Dong S G. A review on response of plant to low temperature and its cold resistance. *Chinese Journal of Agrometeorology*, 2010, 31(2): 310-314.
- [27] Lin P, Shen R C, Lu C Y. The characteristics of chilling-resistance on six mangrove plants. *Journal of Xiamen University (Natural Science)*, 1994, 33(2): 249-252.
- [28] Xu D P, Yang Z J, Liang K N, Zhang N N, Zeng J. The low temperature survey of 5 rare species of Southern China. *Scientia Silvae Sinicae*, 2008, 44(5): 1-2.
- [29] Cannell M G R, Tabbush P M, Deans J D, Hollingsworth M K, Sheppard L J, Philipson J J, Murray M B. Sitke spruce and douglas fir seedlings

- in the nursery and in cold storage: Root growth potential, carbohydrate content, dormancy, frost hardiness and mitotic index. *Forestry*, 1990, 63(1): 9-27.
- [30] Yang C. An exceptional frost injury to Chinese Pine stands and of its analysis. *Journal of Northwest Forestry College*, 1990, 5(4): 76-80.
- [31] Dy G, Payette S. Frost hollows of the boreal forest as extreme environments for black spruce tree growth. *Canadian Journal of Forest Research*, 2007, 32(2): 492-504.
- [32] Lindkvist L, Lindqvist S. Spatial and temporal variability of nocturnal summer frost in elevated complex terrain. *Agricultural and Forest Meteorology*, 1997, 87(2/3): 139-153.
- [33] Lu D H. *Meteorology and Forest Meteorology*. Beijing: China Forestry Press, 1994.
- [34] Tao D L, Jin Y H, Du Y J, Liu Y Y, Liu G Z, Zhan R Y. Responses of organic free-radicals production of overwintering conifer needles to low temperature and light. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 1992, 3(2): 120-124.
- [35] Xu N, Dong X H, Guan Y, Wang J. The effect of low temperature stress on antioxidant enzyme activities of *Buxus sempervirens* L under different light conditions. *Bulletin of Botanical Research*, 2007, 27(5): 574-577.
- [36] Hu W H, Xiao Y A, Yu J Q, Huang L F. Effects of different light intensity after low night temperature stress on PS II functions and absorbed light allocation in leaves of *Ficus microcarpa*. *Bulletin of Botanical Research*, 2005, 25(2): 159-162.
- [37] Blennow K, Lindkvist L. Models of low temperature and high irradiance and their application to explaining the risk of seedling mortality. *Forest Ecology and Management*, 2000, 135(1/3): 289-301.
- [38] Feng Y L, Cao K F, Feng Z L. Effects of nocturnal chilling temperature on chlorophyll Fluorescence parameters in seedlings of two ravine rainforest species grown under different light intensities. *Acta Phytocologica Sinica*, 2004, 28(2): 150-156.
- [39] Lajzerowicz C C, Walters M B, Krasowski M, Massicotte H B. Light and temperature differentially colimit subalpine fir and Engelmann spruce seedling growth in partial-cut subalpine forests. *Canadian Journal of Forest Research*, 2004, 34(1): 249-260.
- [40] Dubayah R, Rich P M. Topographic solar radiation models for GIS. *International Journal of Geographical Information Systems*, 1995, 9(4): 405-419.
- [41] Blennow K, Persson P. Modeling local-scale frost variations using mobile temperature measurements with a GIS. *Agricultural and Forest Meteorology*, 1998, 89(1): 59-71.
- [42] Cheng X W, Zhang Y, Ma H B. Occurrence and control of frost in *Tilia amurensis* and *Fraxinus mandshurica* young plantations. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2000, 11(6): 809-813.
- [43] Blennow K. Modelling minimum air temperature in partially and clear felled forests. *Agricultural and Forest Meteorology*, 1998, 91(3/4): 223-235.
- [44] Fu B P. *Mountain climate*. Beijing: Science Press, 1983.
- [45] Laughlin G P, Kalma J D. Frost risk mapping for landscape planning: a methodology. *Theoretical and Applied Climatology*, 1990, 42(1): 41-51.
- [46] Renaud V, Rebetez M. Comparison between open-site and below-canopy climatic conditions in Switzerland during the exceptionally hot summer of 2003. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2009, 149(5): 873-880.
- [47] Ferrez J, Davison A C, Rebetez M. Extreme temperature analysis under forest cover compared to an open field. *Agricultural and Forest Meteorology*. 2011, 151(7): 992-1001.
- [48] Kubin E, Kempainen L. Effects of clearcutting of boreal spruce forest on air and soil temperature conditions. *Acta Forestalia Fennica*, 1991, 225: 1-42.
- [49] Nunez M, Bowman, D M J S. Nocturnal cooling in a high altitude stand of *Eucalyptus delegatensis* as related to stand density. *Australian Journal of Forest Research*, 1986, 16(2): 185-197.
- [50] Scowcroft P G, Jeffrey J. Potential significance of frost, topographic relief, and *Acacia koa* stands to restoration of mesic Hawaiian forests on abandoned rangeland. *Forest Ecology and Management*, 1999, 114(1/3): 447-458.
- [51] Nunez M, Sander D. Protection from cold stress in a *Eucalyptus* shelterwood. *Journal of Climatology*, 1982, 2(2): 141-146.
- [52] Granberg H B, Ottosson-Löfvenius M, Odin H. Radiative and aerodynamic effects of an open pine shelterwood on calm, clear nights. *Agricultural and Forest Meteorology*, 1993, 63(3/4): 171-188.
- [53] Langvall O, Ottosson-Löfvenius M, Effect of shelterwood density on nocturnal near-ground temperature, frost injury risk and budburst date of Norway spruce. *Forest Ecology and Management*, 2002, 168(1/3): 149-161.
- [54] Feldhake C M. Forage frost protection potential of conifer silvopastures. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2002, 112(2): 123-130.
- [55] Kubin E, Kempainen L. Effect of soil preparation of boreal spruce forest on air and soil temperature conditions in forest regeneration areas. *Acta Forestalia Fennica*, 1994, 244(2): 1-56.
- [56] Yang K M, Chen X F, Wang D S, Wu H. Analysis of weather climatic features of the first frost in the Northeast Part of China. *Meteorological Monthly*, 1999, 25(6): 13-18.
- [57] Wu X G. Characteristics analysis of heavy frostbite weather process in winter of Guangxi. *Journal of Guangxi Meteorology*, 2000, 21(1): 1-5.
- [58] Tan L, Zeng X T, Gao A N. Comparison analysis of the severe chilling icy rain and snow freezing and widespread frost disaster weather events. *Journal of Meteorological Research and Application*, 2008, 29(2): 9-11, 25.
- [59] Zhang J, Liu Y L, Song L H. Autumn in Heilongjiang province the climate analysis of the first frost. *Heilongjiang Meteorology*, 2005, (3):

