应用生态学报 2019年5月 第30卷 第5期 http://www.cjae.net
Chinese Journal of Applied Ecology, May 2019, **30**(5): 1580-1588 DOI: 10.13287/j.1001-9332.201905.026

长白山寒温带风灾区植被受损与灾后变化程度及其影响因素

王慧赟 张英洁 靳英华* 许嘉巍 陶 岩 贺红士 高 翔 白云玉 胡 睿 韩莹莹
(东北师范大学地理科学学院, 长春 130024)

摘 要 1986年台风袭击了长白山,在西、南坡的寒温带针叶林和岳桦林带形成了大量林窗.为了探究在强风干扰下寒温带森林植被受损和变化特征,揭示植被受损与灾后变化规律及其影响因子,2017年在长白山海拔1600~1800 m设立研究区.利用遥感资料,对研究区依据植被破坏程度和灾后变化程度进行植被差异分区,并布设了40个样方进行植被调查.结果表明:按森林结构的受损程度可将长白山寒温带风灾区分为3个等级,轻度破坏、中度破坏和重度破坏,其中,中度破坏区的面积最大,其次是轻度破坏区、重度破坏区.乔木受损差异显著,轻度破坏区、中度破坏区和重度破坏区乔木优势种的数量分别减少20%、50%和85%,岳桦的抗风性大于鱼鳞云杉,大径级岳桦的抗风性大于小径级的岳桦.植被受损程度与坡度的相关性最强,随着坡度的增加,受风灾破坏程度减小.1987—2017年间,长白山寒温带风灾区的植被发生明显变化,根据变化的程度可将研究区分为3个等级:变化快、变化中等和变化慢,其中,变化中等的区域面积最大,其次是变化慢、变化快的区域;植被变化程度与海拔的相关性最强,随着海拔的增加,植被变化变慢.乔木的恢复较慢,鱼鳞云杉略好于岳桦;植被变化主要表现在灌木层和草本层,变化快的区域灌木层发育好于草本层;变化中等的区域草本层发育好于灌木层;变化慢的区域灌木层发育差异大,但草本层总体上表现为低矮稠密.

关键词 长白山; 寒温带; 风灾区; 植被受损; 植被变化

Vegetation damage, post-disaster change degree and driving factors in the cold temperate wind disaster area of Changbai Mountain, China.

WANG Hui-yun, ZHANG Ying-jie, JIN Ying-hua*, XU Jia-wei, TAO Yan, HE Hong-shi, GAO Xiang, BAI Yun-yu, HU Rui, HAN Ying-ying (*Schlool of Geographical Sciences, Northeast Normal University, Changchun* 130024, *China*).

Abstract: The typhoon outbreaks of 1986 caused many gaps in the cold temperate coniferous forest and *Betula errmanii* forest on the western and southern slopes in the Changbai Mountain. In 2017, a research area at the 1600-1800 m altitude in Changbai Mountain was established to explore the damage and changes of forest vegetation disturbed by the typhoon in cold temperate zone and to reveal the regulation of damage on vegetation and post-disaster change as well as the driving factors. The remote sensing data were used to classify research area based on the degree of vegetation damage and post-disaster change. A total of 40 plots were set up for vegetation survey. According to the damage degree of forest structure, three levels of severity of damage to vegetation in the cold temperate zone of Changbai Mountain were classified including gently, moderately, and severely damaged, in which moderately damaged area was largest, followed by gently damaged area and severely damaged area. Tree damage significantly differed among three level areas, with 20%, 50% and

本文由国家自然科学基金项目(41571078,41171072)、长白山地理过程与生态安全教育部重点实验室和吉林省教育厅"十三五"科学技术项目(JJKH20170916KJ)资助 This work was supported by the National Natural Science Foundation of China (41571078, 41171072), the Ministry of Education Key Laboratory of Geographical Processes and Ecological Security in Changbai Mountains and the Foundation of the Education Department of Jilin Province in the 13th Five-Year Project (JJKH20170916KJ).
2018-12-24 Received, 2019-03-22 Accepted.
* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: jinyh796@nenu.edu.cn

85% reduction of the abundance of dominant trees in gently, moderately and severely damaged areas, respectively. The wind resistance ability of *B. errmanii* was higher than that of *Picea jezoensis*. The wind resistance ability of *B. errmanii* with larger diameter grade was higher than that of those with smaller diameter grade. The severity of damage to vegetation was strongly correlated with slope, with lower severity on the steeper slop area. From 1987 to 2017, the vegetation of wind disaster area significantly changed. The study area could be classified into three levels based on the degree of changing: fast, medium, and slow, with largest area in medium changed, followed by slowly and fast changed. The degree of vegetation changes was strongly correlated with altitude, with slower change at higher altitude area. The recovery rate of trees was slow, with *P. jezoensis* recovering slightly quicker than *B. errmanii*. The vegetation change mainly occurred in shrub and herb layers. Shrub layer recovered better than the herb layer in the fast changed area, while herb layer recovered better than the shrub layer in the medium changed area. In the slowly changed area, herb layer was generally low and dense with varying shrub layer.

Key words: Changbai Mountain; cold temperate zone; wind disaster area; vegetation damage; vegetation change.

1986 年 8 月 28 日从朝鲜半岛登陆的 15 号台风袭击了位于温带湿润区的长白山，导致大面积林木风倒，在海拔 750～2000 m 的西、南坡形成许多林窗，且风倒区面积达 11386 hm^2，给当地的森林生态系统造成了破坏性影响.台风一般影响低纬地区，这次在我国中纬湿润林区形成的大面积风倒区尚属首次被观察和记录.学界视此为极偶然的小概率事件，其生态作用和地理意义当时未被重视[1].但在全球气候变暖的背景下，中纬地区台风出现频率有增加趋势，强风对中高纬和高海拔区的森林作用将不断增强.因此，有必要加强台风对于中高纬度和高海拔地区森林的影响及灾后植被变化研究.

