

森林冰雪灾害致损因子研究综述

孙晓瑞, 高永, 杨光, 丁延龙, 贾旭, 陈晓娜

(内蒙古农业大学 沙漠治理学院, 内蒙古 呼和浩特 010020)

摘要: 对国内外森林冰雪灾害的研究进行综述和分析, 将森林冰雪灾害的致损因子总结为地形因子、林分因子和气象因子, 涉及的具体指标分别为坡度、坡向、坡位、海拔、树种组成、林分龄组、林分密度、温度、风速、累计霜冻降雪日数、积雪持续日数、积雪深度。分析认为, 筛选可适用于较大尺度森林冰雪灾害研究的通用致损因子, 并在此基础上开展森林冰雪灾害评估体系研究将是未来森林冰雪灾害研究的重要方向。

关键词: 森林; 冰雪灾害; 致损因子; 地形; 林分; 气象

中图分类号: S761.3 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3776 (2017) 03-0079-06

Review on Factors Affecting Snow and Ice Damage of Forest

SUN Xiao-rui, GAO Yong, YANG Guang, DING Yan-long, JIA Xu, CHEN Xiao-na

(1. Desert Science and Engineering College, Inner Mongolia Agricultural University, Hohhot 010020, China)

Abstract: Reviews were made on researches of forest snow and ice disaster at home and abroad, and as well as on damage factors such as terrain, forest types and meteorology. Their indicators involved gradient, aspect, slope position, elevation, tree species composition, stand age, stand density, temperature, wind speed, cumulative frost and snow days, snow cover days and depth. Analysis showed that further researches should be focused at common damage indicators for forest snow and ice disaster in large area, and their assessment system.

Key words: forest; snow and ice disaster; damage factors; terrain; meteorology; assessment

森林冰雪灾害易造成林木压弯、断梢、断干、倒伏、翻斃等^[1-2], 严重影响林木的正常生长, 同时对林下光照、土壤、凋落物、真菌和森林动物等生物、非生物因素都会产生一定的影响, 影响森林生态系统的正常运行, 不利于林业生产发展。据民政部国家减灾中心灾害信息部记录, 1992-2002年, 我国发生重大冰雪灾害高达9次^[3], 内蒙古地区平均3~5a就会有冰雪灾害发生^[4]。2008年我国南方大部分地区出现大范围、长时间的持续强降雪冰冻天气, 林区大片树木出现倒伏或拦腰折断现象, 各省森林资源损失重大^[5]。

灾害评估的基本目的是通过单项指标或综合指标量化反映灾害的主要特点和破坏损失程度, 为规划、部署和实施灾害防治工作提供依据。目前有关冰雪灾害评估的研究主要集中在牧区、农田方面^[6-7], 研究手段主要有遥感、气象站点资料收集等方法^[8-9]。森林由于其林冠层高大, 遮蔽作用强等特点^[10], 通过常规的遥感手段难以获取林下的积雪情况。另一方面, 森林分布面积广大, 气象站点偏少, 有关森林冰雪灾害相关指标难以获取, 加大了其研究难度^[11]。目前关于森林冰雪灾害受损评估体系的研究较少, 且侧重于冰雪灾害对经济、生态和社

收稿日期: 2016-12-09; 修回日期: 2017-03-18

基金项目: 内蒙古自治区林业厅“森林灾害风险区划及评估”项目

作者简介: 孙晓瑞, 硕士研究生, 从事森林自然灾害风险评估、荒漠化防治研究; E-mail: 1293750989@qq.com。通信作者: 高永, 教授, 从事森林自然灾害风险评估、荒漠化防治研究; E-mail: 13948815709@163.com。

会效益损失方面^[12]。森林作为地球上重要的生态系统,其分布面积广大,各地区自然、地貌、植被条件差异巨大,有关森林冰雪灾害致损因子的研究亦较为分散,不利于森林冰雪灾害受损评估研究的开展。为此,对国内外森林冰雪灾害的研究进展进行综述和分析,总结森林冰雪灾害致损指标,以期梳理森林冰雪灾害致损因子的研究重点及未来发展方向,为相关研究者提供借鉴,为森林冰雪灾害受损评估提供研究基础。