- 18-21.
- [60] Ghaemi A A, Rafiee M R, Sepaskhah A R. Tree-Temperature Monitoring for Frost Protection of Orchards in Semi-Arid Regions Using Sprinkler Irrigation. *Agricultural Sciences China*, 2009, 8(1): 98-107.
- [61] Guy C L, Hummel R L, Haskell D. Induction of freezing tolerance in spinach during cold acclimation. *Plant Physiology*, 1987, 84: 868-871.
- [62] Jian L C. Advances of the studies on the mechanism of plant cold hardiness. *Chinese Bulletin of Botany*, 1992, 9(3): 17-22.
- [63] Cao Q, Kong W F, Wen P F. Plant freezing tolerance and genes express in cold acclimation; a review. *Acta Ecologica Sinica*, 2004, 24(4): 806-811.
- [64] Sogaard G, Granhus A, Johnsen Ø. Effect of frost nights and day and night temperature during dormancy induction on frost hardiness, tolerance to cold storage and bud burst in seedlings of Norway spruce. *Trees-Structure and Function*, 2009, 23(6): 1295-1307.
- [65] Strimbeck G R, Kjellsen T D, Schaberg P G, Murakami P F. Dynamics of low-temperature acclimation in temperate and boreal conifer foliage in a mild winter climate. *Tree Physiol.* 2008, 28, 1365-1374.
- [66] Lin S Z, Li X P, Zhang Z Y. The effects of cold acclimation on the freezing resistance and total soluble protein in *Populus Tomentosa* seedlings. *Scientia Silvae Sinicae*, 2002, 38(6): 137-141.
- [67] Li C Y, Junttila O, Palva E T. Environmental regulation and physiological basis of freezing tolerance in woody plants. *Acta Physiologiae. Plantarum*, 2004, 26(2): 213-222.
- [68] Xu Y, Xue L, Qu M. Physiological and ecological mechanisms of plant adaptation to low temperature. *Scientia Silvae Sinicae*, 2007, 43(4): 88-94.
- [69] Zuo Y Z, Li J Y, Lu G Q, Song Z, Wu H X. Study on cold acclimation in *larix prinapia rupprechtii*. *Biotechnology*, 1999, 9(3): 9-11, 41.
- [70] Li Y Q, Zhang G, Dong S H, Yu S P, Zhu L, Jin X M. The physiological indices affecting parameters of electrical impedance spectroscopy in *Pinus bungeana* Zucc. needles during frost hardening. *Journal of Nanjing Forestry University (Natural Sciences Edition)*, 2010, 34(2): 24-30.
- [71] Beck E H, Heim R, Hansen J. Plant resistance to cold stress; mechanisms and environmental signals triggering frost hardening and dehardening. *Journal of Biosciences*, 2004, 29(4): 449-459.
- [72] Markley J L, McMillan C, Thompson G A. Latitudinal differentiation in response to chilling temperatures among populations of three mangroves, *Avicennia germinans*, *Laguncularia racemosa*, and *Rhizophora mangle*, from the western tropical Atlantic and Pacific Panama. *Canadian Journal of Botany*, 1982, 60(12): 2704-2715.
- [73] Gao X M, Han W D, Zhang X Z. Journal of Anhui Agricultural University, Studies on adaptability of *sonneratia caseolaris* (L) engl and *S. apetala* Buch-Ham through its introduction and acclimatization. *Journal of Anhui Agricultural University*, 1998, 25(4): 413-136.
- [74] Zhou Y M, Lu C Y. The changes in sub-microstructure of leave cell from introduced and original *Bruguiera sexangula* by cold treatment. *Journal of Xiamen University (Natural Science)*, 2001, 40(5): 1170-1174.
- [75] Strimbeck G R, Kjellsen T D. First frost; Effects of single and repeated freezing events on acclimation in *Picea abies* and other boreal and temperate conifers. *Forest Ecology and Management*, 2010, 259(8): 1530-1535.
- [76] Zhong X L. Occurrence and prevention of frost Injury in recent two decades. *Agricultural Meteorology*, 2003, 24(1): 4-6.
- [77] Feng Z Z, Wang J, Feng Z W. Effect of triadimefon on cucumber seedlings growth and their resistance to chilling injury. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2003, 14(10): 1637-1640.
- [78] Zhang Y P, Liu H H, Shen S X, Zhang C H, Zhang X E. Effect of polyamine priming on seed vigor and seedling chilling tolerance in eggplant. *Acta Horticulturae Sinica*, 2010, 37(11): 1783-1788.
- [79] Yang Y J, Zheng L Y, Wang X C. Effect of cold acclimation and ABA on cold hardiness, contents of proline in tea plants. *Journal of Tea Science*, 2004, 24(3): 177-182.
- [80] Wang S G. Roles of cytokinin on stress-resistance and delaying senescence in plants. *Chinese Bulletin of Botany*, 2000, 17(2): 121-126.
- [81] Huang L H, Huang X W, Mai H D. Effect of salicylic acid on chilling resistance of corn seedlings influence. *Crops*, 2005, (5): 16-18.
- [82] Wang L, Wang Y L, Liao K. Effect of exogenous salicylic acid on the cold resistance of the red globe grape. *Journal of Xinjiang Agricultural University*, 2005, 28(2): 51-54.
- [83] Lindow S E, Army D C, Upper C D. *Erwinia herbicola*: a bacteria ice nucleus active in increasing frost injury to corn. *Phytopathology*, 1978, 68(3): 523-527.
- [84] Sun F Z, He L Y. Ice nucleation active bacteria and frost of plants. *Plant Protection*, 1989, (4): 41-43.
- [85] Hazra A, Saha M, De U K, Mukherjee J, Goswami K. Study of ice nucleating characteristics of *Pseudomonas aeruginosa*. *Journal of Aerosol Science*, 2004, 35: 1405-1414.
- [86] Lindow S E, McGourty C, Elkins R. Interactions of antibiotics with *Pseudomonas fluorescens* strain A506 in the control to fire blight and frost injury to pear. *Phytopathology*, 1996, 86(8): 841-848.
- [87] Sun F Z, Zhao T C. Biological characteristics and frost-inciting mechanisms of ice nucleation active (INA) bacteria and the research in frost control. *Acta Ecologica Sinica*, 2003, 23(2): 336-345.
- [88] Chao L J, Lu Q, Jia X Z, Zeng D P. Study on biological ice nucleation and its applications situation and prospect. *Forest Research*, 2001, 14(4): 446-454.
- [89] Baca S, Canfield M L, Moore L W. Variability in Ice Nucleation Strains of *Pseudomonas syringae* Isolated from Diseased Woody Plants in Pacific