针对长白山风灾区植被恢复状况的研究结果表明：低海拔地区的植被恢复较好，而高海拔地区植被恢复较差[2-3].目前，风灾区以原生植被的自然恢复和部分区域的人工更新抚育为主[4-5]，有学者依据风灾区植被恢复现状，提出了相应的恢复措施，认为植被恢复应以人工造林为主、自然恢复为辅[6]，并对恢复措施进行了评价.黄炳军[7]对风灾区植被恢复进行了立地分类研究.另有学者对于影响风灾区植被恢复、土壤改良的其他因素进行了相关研究[8].具体针对低海拔地区针阔混交林恢复的研究较多，如侯向阳等[9]对长白山红松阔叶混交林的植被恢复进行详细研究，认为阳性树种在恢复中更占优势，人工林比天然林恢复程度好；孟莹莹等[10-11]研究表明，阔叶红松林的乔木层更新恢复较好，灌木层和草本层更新较差，且进一步探究了植被恢复与碳、氮等土壤因子的关系.目前，相关研究主要集中在风灾区整体以及低海拔地区的植被恢复研究，对高海拔地区的森林受损和灾后变化研究鲜见.本研究利用遥感数据与野外实地调查相结合的方法，探究了长白山寒温带风灾区植被的受损和变化特征及其影响因素，旨在揭示高海拔寒温带森林在风灾中植被破坏程度和目前植被的恢复状况.

1　研究地区与研究方法

1.1　研究区概况

长白山位于吉林省东南部，属于受季风影响的温带大陆性山地气候.长白山火山锥的气候、植被和土壤呈明显的垂直带状分布，跨越了山地针阔混交林带、山地针叶林带、亚高山岳桦林和高山苔原带.土壤分别为暗棕色森林土、棕色针叶林土、亚高山森林草甸土和高山苔原土.研究区（41°48′01″—42°01′55″ N，127°55′50″—128°06′17″ E）位于长白山火山锥西坡，海拔范围为 1600～1800 m，该区针叶林和岳桦（*Betula ermanii*）林混生.

1.2　数据来源与处理

1.2.1 影像选取　本研究选取长白山 3 幅遥感影像，时间分别为灾前的 1986 年 6 月 18 日（源于 Landset 5）、灾后的 1987 年 6 月 7 日（源于 Landset 5）和 2017 年 7 月 25 日（源于 Landset 8）.长白山植被生长旺盛时期在 6—8 月，因此选取 6、7 月的遥感影像.

1.2.2 归一化植被指数　归一化植被指数（normalized difference vegetation index，NDVI）是对地表植被覆盖和生长情况的一种反映，其值可以指示植被覆盖的变化，是监测植被和生态变化的有效指标[12-13]，计算公式如下：

$$NDVI=(R_{nir}-R_{red})/(R_{nir}+R_{red})$$

式中：R_{nir}为近红外波段反射率；R_{red}为红外波段反射

率[14].利用 ENVI 5.3 软件提取 NDVI 值.

1.2.3 基础底图　由于风灾前后植被覆盖度会发生明显变化,因此选择长白山风灾前后两幅遥感影像(1986 年 6 月 18 日和 1987 年 6 月 7 日),利用NDVI 差值($NDVI_{1987}-NDVI_{1986}$)提取风灾区.然后利用 ArcGIS 10.2 软件,将提取的风灾区遥感影像与长白山等高线图层进行叠加,提取出长白山位于寒温带 1600~1800 m 的风灾区范围.

1.2.4 风灾区植被破坏程度等级划分　进行遥感解译之前,在研究区内实地调查:将没有明显树冠受损及风倒木的区域定义为未破坏区;有风倒木及树冠明显受损的区域定义为风灾区.风灾区又根据乔木树冠受损程度和倒木比例及林窗面积大小综合衡量进一步划分为植被轻度破坏区(树冠受损、倒木较多形成林窗)、中度破坏区(树冠多受损、林窗面积大)和重度破坏区(大面积风倒).依据上述划分标准,在每种类型区域内随机选取 20 个 30 m×30 m 的样方,确定遥感影像上相对应的区域,提取并计算 NDVI 值.依照未破坏、轻度破坏、中度破坏、重度破坏的顺序,取前一类型中最小 NDVI 差值与后一种类型中最大 NDVI 差值的平均值作为两种类型之间的划分依据.而后利用 ENVI 5.3 软件对长白山寒温带风灾前后的 NDVI 差值遥感影像进行决策树分类,NDVI 减少越多,认为其受损程度越重[15-16].具体分类标准见表 1.

1.2.5 风灾区变化程度等级划分　根据风灾区与未破坏区植被的对比,将中度和重度破坏区中草本层优势种部分恢复区域、灌木层优势种未恢复区域以及轻度破坏区定义为变化慢的类型;中度和重度破坏区中草本层优势种部分恢复区域、灌木层优势种部分恢复区域定义为变化中等的类型;中度和重度破坏区草本层和灌木层优势种恢复区域定义为变化快的类型.依据上述标准将之前随机选定的样方重新划分为慢、中、快 3 个不同变化等级.依据这些样方的经纬度,在研究区遥感影像上找到相对应的区域,提取出相应的 NDVI 差值.同样依据变化慢、中、快的顺序,取上一等级中最大 NDVI 差值与下一等级中最小 NDVI 差值的平均值作为两种等级之间的划分依据.然后利用长白山风灾后和经过 30 年恢复的两幅遥感影像(1987 年 6 月 7 日和 2017 年 7 月 25 日)计算得到的 NDVI 差值($NDVI_{2017}-NDVI_{1987}$)进行等级划分.具体分类标准见表 2.

1.3 野外调查

1.3.1 样地选取　依据遥感影像对于研究区植被受损程度、变化程度的区域划分,在研究区实地选择 3 个地理维度(包括海拔、坡度、坡向)布设样地,共设置 40 个 20 m×20 m 的样地进行监测,每个样地又设置 1 个 2 m×2 m 的灌木样方和 2 个 1 m×1 m 的草本样方.样方类型分为 8 类:未破坏-变化慢、轻度破坏-变化慢、中度破坏-变化快、中度破坏-变化中等、中度破坏-变化慢、重度破坏-变化快、重度破坏-变化中等、重度破坏-变化慢.

1.3.2 植被调查　包括乔木的种名、数量、高度、胸径;灌木的种名、数量、高度、地径;草本植物的种名、数量、高度、盖度.研究区样地植被基本概况见表 3.