1 森林冰雪灾害指标的选取

影响森林冰雪灾害的因素多种多样,可将其归纳为地形因子、林分因子和气象因子三个方面。

表 1 森林冰雪灾害致损因子
Table 1 Damage factors in snow and ice disaster

一级指标	二级指标	内 容
A 地形因子	A1 坡度	坡面垂直高度和水平距离的比
	A2 坡向	坡面法线在水平面上的投影的方向
	A3 坡位	脊、上坡、中坡、下坡、谷地、平地
	A4 海拔	地面某个地点高出海平面的垂直距离
B 林分因子	B1 树种组成	组成林分的各树种所占的比重
	B2 林分龄组	幼龄林、中龄林、近熟林、成熟林
	B3 林分密度	单位面积上的林木株数
C 气象因子	C1 温度	空气中的水分子温度位于 0℃ 以下时,即认为达到了冰点
	C2 风速	空气相对于地球某一固定地点的运动速率
	C3 累计霜冻/降雪日数	空气温度突然下降到 0℃ 以下,树木林冠附着白色冰晶
	C4 积雪持续日数	积雪的开始期至终止期
	C5 积雪深度	雪层表面到地面之间的垂直深度

1.1 地形因子

1.1.1 坡度 平地的林木比坡地的林木受冰雪灾害相对较轻^[13],坡度的大小与林木受损呈正比,坡度越陡,林木受害越严重^[1]。尹新华等在分析浙江省毛竹林 *Phyllostachys heterocycla* ‘*Pubescens*’ 的受损特点得出,坡度与受损率呈线性关系,发现坡度在 55° 时,受损率高达 70.5%;坡度小于 30° 时,冰雪冻害呈减少趋势^[14]。由于树木生长具有趋光性^[15],因此陡坡处林木树冠生长不对称,使得积压在树冠上的冰雪重量不均衡,且随着坡度的增加,林木的受压应力相对增加,冰雪附着于树木上的重量远远超过树木自身能够承受的范围,从而极易造成林木折断、倒伏甚至是连根拔起;另外,坡度越陡的地方通常土层较薄、树木的根系生长较浅,陡坡土质较松,树木受灾害时被压倒在地面的距离相对平地距离要远,且在陡坡上因为受灾倒下的树木有更大的趋势倒向相邻的树木,因此极易引起相邻树木受灾。Dobbertin^[16]对瑞士山区两次暴风雪后林木损失的统计结果显示,坡度在 8° ~ 35° 更容易发生森林雪灾。苏志尧等^[5]对 2008 年中国南方冰雪灾害对典型亚热带山地常绿阔叶林造成的损害情况进行了研究,认为坡度在 15° ~ 45° 的林木受害最严重。

1.1.2 坡向 研究表明,迎风坡和阴坡的树木受灾情况较为严重^[17]。对大果紫檀 *Pterocarpus macrocarpus* 调查发现,迎风面的紫檀苗木受损严重,而其他区域的受损明显较轻^[18]。由于树木生长的向光性^[15],所以迎风坡生长的树冠多表现为不对称生长,并易在风口产生冰冻过程,再加上风力对树木的冲击作用,使得迎风坡在遇到冰雪灾害时受损严重^[19]。对贵州省的小桐子 *Jatropha curcas* 幼树的雨雪冰冻灾害调查得知,阳坡林木受损率为 62%,阴坡受损率则高达 100%^[17]。阴坡由于缺乏光照,树木接收的阳光照射较少,局地温度相对阳坡较低,致使林木枝叶上堆积的冰雪不能及时融化,长期累积对林木易造成更严重的损害。

1.1.3 坡位 有关学者研究冰雪灾害对森林影响的过程中,得出上坡位的受损个体比例显著高于中坡和下坡^[1]。在湖北省三峡库区,阴坡与阳坡的坡顶、坡中、坡谷平均冻害比例分别为 30%, 25%, 31.7%^[19]。而同一坡向的中下部受害程度明显低于中上部^[17-19],即随着坡位由下而上,树木受损程度逐渐加重,对贵州省的小桐子幼树调查发现,坡中下部受损率为 80%,而中上部受损率高达 100%^[17]。上坡温度较低,结冰较为严重,且上坡位受到对面山峰的庇护较小,风较大,受到冷空气的袭击更直接,林木结冰也较为严重,因此造成上坡位树木的