- Northwest Nurseries. Plant Disease, 1987, 71(5): 412-415.
- [90] Lindow S E, Army D C, Upper C D. Distribution of ice nucleation-active bacteria on plants in nature. Applied and Environmental Microbiology, 1978, 38(6): 831-838.
- [91] Kam M D E. Damage to poplar caused by *Pseudomonas syringae* in combination with frost and fluctuation temperatures. European Journal of Forest Pathology, 1982, 12(1): 203-209.
- [92] Zeng D P, Zhang Y X, Chao L J, Wang L F, Sun F Z. A study on ice nucleation active bacteria in Northern Poplars. Forest Research, 1994, 7(5): 488-491.
- [93] Zeng D P, Chao L J, Sun F Z, Zhao T C. The ice nucleation active bacteria on poplar trees and their effects in the courses of causing freezing injury and inducing fungous canker. Scientia Silvae Sinicae, 1999, 35(3): 53-57.
- [94] Meng Q R, Li Y H, Li S Y, Zhang Q, Wen L Z, Yang J M. Selection of bactericides controlling INA bacteria and their efficacy on frost damage prevention during blooming period of apricot. Acta Ecologica Sinica, 2007, 27(10): 4191-4196.
- [95] Feng Y X, He W X. Progress on the studies of biological ice nucleators and disaster defence. Agricultural Meteorology, 2003, 24(1): 15-18.
- [96] Weiser C J. Cold resistance and injury in woody plants: knowledge of hardy plant adaptations to freezing stress may help us to reduce winter damage. Science, 1970, 169(3952): 1269-1278.
- [97] Jian L C, Lu C F, Li J H, Li P H. Increment of chilling tolerance and its physiological basis in chilling-sensitive corn sprouts and tomato seedlings after cold-hardening at optimum temperatures. Acta Agronomica Sinica, 2005, 31(8): 971-976.
- [98] Guy C L, Niemi K J, Brambl R. Altered gene expression during cold acclimation of spinach. Proceedings of the National Academy of Sciences USA, 1985, 82(11): 3673-3677.
- [99] Li S F, Su X H, Zhang B Y. Research progress in gene cloning in forest trees. Chinese Bulletin of Botany, 2011, 46(1): 79-107.
- [100] Thomashow M F. Plant cold acclimation: freezing tolerance genes and regulatory mechanisms. Annual Review of Plant Physiology and Plant Molecular Biology, 1999, 50(1): 571-599.
- [101] Guy C L, Haskell D. Preliminary characterization of high molecular mass proteins associated with cold acclimation in spinach. Plant Physiology Biochem, 1989, 27(5): 777-784.
- [102] Ouellet F, Houde M, Sarhan F. Purification, characterization and cDNA cloning of the 200 kDa protein induced by cold acclimation in wheat. Plant Cell Physiology, 1993, 34(1): 59-65.
- [103] Ukaji N, Kuwabara C, Takezawa D, Arakawa K, Fujikawa S. Cold acclimation-induced WAP27 localized in endoplasmic reticulum in cortical parenchyma cells of mulberry tree was homologous to group 3 late-embryogenesis abundant proteins. Plant Physiology, 2001, 126(4): 1588-1597.
- [104] Puhakainen T, Li C, Boije-Malm M, Kangasjärvi J, Heino P, Palva E T. Short-day potentiation of low temperature-induced gene expression of a C-repeat-binding factor controlled gene during cold acclimation in silver birch. Plant Physiology, 2004, 36(4): 4299-4307.
- [105] Martz F, Kiviniemi S, Palva T E, Sutinen M L. Contribution of omega-3 fatty acid desaturase and 3-ketoacyl-ACP synthase II (*KASII*) genes in the modulation of glycerolipid fatty acid composition during cold acclimation in birch leaves. Journal of Experimental Botany, 2006, 57(6): 897-909.
- [106] Lin Y Z, Zhang Z Y, Lin S Z, Zhang Q, Wang X. High level expression of glucose-6-phosphate dehydrogenase gene *PsG6PDH* from *Populus suaveolens* in *E. coli*. Forestry Studies in China, 2005, 7(3): 35-38.
- [107] Kayal W E, Navarro M, Marque G, Keller G, Marque C, Teulieres C. Expression profile of CBF-like transcriptional factor genes from *Eucalyptus* in response to cold. Journal of Experimental Botany, 2006, 57(10): 2455-2469.
- [108] Lin S J, Jiang J, Wang Y C. The cold acclimation protein gene from *Tamarix androssowii*. molecular plant breeding, 2006, 4(2): 299-300.
- [109] Guo X H, Jiang J, Lin S J, Wang B C, Wang Y C, Liu G F, Yang C P. A *ThCAP* gene from *Tamarix hispida* confers cold tolerance in transgenic *Populus* (*P. davidiana* × *P. bolleana*). Biotechnol Lett, 2009, 31(7): 1079-1087.
- [110] Lin Y Z, Zhang Z Y, Liu C X, Guo H, Zhu B Q, Chen X Y. *in silico* cloning and analyzing of *PsICE1* from *Populus suaveolens*, a freezing-resistant transcription factor. Molecular Plant Breeding, 2007, 5(3): 424-430.

