

特大冰冻干扰后常绿阔叶林林木和幼苗的短期动态* Short Term Dynamics of Trees and Seedlings of Evergreen Broadleaved Forest after a Severe Frozen Disturbance in Damingshan, Southern China

赵明威, 周晓果, 温远光, 朱宏光**

ZHAO Mingwei, ZHOU Xiaoguo, WEN Yuanguang, ZHU Hongguang

(广西大学林学院, 广西森林生态与保育重点实验室培育基地, 广西南宁 530004)

(Breeding Base of Guangxi Key Laboratory of Forest Ecology and Conservation, College of Forestry, Guangxi University, Nanning, Guangxi, 530004, China)

摘要:【目的】探讨和阐明 2008 年特大冰冻干扰后广西大明山常绿阔叶林林木和幼苗的短期动态变化规律。【方法】基于 2009 年建立的 3.2 hm² 固定研究样地, 对特大冰冻干扰后大明山常绿阔叶林林木和幼苗进行连续 4 年的监测。【结果】林木和幼苗对特大冰冻干扰存在不同的响应与适应, 灾后第 1 年, 胸径 ≥ 1 cm 林木的密度和物种丰富度显著增加, 之后稍微减少并维持相对稳定; 而幼苗则表现为第 1 年显著增加, 之后又显著降低。不同树种对冰冻干扰后的恢复响应存在较大差别, 在 4 年的恢复期中, 共有 13 个科的林木幼苗从调查样方中完全消失, 虽然消失的主要是稀有种, 但一些群落优势科如樟科(Lauraceae)、山茶科(Theaceae)等的物种也出现不同程度的消失、新增现象。林木密度与林木物种丰富度、幼苗密度与幼苗物种丰富度、林木密度和物种丰富度与幼苗密度和丰富度存在显著正相关关系。【结论】林木的密度与丰富度在较大程度上决定着林下林木幼苗的种类、数量及动态, 这是资源有效性和林木生态生物学特性共同作用的结果。

关键词:常绿阔叶林 冰冻灾害 干扰 更新 木本植物 大明山

中图分类号:S718.5 **文献标识码:**A **文章编号:**1005-9164(2017)02-0159-09

Abstract:【Objective】The objective of this study was to investigate and reveal the short term dynamics of tree and seedlings of evergreen broadleaved forest after a severe frozen disturbance in Damingshan in Guangxi. 【Methods】Tree and seedlings of evergreen broadleaved forest in the 3.2 hm² permanent plot built in 2009 had been continuously monitored for 4 years from 2009 to 2012. 【Results】The response and adaptation of tree and seedlings to the severe frozen disturbance were different. Density and richness of trees with DBH ≥ 1 cm significantly increased 1 year after the disaster, then slightly decreased and relatively stabilized. While density and richness of seedlings significantly increased 1 year after the disaster and then remarkably decreased. Recovered response of different tree species to frozen disturbance was different. Seedlings of 13 families completely disappeared in the 4 years of recover. Although the disappeared species were mainly rare species, several species belonging to the dominate families, such as Lauraceae and Theaceae, disappeared or increased to some extent. There was significantly positive correlation between tree density and

seedlings of 13 families completely disappeared in the 4 years of recover. Although the disappeared species were mainly rare species, several species belonging to the dominate families, such as Lauraceae and Theaceae, disappeared or increased to some extent. There was significantly positive correlation between tree density and

收稿日期: 2016-10-24

作者简介: 赵明威(1991—), 男, 硕士研究生, 主要从事森林生态学研究。

* 国家自然科学基金项目(31460121, 30860059)资助。

** 通信作者: 朱宏光(1962—), 男, 副研究员, 主要从事森林生态学研究, E-mail: xu980307@163.com。

richness, seedlings density and richness, tree density and richness with seedlings density and richness. **【Conclusion】** Tree density and richness determined the species, quantity and dynamics of understory seedlings in a large extent, which was the results of resource availability and tree ecological and biological property.