损伤更为严重。

1.1.4 海拔 海拔对森林冰雪灾害的影响起着至关重要的作用, 是林木受害的一个重要因子。研究表明, 在一定范围内, 海拔高度与林木受损的严重程度呈正相关关系^[20]。在浙江云和县调查结果显示, 海拔小于 300 m, 森林受灾率低于 10%; 海拔在 300 ~ 500 m, 受灾率低于 40%; 海拔大于 500 m, 竹林的受灾率大于 90%, 其他树种受灾率大于 40%。采用普查与抽样结合的方法对日本落叶松 *Larix kaempferi* 调查得知, 海拔大于 1 800 m 的受灾严重程度是小于 1 800 m 的 2 倍^[21]。也有学者^[14]对浙江省毛竹林的受损特征进行分析, 海拔在 380 m 时, 受损率为 18.9%; 海拔在 400 ~ 750 m 时, 受损率达 50% 以上; 海拔在 1 110 m 时, 受损率为 39.5%, 受损率反而降低, 这是由于此时在海拔 1 500 ~ 3 000 m 空气中恰逢暖气流存在, 对毛竹起到一定保护作用, 致使海拔达 1 000 m 以上时, 受损率有所下降。由于高海拔地区的积雪量相对较多, 气温随海拔升高而降低, 所以高海拔地区温度较低、冰凌较厚, 容易导致林木结冰而受灾。其次, 高海拔与低海拔地区对比可知, 高海拔低温持续时间更长, 冰冻危害更加严重。再加上高海拔通常地处山脊上部、山峰顶部和风口等风速大的地方, 林木更容易遭受冰冻的灾害。另有学者^[22]认为, 海拔对树种灾害的影响呈现 s 型曲线, 随着海拔增高, 降雪量增大, 降雪引起的冰雪灾害也越严重, 但是到一定的海拔高度冰雪灾害程度则增加缓慢。蔡子良等^[22]根据广西桉树受害情况将灾害分为 6 级, 研究表明, 海拔 200 ~ 300 m 开始受害; 海拔 400 ~ 500 m, 受害等级达 2 级; 海拔大于 500 m, 树木严重受损且达 3 级以上; 海拔大于 800 m, 树木受损为 5 级且缓慢增加。

2.2 林分因子

2.2.1 树种组成 冰雪灾害对森林的损害程度随树种而异, 当立地条件和其他因素相近时, 不同的造林树种所能够承受冰雪灾害的能力也不同。有关学者研究发现纯林受灾重于混交林^[13,23-25], 咸宁潜山的杉木 *Cunninghamia lanceolata* 纯林的受害率比混交林高 7.09%, 鹤峰木的柳杉 *Cryptomeria fortunei* 纯林受害率比混交林高 12.6%。对湖南城市中生长的森林树种由轻到重分为 5 级 (I: 基本无雪害; II: 50% 以下的侧枝被折断; III: 50% 以上的侧枝被折断; IV: 侧枝、主梢全部被折断; V: 主干折断或翻倒或倒伏), 樟 *Cinnamomum camphora* 纯林的雪害表现为 III 级, 占 48.7%, 混交林模式表现为 II 级, 占 54.2%^[24]。由于纯林层次结构比较简单, 缺乏合理的上层冠木以及下层冠木, 互相之间难以起到支撑作用, 遇到持续的冰雪灾害时不能够承受积雪的重量, 非常容易形成大面积的森林灾害。混交林具有复杂多样的层次结构, 树木的冠层纵横交错, 彼此之间容易形成一定的梯度关系, 整体上可形成抗雪压冰冻体系。唐初明等^[13]研究发现人工林受灾重于天然林, 天然林是经过长期进化的植物群落, 结构稳定, 发生冰雪灾害时, 天然林有更强的抵抗力。2008 年年初的调查发现, 由于鄂西南引进的日本落叶松等落叶树种大面积受灾, 该地区针叶树种受害率大于阔叶树种, 达 14.7%, 说明乡土树种相比外来树种抵御冰雪灾害能力更强^[23]。再以 1998 年 1 月新英格兰的暴风雪对植物的影响为例, 外来树种如刺槐 *Robinia pseudoacacia* 和柳属 *Salix* 树种遭受严重损伤, 而乡土树种受到的伤害极小^[41]。