1.4 数据分析

1.4.1 重要值　重要值是表示某物种在群落中地位和作用的综合数量指标,重要值=(相对多度+相对频度+相对显著度)/3.其中:乔木层植物种的显著度用胸高断面积表示;灌木层植物种的显著度用高度表示;草本层植物种的显著度用盖度表示.

1.4.2 物种多样性指数　物种多样性指数用来反映不同层片群落内植被种类的多样性程度,是判断群落或生态系统稳定性的指标.Shannon 物种多样性指数(SW)计算公式如下:

$$SW=-\sum_{i=1}^{S}P_i\ln P_i$$

式中:P_i 表示群落某一层中第 i 个种的多度比例,$P_i=N_i/N$;N_i 为群落某个层中第 i 个种的个体总数;N 为群落某一层全部种的个体总数.

表 1　基于植被 NDVI 差值的研究区受损程度等级
Table 1　Damage degree of research area based on vegetation NDVI difference

等级 Classification	NDVI 差值范围 Range of NDVI difference	植被破坏程度 Damage degree of vegetation
1	>-0.05	未破坏 Unaffected
2	-0.09~-0.05	轻度破坏 Gently damaged
3	-0.15~-0.09	中度破坏 Moderately damaged
4	<-0.15	重度破坏 Severely damaged

表 2　基于植被 NDVI 差值的研究区植被变化程度等级划分
Table 2　Change degree of research area based on vegetation NDVI difference

等级 Classification	NDVI 差值范围 Range of NDVI difference	植被变化程度 Change degree of vegetation
1	<0.33	慢 Slow
2	0.33~0.43	中等 Medium
3	>0.43	快 Fast

表 3　研究区样地植被基本概况
Table 3　Vegetation information of plots in the study area

编号 No.	类型 Type	主要乔木种 Main tree species	主要灌木种 Main shrub species	主要草本种 Main herb species	样方数 Number of samples
1~6	未破坏-变化慢 Unaffected-slowly changed	岳桦、鱼鳞云杉、大黄柳 *Betula ermanii*, *Picea jezoensis*, *Salix raddeana*	蓝靛果忍冬、岳桦更新苗 *Lonicera caerulea* var. *edulis*, *Betula ermanii*	小叶章、东方草莓 *Deyeuxia angustifolia*, *Fragaria orientalis*	6
7~12	轻度破坏-变化慢 Gently damaged-slowly changed	岳桦、鱼鳞云杉 *Betula ermanii*, *Picea jezoensis*	岳桦更新苗、蓝靛果忍冬 *Betula ermanii*, *Lonicera caerulea* var. *edulis*	小叶章、二叶舞鹤草 *Deyeuxia angustifolia*, *Maianthemum bifolium*	6
13~18	中度破坏-变化快 Moderately damaged-fast changed	岳桦、鱼鳞云杉、臭冷杉 *Betula ermanii*, *Picea jezoensis*, *Abies nephrolepis*	岳桦更新苗、高山桧 *Betula ermanii*, *Juniperus sibirica*	小叶章、东方草莓 *Deyeuxia angustifolia*, *Fragaria orientalis*	6
19~22	中度破坏-变化中等 Moderately damaged-medium changed	岳桦、鱼鳞云杉 *Betula ermanii*, *Picea jezoensis*	岳桦更新苗、蓝靛果忍冬 *Betula ermanii*, *Lonicera caerulea* var. *edulis*	小叶章、贝加尔野豌豆 *Deyeuxia angustifolia*, *Vicia baicalensis*	4
23~25	中度破坏-变化慢 Moderately damaged-slowly changed	岳桦、鱼鳞云杉、红皮云杉、落叶松 *Betula ermanii*, *Picea jezoensis*, *Picea koraiensis*, *Larix gmelinii*	蓝靛果忍冬、岳桦更新苗 *Lonicera caerulea var. edulis*, *Betula ermanii*	小叶章、贝加尔野豌豆 *Deyeuxia angustifolia*, *Vicia baicalensis*	3
26~28	重度破坏-变化快 Severely damaged-fast changed	岳桦、鱼鳞云杉 *Betula ermanii*, *Picea jezoensis*	岳桦更新苗、蓝靛果忍冬 *Betula ermanii*, *Lonicera caerulea* var. *edulis*	小叶章、东方草莓 *Deyeuxia angustifolia*, *Fragaria orientalis*	3
29~34	重度破坏-变化中等 Severely damaged-medium changed	岳桦、鱼鳞云杉 *Betula ermanii*, *Picea jezoensis*	高山桧、岳桦更新苗 *Juniperus sibirica*, *Betula ermanii*	小叶章、山牛蒡 *Deyeuxia angustifolia*, *Synurus deltoides*	6
35~40	重度破坏-变化慢 Severely damaged-slowly changed	–	高山桧、岳桦更新苗 *Juniperus sibirica Burgsd*, *Betula ermanii*	小叶章、山牛蒡 *Deyeuxia angustifolia*, *Synurus deltoides*	6

Pielou 均匀度指数(J_e)计算公式如下:

$$J_e = SW/\ln S$$

式中:S 为群落某一层的物种数.

1.4.3 冗余分析　利用 Canoco 4.5 软件,对研究区样方、主要植被和环境数据进行冗余分析(redundancy analysis,RDA).植被数据矩阵:植物群落特征以物种的株数表示.将 40 个样方中依据重要值大小以及该物种在 8 种类型样方中的频率高低,选出的乔木层、灌木层和草本层 10 个优势植物种组成 40×10 的物种数据矩阵.环境数据矩阵:将 40 个样方的地形环境数据,包括海拔、坡度、坡向,组成 40×3 的环境数据矩阵.

2　结果与分析

2.1　风灾区各受损程度与灾后变化程度的植被面积对比

根据研究区风灾前后两幅遥感影像的 NDVI 差值及植被受损程度等级划分标准,将研究区划分为未破坏区、轻度破坏区、中度破坏区和重度破坏区(图 1),面积占比依次为 3.2%、29.3%、53.1% 和 14.4%.表明在长白山寒温带风灾区内,中度破坏区的面积最多,其次是轻度破坏区,重度破坏区和未破坏区的面积相对较少.从受损程度来讲,研究区大部分区域受到了轻度和中度的风灾破坏.

