

# 云冷杉林风倒区林隙和掘根微立地微气候变化

王金铃<sup>1</sup>, 段文标<sup>1\*</sup>, 陈立新<sup>1</sup>, 王婷<sup>1</sup>, 景鑫<sup>1</sup>, 魏全帅<sup>1</sup>,  
杜珊<sup>1,2</sup>, 赵莹<sup>1</sup>

(1. 东北林业大学林学院, 黑龙江 哈尔滨 150040; 2. 四川省达州市职业技术学院建工系, 四川 达州 635000)

**摘要:**2013年7月,在小兴安岭凉水国家级自然保护区云冷杉林风倒区1.5 hm<sup>2</sup>的样地内,选取由掘根倒木形成且包含坑和丘微立地的大、中、小3个代表性林隙。在每个林隙中心安装HOBO自动气象站,测定了7—9月林隙中心以及林隙内丘顶和坑底的总辐射、光合有效辐射(PAR)、空气温度和相对湿度,并在郁闭林分和空旷地设置对照。分析了不同大小林隙之间以及林隙内丘顶和坑底之间小气候在生长季的动态变化及其差异。结果表明:林隙总辐射、PAR以及空气温度依照大林隙、中林隙和小林隙的次序依次降低;同一林隙内,丘顶的总辐射、PAR和空气温度大于坑底,丘顶空气相对湿度小于坑底;月均气温和月均PAR均为7月>8月>9月,绝大多数按照空旷地、大林隙、中林隙、小林隙和郁闭林分的次序递减,仅9月份小林隙的气温大于中林隙。同一林隙的平均气温日较差均为7月>9月>8月,相同微立地(林隙中心、丘顶、坑底)气温日较差均为大林隙>中林隙>小林隙。相同月份丘顶的气温日较差均大于坑底。各林隙空气相对湿度均为8月>9月>7月,并按照空旷地、大林隙、中林隙、小林隙和郁闭林分的次序依次递增。7月份大林隙的总辐射、PAR与8、9月份相比均差异显著。9月不同大小林隙之间的总辐射、PAR差异均不显著。7—9月,大林隙和小林隙中心的空气湿度均差异显著。同一林隙相同月份丘顶和坑底的PAR、空气相对湿度差异均显著,空气温度差异不显著;无论是在林隙内还是林隙内的丘顶和坑底,同一林隙不同月份的温度差异均显著。

**关键词:**小兴安岭;云冷杉林;风倒区;微立地;丘顶;坑底;微气候

中图分类号:S718

文献标识码:A

## Microclimate Variation of Forest Gaps and Uprooted Microsites in Windthrow Area of Spruce-fir Forest

WANG Jin-ling<sup>1</sup>, DUAN Wen-biao<sup>1</sup>, CHEN Li-xin<sup>1</sup>, WANG Ting<sup>1</sup>, JING Xin<sup>1</sup>, WEI Quan-shuai<sup>1</sup>,  
DU Shan<sup>1,2</sup>, ZHAO Ying<sup>1</sup>

(1. College of Forestry, Northeast Forestry University, Harbin 150040, Heilongjiang, China;

2. Construction Department, Vocational and Technical College, Dazhou 635000, Sichuan, China)

**Abstract:** Three representative large, medium, and small forest gaps with pit and mound microsites formed by uprooted trees were selected within 1.5 hm<sup>2</sup> sample plot in windthrow area of spruce-fir forest in Liangshui National Nature Reserve in Xiaoxing'anling Mountains. HOBO automatic weather stations were installed in the center of each gap. The total radiation, PAR, air temperature and relative humidity in the gap center, mound top and pit bottom of different gaps were measured between July and September, 2013, and the clearing and closed forest were set up as

收稿日期:2014-06-16

基金项目:哈尔滨市科技创新人才研究专项资金项目(RC2012LX002018);黑龙江省自然科学基金项目(C2012310);国家自然科学基金项目(31270666);人力资源与社会保障部留学回国人员科技活动择优启动项目(2012-258)

作者简介:王金铃,硕士研究生。主要研究方向:森林气象学、水土保持学。E-mail:709258808@qq.com 地址:哈尔滨市东北林业大学林学院,150040

\* 通讯作者:博士,教授。主要研究方向:森林气象学、水土保持学。E-mail:dwbiao88@163.com 地址:哈尔滨市东北林业大学林学院,150040

controls. The differences of microclimate and its dynamics change during the growing season among different gaps, as well as the mound top and pit bottom within the gaps were analyzed. The results showed that the total radiation, PAR and air temperature in the center of each gap were in the order of large gap > medium gap > small gap. In the same gap, the total radiation, PAR and air temperature on the mound top were higher than those in the pit bottom, but the air relative humidity was lower at the mound top than at the pit bottom. The monthly mean air temperature and PAR ranked in a decreasing order of July, August, and September, and mostly decreased in the order of clearing, large, medium, small and closed forest from July to September, but the air temperature of small gap was higher than that in the medium gap in September only. In the same gap, the mean daily range of air temperature ranked in a decreasing order of July, August, and September. On the same microsite (gap center, mound top, pit bottom), the mean daily range of air temperature was in a decreasing order of large gap, middle gap, and small gap. On the same month, the mean daily range of air temperature was higher on the mound top than that in the pit bottom. The mean relative humidity in all gaps decreased in the order of August, September, and July, increased in the order of clearing, large gap, medium gap, small gap, and the closed stand. The total radiation and PAR of large gap in July were significantly different compared with that in August and September. The total radiation and PAR of different sized gaps were not significant different in September. The relative humidity in the center of large gap and the small gap from July to September were significantly different. In the same month, the differences of PAR, air relative humidity between the mound top and the pit bottom in the same gap were significant, but the differences of air temperature was not significant. Significant difference was observed in the air relative humidity, while the difference of air temperature was not significant. Whether in the same gaps or on the mound top and pit bottom, the difference of air temperature were significant.

**Key words:** Xiaoxing'anling Mountains; spruce-fir forest; windthrow area; microsite; mound top; pit bottom; microclimate

在北方森林里,树木风倒是一种非常常见的自然现象<sup>[1-2]</sup>。由大尺度景观水平上的风灾到小尺度上个体树木的扰动,风从不同的时间和空间对森林进行干扰<sup>[3]</sup>。风的干扰能够导致树干的折断、树冠的缩减或损坏以及树木的连根拔起<sup>[4-6]</sup>。在森林群落中,单株或多株树木的死亡形成的冠空隙被称为林隙,树倒是林隙形成的主要因素之一<sup>[7-8]</sup>。Chazdon 和 Percy 在 1991 年指出林隙的干扰可以导致资源的再分配以及微生境的异质性<sup>[9]</sup>,它能够通过改变微生境而对幼苗的出土、存活、定居和生长产生重要影响,它的大小、形状和方向对微生境有着重要影响<sup>[10]</sup>,张春雨等提出微环境的异质性主要表现在小气候、土壤理化性质及微地形等方面,都是微环境异质性的重要构成因素<sup>[11]</sup>。微气候的异质性能够为种子萌发、幼苗定居和各种各样的林下物种和树种提供有利的环境条件<sup>[12]</sup>。Ma 等 2010 年曾指出,在混交针叶林里,物种多样性和丰富度的增加常常与微气候的空间变异性有关<sup>[13]</sup>。林隙干扰最直接、最重要的作用是提高了生境中的光照条件,然后进一步造成林隙内温度、湿度、土壤理化性质的变化,