2.2.2 林分龄组 不同林龄的抗冰雪灾害能力明显不同^[27], 幼龄林树干较近成熟林韧性强, 但冠幅相对较小, 极容易被冻死或者冻伤, 受灾相对严重。中龄林生长正处于旺盛期, 根系附着在泥土里的能力相对老林龄较强, 尖削度大, 有更强的抗压抗折能力。随林龄持续增加, 林木的主干越粗壮, 尖削度越大, 林木的抗冻能力也相应增加, 成熟林林冠生长茂盛繁大, 且根系在泥土中的附着力以及林木本身的抗折能力较强, 林木具有较强的抵抗冰雪灾害能力。过熟林长势减弱, 枝条的弹性降低, 抵抗冰雪冻害的能力相应下降^[21]。以日本落叶松为例, 处于中幼龄期 (10 ~ 15 年生) 的林木承灾能力较弱, 受灾较严重, 而成熟林 (26 ~ 30 年生) 受灾相当轻微^[21]。2008 年对江西安福毛竹林立竹调查发现, 幼龄 (1 ~ 2 年生) 的受害率为 53%, 分别是中龄 (3 ~ 5 年生) 和老龄 (大于 6 年生) 的 1.78 和 1.82 倍^[27]。综合目前学者对不同林龄承灾能力的分析, 可以得知林龄对于森林生态系统中冰雪冻害影响的重要性。

2.2.3 林分密度 林分密度对森林受灾程度的影响明显^[26], 郁闭度可以客观反映林分密度, 郁闭度高的林分受灾程度比郁闭度低的林分受灾程度相对严重^[28]。有学者认为^[25], 毛竹林的受损率与林分密度呈正相关关系, 其中林木不同受损类型的受灾比率的总和为林木受损率, 对南岭地区研究得知, 林分密度为 4 060 株·hm⁻², 林木

受损率达 84.24%；林分密度为 5 360 株·hm⁻² 时，林木受损率达 89.18%；当林分密度为 7 993 株·hm⁻² 时，林木受损率高达 91.74%^[19]。由于高密度的林分冠层分布均匀，大部分积压在林冠上的降雪很难透过冠层，导致林分密度越大造成冰雪灾害受损的严重程度越大；也有学者认为^[23-25,28]，林分密度过大或过小均会使林木受灾程度加重，林木密度在一个最适范围内可以使其抵抗冰雪灾害的能力发挥最佳效果。湖北省木荷 *Schima superba* 人工林密度 650 株·hm⁻² 的受害率比密度 1 650 株·hm⁻² 高 6.6%，日本落叶松密度 2 775 株·hm⁻² 的受害率比密度 1 525 株·hm⁻² 高 0.8%^[23]。即当林分密度较小时，树木尖削度较大，对林木抵抗雨雪冰冻灾害有一定优势，但是过低的林分密度，林间树木过于稀少，林冠疏松宽泛，那么林木受风面积和冰雪积累的表面积就会增加，林木无法抵御冰雪重力对林木的压力，林木本身的受灾程度就会加重，导致林木容易发生折断或断梢。

2.3 气象因子

2.3.1 温度 温度是影响冰雪灾害的主要气象因子^[29]，林区冰雪灾害的发生与该地区的气温有着紧密的联系，通常空气中的水分子温度位于 0℃ 以下时即认为达到了冰点，持续的低温和积雪综合作用下，会使树木林冠上的冰雪积滞性增加，散落困难，导致树木受灾。有研究表明造成冰雪灾害的最适温度是 -3.0℃~0.6℃，此时雪片大量的积压在树冠上，当温度大于 0.6℃ 且持续 3 h 以上，积雪可能融化，降低冰雪灾害的发生，若温度小于 -5℃，此时雪片未粘附，难以大量积累于树冠上，同样可以避免林木发生冰雪灾害^[30]。温度的高低决定了冰雪的消融，持续的低温冻害会导致冰雪灾害的发生，气温与冰雪之间存在明显的正反馈关系^[31]。随着气候变暖，气温不断升高，冰雪迅速融化，林木同样会因为不适应骤变温差而死亡^[32]。2008 年南方森林严重受损的主导因素即是温度异常，当年 1 月 4–11 日，气温瞬间升高了 12.95℃，随后在 1 月 12–14 日，又迅速降低了 18.95℃，且持续低温持续时间超过 20 d，连续的温度波动对林木伤害巨大^[33]。