Key words: evergreen broadleaved forest, ice storm damage, disturbance, regeneration, ligneous plants, Damingshan

0 引言

【研究意义】 干扰是自然界的普遍现象, 干扰的结果可以导致生境异质性, 对植物群落的更新和物种组成的变化有重要作用^[1-3]。许多研究证实干扰可以影响群落的物种多样性, 是影响植物群落物种丰富度的主要因素^[4-10]。小尺度和中等频率的干扰能增加温带和热带森林的物种多样性^[11], 但当干扰超过一定强度时, 就会破坏生态系统的平衡并导致生物多样性的降低^[12]。冰冻灾害是极端天气引发的自然灾害, 具有一定的偶然性和突发性, 可以对森林生态系统造成很大的损害。随着全球气候变化和人类活动的加剧, 干扰的生态学过程与作用愈来愈受到学术界的关注^[13]。**【前人研究进展】** 有关雨雪冰冻灾害对森林植被干扰影响的研究大多集中在欧美的一些国家或地区^[14-19]。2008年初我国南方发生的特大雨雪冰冻灾害对森林生态系统造成了重大影响, 引起了社会各界的广泛关注, 并逐渐成为干扰生态学研究热点之一。尽管森林干扰生态学的研究取得了明显进展, 但大多数的研究仅限于森林结构与功能、生态效益与经济效益等受损情况的调查以及受损森林恢复与重建的对策等^[18-29], 尤其缺乏特大冰冻干扰后亚热带山地常绿阔叶林林木与幼苗动态的监测研究。**【本研究切入点】** 本研究对2008年特大冰冻干扰后广西大明山常绿阔叶林林木和幼苗进行连续4年的监测, 将从林木和幼苗的密度、物种丰富度、科属种组成等方面探讨特大冰冻干扰后亚热带山地常绿阔叶林林木(胸径 ≥ 1 cm)和幼苗(胸径 < 1 cm)的动态变化规律。**【拟解决的关键问题】** 研究和阐明特大冰冻干扰后亚热带山地常绿阔叶林林木和幼苗对干扰的响应和适应机制, 为进一步了解亚热带山地常绿阔叶林灾后恢复提供基础资料。

1 材料与方法

1.1 研究地概况

大明山自然保护区位于 $23^{\circ}10' \sim 23^{\circ}38' N$, $108^{\circ}18' \sim 108^{\circ}45' E$, 属亚热带季风气候区, 地带性植被为季风常绿阔叶林。大明山属中山地貌, 最高峰

龙头山海拔1762 m。受山地的影响, 山体中部的年均温 $15.1^{\circ}C$, 7月份平均气温 $21.9^{\circ}C$, 1月份平均气温 $5.8^{\circ}C$, 极端高温 $28.6^{\circ}C$, 极端低温 $-6.0^{\circ}C$; 日均温 $\geq 10^{\circ}C$ 的积温 $5047.7^{\circ}C$; 年均降水量为 2630.3 mm。大明山地理位置独特, 地层古老, 生态环境复杂多样, 生物多样性丰富多彩, 已知维管束植物234科918属2374种^[30]。2008年初, 大明山自然保护区山地常绿阔叶林遭受了严重的冰冻干扰, 据对 $DBH \geq 5$ cm的林木统计, 有67.53%的林木受损^[31]。

1.2 样地设置与调查方法

参照热带雨林大样地构建的技术规范, 于2009年5月在大明山国家级自然保护区天坪站橄榄沟北坡建立了 3.2 hm^2 固定样地, 样地海拔 $800 \sim 1200$ m。利用RTK和全站仪将 3.2 hm^2 大样地划分为80个 20 $m \times 20$ m 的样方, 样方的4个边角用PVC管打桩作永久标记。将每个 20 $m \times 20$ m 样方细分为4个 10 $m \times 10$ m 和16个 5 $m \times 5$ m 的小样方。以每个 5 $m \times 5$ m 小样方为基本调查单位, 对所有胸径 ≥ 1 cm林木挂牌, 2009年—2012年, 每年对样地进行复查, 分别记录种名、胸径、树高及植株坐标等。以每个 20 $m \times 20$ m 样方左上角第1个 5 $m \times 5$ m 小样方作为林木幼苗调查样方, 每年记录样方内所有林木幼苗的种名、高度、株数、覆盖度等。

1.3 数据处理与分析

采用单因素方差分析(one-way ANOVA)分别比较不同年份林木、幼苗密度和丰富度的差异性, 数据分析在SPSS18.0软件下完成, 采用LSD程序分析比较不同类型各均值的差异性, 显著性水平设为 $P < 0.05$ 。