从而形成了微生境的时空异质性<sup>[10]</sup>。因此,对林隙微气候的研究具有极为重要的意义。张一平等<sup>[14-17]</sup>指出林隙形成后,上层林冠疏开,光照增强,致使温度升高,太阳辐射在林隙内重新分配,形成独特的林隙小气候。刘少冲等人指出林隙面积越大,乔木幼苗的更新密度也会增大<sup>[18]</sup>。大多数的天然林里,由树木掘根形成的坑丘微立地<sup>[19]</sup>,是林隙的一个主要的干扰因素<sup>[20]</sup>,也具有其独特的微气候。Clinton 和 Baker 对坑丘和完整立地(未受干扰的郁闭林分)上的光合有效辐射(PAR)、土壤温度和土壤水分进行测量,得出不同微立地的微气候状况明显不同的结果<sup>[21]</sup>。已有研究表明,坑和丘的微气候对林隙内植被的更新有一定的影响<sup>[22]</sup>。Henry 和 Swan 指出三分之二的黑桦(*Betula dahurica* Pall.)生长在树木风倒形成的丘上,三分之一的红枫(*Acer palmatum* Thunb.)幼苗生长在坑里<sup>[23]</sup>。2010 年 Vodde 则曾提出在大而较浅的坑上更有利于幼苗的生长<sup>[24]</sup>。因此对由掘根倒木形成的林隙及林隙内的坑和丘微立地微气候进行研究,对探讨林隙内物种共存和更新具有极为重要的意义。

国内对林隙小气候的相关研究大多集中在热带和亚热带地区,而在温带天然林里,主要是针对阔叶红松林展开的,而且仅集中于对林隙中心的研究,如李猛等、冯静等、段文标等分别对林隙中心、林隙中心与林隙边缘以及林隙中心与丘顶的小气候进行过探讨<sup>[25-27]</sup>,而对谷地云冷杉林风倒区林隙微气候及林隙内掘根倒木形成的丘顶和坑底微气候的差异及其在生长季的变化尚未进行过报道。因此,本研究以小兴安岭谷地云冷杉林为研究对象,通过对风倒区生长季不同大小林隙以及林隙内掘根形成的坑丘微立地的微气候进行连续测定,旨在为小兴安岭谷地云冷杉林风倒区不同大小林隙和林隙内丘顶和坑底微气候在生长季的动态变化及其差异提供基础数据,为林隙及林隙内坑丘微立地物种更新的研究提供理论参考。

## 1 研究地区与研究方法

### 1.1 研究区概况

研究区位于黑龙江省伊春市带岭区凉水国家级自然保护区(47°06'49"~47°16'10" N, 128°47'08"~128°57'19" E)。该区地处欧亚大陆东缘,具有明显的温带大陆性季风气候特征,冬长夏短,寡照低温。年平均气温-0.3℃,年平均最高气温7.5℃,年平均最低气温-6.6℃,年日照时数1 850 h,日照百分率43.6%。年平均降水量676 mm,年平均相对湿度78%,年平均蒸发量805 mm。无霜期100~120 d。该区地带性土壤为暗棕壤土。所选的样地位于保护区的中段,主要组成树种有红皮云杉(*Picea koraiensis* Nakai)、冷杉(*Abies nephrolepis* (Trautv.) Maxim.),因受云杉、冷杉地带性植被的影响,少量混生

一些白桦(*Betula platyphylla* Suk.)、花楷槭(*Acer ukurunduense* Trautv. et Mey.)、五角槭(*Acer mono* Maxim.)、青楷槭(*Acer tegmentosum* Maxim.)毛赤杨(*Alnus sibirica* Fisch.)等阔叶树种。灌木层种类也相对较少,代表种类有:刺五加(*Acanthopanax senticosus* (Rupr. et Maxim.) Harms)、珍珠梅(*Sorbaria sorbifolia* (L.) A. Br.)、兰靛果忍冬(*Lonicera caerulea* Hemsl.)、刺玫蔷薇(*Rosa davurica* Pall.)等,藤本植物不发达,有五味子(*Schisandra chinensis* (Turcz.) Baill.)等。草本植物也不发达,多呈点状分布,种类极贫乏,以矮小的典型耐荫植物为主,有荨麻(*Urtica laetevirens* Maxim.)、水金凤(*Impatiens nolintangere* L.)、林金腰(*Chrysosplenium lectuscochleae* Kitag.)、东北蹄盖蕨(*Athyrium brevifrons* Nakai)、小叶芹(*Aegopodium alpestre* Ledeb.)和舞鹤草(*Maianthemum bifolium* (Linn.) F. W. Schmidt.)等。

### 1.2 研究方法

1.2.1 样地的设置 2013年7月,在小兴安岭谷地云冷杉林风倒区内,通过踏查选择具有较多掘根倒木形成的典型的坑丘微立地的林分。在该林分内,设置100 m×150 m的矩形固定样地,将其作为试验样地。在该样地内,选取立地条件基本相似的小、中、大林隙各1个,并在其周围的空旷地和郁闭林分设置对照样地。林隙的大小按照H/D值来划分<sup>[8]</sup>(其中:H为林隙边缘木的平均树高,D为林隙长轴(A)和短轴(B)长度的平均值)。经调查,3个林隙的形状均近似为椭圆形,利用皮尺测量每个林隙长轴(A)和短轴(B)的长度<sup>[28]</sup>,按照椭圆形面积公式 $S = \pi AB/4$ ,计算它们的面积(表1)。

表1 样地内各林隙和对照的基本特征

样地	郁闭度	边缘木平均树高/m	边缘木平均树高/林隙直径(H/D)	面积/m <sup>2</sup>	海拔/m	坡度/°	坡向	林隙形成木	边缘木主要树种
空旷地	—	—	—	500.0	331.6	20	西	—	—
大林隙	—	27.9	1: 1.4	892.8	332.6	21	西	云杉	冷杉、糖槭、白桦
中林隙	—	21.6	1: 0.8	370.2	331.9	20	西	冷杉	冷杉、红松、白桦
小林隙	—	18.8	1: 0.5	213.5	331.4	19	西	云杉	白桦、红松、糖槭
郁闭林分	0.85	20.7	—	500.0	332.3	20	西	—	云杉、白桦、糖槭