参考文献:

- [1] 孙忠富. 霜冻灾害与防御技术. 北京: 中国农业科技出版社, 2001.
- [2] 林而达, 杨修. 气候变化对农业的影响评价及适应对策. 北京: 气象出版社, 2002.
- [6] 王绍武. 近百年气候变化与变率的诊断研究. 气象学报, 1994, 52(3): 261-273.
- [7] 马柱国. 中国北方地区霜冻日的变化与区域增暖相互关系. 地理学报, 2003, 58(Z1): 31-37.
- [8] 叶殿秀, 张勇. 1961—2007 年我国霜冻变化特征. 应用气象学报, 2008, 19(6): 661-665.
- [9] 钟秀丽, 林而达. 气候变化对我国自然生态系统影响的研究综述. 生态学杂志, 2000, 19(5): 62-66.
- [11] 王琪珍, 王承军, 卜庆雷, 徐凤霞. 2009 年冬春莱芜林果业低温霜冻灾害的成因及防御对策. 江西农业学报, 2010, 22(4): 96-98, 101.
- [13] 冯玉香, 何维勋. 霜冻的研究. 北京: 气象出版社, 1996.
- [14] 赵俊芳, 杨晓光, 刘志娟. 气候变暖对东北三省春玉米严重低温冷害及种植布局的影响. 生态学报, 2009, 29(12): 6544-6551.
- [19] 陈祥伟, 张琛, 刘华, 刘奎敏. 水曲柳人工幼林霜冻危害的研究. 东北林业大学学报, 1999, 27(2): 10-14.

