

云冷杉林风倒区坑丘微立地微气候因子时空变化及其与土温的关系

段文标¹, 王金铃¹, 陈立新^{1*}, 景鑫¹, 张玉双¹, 魏全帅¹,
杜珊^{1,2}, 赵莹¹, 秦必达¹

(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: 为了揭示云冷杉林生长季坑丘微立地上微气候因子的时空变化以及 *PPFD*、*RH*、*SWC* 与不同深度 T_s 的相关性。2013 年 7—9 月在小兴安岭谷地云冷杉林风倒区 1.50 hm² 的固定样地内,测定所有 35 对坑丘微立地(丘顶、丘面、坑底、坑壁)的光量子通量密度(*PPFD*)、空气相对湿度(*RH*)、地表土壤温度(T_{s0})、5 cm 和 10 cm 深度的土壤温度(T_{s5} 和 T_{s10}),以及 0~7.6 cm、0~12 cm 和 0~20 cm 土壤含水量(SWC_1 、 SWC_2 和 SWC_3)等微气候因子,并将完整立地(未受掘根干扰的完整林地)设为对照样地。比较 5 个不同微立地微气候因子的月变化以及 *PPFD*、*RH* 以及 *SWC* 对土壤温度(T_s)的影响。结果表明:7—9 月,坑丘微立地(丘顶、丘面、坑底、坑壁)的月均 *PPFD* 和 T_{s0} 均为 7 月 > 8 月 > 9 月,月均 *RH* 以及 T_{s5} 和 T_{s10} 均为 8 月 > 7 月 > 9 月,月均 *SWC* 均为 8 月最大;7—8 月不同微立地月均 *PPFD* 大小顺序均为丘顶 > 丘面 > 坑底 > 完整立地,9 月却为丘顶 > 丘面 > 完整立地 > 坑底 > 坑壁;7—9 月,各微立地 T_{s0} 大小顺序均为丘顶 > 丘面 > 完整立地 > 坑壁 > 坑底,而 5 cm 和 10 cm 均为丘顶 > 丘面 > 坑壁 > 完整立地 > 坑底;月均 *RH* 和月均 *SWC* 均为坑底 > 坑壁 > 完整立地 > 丘面 > 丘顶;7 月丘顶的 *PPFD* 最大,为 736.11 $\mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$,完整立地最小,为 25.46 $\mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$,丘顶 T_s 最高,为 26.29℃,坑底 T_s 最低,为 5.13℃;浅层 *SWC* 大于较深层的,最大 *SWC* 出现在 8 月的坑底,为 51.58%。相同微立地(丘顶、坑底、完整立地)*PPFD* 与浅层 T_s 的相关性大于较深层的土壤, T_{s0} 与 *PPFD* 呈正相关,与 *RH* 呈负相关。

关键词: 丘顶;坑底;微气候因子;土壤温度

中图分类号:S791

文献标识码:A

Spatiotemporal Variation of the Microclimatic Factors at Pit and Mound Microsites in Windthrow Area of the Spruce-fir Forest and Their Relationships with Soil Temperature

DUAN Wen-biao¹, WANG Jin-ling¹, CHEN Li-xin¹, JING Xin¹, Zhang Yu-shuang¹,
WEI Quan-shua¹, Du Shan^{1,2}, ZHAO Ying¹, Qin Bi-da¹

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

2. Department of Architectural Engineering, Dazhou Vocational and Technical College, Dazhou 635000, Sichuan, China)

Abstract: An investigation was conducted in a 1.5 hm² permanent plot in the windthrow area of *Picea asperata* and *Abies nephrolepis* forest in Xiaoxing'an Mountains to measure the microclimatic factors of photosynthetic photo flux density (*PPFD*), relative air humidity (*RH*), the soil temperature of surface (T_{s0}), the depth of 5 cm (T_{s5}) and 10

收稿日期: 2014-10-15

基金项目: 黑龙江省自然科学基金项目(C2015057); 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); 哈尔滨市科技创新人才研究专项资金项目(RC2012LX002018); 东北林业大学大学生创新创业计划训练项目(201410225158) 资助。

作者简介: 段文标,男,博士,教授,博士生导师,主要从事森林气象学、水土保持和荒漠化防治研究。E-mail: dwbiao88@163.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: 森林土壤与林地养分管理. E-mail: lxchen88@163.com.

cm (T_{s10}), soil water content at the depth of 0 ~ 7.6 cm (SWC_1), 0 ~ 12 cm (SWC_2) and 0 ~ 20 cm (SWC_3) on 35 pairs of pit and mound microsites (mound top, mound face, pit bottom, pit wall) from June to September in 2013. The intact site (intact forest floor undisturbed by uprooting) was set up as the controls. The monthly variations of the microclimatic factors on 5 different microsites and the impacts of PPFD, RH, and SWC on T_s were compared. The results showed that: from July to September, both mean monthly PPFD and T_{s0} in pit and mound microsites ranked in the decreasing order of July > August > September, but the monthly mean RH, T_{s5} and T_{s10} decreased in the order of August > July > September, the monthly mean SWC decreased in the order of August > September > July; from July to the August, the monthly mean PPFD was listed in the decreasing order of mound top > mound face > pit bottom > intact forest floor, but in September, it changed in the order of mound top > mound face > intact forest floor > pit bottom > pit wall; from July to September, the monthly mean T_{s0} decreased in the order of mound top > mound face > intact forest floor > pit wall > pit bottom, but that of T_{s5} and T_{s10} were in the order of mound top > mound face > pit wall > intact forest floor > pit bottom, both the monthly mean RH and SWC was in the order of pit bottom > pit wall > intact forest floor > mound face > mound top; in July, the PPFD at mound top was the highest ($736.1 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$) and the lowest in intact forest floor ($25.46 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$), the T_s at mound top was the highest ($26.29 \text{ }^\circ\text{C}$) and the lowest in pit bottom ($5.13 \text{ }^\circ\text{C}$); the SWC in shallow soil layer was larger than that in deep soil layer, the SWC was the highest in pit bottom (51.58%) on August. The correlation between PPFD in the same microsite and T_s in shallow soil layer was larger than in deep soil layer. There was positive correlation between T_{s0} and PPFD, but negative correlation between T_{s0} and RH, respectively.