1.2.2 不同大小林隙中心及丘坑微立地微气候因子的测定 在每个具有丘坑微立地的林隙中心距地面1.5 m高度处,安装多通道的HOBO自动气象站(U30, USA),与林隙中心的总辐射、PAR、空气温湿度传感器相连接;并在每个林隙内由掘根倒木形成的典型丘坑微立地的丘顶、坑底的相同高度处,安装

PAR、空气温湿度传感器。所有传感器均与HOBO自动气象站的数据采集器相连接。数据采集器每1 min采集1次数据,每4 min记录1次平均值。在空旷地和郁闭林分内设置2个对照样点。数据采集时间为2013年7月7日至2013年9月30日。

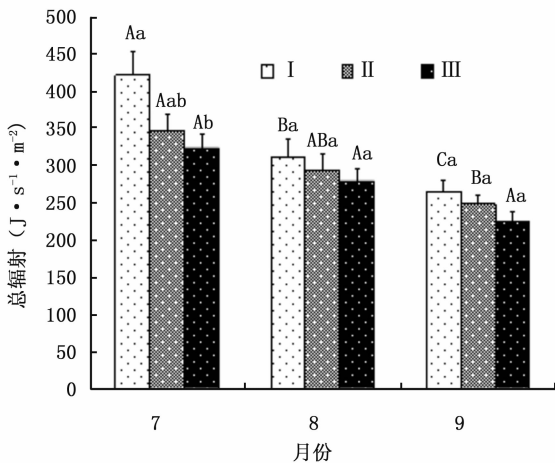
### 1.3 数据处理

每月筛选6~8个典型晴天,计算每个林隙中心的总辐射、PAR、空气温度和相对湿度的月平均值,以及同一林隙内由掘根倒木形成的坑丘微立地的丘顶和坑底的PAR、空气温度和相对湿度的月平均值,并计算它们的月平均气温日较差。利用SPSS 19.0软件处理数据,使用单因素方差分析方法,检验不同大小林隙之间以及同一林隙内丘顶和坑底各微气候因子之间的差异。差异显著性水平设为 $\alpha = 0.05$ 。采用EXCEL 2003绘图。

## 2 结果与分析

### 2.1 不同大小林隙中心的总辐射、光合有效辐射、气温和空气相对湿度的变化

**2.1.1 不同大小林隙中心总辐射的月变化** 7—9月,随着太阳高度角的减小和日照时间的缩短,太阳总辐射逐渐减少(见图1)。7月份光照最强,大、中、小林隙中心的月均总辐射分别为421.9、346.9、323.0  $\text{J} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{m}^{-2}$ 。9月份最小,分别为265.6、248.6、225.1  $\text{J} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{m}^{-2}$ ,其中大林隙月总辐射在8月份的降幅最大,大、中、小林隙分别下降109.4、52.6、44.1  $\text{J} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{m}^{-2}$ 。9月份林隙总辐射继续下降,其中小林隙降幅最小。这可能是由于8月份林冠层郁闭度比9月份高,阻挡了较多的太阳辐射,9月份部分树木的树叶开始凋落,但小林隙周围的边缘木距离林隙中心较近,因此总辐射月变化最小。



注: I、II、III分别代表大林隙、中林隙和小林隙中心;小写字母不同表示同月份不同林隙间差异显著;大写字母不同表示同林隙不同月份间差异显著(下同)。

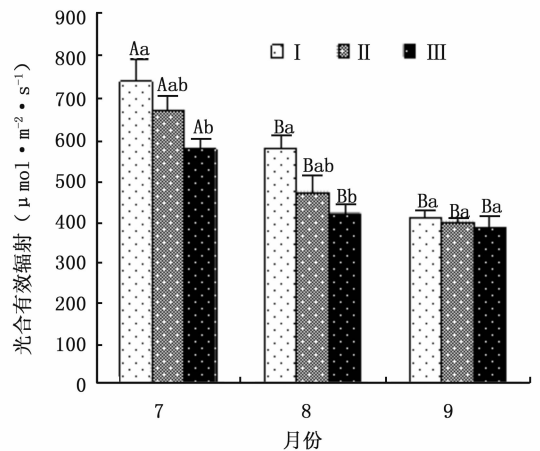
图1 7—9月不同大小林隙中心的月平均总辐射和光合有效辐射

**2.1.3 不同大小林隙中心空气温度的月变化** 7—9月,空气温度在不同大小林隙内和对照均有明显的递减趋势(表2)。7月份林隙中心的温度最高,

7—9月份,不同大小林隙中心月均总辐射的次序均为:大林隙>中林隙>小林隙。这是因为林隙面积越大,能够接收更多的太阳短波辐射,到达林隙内的太阳总辐射较多。7—9月份,仅小林隙中心的月均总辐射的差异均不显著,其它林隙中心月均总辐射差异显著;8月和9月不同大小林隙中心之间的月均总辐射则差异均不显著。

### 2.1.2 不同大小林隙中心光合有效辐射的月变化

光合有效辐射是太阳直接辐射的一部分,是能够被植物用来进行光合作用的那一部分能量。无论是大林隙、中林隙还是小林隙,相同林隙7—9月份林隙中心的PAR呈明显的降低趋势(图1)。7月份PAR最大,大、中、小林隙中心的月均PAR分别为734.58、661.62、570.28  $\mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ ;9月份PAR最小,大、中、小林隙中心PAR分别为404.79、392.37、377.47  $\mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 。7—9月份,不同大小林隙中心月均PAR次序均为:大林隙>中林隙>小林隙。相同林隙7—9月PAR的差异显著性分析表明,各林隙仅8、9月份之间差异均不显著,其他月份之间差异显著。9月份不同大小林隙中心之间的PAR差异均不显著,其它月份差异显著。这是因为进入9月份,树木枝叶开始凋落,使林隙的林冠层有一定程度的疏开,对PAR的下降起到了一定的补偿作用,致使9月份大、中、小林隙的PAR差值较小。



大、中、小林隙分别为20.76、20.39、20.37℃。9月份最低,各林隙中心的空气温度分别为10.21、10.11、10.10℃。这是因为9月森林内落叶树种树

叶凋落,林冠叶面积指数降低,林内外接收的太阳辐射量的差异也减小,林内外空气交换也相对充分,所以此时不同大小林隙的平均温度差异并不明显<sup>[29]</sup>。不同大小林隙中心的月均空气温度为大林隙 > 中林隙 > 小林隙,这是因为白天大林隙接受的光照最多,

因此温度也最高。与大、中、小林隙相比,郁闭林分的空气温度最小,空旷地的最大。7—9月不同大小林隙之间的月均空气温度差异均不显著,无论是大林隙、中林隙还是小林隙,相同林隙不同月份之间的温度差异均显著。