2 结果与分析

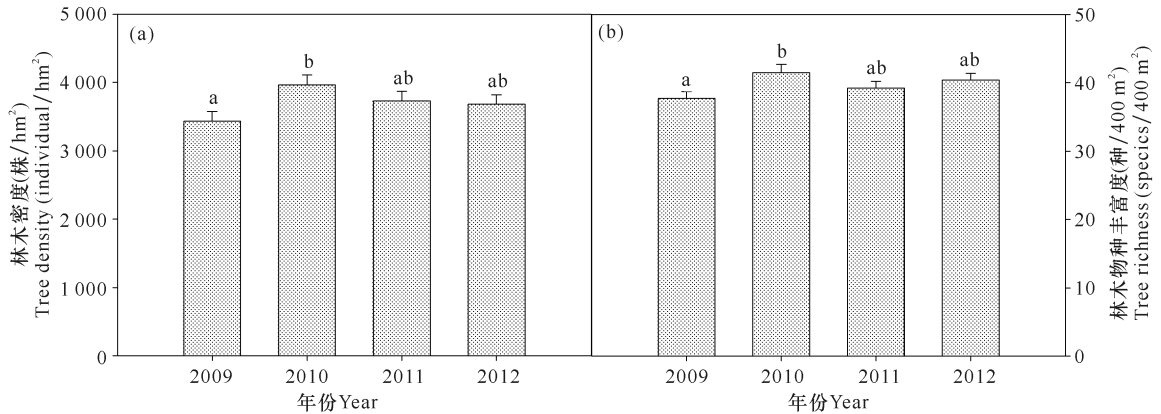
2.1 林木密度和丰富度动态

2009年—2012年, 大明山常绿阔叶林群落中胸径 ≥ 1 cm林木的密度分别为 (3437.5 ± 136.0) 株/ hm^2 、 (3963.1 ± 143.8) 株/ hm^2 、 (3726.9 ± 140.6) 株/ hm^2 、 (3680.0 ± 140.2) 株/ hm^2 , 表现为先增加后稍微减少的趋势。方差分析表明, 2010年群落的林木密度显著高于2009年($P < 0.05$), 其他年份间

差异不显著 ($P > 0.05$) (图 1a)。

2009 年—2012 年胸径 ≥ 1 cm 林木的物种丰富度存在一定的差异 (图 1b)。2009 年、2010 年、2011 年、2012 年的物种丰富度分别为 (37.7 ± 1.0) 种/400 m^2 、 (41.5 ± 1.2) 种/400 m^2 、 (39.2 ± 1.0) 种/

400 m^2 、 (40.4 ± 1.0) 种/400 m^2 ，其变化趋势与林木的密度相似，也呈先增后降的趋势。多重比较结果表明，只有 2009 年与 2010 年之间有显著差异 ($P < 0.05$)，其余各年间的差异不显著 (图 1b)。



不同小写字母表示该指标在不同年份间差异显著 ($P < 0.05$)

Different small letters meant significant difference between different years at 0.05 level

图 1 2009 年—2012 年 DBH ≥ 1 cm 林木密度和物种丰富度

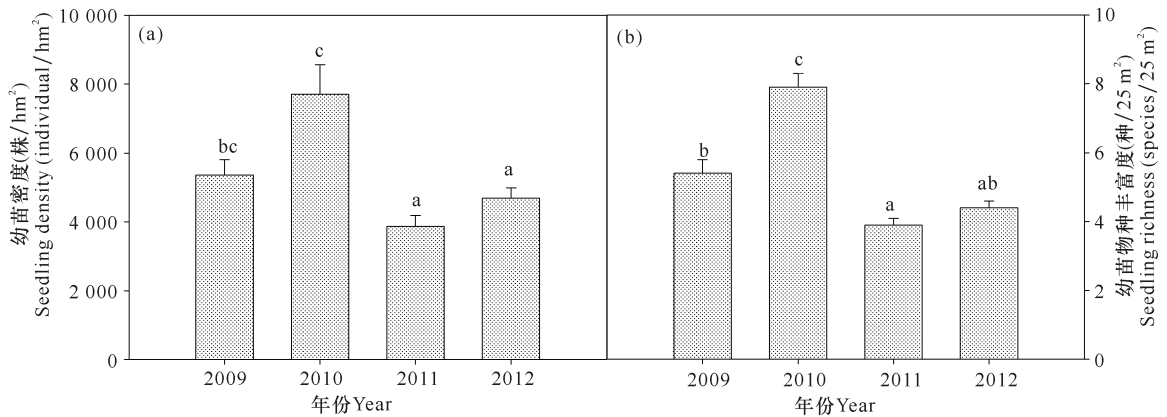
Fig. 1 The density of woody plant and species richness of DBH ≥ 1 cm from 2009 to 2012

2.2 幼苗密度和物种丰富度动态

2009 年—2012 年，胸径 < 1 cm 林木幼苗密度的平均值分别为 $(5\ 355.0 \pm 448.6)$ 株/hm²、 $(7\ 710.0 \pm 860.6)$ 株/hm²、 $(3\ 870.0 \pm 317.9)$ 株/hm²、 $(4\ 690.0 \pm 303.1)$ 株/hm²。不同年份，幼苗密度存在显著差异。2010 年幼苗密度显著高于其他 3 个年份 ($P < 0.05$)；2009 年显著高于 2011 年和 2012 年 ($P < 0.05$)，与 2010 年差异不显著 ($P >$