Key words: mound top; pit bottom; microclimate factor; soil temperature

无论温带还是热带森林,掘根树倒都是森林生态系统受干扰的一个重要来源^[1-4],是形成微地形变异的一个重要的过程^[5-6]。人们将矿质土壤被暴露的区域称为坑,将植物的根盘由水平转变为近似垂直位置而形成的突状体称为丘。坑丘微地形与整个森林相比,尽管面积很小,但是对森林群落的组成和结构起着非常重要的作用^[7]。仅坑和丘之间土壤温度和水分差异就能够小范围影响森林的组成^[8-9]。坑丘微地形、周围的完整立地以及腐烂的原木构成了一个具有独特微气候特征的区域^[10-14]。Peterson 和 Carson 指出,与掘根倒木相关的坑、丘、坑壁与完整林地(土壤未被干扰的林地)4种微立地之间的光照、土壤水分和土壤温度有显著的差异^[6]。微气候高度的变异性对许多生态过程来说是非常重要的。如在混交针叶林里,物种多样性和丰富度的增加常常与微气候高度的空间变异性有关^[15-16]。这是因为在针叶林里微气候的异质性能为种子萌发、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^[17]。因此对由掘根倒木形成的坑丘微立地的微气候进行研究,对探讨坑丘内幼苗更新具有极为重要的意义。

国内对森林里微气候的研究主要是从林隙的角

度展开的。如李猛等探讨了阔叶红松(*Pinus koraiensis* Sieb. et Zucc.)林单一林隙里部分小气候因子的时空分布格局,指出实验区内各样点的月平均光量子通量密度(PPFD)郁闭林分最低,林隙次之,空旷地的最高^[18];段文标等比较了不同大小林隙中心和丘顶部微气候因子的差异,指出在同一林隙中,丘顶的月均光合有效辐射(PAR)和月均气温大于林隙中心,月均空气相对湿度(RH)小于林隙中心;不同大小林隙的月均PAR和月均气温为大林隙>中林隙>小林隙,空气湿度则相反^[19],而对风倒区内形成的坑丘微立地的微气候差异报道很少。仅魏全帅等^[20]对红松阔叶混交林丘坑复合体不同微立地(坑底、坑壁、丘顶、丘面及完整立地)的土壤温度、土壤含水量和空气相对湿度进行了测定。但报道的内容并不全面,通过查阅相关文献得知,掘根倒木最直接、最重要的作用是改变了微生境的光照条件,由此引起土壤温度(T_s)、气温和空气相对湿度(RH)以及土壤理化性质的变化。因此,本研究增加了光量子通量密度(PPFD)以及不同深度 T_s 和土壤水分含量(SWC)的测定。而温度是影响种子萌发的主要因素,本研究还增加了生长季内坑丘微立地PPFD、RH、SWC与不同深度 T_s 的相关性分析^[21]。所选取

的样地为小兴安岭的谷地云冷杉林,是黑龙江省重要的森林群落和用材林基地之一,在涵养水源、护岸保土等方面起着重要作用^[22]。因此,本文通过对小兴安岭谷地云冷杉林风倒区坑丘微立地在生长季(7—9月)微气候因子的测定,旨在揭示该林型生长季坑丘微立地上微气候因子的时空变化以及 *PPFD*、*RH*、*SWC* 与不同深度 T_s 的相关性,为云冷杉林坑丘微立地的更新、生态系统的恢复及其科学经营提供基础数据和理论参考。

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凉水国家级自然保护区(47°6′49″~47°16′10″ N, 128°47′8″~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。年平均气温 -0.3℃,年平均降水量 676.0 mm,年平均相对湿度 78%~96%,年平均蒸发量 805.0 mm。年日照时数 1 850 h,年平均地温 1.2℃,无霜期 100~120 d。本地区春、夏季多西南风,秋、冬季多西北风。地带性土壤为暗棕壤。所选样地位于保护区中段,主要组成树种有红皮云杉(*Picea koraiensis* Nakai)、臭冷杉(*Abies nephrolepis* (Trautv.) Maxim),因受云杉、冷杉非地带性植被的影响,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)和毛赤杨(*Alnus sibirica*)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*)、珍珠梅(*Sorbaria sorbifolia* (L.) A. Br)、兰靛果忍冬(*Lonicera caerulea* Linn. var. *edulis* Turcz. ex Herd)、刺玫蔷薇(*Rosia acicalarica*)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,有宽叶荨麻(*Urtica laetereirens* Maxim)、水金凤(*Impatiens noli-tangere* Linn)、林金腰(*Chrysosplenium lectus-cochleae* Kitagawa)、东北蹄盖蕨(*Athyrium brevifrons* Ching et S. K. Wu)、小叶芹(*Aegopodium alpestre* Ledeb)和舞鹤草(*Maianthem umbifolium* (Linn) F. W. Schmidt)等。

1.2 研究方法

1.2.1 样地选择及其基础状况调查 2013年7月,在小兴安岭谷地云冷杉林风倒区内,通过踏查,选择由掘根倒木形成的典型坑和丘微立地的代表性林

分。在该林分内,设置 100 m × 150 m 的矩形固定样地,作为试验样地,并将完整立地(未受掘根倒木及其形成的坑和丘微立地影响的郁闭林分)设为对照样地。经过调查,确认该试验样地内共有 35 对坑丘微立地。

1.2.2 外业调查 2013年7—9月,每月选定 6~10 个典型晴天。在每个晴天的 10:00—14:00 时段内,测定每对坑丘微立地的微气候因子。利用土壤时域反射仪 TDR 200 (Spectrum Technologies Inc., USA, 测量范围为 0~100%; 测量精度为 ±3.0%; 分辨率为 1.0%),测定 5 个微立地(坑底、坑壁、丘顶、丘面以及完整立地)上 0~7.6 cm、0~12 cm 和 0~20 cm 深度的土壤含水量(分别用 SWC_1 、 SWC_2 、 SWC_3 表示);采用红外测温仪测量地表的 T_s ,利用数字电偶探针温度计(Spectrum Technologies, Inc., USA)测定以上微立地 5 cm、10 cm 深度处的 T_s ;使用光量子/照度双辐射计(Apogee Instruments Inc., USA)和数字温湿度计(TES Electrical Electronic Corp., 中国台湾)分别测定微立地上方 20 cm 处的 *PPFD* 和 *RH*。