- [20] 吴静, 王政权, 刘雪峰. 霜冻害对紫椴人工幼龄林的影响. 东北林业大学学报, 2002, 30(6): 6-10.
- [22] 李茂松, 王道龙, 吉田久. 农业低温灾害研究新进展. 北京: 中国农业科技技术出版, 2006.
- [23] 张裕道. 辽东山区气象灾害及减灾对策. 北京: 气象出版社, 1992.
- [24] 贺庆棠. 中国森林气象学. 北京: 中国林业出版社, 2001.
- [25] 陶大立, 靳月华, 杨碧芳. 长白山树木的耐冻性. 生态学报, 1989, 9(3): 283-284.
- [26] 曹慧明, 史作民, 周晓波, 雷鹏志, 董生刚. 植物对低温环境的响应及其抗寒性研究综述. 中国农业气象, 2010, 31(2): 310-314.
- [27] 林鹏, 沈瑞池, 卢昌义. 六种红树植物的抗寒性特性研究. 厦门大学学报(自然科学版), 1994, 33(2): 294-252.
- [28] 徐大平, 杨曾奖, 梁坤南, 张宁南, 曾杰. 华南 5 个珍贵树种的低温寒害调查. 林业科学, 2008, 44(5): 1-2.
- [30] 杨澄. 一次罕见的油松林冻灾害及其成因分析. 西北林学院学报, 1990, 5(4): 76-80.
- [33] 陆鼎煌. 气象学与森林气象学. 北京: 中国林业出版社, 1994.
- [34] 陶大立, 靳月华, 杜英君, 刘雅言, 刘桂珍, 詹瑞云. 越冬针叶有机自由基产额对低温和光照的反应. 应用生态学报, 1992, 3(2): 120-124.
- [35] 徐娜, 董晓红, 关旻, 王静. 低温胁迫下不同光照条件对锦熟黄杨抗氧化酶活性的影响. 植物研究, 2007, 27(5): 574-577.
- [36] 胡文海, 肖宜安, 喻景权, 黄黎锋. 低夜温后不同光强对榕树叶片 PS II 功能和光能分配的影响. 植物研究, 2005, 25(2): 159-162.
- [38] 冯玉龙, 曹坤芳, 冯志立. 夜间低温对不同光强下生长的两种沟谷雨林树苗荧光参数的影响. 植物生态学报, 2004, 28(2): 150-156.
- [42] 陈祥伟, 张羽, 马洪波. 紫椴、水曲柳人工幼林霜冻发生与控制研究. 应用生态学报, 2000, 11(6): 809-813.
- [44] 傅抱璞. 山地气候. 北京: 科学出版社. 1983.
- [56] 杨克明, 陈秀凤, 王东生, 吴昊. 东北地区初霜冻的天气气候特征. 气象, 1999, 25(6): 13-18.
- [57] 吴兴国. 广西冬季重大霜冻天气过程特征分析. 广西气象, 2000, 21(1): 1-5.
- [58] 覃丽, 曾小团, 高安宁. 低温雨雪冰冻灾害天气与大范围霜冻天气对比分析. 气象研究与应用, 2008, 29(2): 9-11, 25.
- [59] 张健, 刘玉莲, 宋丽华. 黑龙江省秋季初霜冻的气候分析. 黑龙江气象, 2005, (3): 18-21.
- [62] 简令成. 植物抗寒机理研究的新进展. 植物学通报, 1992, 9(3): 17-22.
- [63] 曹琴, 孔维府, 温鹏飞. 植物抗寒及其基因表达研究进展. 生态学报, 2004, 24(4): 806-811.
- [66] 林善枝, 李雪平, 张志毅. 低温锻炼对毛白杨幼苗抗冻性和总可溶性蛋白质的影响. 林业科学, 2002, 38(6): 137-141.
- [68] 徐燕, 薛立, 屈明. 植物抗寒性的生理生态学机制研究进展. 林业科学, 2007, 43(4): 88-94.
- [69] 左永忠, 李俊英, 陆贵巧, 宋珍, 武惠肖. 低温驯化对苗木生理及核酸转录的影响. 生物技术, 1999, 9(3): 9-11, 41.