根据研究区风灾后两幅遥感影像的 NDVI 差值及植被变化程度等级划分标准,将研究区划分为植被变化快、中等和慢 3 种类型,面积占比依次为 14.8%、43.7%、41.6%.研究期间,长白山寒温带风灾区内植被变化中等的区域面积最多,其次是变化慢的区域,变化快的区域面积占比最小.

将研究区植被受损和变化程度图叠加,将研究区划分为未破坏-变化快、未破坏-变化中等、未破坏-变化慢、轻度破坏-变化快、轻度破坏-变化中等、轻度破坏-变化慢、中度破坏-变化快、中度破坏-变化中等、中度破坏-变化慢、重度破坏-变化快、重度破坏-变化中等、重度破坏-变化慢 12 种类型,其面积占比依次为 0.4%、0.6%、2.3%、4.9%、6.1%、18.2%、8.0%、26.0%、19.1%、1.5%、11.0%、2.0%.未破坏、轻度破坏区内的植被以变化慢为主,中度、重度破坏区内的植被以变化中等为主.

2.2　风灾区各受损程度与灾后变化程度的植被结构对比

2.2.1 植被受损差异　风灾前研究区森林组成较为一致.强风对乔木破坏最严重,比较现在样方内树龄

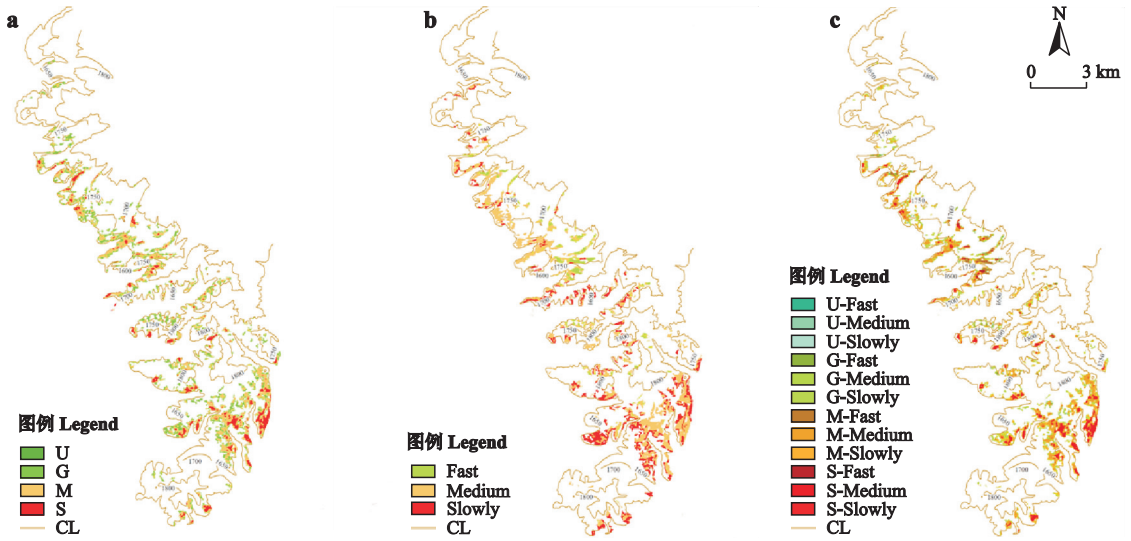


图 1 长白山寒温带风灾区植被受损程度及灾后变化程度分布

Fig.1 Distribution of vegetation damage degree and post-disaster change degree in the cold temperate wind disaster area of Changbai Mountain.

a) 植被受损程度等级分布 Distribution of vegetation damage degree; b) 植被灾后变化程度等级分布 Distribution of vegetation post-disaster change degree; c) 植被受损、灾后变化程度等级分布 Distribution of vegetation damage degree and post-disaster change degree. U: 未破坏 Unaffected; G: 轻度破坏 Gently damaged; M: 中度破坏 Moderately damaged; S: 重度破坏 Severely damaged; Fast: 变化快 Fast changed; Medium: 变化中等 Medium changed; Slowly: 变化慢 Slowly changed; CL: 等高线 Contour line. 下同 The same below.

大于 30 年的乔木状况可知风倒后的乔木受损情况(表 4).风灾区乔木生长速度极慢,目前乔木层中未满 30 年树龄的岳桦和鱼鳞云杉(*Picea jezoensis*)很少,因此,可以通过直接比较乔木差异说明各受损程度下的植被结构特征.

未破坏区的森林植物群落组成分为乔-灌-草 3 层,乔木为优势层,以岳桦和鱼鳞云杉混生为主.其中,岳桦和鱼鳞云杉数量比例略大于 2∶1,岳桦更占优势;乔木层平均高度为 9.2 m,鱼鳞云杉的平均株高大于岳桦;乔木层平均胸径为 19.4 cm,岳桦平均胸径略大于鱼鳞云杉.

与未破坏区相比,轻度破坏区乔木数量少了约 20%,岳桦和鱼鳞云杉的比值也有所下降,数量比为 1.6∶1.鱼鳞云杉的数量略少于未破坏区,但平均株高和胸径略高;岳桦的数量比未破坏区减少约 30.6%,且平均株高和胸径都稍等于未破坏区.