1.3 数据处理

计算每对坑丘微立地的 *PPFD*、*RH*、 T_s 和 *SWC* 的月均值和标准差,比较不同深度处 T_s 和 *SWC* 的最大值和最小值,并计算不同深度 T_s 和 *SWC* 的变异系数。使用 SPSS 19.0 软件中的单因素方差分析,检验不同微立地之间各微气候因子的差异;采用 Pearson 相关分析法,探讨 *PPFD*、*RH* 以及 SWC_1 与不同层次 T_s (地表、地下 5 cm 和 10 cm) 的相关性,并对主要微气候因子与坑底、丘顶和完整立地草本植物物种丰富度的影响进行分析。

2 结果与分析

2.1 *PPFD* 的时空变化

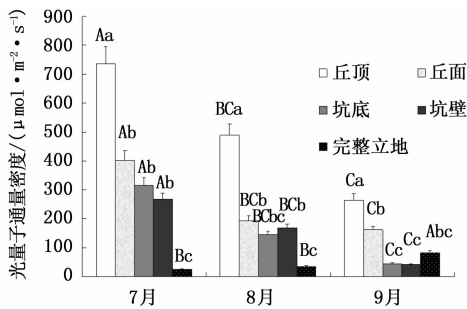
2.1.1 相同微立地 *PPFD* 的月变化 不同月份 *PPFD* 不同,除完整立地外,相同微立地 7—9 月的 *PPFD* 均呈明显下降趋势,丘顶、丘面、坑底和坑壁 8 月比 7 月分别下降了 248.03、209.19、170.98 和 98.24 $\mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$,9 月比 8 月又分别下降了 223.37、31.50、100.87 和 127.43 $\mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ (图 1)。完整立地的 *PPFD* 大小顺序为 9 月 > 8 月 > 7 月,这是因为 9 月份随着气温降低,树叶开始脱落,进入完整立地的光照不断增加,*PPFD* 也相应增大;其他微立地(丘顶、丘面、坑底和坑壁)的 *PPFD*

均为7月>8月>9月。7—9月,除完整立地外,相同微立地(丘顶、丘面、坑底和坑壁)8月和9月PPFD差异不显著,其他月份差异均显著;而完整立地7月和8月差异不显著,其他月份差异显著。

2.1.2 相同月份不同微立地PPFD的变化 7—8月不同微立地月均PPFD大小顺序均为丘顶>丘面>坑底>完整立地。9月为丘顶>丘面>完整立地>坑底>坑壁(图1)。除完整立地外,各微立地(丘顶、丘面、坑底、坑壁)PPFD均为7月份最大,分别为736.11、402.60、315.54、267.27 $\mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$;9月份最小,分别为264.71、161.91、43.69、41.60 $\mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 。完整立地9月份的PPFD最大,为83.17 $\mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$,7月份最小,仅为25.46 $\mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 。7—9月,丘顶与其他微立地之间PPFD的差异均显著,坑底仅7月与完整立地差异显著,8、9月差异不显著。

2.2 RH的时空变化

2.2.1 相同微立地RH的月变化 7—9月各微立地RH大小顺序均为8月>7月>9月(图2)。8月份月均RH均最大,各微立地(丘顶、丘面、坑底、坑壁、完整立地)分别为79.4%、86.7%、92.4%、89.9%、86.7%,9月份最小,分别为44.3%、45.3%、52.3%、51.2%、48.9%。单因素方差分析表明,除7月和9月丘顶的RH差异不显著外,其他微立地7—9月差异均显著。



注:大写字母不同表示相同微立地不同月份间差异显著,小写字母不同表示相同月份不同微立地间差异显著,下同

图1 7—9月不同微立地的月均PPFD (mean ± SD)

2.2.2 相同月份不同微立地RH的变化 7—9月,不同微立地月均RH大小均为坑底>坑壁>完整立地>丘面>丘顶,3个月总平均值的大小依次为坑底(71.7%)>坑壁(70.6%)>完整立地(69.8%)>丘面(61.1%)>丘顶(56.9%)。7—9月丘顶的月均RH最小,分别为46.3%、79.4%和44.3%;坑底最大,分别为71.5%、92.4%、52.4%。7—9月,

坑底、坑壁和完整立地两两之间差异均不显著,丘顶和丘面仅8月份差异显著,其他月份差异均不显著。

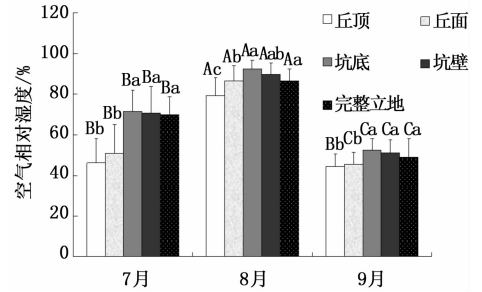


图2 7—9月不同微立地的月均RH (mean ± SD)

2.3 土壤温度的时空变化

2.3.1 同一微立地相同深度T_s的月变化 由表1可见,7—9月,各微立地(丘顶、丘面、坑底、坑壁、完整立地)T_{s0}均为7月>8月>9月,7月份T_{s0}最大,分别为26.29、24.96、19.58、20.35、20.53℃,9月份最小,分别为11.79、10.9、8.59、8.88、10.01℃;而T_{s5}和T_{s10}深度月均土壤温度7—9月大小顺序均为8月>7月>9月,8月份最大,其中T_{s5}分别为22.04、21.08、14.41、15.32、15.09℃,T_{s10}分别为21.13、20.68、13.34、14.20、14.06℃。两个深度T_{s5}和T_{s10}的最大值均出现在8月,而不是出现在太阳辐射最强的7月。这是因为土壤的热量是由表层向深处传递的,浅层土壤被加热后才能进一步加热深层土壤,因此温度在较深土壤中出现的时间相对浅层土壤要晚。丘顶、丘面、坑底的地表温度7、8月差异均不显著;同一微立地不同月份T_{s5}和T_{s10}差异均显著。从变异系数来看,各微立地(丘顶、丘面、坑底、坑壁)9月份的变异程度最大,7月份变异程度最小。仅8月份丘顶和丘面不同深度处的T_s、完整立地地表温度均属于弱变异性,其他均为中等变异程度。