- [70] 李亚青, 张钢, 董胜豪, 邵书鹏, 祝良, 靳秀梅. 抗寒锻炼期间影响白皮松针叶电阻抗图谱参数的生理指标. 南京林业大学学报(自然科学版), 2010, 34(2): 24-30.
- [73] 高秀梅, 韩维栋, 张秀枝. 海桑及无瓣海桑引种驯化中的适应性研究. 安徽农业大学学报, 1998, 25(4): 413-416.
- [74] 周一鸣, 卢昌义. 低温处理下原产地与引种的海莲叶细胞亚显微结构比较. 厦门大学学报(自然科学版), 2001, 40(5): 1170-1174.
- [76] 钟秀丽. 近 20 年来霜冻害的发生与防御研究进展. 中国农业气象, 2003, 24(1): 4-6.
- [77] 冯兆忠, 王静, 冯宗炜. 三唑酮对黄瓜幼苗生长及抗寒性的影响. 应用生态学报, 2003, 14(10): 1637-1640.
- [78] 张彦萍, 刘海河, 申书兴, 张成合, 张新娥. 多胺引发处理对茄子种子活力及幼苗耐冷性的影响. 园艺学报, 2010, 37(11): 1783-1788.
- [79] 杨亚军, 郑雷英, 王新超. 冷驯化和 ABA 对茶树抗寒力及其体内脯氨酸含量的影响. 茶叶科学, 2004, 24(3): 177-182.
- [80] 王三根. 细胞分裂素在植物抗逆和延衰中的作用. 植物学通报, 2000, 17(2): 121-126.
- [81] 黄丽华, 黄晓伟, 麦焕钿. 水杨酸对玉米幼苗抗寒性的影响. 作物杂志, 2005, (5): 16-18.
- [82] 王丽, 王燕凌, 廖康. 外源水杨酸处理对全球红葡萄植株抗寒性的影响. 新疆农业大学学报, 2005, 28(2): 51-54.
- [84] 孙福在, 何礼远. 冰核活性细菌与植物霜冻的研究概况. 植物保护, 1989, (4): 41-43.
- [87] 孙福在, 赵延昌. 冰核细菌生物学特性及其诱发植物霜冻机理与防霜应用. 生态学报, 2003, 23(2): 336-345.
- [88] 晁龙军, 吕全, 贾秀珍, 曾大鹏. 生物冰核研究与应用的现状和前景. 林业科学研究, 2001, 14(4): 446-454.
- [92] 曾大鹏, 张永祥, 晁龙军, 汪来发, 孙福在. 北方杨树上冰核活性细菌的研究. 林业科学研究, 1994, 7(5): 488-491.
- [93] 曾大鹏, 晁龙军, 孙福在, 赵延昌. 杨树上的冰核细菌及其在引起杨树冻害和又发真菌溃疡病过程中的作用. 林业科学, 1999, 35(3): 53-57.
- [94] 孟庆瑞, 李彦慧, 李帅英, 张倩, 陈少坤, 温林柱, 杨建民. 防除杏树(*Prunus armeniaca* L.) 冰核细菌药剂筛选及花期防霜效果. 生态学报, 2007, 27(10): 4191-4196.
- [95] 冯玉香, 何维勋. 生物冰核与灾害防御的研究进展. 中国农业气象, 2003, 24(1): 15-18.
- [97] 简令成, 卢存福, 李积宏, Li Paul H. 适宜低温锻炼提高冷敏感植物玉米和番茄的抗冷性及其生理基础. 作物学报, 2005, 31(8): 971-976.
- [99] 李少锋, 苏晓华, 张冰玉. 林木基因克隆研究进展. 植物学报, 2011, 46(1): 79-107.
- [108] 林士杰, 姜静, 王玉成. 桤柳冷适应蛋白基因. 分子植物育种, 2006, 4(2): 299-300.
- [110] 林元震, 张志毅, 刘纯鑫, 郭海, 朱保庆, 陈晓阳. 甜杨抗冻转录因子 ICE1 基因的 *in silico* 克隆及其分析. 分子植物育种, 2007, 5(3): 424-430.