与未破坏区相比,中度破坏区的乔木数量少了近 50%,岳桦的优势程度显著高于鱼鳞云杉,数量比约为 4∶1.岳桦的数量比未破坏区减少 40%,但平均株高和胸径都大于未破坏区;鱼鳞云杉的数量

表 4 长白山寒温带风灾区不同受损程度群落乔木优势种特征对比

Table 4 Comparison of dominant species characteristics of arbor in communities with different degrees of damage in the cold temperate wind disaster area of Changbai Mountain

受损程度 Degree of damage	优势种 Dominant species	平均株数 Average number	平均株高 Average height (m)	平均胸径 Average diameter (cm)	树龄≥30 年的平均株数 Average number of age ≥30 years	树龄<30 年的平均株数 Average number of age <30 years	在不同受损程度群落中所占百分比 Proportion in communities with different degrees of damage (%)
未破坏	岳桦 *Betula ermanii*	18.0	8.54	19.47	17.5	0.5	67.9
Unaffected	鱼鳞云杉 *Picea jezoensis*	8.0	10.67	19.33	7.7	0.3	30.2
轻度破坏	岳桦 *Betula ermanii*	12.5	8.51	19.36	12.0	0.5	62.0
Gently damaged	鱼鳞云杉 *Picea jezoensis*	7.7	11.23	20.98	7.4	0.3	38.0
中度破坏	岳桦 *Betula ermanii*	10.8	10.73	24.05	10.8	0	77.2
Moderately damaged	鱼鳞云杉 *Picea jezoensis*	2.6	7.41	15.38	2.3	0.3	18.6
重度破坏	岳桦 *Betula ermanii*	1.9	5.49	20.78	1.9	0	47.5
Severely damaged	鱼鳞云杉 *Picea jezoensis*	2.1	6.76	14.96	1.8	0.3	52.5

比未破坏区减少约 67%,平均株高和胸径都显著小于未破坏区.在中度破坏区域,鱼鳞云杉受到更大破坏,岳桦比鱼鳞云杉风倒比例小,且大径级岳桦比小径级岳桦风倒比例更小.

与未破坏区相比,重度破坏区的乔木数量减少了近 85%,只残留几株大径级的岳桦,鱼鳞云杉的存活数量也较少.说明当重度破坏发生时,乔木几乎全部风倒.

2.2.2 植被变化差异　样方调查数据显示,树龄小于 30 年的乔木数量很少,鱼鳞云杉比岳桦多,表明乔木生长缓慢,鱼鳞云杉的生长速度略大于岳桦.植被变化的快慢主要表现在灌木和草本层的差异上.

对 3 类不同变化程度的灌木和草本样方进行统计分析,结果表明:在中度和重度破坏区-变化快的群落,灌木层的物种多样性最高、均匀度较好、总株数多、平均高度高、地径较粗,其中,优势种岳桦和鱼鳞云杉的更新苗株数多;草本层物种多样性和均匀度都较低,物种种类少,但总株数较多,平均高度最高,特别是最优势种小叶章(*Deyeuxia angustifolia*)的株数最多、高度较高.与变化快的区域相比,变化中等的群落中灌木层的物种多样性和均匀度都略有下降,总株数也较少,物种数最少,但平均地径粗度大,优势种岳桦和鱼鳞云杉的更新苗数量少;草本层物种多样性和均匀度比变化快的区域大,物种种类较少,但总株数较多,草本层的平均高度和最优势种小叶章的高度都较高.与变化快的区域相比,变化慢的群落中草本层的物种多样性和均匀度均最高,但草本层平均高度较低,株数较多,总体特点是草本低矮稠密,最优势种小叶章的高度和数量都低,其他草本物种的数量多;灌木层的组成有两种情况,一种是在未破坏和轻度破坏区,灌木层的物种多样性和均匀度较高,数量多,优势种的数量也较多,另一种是在重度破坏区,灌木层的物种多样性和均匀度极低,数量极少,优势种的数量也较少(表 5 和图 2).

2.3　风灾区植被受损和灾后变化程度的环境背景

对风灾区的主要植物物种数据进行去趋势对应分析(detrended correspondence analysis, DCA).其第一轴的梯度长度为 2.21,小于 3,表明该数据适用于进行 RDA 分析.

由研究区植物优势种与环境因子的 RDA 分析可知,植物物种与环境因子的相关系数在第一轴上为 0.550,在第二轴上为 0.351,前两轴的物种与环境相关系数较高,植物物种的 95.2%能被环境因子解释.RDA 分析第一轴能解释 77.4%,第二轴解释 17.8%.另外,环境因子海拔、坡度、坡向与 RDA 第一排序轴的相关系数依次为 0.07、0.23、-0.08;与 RDA 第二排序轴的相关系数依次为-0.34、-0.16、-0.15.由此可知,第一排序主要反映了坡度的变化趋势,该因子与第一排序轴的相关系数为 0.23,说明坡度与第一排序轴为正相关关系.第二轴主要反映了海拔的变化趋势,且该因子与第二排序轴的相关系数为-0.34,说明海拔与第二排序轴为负相关关系.表明坡度和海拔对植物群落的破坏和变化都有重要影响.

表 5　长白山寒温带风灾区的灌木和草本层群落的物种组成特征

Table 5　Species composition of communities of shrubs and herbs layer in the cold temperate wind disaster area of Changbai Mountain

组别 Group	灌木层 Shrub layer			草本层 Herb layer			总物种数 Total species
	物种数 Number of species	物种多样性指数 SW	均匀度指数 J_e	物种数 Number of species	物种多样性指数 SW	均匀度指数 J_e	
未破坏-变化慢 Unaffected-slowly changed	7	1.40	0.72	32	2.70	0.78	39
轻度破坏-变化慢 Gently damaged-slowly changed	5	1.22	0.76	31	2.70	0.79	36
中度破坏-变化快 Moderately damaged-fast changed	10	1.65	0.72	20	2.40	0.73	30
中度破坏-变化中等 Moderately damaged-medium changed	4	1.11	0.68	24	2.56	0.74	28
中度破坏-变化慢 Moderately damaged-slowly changed	8	1.17	0.56	21	2.12	0.70	29
重度破坏-变化快 Severely damaged-fast changed	10	1.45	0.63	19	1.87	0.64	29
重度破坏-变化中等 Severely damaged-medium changed	4	1.06	0.61	26	2.64	0.81	30
重度破坏-变化慢 Severely damaged-slowly changed	5	0.97	0.60	23	2.70	0.80	28