0.05) (图 2a)。

2009 年—2012 年，大明山常绿阔叶林幼苗样方的物种丰富度平均值分别为 (5.4 ± 0.4) 种/400 m^2 、 (7.9 ± 0.4) 种/400 m^2 、 (3.9 ± 0.2) 种/400 m^2 、 (4.4 ± 0.2) 种/400 m^2 ，2010 年显著高于 2009 年、2011 年和 2012 年 ($P < 0.05$)，2009 年显著高于 2011 年 ($P < 0.05$)，其余年份间差异不显著 ($P >$



不同小写字母表示该指标在不同年份间差异显著 ($P < 0.05$)

Different small letters meant significant difference between different years at 0.05 level

图 2 2009 年—2012 年林木幼苗密度和物种丰富度

Fig. 2 The density of seedling and species richness from 2009 to 2012

2.3 林木幼苗的科、属、种及个体数动态

调查统计发现，特大冰冻灾害干扰后的 4 年里，大明山常绿阔叶林群落中林木幼苗的科、属、种及个体数均有较大的变化 (表 1)。2009 年样方 (80 个 25

m^2) 中出现的幼苗有 76 种，隶属于 27 科 51 属，共 1 071 株，其中樟科的物种数最多有 14 种 234 株，占本年度记录物种总数的 18.4%、总个体数的 21.8%。

2010 年林木幼苗的科、属、种数量开始呈下降趋

势,但个体总数却表现为大幅度增加;该年度共记录到幼苗 1 542 株,隶属于 26 科 47 属 72 种,与上年度相比,其科、属、种的数量分别下降了 3.7%、7.8%、5.3%,但个体数却上升了 44.0%。同上年度一样,2010 年樟科幼苗的种数和个体数占据了绝对的优势,分别占本年度幼苗总数的 22.2%和 51.4%。值得关注的是,2009 年曾出现过的马鞭草科、榆科、桃金娘科等科的物种在样方中消失,而新出现了桦木科、省沽油科的幼苗(表 1)。

在 2011 年,样方中幼苗的科、属、种总数继续呈下降趋势,且个体数也开始大幅度减少;本年度记录到的幼苗仅有 11 科 19 属 25 种 774 株,比 2010 年分别减少了 57.7%、59.6%、65.3%和 49.8%。2010 年曾记录到的茜草科、蔷薇科、桑科、山矾科、五加科、古柯科、卫矛科、冬青科、虎耳草科、八角枫科、漆树科、木犀科、八角科、省沽油科、桦木科等 15 个科的幼苗在样方中消失(表 1)。

在 2012 年,群落中林木幼苗的科、属、种及个体数开始出现大幅度增加趋势,分别比上年增加了 47.4%、52.6%、44.0%和 21.2%。值得注意的是,综观 4 年的调查结果发现,共有 13 科植物的幼苗在调查样方中消失,分别是茜草科(4 属 4 种)、蔷薇科

(3 属 4 种)、桑科(1 属 2 种)、山矾科(1 属 4 种)、虎耳草科(1 属 1 种)、马鞭草科(1 属 2 种)、八角枫科(1 属 2 种)、木犀科(1 属 1 种)、榆科(1 属 1 种)、桃金娘科(1 属 1 种)、八角科(1 属 1 种)、省沽油科(1 属 1 种)和桦木科(1 属 1 种)。此外,其它一些科的物种也有不同程度的增减现象。如樟科,尽管其幼苗占绝对优势,但物种增减的现象也较普遍:2009 年,樟科的物种数有 6 属 14 种,但到 2012 年只剩下 5 属 7 种,4 年间共消失 9 种但新增了 2 种,消失的 9 种植物分别是阴香(*Cinnamomum burmannii*)、狭叶阴香(*Cinnamomum heyneanum*)、新木姜(*Neolitsea aurata*)、短梗新木姜子(*Neolitsea brevipes*)、南亚新木姜(*Neolitsea zeylanica*)、清香木姜子(*Litsea mollis*)、竹叶木姜子(*Litsea pseudoelongata*)、黄丹木姜子(*Litsea elongata*)、红楠(*Machilus thunbergii*),新增的 2 种分别是广东琼楠(*Beilschmiedia fordii*)和豹皮樟(*Litsea coreana*)。又如山茶科,2009 年有 6 属 8 种,到 2012 年只有 4 属 5 种,消失的 3 种分别是天目紫茎(*Stewartia sinensis*)、半齿柃(*Eurya semiserrata*)和红淡比(*Cleyera japonica*)(表 1)。