2.3.2 风速 风速是造成降雪大量积累的主要气象条件，一些学者认为大风会导致冰雪灾害的发生。例如英国历史记载的一场发生在北约克郡的雪灾，发生时风速达到 25 m·s⁻¹，造成部分地区 8×10⁴ m³ 林木的损失^[34]。在冬季，随着温度的逐渐降低，风速的逐渐增大，过重的积雪或冰凌在一定的风速下会使林木不同程度的受到断枝或压弯的伤害。例如 1974 年发生在日本新潟县森林和 1977 年发生在我国山西管涔林区的冰雪灾害，均与风速过大有关^[35]。也有学者研究认为造成降雪大量积累的主要气象因子是较低的风速，若风速超过 9 m·s⁻¹，附着在树冠上的雪将会被吹走，树木受灾程度将减轻^[36]。所以风速的大小是导致森林受冰雪灾害损伤程度的关键因子之一。

2.3.3 累计霜冻/降雪日数 霜冻是指空气温度突然下降，地表温度骤降到 0℃ 以下，树木林冠附着白色冰晶，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^[37]。世界上很多地区，霜冻/降雪已成为阻碍林木正常生长发育的一个主要限制因子^[13]。霜冻对林木的危害主要是低温冻害，在生长季内由低温冻害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^[38]。因此霜冻日数和降雪日数与森林受冰雪灾害的大小密切相关，二者对树木受灾程度的影响关系密切。

2.3.4 积雪持续日数 当降雪量达到成灾程度时，积雪持续时间就成为加重灾害的一个重要致灾因子。冰雪灾害发生的时期长短的决定性因素是积雪的开始期和终止期，而冰雪灾害发生时期的起止日期与积雪的起止日期是一致的^[39]。大量有关冰雪灾害的研究均将积雪持续日数和最大积雪深度作为评估指标^[28,40]，因此，积雪初日和积雪终日是冰雪灾害持续时间的关键因素，低温持续时间长，发生冰雪灾害的机率也就越大^[41]，而积雪持续日数与降雪日数和温度关系密切。

2.3.5 积雪深度 积雪深度是指从雪层表面到地面之间的垂直深度，反映了冰雪灾害发生时森林生态系统接受到的积雪量。不同的森林类型，林内积雪厚度不同，对树木造成的损害程度也会不同^[42]。大多数研究者在对冰雪灾害进行风险性评估时，通常选用积雪深度作为风险评估的关键因子之一^[40]。因此，在研究森林冰雪灾害时，积雪深度也是关键指标。庄晓翠等对新疆北部牧区雪灾的研究中，不仅利用同期雪灾灾情资料，还选取最大积雪深度作为评估指标^[43]。

3 结论与展望

冰雪灾害通过对林木本身的伤害, 引起森林经济、生态、社会三大效益的减损, 灾害程度与森林所处位置自然因子、林分组成及气象条件紧密相关, 合理确定森林冰雪灾害致损因子, 对开展森林冰雪灾害致损机理研究, 完善森林冰雪灾害研究理论体系较为重要。现阶段, 森林冰雪灾害研究已取得较大进展, 但由于森林分布面积巨大, 各地区自然条件差异很大, 森林冰雪灾害研究成果较为分散, 各有侧重。同时, 森林冰雪灾害评估作为规划、部署和实施灾害防治工作的依据, 目前相关研究很少, 不利于森林冰雪灾害防治工作的开展。针对存在问题和发展趋势, 认为森林冰雪灾害研究可从以下 2 个方面进行深入研究。

(1) 森林冰雪灾害致损因子的整合简化。目前, 由于森林分布区域很广, 森林冰雪灾害致损因子选取较为分散, 相关研究结果难以统一采用, 造成研究工作大量浪费, 因此, 通用致损因子的筛选较为重要, 可分为大区域致损因子, 如国家级致损因子; 较大区域致损因子, 如在一国内, 可按照森林类型或气候带划分为几个致损因子类型。通过较大区域致损因子的选取, 研究大尺度下森林冰雪灾害受损情况, 有利于后期研究成果的整合共享。