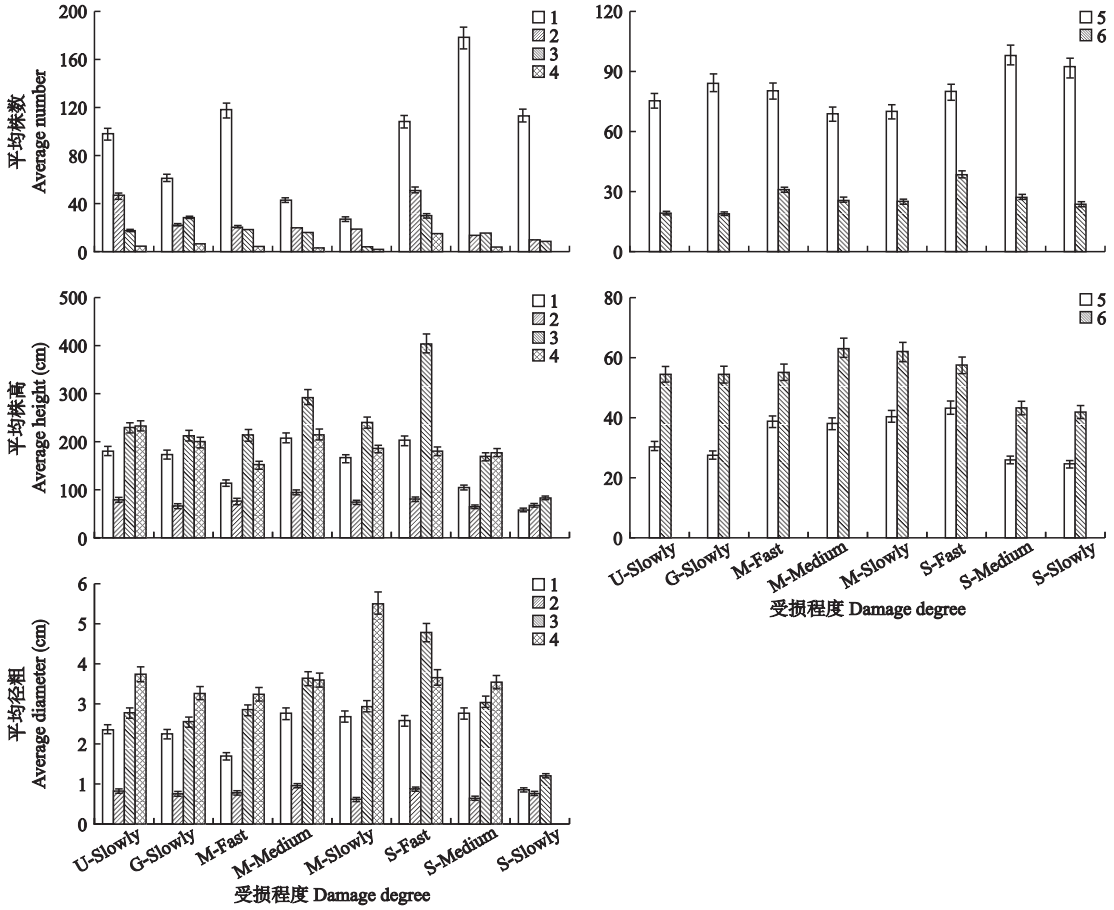


图 2 长白山寒温带风灾区灌木和草本层及其优势种特征

Fig.2 Characteristics of shrubs and herbs layers and their dominant species in the cold temperate wind disaster area of Changbai Mountain.

1) 灌木层 Shurb layer; 2) 蓝靛果忍冬 *Lonicera caerulea* var. *edulis*; 3) 岳桦更新苗 *Betula ermanii* renewed seedlings; 4) 鱼鳞云杉更新苗 *Picea jezoensis* renewed seedlings; 5) 草本层 Herb layer; 6) 小叶章 *Deyeuxia angustifolia*.

从图 3 可知,第一轴能很好地解释森林的受损程度,坡度与第一轴的正相关性最强,从样方分布看,第一和第四象限主要分布未破坏、轻度破坏样方,第二和第三象限主要分布中度、重度破坏的样方.因此,沿着第一轴从左到右坡度增大,风灾对森林的破坏程度在降低,即坡度与森林受损程度呈负相关关系.第二轴更能反映植被变化程度,变化快的样方大部分分布在第一轴的上方,第一轴下方分布着变化较慢的样方,随海拔升高,植被变化强度越来越小,说明海拔与变化程度呈负相关关系.

从优势种角度来看,岳桦和鱼鳞云杉均分布在第二排序轴的右侧,同样位于右侧的还有属于灌木种的蓝靛果忍冬(*Lonicera caerulea* var. *edulis*)、岳桦更新苗和鱼鳞云杉更新苗,以及草本种的东方草莓,其中,岳桦更新与坡度的相关性较强,且呈正相关关系.位于第二排序轴左侧的只有属于草本种的小叶章、贝加尔野豌豆(*Vicia baicalensis*)、山牛蒡(*Synurus deltoides*).表明随植被破坏程度的增强,优势层从乔灌木向草本层过渡.第一排序轴上方分布着属于灌木种的鱼鳞云杉更新苗、蓝靛果忍冬,以及除了贝加尔野豌豆的草本种.第一排序轴下方,主要分布乔木优势种.表明随植被变化程度的由快到慢,优势层主要从灌草向乔木层过渡.

3 讨 论

风速是决定森林破坏程度的主要因子,台风使树木的受损程度及其对森林生态系统的影响随着风速的增加而线性增加[17].姚丹丹等[18]研究表明,缓坡处林分受台风侵害较为严重,可能是缓坡处缺少地势阻挡,风速较大.因此,本研究区所表现出的坡度与植被受损程度的负相关关系可能与坡度削弱风强有关.在中纬地区山地发生强风干扰的几率较少,并且由于存在较大的坡度差异,坡度大的区域面积较大,可能减少强风造成的森林受损程度.此外,除

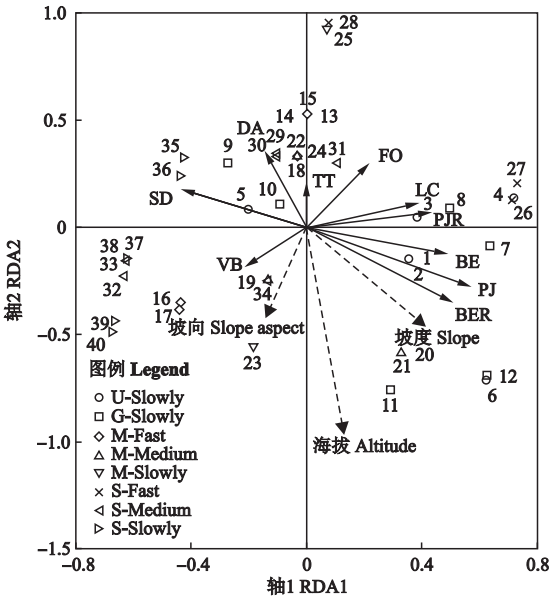


图 3　长白山寒温带风灾区的冗余分析(RDA)

Fig.3　Redundancy analysis (RDA) of the cold temperate wind disaster area of Changbai Mountain.