表2 7—9月不同大小林隙中心月平均气温、最高、最低气温及日较差变化

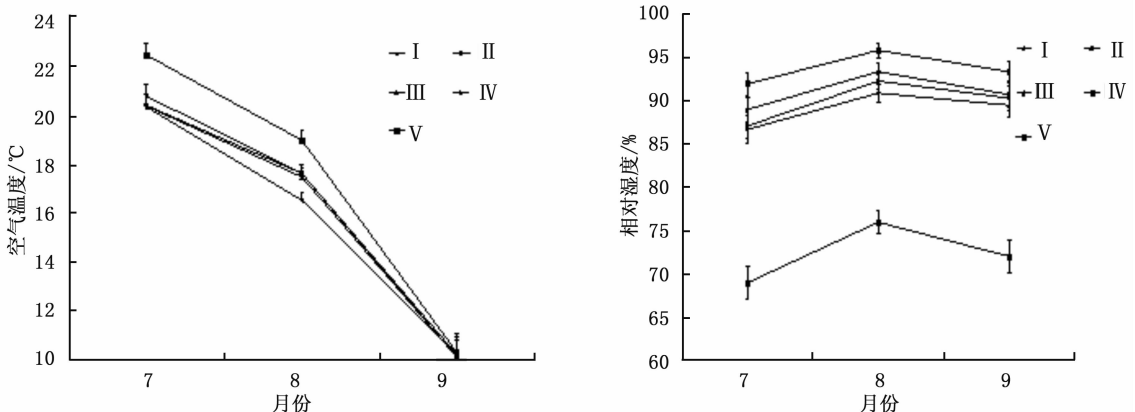
月份	样地	平均气温/℃	平均最高气温/℃	平均最低气温/℃	平均日较差/℃
7	大林隙	20.76 ± 5.05Ab	28.85 ± 1.43	14.41 ± 1.91	14.44 ± 2.90
	中林隙	20.39 ± 4.68Ab	28.14 ± 1.36	14.41 ± 1.92	13.73 ± 2.76
	小林隙	20.37 ± 4.68Ab	27.64 ± 1.46	14.46 ± 1.81	13.17 ± 2.79
	空旷地	22.43 ± 5.10Aa	29.89 ± 1.40	15.39 ± 2.85	14.50 ± 5.51
	郁闭林分	20.32 ± 4.50Ab	27.47 ± 1.35	14.37 ± 1.82	13.10 ± 2.38
8	大林隙	17.62 ± 3.92Bb	24.95 ± 2.24	12.38 ± 2.14	12.57 ± 2.86
	中林隙	17.61 ± 3.61Bb	23.57 ± 2.09	12.72 ± 2.09	10.85 ± 2.47
	小林隙	17.47 ± 3.61Bb	23.37 ± 1.79	12.73 ± 2.21	10.65 ± 2.12
	空旷地	18.98 ± 4.30Ba	27.24 ± 1.54	13.66 ± 2.32	13.58 ± 2.12
	郁闭林分	16.51 ± 3.60Bb	23.13 ± 1.58	12.58 ± 2.03	10.55 ± 2.07
9	大林隙	10.11 ± 7.15Cb	19.23 ± 5.03	5.02 ± 5.02	14.21 ± 2.98
	中林隙	10.21 ± 6.98Cb	18.66 ± 4.52	5.23 ± 6.54	13.42 ± 2.57
	小林隙	10.10 ± 7.02Cb	18.59 ± 4.67	5.23 ± 6.54	13.36 ± 2.62
	空旷地	10.32 ± 7.80Ca	22.55 ± 2.51	5.05 ± 5.65	17.50 ± 4.38
	郁闭林分	10.23 ± 7.03Cb	18.49 ± 4.13	5.19 ± 6.16	13.30 ± 2.63

7—9月,所有林隙的月平均最高气温和最低气温总体呈下降趋势(图2)。月平均最高气温依照大林隙、中林隙、小林隙顺序依次降低,月平均最低气温却依照大林隙、中林隙、小林隙次序依次升高。7—9月,大林隙最高气温最大,分别为28.85、24.95、19.23℃;最低气温也最低,分别为14.41、12.38、5.02℃。这是因为白天大林隙接受的光照最多,最高气温也最大,而到了夜间,林隙越大,林地的有效辐射越强,损失的热量越多,温度下降得越剧烈。7—9月,相同月份不同大小林隙的温度日较差均为大林隙 > 中林隙 > 小林隙。所有林隙的月平均日较差均为7月 > 9月 > 8月。7月日较差最大,不

同大小林隙月平均日较差分别为14.44、13.73、13.17℃;8月份最小,分别为12.57、10.85、10.65℃。与对照样地相比,空旷地日较差最大,郁闭林分最小。这是白天由于林冠、灌木与草本层对太阳辐射的阻挡,导致林内近地表空气温度低于林外空旷地,而夜间却由于它们对地面辐射的阻挡,减弱了地面的有效辐射,导致林内近地表空气温度高于林外空旷地,因而郁闭林分具有较低的日较差。

#### 2.1.4 不同大小林隙中心空气相对湿度的月变化

7—9月,同一林隙的月均空气相对湿度均差异显著(图2),其中8月份的空气相对湿度最大,大、中、小林隙中心分别为90.9%、92.3%、93.3%。7月份



注:IV和V分别代表郁闭林分和空旷地。

图2 7—9月不同大小林隙中心和对照的空气温度和相对湿度

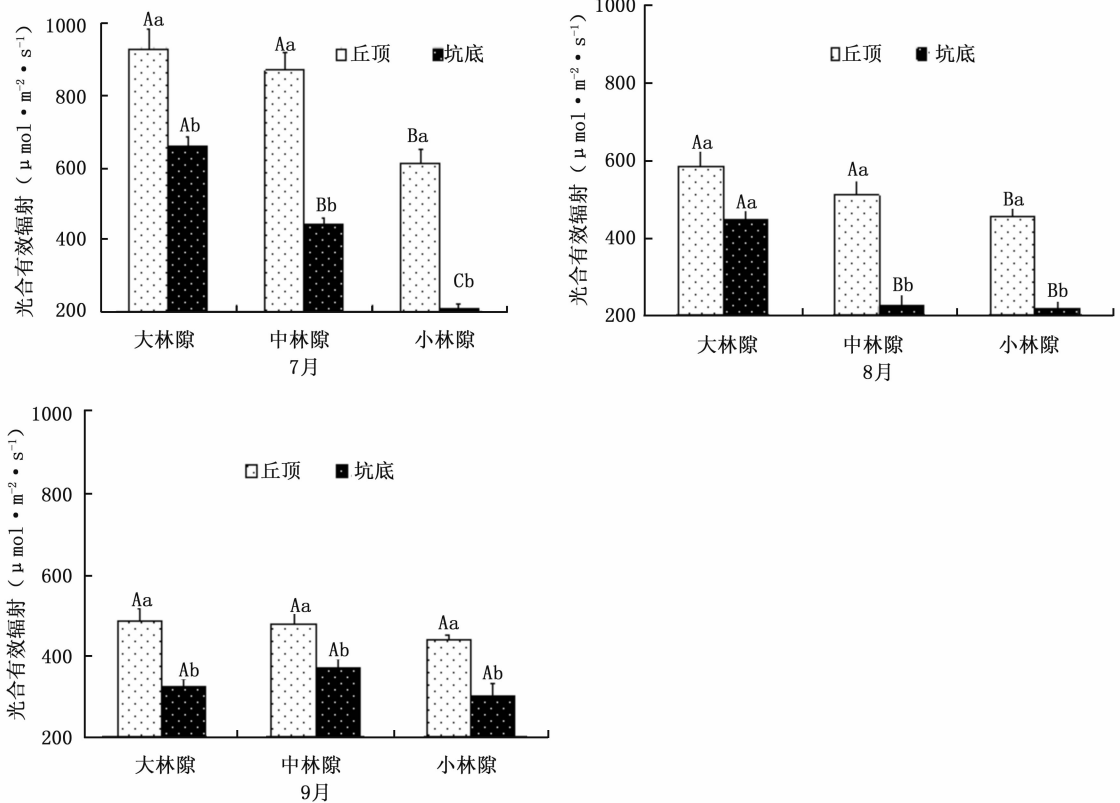
的空气相对湿度最低,分别为 86.7%、87.1%、89.0%。8—9 月份空气相对湿度呈现下降趋势。9 月份不同大小林隙中心的空气相对湿度分别为 89.5%、90.3%、90.7%。7—9 月不同大小林隙中心和对照样地的月均空气相对湿度均为郁闭林分 > 小林隙 > 中林隙 > 大林隙 > 空旷地,这可能是因为林隙越大,林冠开敞度越大,边缘木对林冠的遮蔽程度越低,白天能够接受的太阳辐射能越多,空气温度也越高,从而降低了空气相对湿度。7—9 月,大林隙和小林隙中心的空气湿度均差异显著。