ACTA ECOLOGICA SINICA Vol. 33, No. 12 Jun. ,2013(Semimonthly)

CONTENTS

Frontiers and Comprehensive Review

- Research on the disturbance of frost damage to forests LI Xiufen, ZHU Jiaojun, WANG Qingli, et al (3563)
- Advances in salt-tolerance mechanisms of *Suaeda* plants ZHANG Aiqin, PANG Qiuying, YAN Xiufeng (3575)

Autecology & Fundamentals

- Simulation and prediction of spatial patterns of *Robinia pseudoacacia* flowering dates in eastern China's warm temperate zone
..... XU Lin, CHEN Xiaoqiu, DU Xing (3584)
- Response of leaf functional traits of *Betula ermanii* saplings to the altitudinal Variation
..... HU Qipeng, GUO Zhihua, SUN Lingling, et al (3594)
- Analysis of genetic diversity of chinese pine (*Pinus tabulaeformis*) natural secondary forest populations and correlation with theirs
habitat ecological factors LI Ming, WANG Shuxiang, GAO Baojia (3602)
- Nitrogen addition affects root growth, phosphorus and nitrogen efficiency of three provenances of *Schima superba* in barren soil
..... ZHANG Rui, WANG Yi, JIN Guoqing, et al (3611)
- Effect of enclosure on soil C mineralization and priming effect in *Stipa grandis* grassland of Inner Mongolia
..... WANG Ruomeng, DONG Kuanhu, HE Nianpeng, et al (3622)
- Effects of slope position on gas exchange characteristics of main tree species for vegetation restoration in dry-hot valley of Jingsha
River DUAN Aiguo, ZHANG Jianguo, HE Caiyun, et al (3630)
- Impacts of biodegradation on desorption of phenol adsorbed on black carbon and soil
..... HUANG Jiexun, MO Jianmin, LI Feili, et al (3639)
- Physiological and biochemical responses to different soil drought stress in three tree species
..... WU Qin, ZHANG Guangcan, PEI Bin, et al (3648)
- The ear-leaf ratio of population is related to yield and water use efficiency in the water-saving cultivation system of winter wheat
..... ZHANG Yongping, ZHANG Yinghua, HUANG Qin, et al (3657)
- Effects of ozone stress on photosynthesis, dry matter production and yield of rice under different seedling quality and plant density ...
..... PENG Bin, LI Panlin, ZHOU Nan, et al (3668)
- Effects of water and nitrogen under root restriction on photosynthetic characters of cotton plants grown with under-mulch drip
irrigation TAO Xianping, LUO Honghai, ZHANG Yali, et al (3676)
- The influence of light and growth stage on oxygen diffusion capacity of *Acorus calamus* roots
..... WANG Wenlin, WANG Guoxiang, WAN Yinjing, et al (3688)
- Isolation, screening and characterization of phytopathogen antagonistic endophytes from wild *Artemisia argyi*
..... XU Yajun, ZHAO Longfei, CHEN Pu, et al (3697)
- Performance of the two host-biotypes of *Aphis gossypii* (Hemiptera: Aphididae) on different cucurbitaceous host plants
..... XIAO Yunli, YIN Xiangchu, LIU Tongxian (3706)
- The effects of gender and temperature on the wintering behavior of Chinese merganser
..... ZENG Binbin, SHAO Mingqin, LAI Hongqing, et al (3712)

Population, Community and Ecosystem

- Assessment indicators system of forest ecosystem health based on the disturbance in Wangqing forestry
..... YUAN Fei, ZHANG Xingyao, LIANG Jun (3722)
- Heterogeneity evaluation of forest ecological system spatial structure in Dongting Lake
..... LI Jianjun, LIU Shuai, ZHANG Huiru, et al (3732)