DA: 小叶章 *Deyeuxia angustifolia*; FO: 东方草莓 *Fragaria orientalis*; LC: 蓝靛果忍冬 *Lonicera caerulea* var. *edulis*; PJR: 鱼鳞云杉更新苗 *Picea jezoensis* renewed seedling; BE: 岳桦 *Betula ermanii*; PJ: 鱼鳞云杉 *Picea jezoensis*; BER: 岳桦更新苗 *Betula ermanii* renewed seedling; VB: 贝加尔野豌豆 *Vicia baicalensis*; SD: 山牛蒡 *Synurus deltoids*; TT: 深山唐松草 *Thalictrum tuberiferum*.

了地形,树种、树龄、树木高度、树冠大小、树木位置以及林分疏密度等因子都会影响到森林遭受台风损害的形式和程度[19].树种的抗风能力取决于木质强度、树冠形状和大小、树干的形状、树叶特征以及根系性状(根系范围和深度)等,与针叶树相比,岳桦的树高较矮、木质坚硬、根系发达且长年生活在湿润多风的环境中,对风的适应性相对较强,本研究结果也表明岳桦比鱼鳞云杉更抗风.Foster[20] 研究揭示了森林遭受损害的程度与林分年龄和高度呈正相关关系,但本研究结果表明,在风灾破坏强度不大时,大径级的岳桦比小径级的岳桦更抗风,这可能与小岳桦多生长在岩石裸露、土层较薄的环境,而在大岳桦生长的位置,由于多年岳桦的生长使土层变厚,大岳桦根系更发达,导致其可能更抗风.因此,探究地形和植被自身特征与受损程度的关系对解释中纬度地区植被受损机理具有重要意义.

在中纬度山地的高海拔区,温度成为制约植被生长的主要因子[21-22].森林受损后植被变化的快慢主要反映在海拔上,随海拔的增加,植被变化变慢.从灾后植被变化差异来看,变化中等的区域面积最大,可能原因是该类区域主要为破坏中等和破坏严重的区域,乔木层在风灾中受损严重,且乔木恢复极慢,导致原有林下的环境发生剧烈改变,导致风灾后30 年灌木和草本迅速变化和生长.该区域局部条件好的生境较少,所以植被变化快的区域面积最少.变化慢的组别在灌木层的特征上存在异质性,一种是未破坏和轻度破坏的区域,乔木破坏较少,对林下的灌木和草本影响不大,30 年植被有所变化但不大;另一种是在重度破坏区,可能环境条件极为恶劣,不仅乔木没有恢复,灌木也没有恢复,只有草本恢复.本研究只对植被变化与地形因子的关系进行分析,没有涉及与土壤养分的关系研究,但有研究表明土壤环境与植被多样性存在一定的关联性[23].因此,未来将进一步完善这方面的研究,加入与土壤养分的关系分析,将能更好解释植被变化的程度.

4　结　　论

长白山寒温带风灾区依据森林结构的受损程度可分为 3 个等级:轻度破坏、中度破坏和重度破坏.其中,中度破坏区的面积所占比例最多,其次是轻度破坏区,重度破坏区的面积占比相对较小.经过灾后 30 年的恢复,该区植被发生了明显变化.依据植被的变化程度可将该区分为 3 个等级:变化快、变化中等和变化慢.其中,变化中等的区域面积所占比例最大,其次为变化慢的区域,变化快的区域面积占比最小.

研究区乔木层受损差异性显著,轻度破坏区、中度破坏区和重度破坏区乔木优势种的数量分别减少 20%、50%和 85%,岳桦的抗风性大于鱼鳞云杉,大径级岳桦的抗风性大于小径级的岳桦.

与灌木层和草本层相比,乔木恢复较慢,但鱼鳞云杉略好于岳桦.因此植被的变化主要表现在灌木层和草本层.变化快的区域,灌木发育最好,草本层相对较好;变化中等的区域,灌木发育相对较好,草本层发育好;植被变化慢的区域灌木的发育存在差异,具体表现为两种,一种是灌木发育较好,一种是灌木发育最差,但草本层总体上表现为低矮稠密.

植被受损程度与坡度的相关性最强,随着坡度的增加,植被受风灾破坏程度有减小趋势.植被灾后变化程度与海拔的相关性最强,随着海拔的增加,植被变化有变慢的趋势.

参考文献

[1]　Guo L-P (郭利平), Ji L-Z (姬兰柱), Zhang W-D (张伟东), *et al.* Forest recovery state in wind disaster area of Changbai Mountains, Northeast China. *Chinese Journal of Applied Ecology* (应用生态学报), 2010, **21**(6): 1381-1388 (in Chinese)