## 2.2 林隙内坑底和丘顶的光合有效辐射、空气温度和相对湿度的月变化

### 2.2.1 林隙内坑底和丘顶光合有效辐射的月变化

在 7—9 月观测期间,所有林隙的月均光合有效辐射随着时间的推移均呈现递减的趋势(图 3)。丘顶的月均 PAR 均大于坑底。7 月份丘顶月均 PAR 最

大,大、中、小林隙分别为 928.5、846.9、609.7  $\mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 。9 月份的 PAR 最小,分别为 482.6、478.5、438.3  $\mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ ,且大林隙 > 中林隙 > 小林隙;7 月份大林隙坑底的 PAR 最大,为 657.7  $\mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ ,而小林隙 9 月份最大,为 438.3  $\mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 。这可能是因为 7 月和 8 月坑底植物的长势良好,覆盖度较高,周围的边缘木与坑底的距离相对大、中林隙较近,遮挡了较多的太阳辐射,9 月份树叶凋落,使小林隙坑底相对能够接受较多的 PAR。同一林隙丘顶与坑底之间的 PAR 差异均显著。仅 9 月份不同大小林隙在相同位置上的 PAR 差异不显著 7—9 月差异:仅中林隙丘顶的 PAR 在 8 月和 9 月差异不显著,其它林隙 7、8、9 月均差异显著。不同大小林隙坑底之间的 PAR 差异均显著。



注:大写字母不同表示同月份不同林隙相同位置差异显著;小写字母不同表示相同林隙同月份丘顶和坑底间差异显著。

图3 不同大小林隙内7—9月丘顶和坑底月均光合有效辐射

2.2.2 林隙内坑底和丘顶空气温度的月变化 所有林隙中,7—9 月丘顶的空气温度均大于坑底(图 4)。大、中、小林隙丘顶和坑底空气温度均为 7 月最高,丘顶分别为 20.91、20.59、20.53℃,坑底分别为 20.45、20.10、20.07℃。9 月最低,丘顶气温分别为 10.46、10.29、10.31℃,坑底分别为 10.23、10.13、

10.25℃。7 月和 8 月,不同大小林隙丘顶和坑底的空气温度均为大林隙 > 中林隙 > 小林隙;9 月却为 大林隙 > 小林隙 > 中林隙。这可能是进入 9 月份,气温明显下降,小林隙受周围边缘木树冠的影响,降温幅度较小。同一林隙同一微立地(坑底或丘顶)7—9 月之间空气温度差异均显著,同一林隙相同月

份丘顶和坑底的空气温度差异均不显著。

7—9月丘顶、坑底的月均最高气温、月均最低气温均呈降低趋势。由表3可见,相同微立地空气温度的日较差均为大林隙>中林隙>小林隙。7—9月最高气温均出现在大林隙的丘顶,分别为29.56、25.23、19.87℃。最低气温7—8月出现在小林隙里,9月出现在中林隙但位置并不固定。这是因为

丘顶的位置与坑底相比要高,能够接受较多的太阳辐射,因此丘顶最高气温大于坑底,而到了夜间,坑底由于位置较丘顶低,由于地形隐蔽,气流不畅通,不易于周围的空气进行热量的交换,因此温度下降并不明显。相同林隙丘顶和坑底日较差均为7月>9月>8月,相同月份丘顶的日较差均大于坑底。