表 1 林木幼苗的科、属、种及个体数动态

Table 1 The dynamic of family, genus, species and individual numbers of seedlings

科名 Family	2009 年			2010 年			2011 年			2012 年		
	属数 Genus	物种数 Species	个体数 Individuals	属数 Genus	物种数 Species	个体数 Individuals	属数 Genus	物种数 Species	个体数 Individuals	属数 Genus	物种数 Species	个体数 Individuals
樟科 Lauraceae	6	14	234	6	16	793	5	5	481	5	7	619
茜草科 Rubiaceae	4	4	127	2	2	112	/	/	/	/	/	/
槭树科 Aceraceae	1	2	103	1	2	99	1	2	88	1	2	69
杜英科 Elaeocarpaceae	2	3	86	2	3	80	1	3	45	2	3	40
山茶科 Theaceae	6	8	69	5	9	57	2	3	16	4	5	29
安息香科 Styracaceae	4	4	58	4	4	22	2	2	5	2	2	26
蔷薇科 Rosaceae	3	4	50	2	4	46	/	/	/	/	/	/
胡桃科 Juglandaceae	1	2	50	1	1	69	1	1	59	1	1	21
桑科 Moraceae	1	2	38	1	2	5	/	/	/	/	/	/
古柯科 Erythroxylaceae	1	1	38	1	1	45	/	/	/	1	1	5

续表 1

Continue table 1

科名 Family	2009 年			2010 年			2011 年			2012 年		
	属数 Genus	物种数 Species	个体数 Individuals	属数 Genus	物种数 Species	个体数 Individuals	属数 Genus	物种数 Species	个体数 Individuals	属数 Genus	物种数 Species	个体数 Individuals
虎皮楠科 Daphniphyllaceae	1	3	33	1	2	23	1	2	23	1	2	22
五加科 Araliaceae	3	3	32	2	2	21	/	/	/	1	1	3
大戟科 Euphorbiaceae	2	3	32	3	5	36	2	2	5	2	2	7
壳斗科 Fagaceae	2	4	31	3	5	40	2	3	25	2	4	44
柿树科 Ebenaceae	1	1	27	1	1	51	1	1	22	1	1	15
山矾科 Symplocaceae	1	4	13	1	1	2	/	/	/	/	/	/
卫矛科 Celastraceae	1	1	11	1	1	7	/	/	/	1	1	19
冬青科 Aquifoliaceae	1	1	7	1	2	8	/	/	/	1	1	9
虎耳草科 Saxifragaceae	1	1	6	1	1	1	/	/	/	/	/	/
木兰科 Magnoliaceae	1	1	5	2	2	11	1	1	5	1	1	5
马鞭草科 Verbenaceae	1	2	5	/	/	/	/	/	/	/	/	/
八角枫科 Alangiaceae	1	2	5	1	1	2	/	/	/	/	/	/
漆树科 Anacardiaceae	2	2	3	1	1	2	/	/	/	1	1	4
木犀科 Oleaceae	1	1	3	1	1	4	/	/	/	/	/	/
榆科 Ulmaceae	1	1	2	/	/	/	/	/	/	/	/	/
桃金娘科 Myrtaceae	1	1	2	/	/	/	/	/	/	/	/	/
八角科 Illiciaceae	1	1	1	1	1	2	/	/	/	/	/	/
省沽油科 Staphyleaceae	/	/	/	1	1	3	/	/	/	/	/	/
桦木科 Betulaceae	/	/	/	1	1	1	/	/	/	/	/	/
金缕梅科 Hamamelidaceae	/	/	/	/	/	/	/	/	/	1	1	1
合计 Total	51	76	1 071	47	72	1 542	19	25	774	28	36	938