[2] Xue J-G (薛俊刚). Investigation about vegetation restoration at typhoon ruined area in Jilin Changbai Mountain National Nature Reserve. *Territory & Natural Resources Study* (国土与自然资源研究), 2009(1): 95-96 (in Chinese)
[3] Nan Y (南 颖), Liu Z-F (刘志锋), Zhu W-H (朱卫红), *et al*. Range of typhoon-stricken area and trend of vegetation restoration in Changbai Mountain: RS-based research. *Journal of Natural Disasters* (自然灾害学报), 2011, **20**(6): 131-139 (in Chinese)
[4] Hou X-Y (侯向阳), Han J-X (韩进轩). The restoration and protection of the wind disaster interfered area on the western slopes of the Changbai Mountains. *Journal of Natural Resources* (自然资源学报), 1997(1): 29-34 (in Chinese)
[5] Zhao X-F (赵晓飞), Niu L-J (牛丽君), Chen Q-H (陈庆红), *et al*. Restoration and rebuilding of the wind disturbed ecosystems at the wind disaster region in the National Nature Reserve of Changbai Mountain. *Journal of Northeast Forestry University* (东北林业大学学报), 2004, **32**(3): 405-426 (in Chinese)
[6] Niu L-J (牛丽君), Liang Y (梁 宇), Wang S-X (王绍先), *et al*. Evaluation of vegetation restoration in wind disaster area in Changbai Mountains Nature Reverse, Northeast China. *Chinese Journal of Ecology* (生态学杂志), 2013, **32**(9): 2375-2381 (in Chinese)
[7] Huang B-J (黄炳军). The classification of the vegetation restoration site at wind disastrous area in Changbai Mountain Nature Reserve. *Journal of Changchun Normal University* (长春师范大学学报), 2013, **32**(12): 64-68 (in Chinese)
[8] Jin H (金 慧), Zhao Y (赵 莹), Zhao W (赵伟), *et al*. Influences of forest fire on soil properties in wind disaster area of Changbai Mountain Nature Reserve. *Journal of Beihua University* (Natural Science) (北华大学学报:自然科学版), 2013, **14**(6): 698-703 (in Chinese)
[9] Hou X-Y (侯向阳), Han J-X (韩进轩). Regeneration and restoration of Korean pine broadleaf mixed forest in windfall area in Changbai Mountain. *Scientia Silvae Sinicae* (林业科学), 1996, **32**(5): 419-425 (in Chinese)
[10] Meng Y-Y (孟莹莹), Zhou L (周 莉), Zhou W-M (周旺明), *et al*. Characteristics of plant species diversity in a windthrow area on Changbai Mountain after 26 years of natural recovery. *Acta Ecologica Sinica* (生态学报), 2015, **35**(1): 142-149 (in Chinese)
[11] Meng Y-Y (孟莹莹), Bao Y (包 也), Guo Y (郭焱), *et al*. Soil carbon and nitrogen content in windthrow area on Changbai Mountain after 26 years' natural recovery. *Chinese Journal of Ecology* (生态学杂志), 2014, **33**(7): 1757-1761 (in Chinese)
[12] Paruelo JM, Epstein HE, Lauenroth WK, *et al*. ANPP Estimates from NDVI for the central grassland region of the United States. *Ecology*, 1997, **78**: 953-958
[13] Zhong L-N (钟莉娜), Zhao W-W (赵文武). Detecting the dynamic changes of vegetation coverage in the Loess Plateau of China using NDVI data. *Science of Soil & Water Conservation* (中国水土保持科学), 2013, **11**(5): 57-62 (in Chinese)
[14] Miao Q-L (苗庆林), Tian X-R (田晓瑞), Zhao F-J (赵凤君). NDVI recovery process for post-fire vegetation in Daxing'anling. *Scientia Silvae Sinicae* (林业科学), 2015, **51**(2): 90-98 (in Chinese)
[15] Liu S-J (刘少军), Zhang J-H (张京红), He Z-W (何政伟), *et al*. Analysis of the effects on rubber plant by typhoon based on remote sensing and GIS. *Guangdong Agricultural Sciences* (广东农业科学), 2010, **37**(10): 191-193 (in Chinese)
[16] Liu S-J (刘少军), Zhang J-H (张京红), Cai D-X (蔡大鑫), *et al*. Application of Landsat 8 in monitoring of rubber plantation typhoon disaster. *Journal of Natural Disasters* (自然灾害学报), 2016, **25**(2): 53-58 (in Chinese)
[17] Liu B (刘 斌), Pan L (潘 澜), Xue L (薛 立). A review of the effect of typhoon on forests. *Acta Ecologica Sinica* (生态学报), 2012, **32**(5): 1596-1605 (in Chinese)
[18] Yao D-D (姚丹丹), Wang Z-Y (汪兆阳), Yu L (余黎), *et al*. Damage of Typhoon Bolaven to Semi-natural Larch-spruce-fir Forests in Northeast China. Fuzhou: China Forestry Academic Conference, 2013: 290-299 (in Chinese)
[19] Tong C (仝 川), Yang Y-S (杨玉盛). A review of the impacts of hurricanes and typhoons on forest ecosystems in coastal areas. *Acta Ecologica Sinica* (生态学报), 2007, **27**(12): 5337-5344 (in Chinese)
[20] Foster DR. Species and stand response to catastrophic wind in central New England, U.S.A. *Journal of Ecology*, 1988, **76**: 135-151
[21] Li X-Y (李小燕), Ren Z-Y (任志远), Zhang C (张翀), *et al*. Vegetation cover restrictive zoning and temporal and spatial change of China. *Journal of Shaanxi Normal University* (Natural Science) (陕西师范大学学报:自然科学版), 2013, **41**(3): 76-81 (in Chinese)
[22] Hou J (侯 静), Du L-T (杜灵通), Liu K (刘可), *et al*. Characteristics of phenology changes and its relationship with climatic factors in desert/grassland biome transition zone of northern hemisphere during 1982-2012. *Climate Change Research* (气候变化研究进展), 2017, **13**(5): 473-482 (in Chinese)
[23] Chen Q (陈 强), Zhao Y-S (赵雨森), Xin Y (辛颖), *et al*. Plant species diversity and correlation with soil factors after vegetation restoration in burned area of Great Xing'an Mountains. *Bulletin of Soil & Water Conservation* (水土保持通报), 2012, **32**(6): 61-70 (in Chinese)

作者简介 王慧赟,女,1994 年生,硕士研究生.主要从事自然地理学研究. E-mail: wangh0744@ nenu.edu.cn

责任编辑 杨 弘

王慧赟, 张英洁, 靳英华, 等. 长白山寒温带风灾区植被受损与灾后变化程度及其影响因素. 应用生态学报, 2019, **30**(5): 1580-1588
Wang H-Y, Zhang Y-J , Jin Y-H, *et al*. Vegetation damage, post-disaster change degree and driving factors in the cold temperate wind disaster area of Changbai Mountain, China. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2019, **30**(5): 1580-1588 (in Chinese)