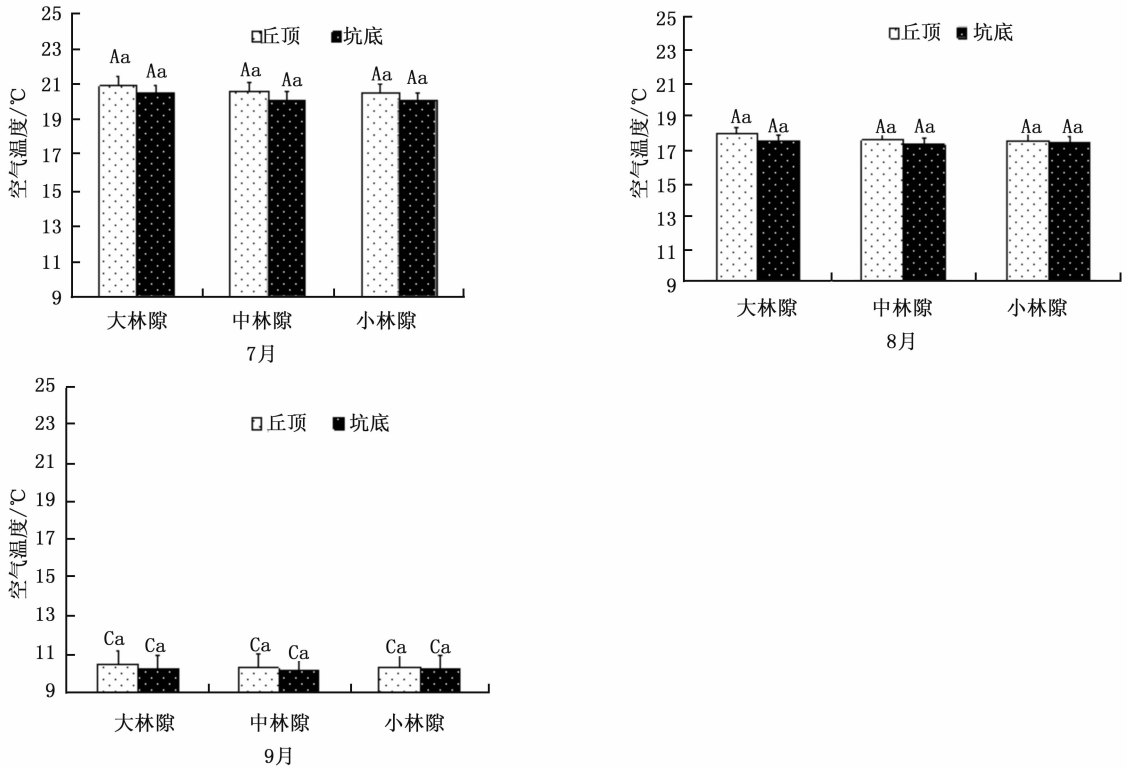


图4 不同大小林隙7—9月丘顶和坑底月均空气温度

表3 7—9月不同大小林隙丘顶和坑底的月平均气温、最高、最低气温及日较差变化

月份	林隙大小	平均气温/℃		平均最高气温/℃		平均最低气温/℃		平均日较差/℃	
		丘顶	坑底	丘顶	坑底	丘顶	坑底	丘顶	坑底
7	大林隙	20.91 ± 5.06Aa	20.45 ± 4.80Aa	29.56 ± 1.41	28.98 ± 1.39	14.48 ± 1.90	14.23 ± 1.87	15.08 ± 2.92	14.75 ± 2.69
	中林隙	20.60 ± 4.87Aa	20.10 ± 4.58Aa	28.21 ± 1.24	28.07 ± 1.40	14.34 ± 1.88	14.25 ± 1.85	13.86 ± 2.62	13.82 ± 2.67
	小林隙	20.53 ± 4.88Aa	20.70 ± 4.57Aa	28.29 ± 1.07	27.72 ± 1.37	14.30 ± 1.89	14.12 ± 1.66	13.99 ± 2.56	13.60 ± 2.62
8	大林隙	17.91 ± 3.93Ba	17.46 ± 3.72Ba	25.23 ± 2.09	24.14 ± 1.70	12.75 ± 2.10	12.67 ± 2.07	12.49 ± 2.21	11.47 ± 1.90
	中林隙	17.54 ± 3.81Ba	17.28 ± 3.51Ba	23.82 ± 1.75	23.10 ± 1.59	12.64 ± 2.08	12.69 ± 2.04	11.18 ± 2.24	10.41 ± 2.18
	小林隙	17.57 ± 3.87Ba	17.36 ± 3.70Ba	24.21 ± 1.90	23.77 ± 1.71	12.53 ± 2.08	12.62 ± 2.02	11.68 ± 2.32	11.16 ± 2.21
9	大林隙	10.46 ± 7.19Ca	10.23 ± 7.06Ca	19.87 ± 5.19	19.56 ± 4.63	5.02 ± 6.48	5.03 ± 6.50	14.86 ± 3.08	14.53 ± 2.84
	中林隙	10.29 ± 7.08Ca	10.14 ± 6.83Ca	19.14 ± 4.65	18.89 ± 4.80	4.89 ± 6.48	4.99 ± 6.49	14.25 ± 2.52	13.90 ± 2.43
	小林隙	10.31 ± 7.14Ca	10.25 ± 7.08Ca	18.86 ± 4.63	18.30 ± 4.48	4.94 ± 6.54	5.08 ± 6.39	13.90 ± 2.48	13.20 ± 2.40

2.2.3 林隙内坑底和丘顶空气相对湿度的月变化

7—9月,同一林隙内坑底和丘顶月均空气相对湿度大小顺序均为丘顶<坑底(图5),最大值均出现在8月份,大、中、小林隙丘顶的月均空气相对湿度分别为89.3%、90.4%、91.2%;坑底的分别为

90.9%、91.7%、94.3%。月均空气相对湿度的最小值均出现在7月份,大、中、小林隙丘顶分别为84.8%、85.0%、86.8%,坑底的分别为86.7%、87.1%、89.0%。同一月份相同林隙的丘顶和坑底空气相对湿度差异均显著。7月份丘顶和坑底的空