2.4 林木、幼苗密度与物种丰富度的关系

相关分析表明,大明山常绿阔叶林林木密度与林木物种丰富度(图 3a)、幼苗密度与幼苗物种丰富度(图 3b)呈极显著正相关关系($P < 0.001, N =$

320);林木密度和物种丰富度与幼苗密度和幼苗物种丰富度也呈显著正相关关系($P < 0.05, N = 320$)(图 3c~f)。

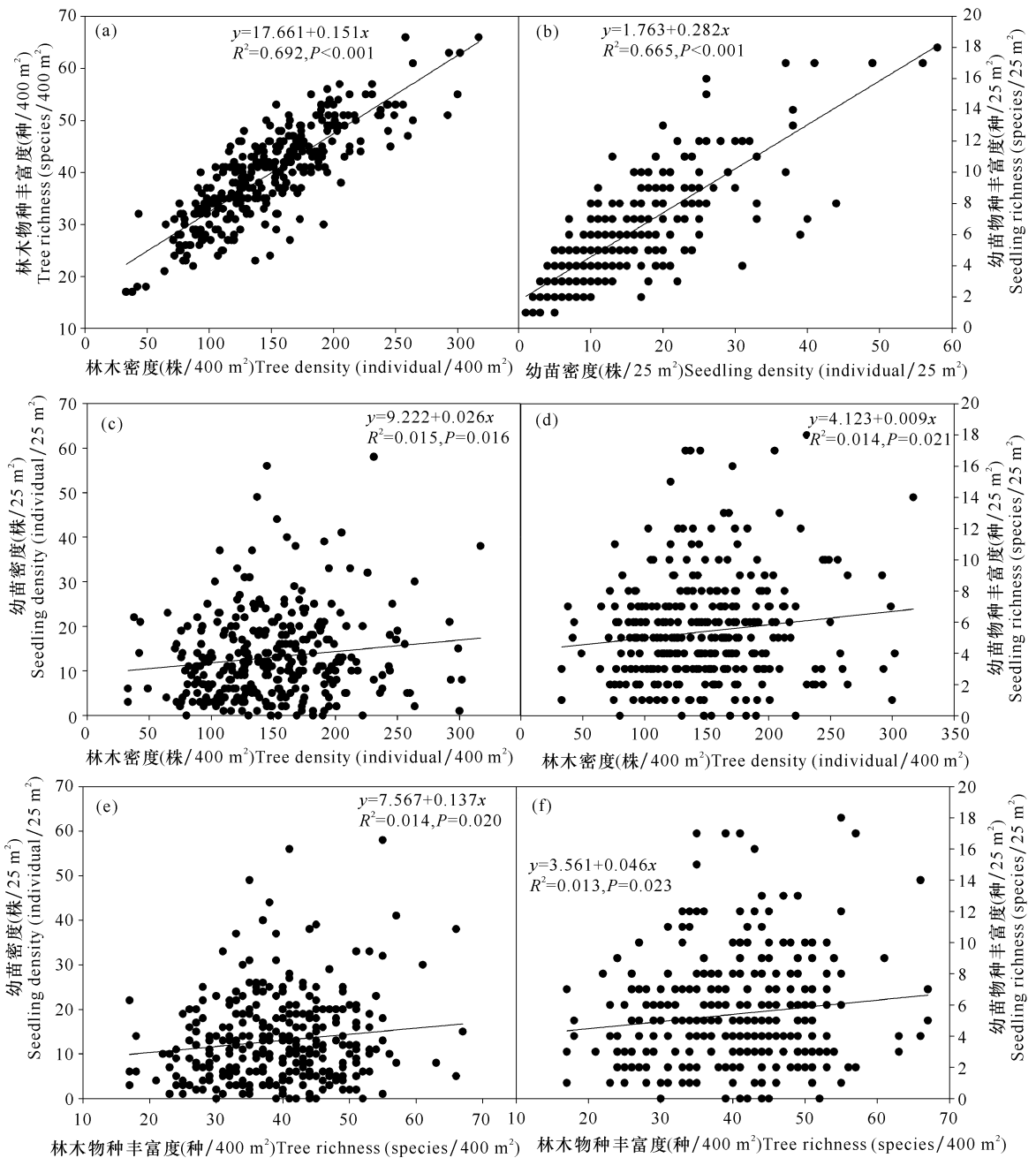


图 3 林木密度和林木物种丰富度与幼苗密度和幼苗物种丰富度的关系

Fig. 3 The relationship between tree density, tree richness, seedling density and seedling richness

3 讨论

林下幼苗在森林生态系统的物种多样性维持及群落的更新演替过程中扮演着重要的角色^[32-34],对森林生态系统的恢复与重建有着重要的作用。幼苗脆弱的生长特性决定了其对干扰反应的敏感性,其生长适应性一定程度上决定着干扰后系统恢复的速度与质量。本研究发现,特大冰冻干扰后,大明山常绿阔叶林林下幼苗的密度和物种丰富度均出现快速增加,之后又出现轻微下降并保持相对稳定。产生这种现象的原因可能是冰冻干扰后林冠受损,林冠开度增

大,林下光照和温度增加,有利于种子的萌发和生长。李晓亮等^[35]对西双版纳热带森林受干旱胁迫干扰后幼苗密度和物种丰富度的研究发现,该森林林下幼苗的平均密度为(14.15±0.72)株/m²,平均物种丰富度为(3.73±0.10)种/m²。在本研究中,2012年幼苗的平均密度仅(0.47±0.8)株/m²,平均物种丰富度(0.18±0.2)种/m²,明显低于西双版纳热带森林。这与大明山山地常绿阔叶林岩石裸露大(占林地面积的80%以上),土壤少,土层浅薄有关。