2.3.2 相同月份同一深度不同微立地T_s的变化

从表1看出,7—9月,相同月份不同微立地T_{s0}大小均为丘顶>丘面>完整立地>坑壁>坑底,T_{s5}和T_{s10}大小均为丘顶>丘面>坑壁>完整立地>坑底。无论是那个深度的土壤,同一月份丘顶的T_s均最大,坑底的均最小。例如7—9月丘顶总平均T_{s0}为21.19℃,比其他微立地(丘面、坑底、坑壁、完整立地)分别高1.26、5.36、4.75、4.2℃。T_s的极大值出现在7月份丘顶T_{s0}处,为37.4℃,极小值也出现在9月丘顶T_{s10},仅为2.2℃;单因素方差分析表明,T_{s0}在7月仅坑底、坑壁和完整立地两两间差异不显著,8月仅坑壁和完整立地差异不显著,9月丘顶和丘面

以及坑底、坑壁和完整立地两两差异均不显著;7—9月丘顶和丘面 T_{55} 和 T_{510} 差异均不显著,7—8月坑底、坑壁和完整立地两两之间差异均不显著,9月完

整立地 T_{510} 与坑底差异显著,与其他微立地差异均不显著。从变异系数(CV)来看,同一月份相同深度丘顶 T_5 的 $CV >$ 坑底 T_5 的 CV 。

表 1 7—9月各微立地不同深度土壤温度

微立地	深度/cm	月份	最大值 /°C	最小值 /°C	极差 /°C	平均值 ± 标准差 /°C	总均值 /°C	变异系数 CV/%
丘顶	0	7	37.4	20.0	17.4	26.29 ± 4.60Aa	21.19	17.50
		8	31.2	20.6	10.6	25.49 ± 2.17Aa		8.51
		9	20.8	7.0	13.8	11.79 ± 3.86Ba		32.69
	5	7	28.3	14.7	13.6	19.98 ± 3.90Ba	16.37	19.51
		8	27.2	18.6	8.6	22.04 ± 1.56Aa		7.06
		9	12.9	3.2	9.7	7.09 ± 2.42Ca		34.17
	10	7	26.0	13.0	13.0	18.65 ± 3.05Ba	15.42	16.38
		8	26.0	18.4	7.6	21.13 ± 1.39Aa		6.57
		9	12.0	2.2	9.8	6.49 ± 2.72Ca		41.93
丘面	0	7	35.6	17.8	17.8	24.96 ± 4.81Aa	19.93	19.28
		8	26.8	19.3	7.5	23.92 ± 1.73Ab		7.24
		9	20.4	6.6	13.8	10.90 ± 3.87Ba		35.49
	5	7	24.8	8.4	16.4	18.38 ± 3.08Bb	15.47	16.74
		8	24.7	18.2	6.5	21.08 ± 1.47Aa		6.97
		9	16.0	3.3	12.7	6.94 ± 3.04Ca		43.80
	10	7	26.1	10.1	16.0	18.09 ± 3.03Ba	15.21	16.74
		8	23.3	18.2	5.1	20.68 ± 1.36Aa		6.58
		9	13.9	2.7	11.2	6.87 ± 2.71Ca		39.40
坑底	0	7	26.8	12.8	14.0	19.58 ± 3.10Ab	15.83	15.81
		8	25.2	15.8	9.4	19.33 ± 2.38Ad		12.29
		9	15.4	3.6	11.8	8.59 ± 2.59Bb		30.13
	5	7	16.6	6.6	10.0	10.84 ± 2.44Bc	10.13	22.48
		8	19.0	9.0	10.0	14.41 ± 1.96Ab		13.62
		9	10.4	3.0	7.4	5.13 ± 1.21Cb		23.69
	10	7	14.4	4.9	9.5	9.59 ± 2.21Bb	9.40	23.06
		8	16.0	8.1	7.9	13.34 ± 1.80Ab		13.49
		9	10.0	3.2	6.8	5.27 ± 1.06Cb		22.67
坑壁	0	7	32.8	16.0	16.8	20.35 ± 3.18Bb	16.44	15.63
		8	26.4	15.5	10.9	20.10 ± 1.97Ac		9.03
		9	15.6	4.2	11.4	8.88 ± 2.40Cb		27.54
	5	7	19.0	6.9	12.1	11.29 ± 2.40Bc	10.68	21.27
		8	19.7	8.2	11.5	15.32 ± 2.50Ab		16.37
		9	10.2	3.3	6.9	5.43 ± 1.22Cb		22.53
	10	7	15.0	6.0	9.0	10.14 ± 2.10Bb	9.93	20.67
		8	17.7	7.0	10.7	14.20 ± 2.31Ab		16.28
		9	9.4	3.8	5.6	5.45 ± 1.06Cb		19.42
完整立地	0	7	24.5	13.8	10.7	20.53 ± 2.27Bb	16.99	11.04
		8	26.2	17.8	8.4	20.43 ± 1.88Ac		8.41
		9	19.0	5.4	13.6	10.01 ± 2.81Cb		28.02
	5	7	13.8	6.7	7.1	10.72 ± 1.75Bc	10.66	16.35
		8	19.8	9.8	10.0	15.09 ± 2.41Ab		16.00
		9	8.1	4.3	3.8	6.18 ± 1.06Cb		17.20
	10	7	11.9	5.4	6.5	9.07 ± 1.93Bb	9.80	21.27
		8	18.8	8.7	10.1	14.06 ± 2.21Ab		15.70
		9	8.7	4.3	4.4	6.27 ± 1.10Ca		17.54