Landscape, Regional and Global Ecology

- Climate-growth relationships of *Abies faxoniana* from different elevations at Miyaluo, western Sichuan, China
..... XU Ning, WANG Xiaochun, ZHANG Yuandong, et al (3742)

- Spatial-temporal distribution of net primary productivity and its relationship with climate factors in Inner Mongolia from 2001 to 2010 MU Shaojie, LI Jianlong, ZHOU Wei, et al (3752)
- Influences of topographic features on the distribution and evolution of landscape in the coastal wetland of Yancheng
..... HOU Minghang, LIU Hongyu, ZHANG Huabing, et al (3765)
- Vegetation landscape pattern change and characteristics of spatial distribution in south edge of Mu Us Sandy Land
..... ZHOU Shuqin, JING Yaodong, ZHANG Qingfeng, et al (3774)
- Climate change recorded mainly by pollen from baixian lake during the last 5.5kaB. P.
..... DU Rongrong, CHEN Jing'an, ZENG Yan, et al (3783)
- Characteristics of temperature field, humidity field and their eco-environmental effects in spring in the typical valley-city
..... LI Guodong, ZHANG Junhua, WANG Naiang, et al (3792)
- Spatial and temporal variation of surface water vapor over northern and southern regions of Qinling Mountains
..... JIANG Chong, WANG Fei, YU Xiaoyong, et al (3805)
- Spatial variation of landscape eco-risk in open mine area WU Jiansheng, QIAO Na, PENG Jian, et al (3816)
- The comparison of ecological geographica regionlization in China based on Holdridge and CCA analysis
..... KONG Yan, JIANG Hong, ZHANG Xiuying, et al (3825)
- Resource and Industrial Ecology**
- Agricultural eco-efficiency evaluation in China based on SBM model PAN Dan, YING Ruiyao (3837)
- The emergy analysis of large yellow croaker (*Larimichthys crocea*) aquaculture system around Dongji island in Zhoushan
..... SONG Ke, ZHAO Sheng, CAI Huiwen, et al (3846)
- Optimum stripe arrangement for inter-cropping and mixed-cropping of different maize (*Zea mays* L.) genotypes
..... ZHAO Yali, KANG Jie, LIU Tianxue, et al (3855)
- Effects of climate and soil on the carotenoid and cuticular extract content of cured tobacco leaves
..... CHEN Wei, XIONG Jing, CHEN Yi, et al (3865)
- Urban, Rural and Social Ecology**
- Carbon sequestration and oxygen release as well as cooling and humidification efficiency of the main greening tree species of
Sha River, Chengdu ZHANG Yanli, FEI Shimin, LI Zhiyong, et al (3878)

《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工作者,探索生态学奥秘,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

本期责任副主编 吴文良

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 33 卷 第 12 期 (2013 年 6 月)

ACTA ECOLOGICA SINICA

(Semimonthly, Started in 1981)

Vol. 33 No. 12 (June, 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	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	王如松	Editor-in-chief	WANG Rusong
主 管	中国科学技术协会	Supervised by	China Association for Science and Technology
主 办	中国生态学学会 中国科学院生态环境研究中心 地址:北京海淀区双清路 18 号 邮政编码:100085	Sponsored by	Ecological Society of China Research Center for Eco-environmental Sciences, CAS Add:18, Shuangqing Street, Haidian, Beijing 100085, China
出 版	科 学 出 版 社 地址:北京东黄城根北街 16 号 邮政编码:100717	Published by	Science Press Add:16 Donghuangchenggen North Street, Beijing 100717, China
印 刷	北京北林印刷厂	Printed by	Beijing Bei Lin Printing House, Beijing 100083, China
发 行	科 学 出 版 社 地址:东黄城根北街 16 号 邮政编码:100717 电话:(010)64034563 E-mail:journal@cspg.net	Distributed by	Science Press Add:16 Donghuangchenggen North Street, Beijing 100717, China Tel:(010)64034563 E-mail:journal@cspg.net
订 购	全国各地邮局	Domestic	All Local Post Offices in China
国外发行	中国国际图书贸易总公司 地址:北京 399 信箱 邮政编码:100044	Foreign	China International Book Trading Corporation Add:P. O. Box 399 Beijing 100044, China
广告经营 许 可 证	京海工商广字第 8013 号		



ISSN 1000-0933
CN 11-2031/Q

国内外公开发行

国内邮发代号 82-7

国外发行代号 M670

定价 90.00 元