气湿度分别在不同大小林隙之间的差异均显著,9月均不显著。7月大、中、小林隙之间坑底差异显著,9月不显著。同一林隙坑底7月和9月的差异均

不显著,7月和8月以及8月和9月差异显著,相同林隙8月丘顶的空气湿度与7月和9月均差异显著。

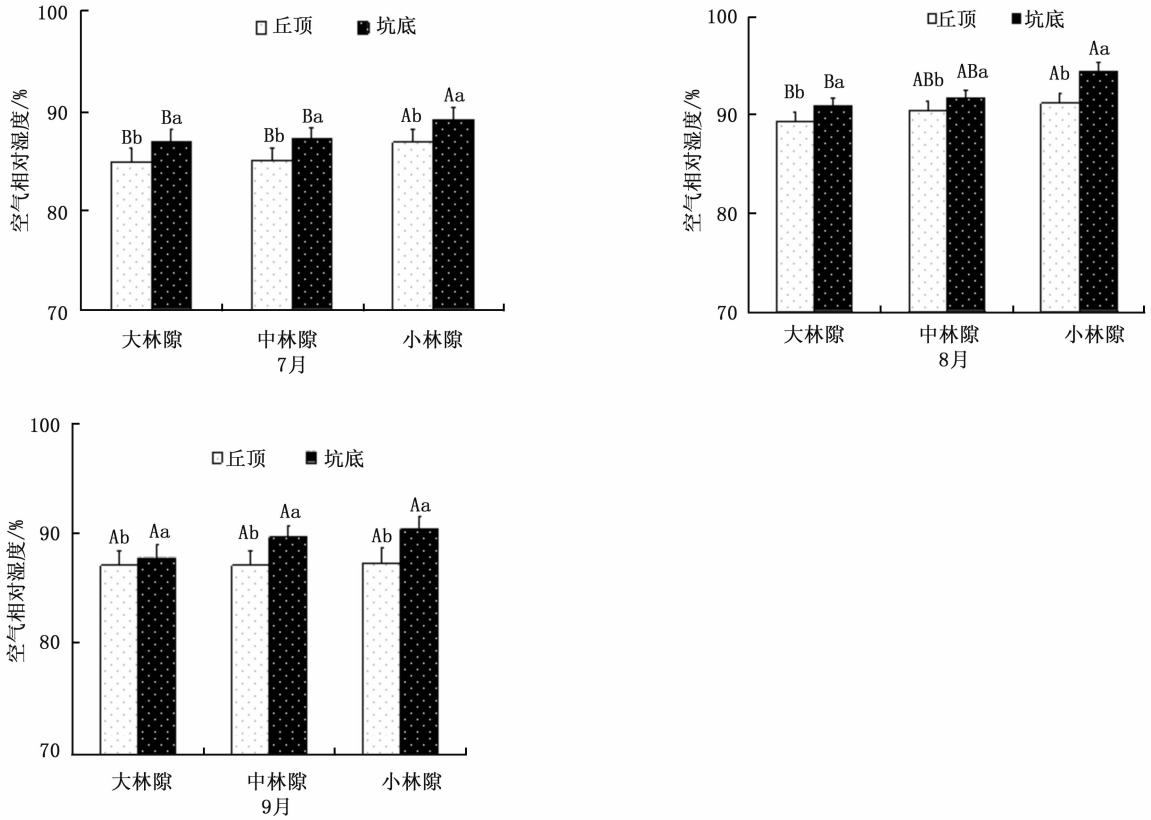


图5 不同大小林隙7—9月丘顶和坑底的月均空气相对湿度

### 3 讨论

在大多数的森林里,由大风引起的掘根(树木的连根拔起)和树倒是一种普遍的自然现象<sup>[30]</sup>。一般风倒事件是导致树木掘根的主要原因<sup>[19]</sup>,但同时也受到地形、地势以及土壤等因素的影响。本研究所选的样地位于保护区的中段,具体位于坡向朝西的斜坡上。研究区秋冬季多西北风,样地内的主要树种有云杉、冷杉、白桦、红松、糖槭,这些树种大多属于浅根性树种,容易掘根形成风倒现象。这与 Samonil<sup>[31]</sup>的研究结论大体一致。树木掘根和风倒形成的林冠空隙,为森林打开了一片空地,释放了资源,从而促进了植被的演替和树木的更新<sup>[32]</sup>。已有研究表明,不同的温度梯度对种子发芽的影响具有极显著的差异<sup>[33]</sup>。

本研究结果表明,林隙的大小和形状对光环境的影响很大。大林隙的光照水平比小林隙和郁闭林分的高,光合有效辐射所占的比例也大。不同大小林隙中心月均总辐射和 PAR 大小次序均为大林隙

>中林隙>小林隙,这与 Geiger<sup>[34]</sup>和段文标<sup>[27]</sup>等的研究结果基本一致。光照条件的不同,使得气温和空气相对湿度也有所不同。在整个生长季,所有林隙的空气温度均低于空旷地而高于郁闭林分,空气相对湿度则相反。7—9月,研究样地内空气相对湿度大小顺序依次为:大林隙<中林隙<小林隙,在整个观测期间,郁闭林分空气相对湿度一直最大,空旷地最小。这与 Mocroft 和 Oliver<sup>[35]</sup>、段文标等<sup>[36]</sup>的研究结果吻合。月均空气相对湿度为8月>9月>7月,这与冯静等<sup>[26]</sup>的研究结果略有不同。这说明月均空气相对湿度的变化趋势并不一致,它与观测年份的天气条件、立地类型等诸多因素有关。总的来说,不同大小林隙的月均总辐射、光合有效辐射以及空气温度变化趋势大体一致,与空气湿度的变化趋势相反。

对林隙内丘顶和坑底微气候的研究表明,7—9月,丘顶的月均光合有效辐射(PAR)和空气温度均大于坑底,空气相对湿度则小于坑底。这与 Clinton 和 Baker<sup>[21]</sup>的研究结果相一致。这是因为丘是由树



木的根盘由水平转变为垂直而形成的一个小山形状的土状体,更容易接受较多的光照,因此丘顶的光合有效辐射和空气温度较高,而相对湿度却低;而坑则形成一个凹状,有利于土壤水分的集聚和滞留,因此坑底的空气相对湿度高,同时坑由于部分受到位置较高的丘的遮蔽,光照条件较差,气温也就相对较低。不同大小林隙相同位置(丘顶、坑底)PAR和空气温度均为大林隙>中林隙>小林隙。这与魏全帅<sup>[37]</sup>等的研究结果基本一致。7—8月不同大小林隙丘顶和坑底的空气温度均为大林隙>中林隙>小林隙;9月却为大林隙>小林隙>中林隙,月均相对湿度均为8月>9月>7月,这与刘少冲等<sup>[18]</sup>的研究结果略有不同。这可能是由于两块样地的林型、所处位置、地形地势和研究年份的天气条件有所不同造成的。

不同大小林隙相同位置(林隙中心、丘顶、坑底)温度月均日较差均为大林隙>中林隙>小林隙,相同月份丘顶的日较差均大于坑底。这是因为7—9月所有林隙中心的月平均气温、最高、最低气温均呈下降趋势,且下降幅度随林隙大小的增加而变大,林隙越大,白天最高温度越高,而夜间最低温度越低,导致月均日较差随着林隙大小的增加而增大。这与Carlson和Groot<sup>[38]</sup>曾提出的皆伐迹地的日较差(最高温度和最低温度之差)比森林内的大原理大致相同。皆伐迹地由于林冠敞开,白天接受的光照多,气温增加明显,夜间气流交换顺畅,温度下降得快。林内由于林冠层的遮挡,光照少,温度较皆伐迹地低,而在夜间,林内由于有周围树木的遮挡和林冠的遮蔽,气流不通畅,不易与周围的空气进行热量交换,因此温度下降得也慢。

本研究由于受条件所限,只选择了地形条件相对一致而面积不同的大、中、小3个林隙进行研究,旨在揭示一个生长季内林隙内以及林隙内由掘根倒木形成的坑低和丘顶的微气候变化。林隙内物种的更新不是一层不变的,在林隙更新过程中,林隙内幼苗的种类和数量随着林隙面积及其形成年龄的变化而发生改变,最后只有少数种类的小部分个体进入林冠层,完成林隙树种的更新<sup>[39]</sup>。在常见林隙内,林隙初期存在的微地形,也会随着时间的流逝,变得不明显或逐渐消失。大林隙的幼苗更新、草本植物覆盖度和丰富度均大于小林隙<sup>[18,40]</sup>,而随着植物覆盖度的增加,净辐射、光照强度、风速和温度日较差随之减小,但空气湿度却增加<sup>[41]</sup>。在具有坑和丘微

立地的林隙内,必然会增加其微气候的变异性<sup>[18]</sup>。因此,需要对林隙内以及林隙内由掘根倒木形成的坑和丘微立地微气候的动态变化过程进行长期而系统的定位研究。在今后的研究中,还可以进一步对林隙内坑丘微立地微气候因子之间的相关关系以及微气候因子对物种丰富度和多样性的影响展开研究。