刘少冲等^[36]的研究发现,更新层物种(乔木和灌木)的多样性随着林冠开度的减小(林冠覆盖度增加)

而减少。雷相东等^[37]和 Brosofske 等^[38]的研究也证明,天然林下植物多样性随着林分密度和林冠郁闭度的增大而减小。这是不同的物种对林冠结构(LAI)变化的响应不同所致^[39]。本研究也表明,随着灾后的植被恢复和林冠覆盖度的增大,幼苗的密度和丰富度减少。本研究还发现,上层林木密度和物种丰富度与林下幼苗密度和幼苗物种丰富度呈显著正相关关系。这一发现表明上层林木的密度与丰富度在较大程度上决定着林下幼苗种类、数量及动态。

森林植被对干扰的反应是一个复杂的生态学过程,各干扰因子或单独或综合地影响到群落的物种多样性以及森林的自然更新与发展进程^[40]。不同物种对干扰的反应有着较大的差异性,如飓风的干扰可导致一些树种的大树大量死亡,但其幼苗或幼树可以存活下来并能迅速生长,而某些树种则于干扰后仍能存活一定时间之后逐渐死亡,且这些树种很少有更新的幼苗或幼树^[41-42]。Pascarella 等^[43]对美国加勒比海波多黎各地区多处 4~5 年次生林分的调查结果表明,飓风干扰后各林分平均消失了 2~14 个物种但同时新增了 1~6 个物种。本研究发现,大明山常绿阔叶林不同树种对冰冻灾害干扰的反应同样也存在较大的差别,在恢复初期的 4 年中,群落物种出现了不同程度消失和新增现象。值得关注的是,在消失的物种中尽管大多是一些稀有种,但也有位于群落重要值前 5 位的优势种如山茶科的天目紫茎,表明群落中一些稀有种及个别优势种的更新能力受到了制约,从而反映出不同树种对冰冻灾害干扰后的恢复响应不同。由于大明山常绿阔叶林仍处在特大冰冻干扰后的恢复初期,其群落的结构与物种组成仍然处于不断调整适应的响应状态,其响应过程与机理有待进一步的深入研究。

参考文献:

[1] BELSKY A J. Revegetation of artificial disturbances in grasslands of the Serengeti National Park, Tanzania: II. Five years of successional change[J]. *Journal of Ecology*, 1986, 74(4): 937-951.

[2] COLLINS S L, BARBER S C. Effects of disturbance on diversity in mixed-grass prairie[J]. *Vegetation*, 1985, 64(2): 87-94.

[3] 区余端, 王楚彪, 苏志尧. 自然干扰后冠层乔木的群落组成与结构动态[J]. *中南林业科技大学学报*, 2015, 35(8): 36-41.

OU Y D, WANG C B, SU Z Y. Dynamics of canopy plant community compose and structure in evergreen broadleaved forest following a natural disturbance[J].

Journal of Central South University of Forestry & Technology, 2015, 35(8): 36-41.

[4] CONNELL J H. Diversity in tropical rain forests and coral reefs[J]. *Science*, 1978, 199(4335): 1302-1310.

[5] WHITE P S. Pattern, process, and natural disturbance in vegetation[J]. *The Botanical Review*, 1979, 45(3): 229-299.

[6] COLLINS S L, GLENN S M, GIBSON D J. Experimental analysis of intermediate disturbance and initial floristic composition: Decoupling cause and effect[J]. *Ecology*, 1995, 76(2): 486-492.

[7] MACKEY R L, CURRIE D J. The diversity-disturbance relationship: Is it generally strong and peaked? [J]. *Ecology*, 2001, 82(12): 3479-3492.

[8] 丁易, 路兴慧, 臧润国, 等. 抚育措施对热带天然次生林群落结构与物种多样性的影响[J]. *林业科学研究*, 2016, 29(4): 480-486.

DING Y, LU X H, ZANG R G, et al. Effects of tending on the community structure and species diversity of a tropical natural secondary forest[J]. *Forest Research*, 2016, 29(4): 480-486.

[9] 褚燕琴, 牛树奎, 陈锋, 等. 火干扰及环境因子对油松林林下植被的影响[J]. *浙江农林大学学报*, 2017, 34(1): 96-103.

CHU Y Q, NIU S K, CHEN F, et al. Fire disturbance and environmental factors for the undergrowth in a *Pinus tabulaeformis* forest [J]. *Journal of Zhejiang A&F University*, 2017, 34(1): 96-103.