极差 = 最大值 - 最小值;大写字母不同表示相同微立地同深度不同月份间差异显著;小写字母不同表示同月份同深度不同微立地间差异显著(下同)。

2.3.3 同一月份相同微立地不同深度 T_s 的变化

由表1可知,7—8月,相同微立地同一月份 T_{s0} 均大于 T_{s5} 和 T_{s10} 。这是因为白天地表土壤首先受到阳光的照射,得到的太阳辐射最多,而热量在由土壤表层向深层土壤传递的过程中,每层土壤均要吸收一部分热量,而随着土壤深度的增加,供深层土壤吸收的热量越来越少,温度自然就越来越低。相同微立地(丘顶、丘面、坑底、坑壁、完整立地)7月 T_{s0} 比 T_{s5} 的分别高 6.31、6.58、8.74、9.06、9.81℃,比 T_{s10} 的分别高 7.64、6.81、9.99、10.21、11.46℃;8月的 T_{s0} 比 T_{s5} 的分别高 3.45、2.84、4.92、4.78、5.34℃,比 T_{s10} 的分别高 4.36、3.24、5.99、5.90、6.37℃;9月 T_{s0} 比 T_{s5} 的分别高 4.70、3.96、3.46、3.45、3.83℃,比 T_{s10} 的分别高 5.3、4.03、3.32、3.43、3.74℃。7—8月 T_{s5} 均大于 T_{s10} ,仅9月份坑底、坑壁和完整立地的 $T_{s5} < T_{s10}$,这可能是由于 T_s 的变化是由白天吸热和夜间放热综合作用的结果。9月份随着日照时间的减少和太阳辐射的减弱,白天土壤吸收的热量逐渐减少,而夜间失去的热量却在不断增加,尤其表层土壤表现明显,而较深层次的土壤夜间失去的热量较少且缓慢,坑底、坑壁和完整立地由于所处的微地形比较隐蔽,土壤热量不易散失,而5cm深度土壤白天吸收的热量不足以弥补夜间损失的热量,因此温度较10cm深度的土壤略低。相同微立地的 T_{s0} 分别与 T_{s5} 和 T_{s10} 差异均显著,7月和9月相同微立地 T_{s5} 和 T_{s10} 差异均不显著。从表1的变异系数可知, T_{s0} 的 $CV > T_{s5}$ 的 $CV > T_{s10}$ 的 CV 。

2.4 SWC 的时空变化

2.4.1 同一微立地相同深度 SWC 的月变化 从表2看出,7—9月,同一微立地(丘顶、丘面、坑底和坑壁)相同深度 SWC 均为 8月 > 9月 > 7月,完整立地为 8月 > 7月 > 9月,7月相同微立地(丘顶、丘面、坑底、坑壁、完整立地) SWC_1 分别为 2.35%、2.62%、39.34%、38.11%、38.39%;8月有所增加,分别为 14.73%、9.06%、51.58%、45.45%、45.72%,9月又呈现下降趋势,分别为 4.31%、5.49%、44.9%、41.88%、35.28%。 SWC_2 和 SWC_3 土壤含水量月变化趋势与 SWC_1 相同。单因素方差分析表明, SWC_1 仅坑底在7月和9月差异显著,其它微立地7月和9月差异均不显著;0~12cm丘顶、丘面7月和9月的差异均不显著;坑底、坑壁8月和9月差异不显著,完整立地7月和8月差异不显著;0~20cm丘顶7—9月差异均显著,坑底、坑

壁和完整立地7月和9月份差异均不显著。

2.4.2 相同月份同一深度不同微立地 SWC 的变化

由表2可知,不同微立地各深度7—9月总平均 SWC 均为坑底 > 坑壁 > 完整立地 > 丘顶。相同微立地(坑底、坑壁、完整立地、丘顶)总平均 SWC_1 分别为 45.27%、41.81%、39.80%、7.13%;随着深度的增加,各微立地的 SWC 有所降低(丘顶的 SWC_3 除外), SWC_2 分别为 44.00%、40.90%、38.22%、6.47%, SWC_3 分别为 41.15%、40.27%、36.88%、7.47%。极大值出现在8月份坑底 SWC_1 处,为 66.8%,极小值出现在7月丘顶为 0.2%。由于丘顶的位置高,受降雨、光照等外界条件的影响较大,丘顶 SWC 的变异程度均大于坑底。7—9月丘面以及7月丘顶不同深度 SWC 属于强变异程度,其它微立地(坑底、坑壁、完整立地)不同深度 SWC 均属中等变异程度。7—9月,丘顶和丘面仅在8月 SWC_3 差异显著,其余深度不同月份差异均不显著,与坑底和完整立地均差异显著。

2.4.3 相同月份同一微立地不同深度 SWC 的变化

由表2可知,相同月份同一微立地(坑底、坑壁、完整立地)浅层 SWC 大于深层 SWC,各微立地(坑底、坑壁、完整立地)7—9月总平均 SWC_1 分别为 45.27%、41.81%、39.80%,比 SWC_2 分别高 1.27%、0.91%、1.58%,比 SWC_3 分别高 4.12%、1.54%、2.92%。7—9月丘顶和丘面的月均 SWC 随着深度的增加先上升后下降,7月和9月相同微立地不同深度的 SWC 差异不显著,8月仅坑底 SWC_2 和 SWC_3 及完整立地 SWC_1 和 SWC_2 差异显著,其它差异均不显著。从变异系数来看,同一月份相同微立地(丘顶、丘面、坑底、坑壁、完整立地)不同深度的 SWC 变异程度相差不大。

2.5 PPF、RH、SWC 与不同层 T_s 的关系

由表3可知,7—9月 PPF 与 T_{s0} 均呈正相关, RH 和 SWC 与 T_{s0} 均呈负相关, PPF、RH 和 SWC 与 T_{s5} 和 T_{s10} 的相关性并没有呈现统一的规律。但总的来说, PPF 与浅层 T_s 的相关性大于较深层次 T_s 。其中7月光照最强,各微立地(丘顶、坑底、完整立地) PPF 与 T_{s0} 均呈极显著的相关性,相关系数分别为 0.469 4、0.734 3、0.467 2;与7月和8月相比,9月太阳辐射最小,光照最弱,仅丘顶 PPF 与 T_{s0} 相关关系显著;丘顶地表土壤由于所处的位置较高且接受的太阳辐射最多,温度较高,因此,丘顶 PPF 与 T_{s0} 的相关程度大于与 T_{s5} 和 T_{s10} 相关性(相关系

数);坑底和完整立地 $PPFD$ 与 T_{S0} 均呈正相关,与 T_{S5} 和 T_{S10} 影响较小且相关性不显著。丘顶 RH 与不同层 T_s 均呈负相关关系,且7月 $PPFD$ 与 T_{S0} 和 T_{S5} 呈极显著负相关关系,与 T_{S10} 相关不显著;7—9月,坑底 RH 与 T_{S0} 呈负相关,与 T_{S5} 、 T_{S10} 无明显的相关性。丘顶 SWC_1 与不同层 T_s 均呈负相关关系,且7月与 T_{S5} 、 T_{S10} 相关显著,相关系数分别为 -0.5726 、