(2) 森林冰雪灾害评估。全球气候变化模型的预测表明, 各种类型风/雪灾害的发生频率和强度正呈现增加的趋势, 显然, 对森林冰雪灾害进行合理评估, 不仅对于冰雪灾害风险性评估和安全防护具有重要的意义, 对森林生态及资源的保护也将起到重要作用。因此, 建立科学、完善、简易、可行的冰雪灾害评估指标体系及方法很有必要。

参考文献:

- [1] 吴可可, 彭少麟, 陈蕾伊, 等. 南方森林雨雪冰冻灾害的特征[J]. 生态学杂志, 2011, 30(3): 611–620.
- [2] 赵霞, 沈孝清, 黄世能, 等. 冰雪灾害对杨东山十二度水自然保护区木本植物机械损伤的初步调查[J]. 林业科学, 2008, 44(11): 164–167.
- [3] 民政部国家减灾中心灾害信息部. 1992 年以来中国重大雪灾记录[J]. 中国减灾, 2005, 15(1): 56.
- [4] 康玲. 内蒙古地区雪灾分析[J]. 内蒙古气象, 2007, 14(1): 10–11.
- [5] 苏志尧, 刘刚, 区余端, 等. 车八岭山地常绿阔叶林冰灾后林木受损的生态学评估[J]. 植物生态学报, 2010, 34(2): 213–222.
- [6] 张学通, 黄晓东, 梁天刚, 等. 新疆北部地区 MODIS 积雪遥感数据 MOD10A1 的精度分析[J]. 草业学报, 2008, 17(2): 110–117.
- [7] 冯学智, 鲁安新, 曾群柱. 中国主要牧区雪灾遥感监测评估模型研究[J]. 遥感学报, 1997, 1(2): 129–134.
- [8] 马丽娟, 秦大河. 1957–2009 年中国台站观测的关键积雪参数时空变化特征[J]. 冰川冻土, 2012, 34(1): 1–11.
- [9] 娄梦筠, 刘志红, 娄少明, 等. 2002–2011 年新疆积雪时空分布特征研究[J]. 冰川冻土, 2013, 35(5): 1095–1102.
- [10] 郭淑红, 薛立. 冰雪灾害对森林的影响[J]. 生态学报, 2012, 32(16): 5242–5253.
- [11] 国家林业局. 国家林业局陆地生态系统定位研究网络中长期发展规划(2008–2020 年)[R/OL]. [2014–10–20]. <http://www.forestry.gov.cn/ctern/4400/content-711355.html>
- [12] 高岚, 谭李嫔. 森林冰雪灾害损失评价指标体系研究[J]. 广东农业科学, 2010, 33(11): 232–235.
- [13] 唐初明, 陈丰惠. 雨雪冰冻灾害对荔浦县森林资源的影响[J]. 广西林业科学, 2008, 37(4): 200–203.
- [14] 尹新华, 翁益明, 董云富, 等. 毛竹受雨雪冰冻危害的受损特点[J]. 浙江林学院学报, 2008, 25(6): 823–827.
- [15] 徐雅雯, 吴可可, 朱丽蓉, 等. 中国南方雨雪冰冻灾害受损森林植被研究进展[J]. 生态环境学报, 2010, 19(6): 1485–1494.
- [16] Dobbertin M. Influence of stand structure and site factors on wind damage comparing the storms Vivian and Lothar[J]. For Snow Landscape Res, 2002, 77(1): 187–204.
- [17] 陈波涛, 欧国腾, 李昆. 贵州小桐子特大雨雪冰冻低温灾害调查研究[J]. 林业科学研究, 2008, 21(4): 506–509.
- [18] 杨曾奖, 徐大平, 曾杰, 等. 南方大果紫檀等珍贵树种寒害调查[J]. 林业科学, 2008, 44(11): 123–127.
- [19] 王旭. 冰雪灾害对南岭常绿阔叶林结构的影响研究[D]. 北京: 中国林业科学研究院, 2012.
- [20] 刘建灵, 孙莉莉, 戚连忠, 等. 雨雪冰冻灾害对云和县主要森林群落的影响[J]. 浙江林业科技, 2009, 29(3): 48–51.
- [21] 许亚洲, 孙晓梅, 宋丛文, 等. 鄂西亚高山日本落叶松人工林雪灾调查[J]. 林业科学, 2008, 44(11): 11–17.
- [22] 蔡子良, 钟秋平, 刘清元, 等. 广西主要树种冰雪灾害调查及恢复措施[J]. 林业科学研究, 2008, 21(6): 837–841.
- [23] 汤景明, 宋丛文, 戴均华, 等. 湖北省主要造林树种冰雪灾害调查[J]. 林业科学, 2008, 44(11): 2–10.