## 参考文献:

- [1] Schelhaas M J, Nabuurs G J, Schuck A. Natural disturbances in the European forests in the 19th and 20th centuries[J]. *Global Change Biology*, 2003, 9: 1620 - 1633.
- [2] Schlyter P, Stjernquist I, Barring L, *et al.* Assessment of the impacts of climate change and weather extremes on boreal forests in northern Europe, focusing on Norway spruce[J]. *Climate Research*, 2006, 31: 75 - 84.
- [3] Ruel J C. Factors influencing windthrow in balsam fir forests: from landscape studies to individual tree studies[J]. *Forest Ecology and Management*, 2000, 135: 169 - 178.
- [4] Everham E M, Brokaw N V L. Forest damage and recovery from catastrophic wind[J]. *The Botanical Review*, 1996, 62: 113 - 185.
- [5] Ennos A R. Wind as an ecological factor[J]. *Trends in Ecology & Evolution*, 1997, 12: 108 - 111.
- [6] Ilisson T, Metslaid M, Vodde F, *et al.* Storm disturbance in forest ecosystems in Estonia[J]. *Scandinavian Journal of Forest Research*, 2005, 20: 88 - 93.
- [7] Whitmore T C. Canopy gaps and the two major groups of forest trees[J]. *Ecology*, 1989, 70: 536 - 538.
- [8] Schliemann S A, Bockheim J G. Methods for studying treefall gaps: a review[J]. *Forest Ecology and Management*, 2011, 261: 1143 - 1151.
- [9] Chazdon R L, Pearcy R W. The importance of sunflecks for forest understory plants[J]. *Biology Science*, 1991, 41(11): 760 - 766.
- [10] 宋新章,肖文发. 林隙微生境及更新研究进展[J]. *林业科学*, 2006, 42(5): 114 - 119.
- [11] 张春雨,高露双,赵秀海. 林隙微环境异质性及物种更新响应研究进展[J]. *河北林果研究*, 2006, 21(2): 162 - 166.
- [12] Schaeztl R J, Burns S F, Johnson D L, *et al.* Tree uprooting: review of impacts on forest ecology[J]. *Vegetatio*, 1988, 79: 165 - 176.
- [13] Ma S Y, Concilio A, Oakley B, *et al.* Spatial variability in microclimate in a mixed-conifer forest before and after thinning and burning treatments[J]. *Forest Ecology and Management*, 2010, 259: 904 - 915.
- [14] 张一平, 窦军霞, 马友鑫, 等. 热带季节雨林林窗小气候要素时空分布特征[J]. *福建林学院学报*, 2002, 22(1): 42 - 46.
- [15] 张一平, 窦军霞, 马友鑫, 等. 热带季节雨林林窗不同热力作用面的热力特征[J]. *中南林学院学报*, 2001, 21(4): 68 - 72.
- [16] 张一平, 马友鑫, 刘玉洪, 等. 哀牢山北部常绿阔叶林林窗小气候空间分布特征[J]. *北京林业大学学报*, 2001, 23(4): 80

- 83.

- [17] 张一平,王进欣,刘玉洪,等. 热带次生林林窗干热季光照特征初步分析[J]. 广西植物,2001,21(1):1-8.
- [18] 刘少冲,段文标,冯 静,等. 林隙对小兴安岭阔叶红松林树种更新及物种多样性的影响[J]. 应用生态学报,2011,22(6):1381-1388.
- [19] Ulanova N G. The effects of windthrow on forest at different spatial scales: a review[J]. *Forest Ecology and Management*,2000,135:155-167.
- [20] Stephens E P. The uprooting of trees: a forest process[J]. *Soil Science Society of America Journal*,1956,20:113-116.
- [21] Clinton B D, Baker C R. Catastrophic windthrow in the southern Appalachians: characteristics of pits and mounds and initial vegetation responses[J]. *Forest Ecology and Management*,2000,16:51-60.
- [22] 臧润国. 林隙更新动态研究进展[J]. 生态学杂志,1998,17(2):50-58.
- [23] Henry J D, Swan J M A. Reconstructing forest history from live and dead plant material-an approach to the study of forest succession in southwest New Hampshire[J]. *Ecology*,1974,55:772-783.
- [24] Vodde F, Jogiste K, Gruson L, *et al.* Regeneration in windthrow areas in hemiboreal forests: the influence of microsite on the height growths of different tree species[J]. *Journal of Forest Research*,2010,15:55-64.
- [25] 李 猛,段文标,陈立新. 红松阔叶混交林林隙光量子通量密度、气温和空气相对湿度的时空分布格局[J]. 应用生态学报,2009,20(12):2853-2860.
- [26] 冯 静,段文标,陈立新. 阔叶红松混交林林隙大小和林隙内位置对小气候的影响[J]. 应用生态学报,2012,23(7):1758-1766.
- [27] 段文标,杜 珊,陈立新,等. 阔叶红松混交林林隙大小和掘根微立地对小气候的影响[J]. 应用生态学报,2013,24(8):2097-2105.
- [28] Runkle, J R. Gap regeneration in some old-growth forests of the Eastern United-States[J]. *Ecology*,1981,62:1041-1051.
- [29] 孙金伟,吴家兵,关德新,等. 森林与空旷地空气温湿度及土壤温度的长期对比研究[J]. 生态学杂志,2011,30(12):2685-2691.
- [30] Copper W S. The climax forest of Isle Royale, Lake Superior, and its development[J]. *Botanical Gazette*,1913,55:189-235.
- [31] Samonil P, Antolıkl L, Svoboda M, *et al.* Dynamics of windthrow events in a natural fir-beech forest in the Carpathian mountains[J]. *Forest Ecology and Management*,2009,275(10):1148-1156.
- [32] Taskinen O, LIVESNIEMI H, KUULUVAINEN T. Response of fine roots to an experimental gap in a boreal piceaabies forest[J]. *Plant and Soil*,2003,255:503-512.
- [33] 李 云,郑德璋,廖宝文,等. 盐度与温度对红树植物无瓣海桑种子发芽的影响[J]. 林业科学研究,1997,10(2):137-142.
- [34] Geiger R. *The Climate Near the Ground*[M]. Cambridge, Mass, 1965. 611 pp.
- [35] Morecroft M D, Taylor M E, Oliver H R. Air and soil microclimates of deciduous woodland compared to an open site[J]. *Agricultural and Forest Meteorology*,1998,90:141-156.
- [36] 段文标,王 晶,李 岩. 红松阔叶混交林不同大小林隙小气候特征[J]. 应用生态学报,2008,19(12):2561-2566.
- [37] 魏全帅,王敬华,段文标,等. 红松阔叶混交林不同大小林隙内丘坑复合体微气候动态变化[J]. 应用生态学报,2014,25(3):702-710.
- [38] Carlson D W, Groot A. Microclimate of clear-cut, forest interior, and small openings in trembling aspen forest[J]. *Agricultural and Forest Meteorology*,1997,87:313-329.
- [39] 陶建平,臧润国. 海南霸王岭热带山地雨林林隙幼苗库动态规律研究[J]. 林业科学,2004,40(3):34-38.
- [40] 段文标,王丽霞,陈立新,等. 红松阔叶混交林林隙大小及光照对草本植物的影响[J]. 应用生态学报,2013,24(3):614-620.
- [41] 范兴海,黄寿波. 我国农林系统小气候研究概述[J]. 林业科学研究,2000,13(2):197-202.