-0.4474 ,与 T_{S0} 相关不显著。坑底 SWC 与不同层次 T_s 相关性均不显著。其中8月 SWC 最高,丘顶和坑底月均 SWC_1 分别为 14.73% 和 51.58% (由表2可知),对 T_s 上升的抑制作用最大,两者均与 T_{S0} 呈显著负相关,而完整立地接收到的太阳辐射较少,且受植被或枯落物的覆盖影响较大,深层土壤水分更不易蒸发,且导致 SWC 与 T_s 的相关并不显著。

表2 7—9月各微立地不同深度土壤水分含量

微立地	深度/cm	月份	最大值 /%	最小值 /%	极差 /%	月均值 ± 标准差 /%	总均值 /%	变异系数 /%
丘顶	0~7.6	7	6.6	0.5	6.1	2.35 ± 2.98Bb	7.13	126.70
		8	28.9	1.5	27.4	14.73 ± 7.26Ac		49.32
		9	18.7	0.7	18.7	4.31 ± 4.28Bd		99.19
	0~12	7	20.3	2.0	18.3	2.84 ± 4.47Bb	6.47	157.22
		8	26.4	3.9	22.5	12.53 ± 7.58Ad		60.47
		9	12.0	0.6	11.4	4.03 ± 3.69Bd		91.50
	0~20	7	13.8	0.9	12.9	2.61 ± 3.56Cb	7.47	136.26
		8	28.2	4.1	24.1	14.39 ± 7.64Ab		53.12
		9	13.4	0.2	13.2	5.43 ± 4.13Bd		76.19
丘面	0~7.6	7	21.4	0.5	20.9	2.62 ± 3.96Bb	5.72	151.41
		8	34.4	4.0	30.4	9.06 ± 10.73Ac		118.40
		9	27.5	2.0	25.5	5.49 ± 8.21ABd		149.47
	0~12	7	23.8	0.6	23.2	3.71 ± 4.88Bb	17.09	131.64
		8	36.8	6.0	30.8	8.74 ± 10.56Ad		120.79
		9	22.7	0.8	21.9	4.64 ± 5.78Bd		124.52
	0~20	7	12.1	1.1	11.0	2.93 ± 3.66Ab	5.85	124.58
		8	31.0	3.0	28.0	9.11 ± 10.86Ac		119.13
		9	23.3	0.6	22.7	5.53 ± 9.01Ad		163.07
坑底	0~7.6	7	64.7	3.8	60.9	39.34 ± 17.59Ba	45.27	46.69
		8	66.8	28.5	38.3	51.58 ± 10.19Aa		19.76
		9	64.0	13.9	50.1	44.90 ± 12.06Aa		26.86
	0~12	7	55.8	8.1	47.7	37.72 ± 11.79Ba	44.00	31.24
		8	58.4	39.4	19.0	48.83 ± 5.19Aa		10.62
		9	61.8	20.3	41.5	45.32 ± 11.43Aa		25.23
	0~20	7	66.3	10.5	55.8	37.6 ± 10.51Ba	41.15	26.71
		8	53.7	12.7	41.0	44.21 ± 7.30Aa		16.52
		9	62.5	22.3	40.2	41.63 ± 9.26ABa		22.16
坑壁	0~7.6	7	65.0	2.6	62.4	38.11 ± 16.41Ba	41.81	43.04
		8	62.4	27.0	35.4	45.45 ± 9.96Aa		21.92
		9	59.1	14.3	44.8	41.88 ± 10.44ABb		26.85
	0~12	7	61.6	7.3	54.3	38.58 ± 11.42Aa	40.90	29.61
		8	59.6	25.9	33.7	43.26 ± 7.09Ab		16.39
		9	55.7	13.3	42.4	40.85 ± 12.01Ab		29.41
	0~20	7	65.3	9.9	55.4	39.62 ± 9.89Aa	40.27	24.96
		8	49.6	33.1	16.5	41.55 ± 5.05Aa		12.15
		9	56.4	17.0	39.4	39.64 ± 9.30Ab		23.75
完整立地	0~7.6	7	64.8	4.9	59.9	38.39 ± 14.89Bb	39.80	40.34
		8	62.7	15.7	47.0	45.72 ± 12.36Ab		27.02
		9	54.0	14.1	39.9	35.28 ± 10.70Bc		34.51
	0~12	7	56.3	9.0	47.3	38.28 ± 8.90Ab	38.22	23.50
		8	49.5	21.3	28.2	43.11 ± 9.05Ac		22.58
		9	39.6	14.8	24.8	33.27 ± 8.13Bc		24.43
	0~20	7	52.7	8.4	44.3	36.91 ± 8.37Bb	36.88	21.81
		8	49.0	21.7	27.3	42.71 ± 6.83Aa		15.99
		9	52.5	18.1	34.4	31.01 ± 7.92Bc		22.44

表3 PPF_D、RH、SWC₁ 与不同深度 T_s 的 Pearson 相关系数

月份	微气候因子	丘顶			坑底			完整立地		
		0 cm	5 cm	10 cm	0 cm	5 cm	10 cm	0 cm	5 cm	10 cm
7月	PPFD	0.469 4**	0.297 9*	0.082 2	0.734 3**	0.249 8	0.247 3	0.467 2**	0.164 6	0.219 2
	RH	-0.427 7**	-0.443 8**	-0.328 4	-0.346 7*	-0.068 3	-0.042 2	-0.323 1	-0.033 0	-0.049 4
	SWC ₁	-0.310 7	-0.572 6*	-0.447 4*	-0.245 9	-0.144 3	-0.212 1	-0.244 7	-0.256 5	-0.214 8
8月	PPFD	0.314 8	0.118 4	0.122 6	0.306 2	0.013 7	0.090 3	0.112 5	-0.301 7	-0.209 9
	RH	-0.285 2	-0.189 9	-0.071 9	-0.036 5	-0.174 5	-0.083 8	-0.244 0	0.169 0	0.023 4
	SWC ₁	-0.276 6*	-0.457 3	-0.321 4	-0.232 2*	-0.125 3*	-0.220 3	-0.125 5	-0.089	-0.059 8
9月	PPFD	0.286 0*	-0.005 8	-0.008 2	0.059 7	0.029 9	-0.036 6	0.084 4	-0.243 9	-0.14
	RH	-0.128 9	-0.176 2	-0.500 0	-0.135 9	0.058 8	0.106 9	-0.394 9**	0.435 6	0.392 5*
	SWC ₁	-0.257 9	-0.189 5	-0.081 1	0.173 3	0.231 4	0.120 0	-0.191 1	0.167 3	-0.330 0**