- [24] 吴际友, 王旭军, 廖德志, 等. 冰冻雨雪灾害中城市森林抗雪压特性及评价[J]. 林业科学, 2008, 44 (11) : 59 – 63.
- [25] 魏松正, 张水生, 钟寿旺, 等. 南方重大冰雪灾害对福建省建阳市毛竹林的影响及成因分析[J]. 福建林业科技, 2008, 35 (4) : 203 – 206.
- [26] 李晓靖, 洪奕丰, 王宗星, 等. 2008 年南方冰雪灾害对森林生态系统影响研究[J]. 安徽农业科学, 2011, 39 (36) : 22374 – 22377.
- [27] 肖复明, 陈红兴, 江香梅, 等. 江西安福林区毛竹林雨雪冰冻灾情调查分析[J]. 林业科学, 2008, 44 (11) : 32 – 35.
- [28] 周陆生, 汪青春, 李海红, 等. 青藏高原东部牧区大暴雪过程雪灾灾情实时预评估方法的研究[J]. 自然灾害学报, 2001, 10 (2) : 58 – 65.
- [29] 李秀芬, 朱教君, 王庆礼, 等. 森林的风/雪灾害研究综述[J]. 生态学报, 2005, 25 (1) : 148 – 157.
- [30] Solantie R. Effect of weather and climatological background on snow damage of forests in southern Finland in November 1991[J]. Silva Fen, 1994, 28 (3) : 203 – 211.
- [31] 李茂松, 王道龙, 吉田久. 农业低温灾害研究新进展[M]. 北京: 中国农业科技出版社, 2006.
- [32] 吴静, 王政权, 刘雪峰. 霜冻害对紫椴人工幼龄林的影响[J]. 东北林业大学学报, 2002, 30 (6) : 6 – 10.
- [33] 邵全琴, 黄麟, 刘纪远, 等. 2008 年春季中国南方冰雪冻害林木物理折损典型样带分析[J]. 山地学报, 2009, 27 (2) : 177 – 187.
- [34] Wright J A, Quine C P. The use of a Geographical Information System to investigate storm damage to trees at Wykeham Forest, North Yorkshire[J]. Scot For, 1993, 47 (4) : 166 – 174.
- [35] 李秀芬, 朱教君, 王庆礼, 等. 森林低温霜冻灾害干扰研究综述[J]. 生态学报, 2013, 33 (12) : 3563 – 3574.
- [36] 王贺. 小兴安岭人工林降雪积雪特征研究[D]. 哈尔滨: 东北林业大学, 2013.
- [37] 陈彦清, 杨建宇, 苏伟, 等. 县级尺度下雪灾风险评估方法 [J]. 农业工程学报, 2010, 26 (S2) : 307 – 311.
- [38] Nykaenen M L, Peltola H, Kellomaeki S, et al. Factors affecting snow damage of trees in particular reference to European conditions[J]. Silva Fen, 1997, 31 (2) : 193 – 213.
- [39] 于金霞. 福建省森林灾害损失评估研究[D]. 福州: 福建农林大学, 2012.
- [40] 王世金, 魏彦强, 方苗. 青海省三江源牧区雪灾综合风险评估[J]. 草业学报, 2014, 23 (2) : 108 – 116.
- [41] Irland L C. Ice storms and forest impacts[J]. The Science of the Total Environment, 2000, 262 (3) : 231 – 242.
- [42] Solantie R, Ahti K. The influence of weather in the snow damage for forests of South-Finland in 1959[J]. Silva Fen, 1980, 14 (4) : 342 – 353.
- [43] 庄晓翠, 周鸿奎, 王磊, 等. 新疆北部牧区雪灾评估指标及其成因分析[J]. 干旱区研究, 2015, 32 (5) : 1000 – 1006.