** (P < 0.01); * (0.01 < P < 0.05); - 负相关;下同

7—9月,相同微立地(丘顶、坑底、完整立地)各个微气候因子(PPFD、RH、SWC₁)对 T₃₀的影响并不完全一致。丘顶和坑底7—9月月均PPFD与月均T₃₀均呈显著的正相关(P < 0.05), R²分别为0.192 2和0.379 7,而且丘顶T₃₀对PPFD的敏感性(方程斜率)小于坑底(图3和图4);丘顶7—9月T_s除受PPFD的显著影响外,与RH呈显著负相关关系(方程斜率为-0.226 8,图5),RH越大,T₃₀越低。完整立地由于林冠郁闭,受光照条件的影响较小,T₃₀主要受RH和SWC的影响显著,它与RH的敏感性(方程斜率)高于SWC(图6,图7)。综上所述,丘顶和坑底由于位置的差异,PPFD、RH和SWC对T₃₀的影响程度不同。

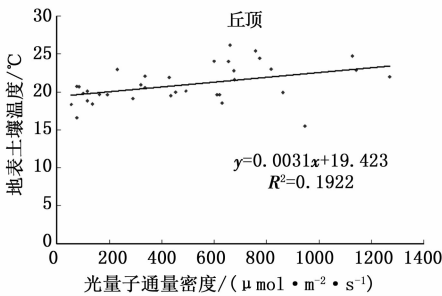


图3 丘顶PPFD与T₃₀的相关关系图

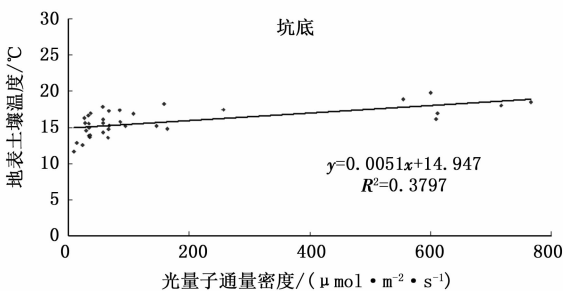


图4 坑底PPFD与T₃₀的相关关系图

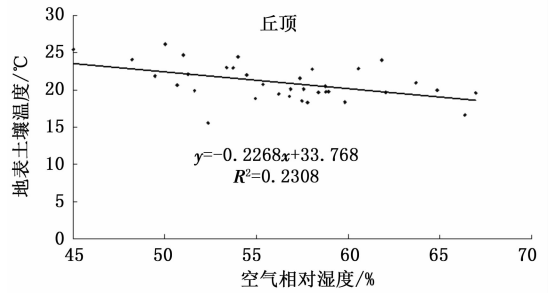


图5 丘顶RH与T₃₀相关关系图

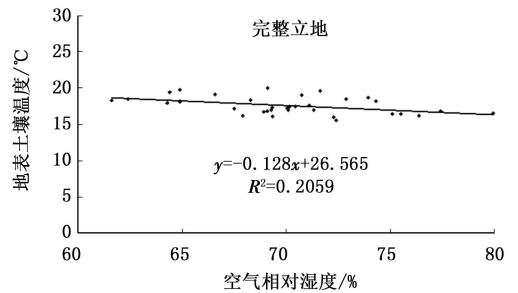


图6 完整立地RH与T₃₀的关系图

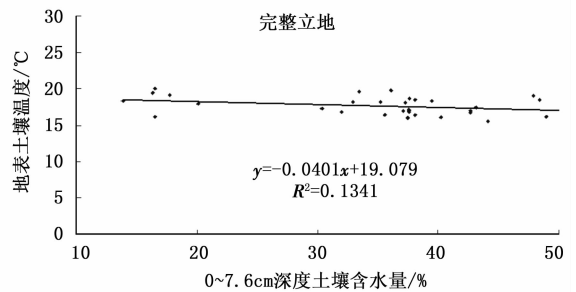


图7 SWC与T₃₀的相关关系图

注:图3~图7为不同微立地上与T₃₀相关显著的微气候因子与T₃₀的相关关系图

3 讨 论

风的干扰能够导致树干折断、树冠缩减或损坏以及树木连根拔起^[23-25]。在大多数天然林里,掘根倒木形成的倒坑和倒丘是森林的一个重要的干扰因素^[26]。Peterson 和 Campbell 通过调查和研究发现,样地内倒坑和倒丘可以覆盖云冷杉林林地面面积的 20%~40%,能提供一个独特且长时间持续的微生境^[27]。

(1)坑丘微立地(丘顶、丘面、坑底、坑壁)的月均 $PPFD$ 和 T_{s0} 均为 7 月 > 8 月 > 9 月,这与段文标^[23]等的月均光合有效辐射和月均气温最大值出现在 7 月,最小值出现在 9 月的研究结果相一致。月均 RH 为 8 月 > 7 月 > 9 月,与冯静^[28]等的研究结果一致。与月均 T_{s0} 不同,月均 T_{s5} 和 T_{s10} 均为 8 月 > 7 月 > 9 月,这是由于热量是由表层土壤向深层土壤传递的,因此温度在较深土壤中出现的时间相对浅层土壤要相对滞后。不同土层的月均 SWC 均为 8 月最大,同一微立地(丘顶、丘面、坑底和坑壁)相同深度 SWC 均为 8 月 > 9 月 > 7 月,而完整立地却为 8 月 > 7 月 > 9 月,这可能是由于完整立地凋落物覆盖和植被更新已达到相对稳定阶段,土壤的蓄水保水能力较好。

(2)丘顶、丘面、坑底、坑壁以及完整立地等 5 种不同微立地 $PPFD$ 、 T_s 、 RH 、 SWC 均存在很大差异。总的来说,坑底和丘顶的差异最大。调查结果显示,坑底具有较少的光照和较低的土壤温度,而 SWC 最高。相反地,丘顶的月均 $PPFD$ 最高,月均 T_s 最大,而 RH 和 SWC 最低。这与 Clinton 和 Baker^[29]、段文标^[19]等、魏全帅^[24]等的研究结果基本一致。这是由于丘顶所处微地形的的位置较高,接受光照的能力最强,因此 $PPFD$ 最高。然而由于其凸出的微地形引起气流流速快和土壤蒸发量大等原因,导致丘顶的空气相对湿度和土壤含水量最低。

(3)各微立地上 $PPFD$ 、 RH 、 SWC 与不同层 T_s 的 Pearson 相关分析表明, $PPFD$ 与 T_s 呈正相关,而 RH 、 SWC 与 T_s 呈负相关, T_{s0} 受 $PPFD$ 的影响显著,深层 T_s 则与 SWC 关系更为密切。这与陈丽娟等^[30] 2008 年提出的“土壤含水率的变化是影响 T_s 状况的主要因素,土壤含水率和 T_s 呈极显著的负相关”的结论略有差异。这是因为陈丽娟等是针对相同光照条件下不同土壤水分处理对 T_s 的影响进行研究的,而本研究由于坑丘微立地所处的独特位置,光照

情况不同,得出了导致 SWC 并不是影响 T_s 的主要因素的结果。

本研究由于条件所限,仅对生长季(7—9 月)坑丘微立地的微气候进行测定,而由掘根倒木形成的坑丘微地形随着时间的推移,丘上的土壤经过雨水长时间的冲刷和淋溶,往往会变得不那么明显或逐渐消失,因此坑丘微地形的微气候因子和植被的更新也会相应发生变化。随着植被覆盖度的增加,太阳辐射、气温日较差、土温日较差以及风速随之减小,但空气相对湿度却会相应增加。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^[31]。因此,要更加系统地揭示坑丘微气候的时空变化及其对物种更新的影响还需要进行长期的定位研究。

参 考 文 献:

- [1] Stearns F W. Ninety years of change in a northern hardwood forest in Wisconsin[J]. *Ecology*, 1949, 30: 350–358.
- [2] Webb L J. Cyclones as an ecological factor in tropical lowland rainforests, North Queensland[J]. *Australian Journal of Botany*, 1958, 6(3): 220–228.
- [3] Wright H E. Landscape development, forest fires, and wilderness management[J]. *Science*, 1974, 186: 487–495.
- [4] Pritchett W L. Properties and management of forest soils[M]. Wiley, New York, 1979.
- [5] Peterson C J, Pickett S T A. Microsite and elevation influences on early forest regeneration after catastrophic windthrow[J]. *Vegetation Science*, 1990, 1(5): 657–662.
- [6] Peterson C J, Carson W P, McCarthy B C. *et al.* Microsite variation and soil dynamics within newly created treefall pits and mounds[J]. *Oikos*, 1990, 58: 39–46.
- [7] Beatty S W. Influence of microtopography and canopy species on spatial patterns of forest understory plants[J]. *Ecology*, 1984, 65: 1406–1419.
- [8] Beatty S W, Stone E L. The variety of soil microsites created by tree falls[J]. *Canadian Journal of Forest Research*, 1986, 16: 539–548.
- [9] Smallidge P C, Leopold D J. Watershed liming and pit and mound topography effects on seed banks in the Adirondacks, New York[J]. *Forest Ecology and Management*, 1984, 72: 273–285.
- [10] Lawton R O, Putz F E. Natural disturbance and gap-phase regeneration in a wind exposed tropical cloud forest[J]. *Ecology*, 1988, 69(3): 764–777.
- [11] Peterson C J, Pickett S T A. Patch type influences on regeneration in a western Pennsylvania, USA, catastrophic windthrow[J]. *Oikos*, 2000, 90: 489–500.
- [12] Ulanova N G. The effects of windthrow on forest at different spatial scales: a review[J]. *Forest Ecology and Management*, 2000, 135:

155-167.

- [13] Ruel J C, Pineau M. Windthrow as an important process for white spruce regeneration[J]. *Forestry Chronicle*, 2002, 78: 732-738.
- [14] 王金铃, 段文标, 陈立新, 等. 云冷杉林风倒区林隙和掘根微立地微气候变化[J]. *林业科学研究*, 2015, 28(2): 173-182.
- [15] 王 婷, 段文标, 王金铃, 等. 云冷杉林风倒区坑丘微立地特征及物种多样性[J]. *中国水土保持科学*, 2014, 12(5): 57-63.
- [16] 王 婷, 段文标, 陈立新, 等. 小兴安岭谷地云冷杉林林隙形成木特征及植物多样性[J]. *植物研究*, 2015, 35(2): 304-309.
- [17] Siyan Ma, Amy Conciliob, Brian Oakley, *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.
- [18] 李 猛, 段文标, 陈立新. 红松阔叶混交林林隙光子通量密度、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.
- [19] 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.
- [20] 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.
- [21] 刘小金, 徐大平, 杨曾奖, 等. 温度对越南黄花梨种子萌发的影响[J]. *林业科学研究*, 2014, 27(5): 707-709.
- [22] 金光泽, 刘志理, 蔡慧颖, 等. 小兴安岭谷地云冷杉林粗木质残体的研究[J]. *自然资源学报*, 2009, 24(7): 1256-1266.
- [23] Everham E M, Brokaw N V L. Forest damage and recovery from catastrophic wind [J]. *The Botanical Review*, 1996, 62: 113-185.
- [24] Ennos A R. Wind as an ecological factor[J]. *Trends in Ecology & Evolution*, 1997, 12: 108-111.
- [25] 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.
- [26] Stephens E P. The uprooting of trees: a forest process [J]. *Soil Science Society of America Journal*, 1956, 20: 113-116.
- [27] Peterson C J, Campbell J E. Microsite differences and temporal change in plant communities of treefall pits and mounds in an old-growth forest[J]. *Bulletin of the Torrey Botanical Club*, 1993, 120(4): 451-460.
- [28] 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.
- [29] 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.
- [30] 陈丽娟, 张新民, 王小军, 等. 不同土壤水分处理对膜上灌春小麦土壤温度的影响[J]. *农业工程学报*, 2008, 24(4): 9-13.
- [31] 李 岩, 段文标, 陈立新, 等. 阔叶红松林林隙地面温度微环境变异特征[J]. *中国水土保持科学*, 2007, 5(2): 81-85.