[10] 孟莹莹, 周莉, 周旺明, 等. 长白山风倒区植被恢复 26 年后物种多样性变化特征[J]. *生态学报*, 2015, 35(1): 142-149.

MENG Y Y, ZHOU L, ZHOU W M, et al. Characteristics of plant species diversity in a wind throw area on Changbai Mountain after 26 years of natural recovery [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2015, 35(1): 142-149.

[11] GIVNISH T J. On the causes of gradients in tropical tree diversity[J]. *Journal of Ecology*, 1999, 87(2): 193-210.

[12] 文隗英, 李仲芳. 干扰对物种多样性维持机制的影响[J]. *西北师范大学学报: 自然科学版*, 2006, 42(4): 87-91.

WEN L Y, LI Z F. The effects of disturbance on maintaining mechanism of species diversity[J]. *Journal of Northwest Normal University: Natural Science*, 2006, 42(4): 87-91.

[13] 刘志民, 赵晓英, 刘新民. 干扰与植被的关系[J]. *草业学报*, 2002, 11(4): 1-9.

LIU Z M, ZHAO X Y, LIU X M. Relationship between disturbance and vegetation[J]. *Acta Prataculturae Sini-*

- ca,2002,11(4):1-9.
- [14] SHEPARD R K. Ice storm damage to loblolly pine in northern Louisiana[J]. Journal of Forestry, 1975, 73(7):420-423.
- [15] SEISCHAB F K, BERNARD J M, EBERLE M D. Glaze storm damage to western New York forest communities[J]. Bulletin of the Torrey Botanical Club, 1993, 120(1):64-72.
- [16] NYKÄNEN M L, PELTOLA H, QUINE C, et al. Factors affecting snow damage of trees with particular reference to European conditions[J]. Silva Fennica, 1997, 31(2):193-213.
- [17] PISARIC M F J, KING D J, MACINTOSH A J M, et al. Impact of the 1998 ice storm on the health and growth of sugar maple (*Acer saccharum* Marsh.) dominated forests in Gatineau Park, Quebec[J]. The Journal of the Torrey Botanical Society, 2008, 135(4):530-539.
- [18] 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.
- XU Y W, WU K K, ZHU L R, et al. A review of freezing rain and snow impacts on forests in southern China [J]. Ecology and Environmental Sciences, 2010, 19(6):1485-1494.
- [19] 栾启福, 卢萍, 肖复明, 等. 雨雪冰冻重灾区湿地松受害情况调查及其原因初步分析[J]. 林业科学, 2008, 44(11):50-54.
- LUAN Q F, LU P, XIAO F M, et al. Investigation on the damage of *Pinus elliottii* in the freezing rain and snow area and the analysis on the reason[J]. Scientia Silvae Sinicae, 2008, 44(11):50-54.
- [20] 温庆忠, 魏雪峰, 赵元藩, 等. 雨雪冰冻灾害对滇东南 5 种人工林的影响[J]. 林业科学, 2008, 44(11):23-27.
- WEN Q Z, WEI X F, ZHAO Y F, et al. Impact of the freezing rain and snow disasters on five plantations in the Southeast Yunnan[J]. Scientia Silvae Sinicae, 2008, 44(11):23-27.
- [21] 李意德. 低温雨雪冰冻灾害后的南岭山脉自然保护区——亟待拯救的生态敏感区域[J]. 林业科学, 2008, 44(6):2-4.
- LI Y D. Nanling Mountains Nature Reserve after cryogenic freezing rain and snow disaster: The ecological sensitive region ulgently to be saved[J]. Scientia Silvae Sinicae, 2008, 44(6):2-4.
- [22] 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.
- ZHAO X, SHEN X Q, HUANG S N, et al. Mechanical damages to woody plants from a snow disaster in Yangdongshan Shierdushui Provincial Nature Reserve [J]. Scientia Silvae Sinicae, 2008, 44(11):164-167.
- [23] 张建国, 段爱国, 童书振, 等. 冰冻雪压对杉木人工林近成熟林分危害调查[J]. 林业科学, 2008, 44(11):18-22.
- ZHANG J G, DUAN A G, TONG S Z, et al. Harm of frost and snow suppress to near mature stands of *Cunninghamia lanceolata* plantations[J]. Scientia Silvae Sinicae, 2008, 44(11):18-22.
- [24] 薛立, 冯慧芳, 郑卫国, 等. 冰雪灾害后粤北杉木林冠残体和凋落物的持水特性[J]. 林业科学, 2008, 44(11):82-86.
- XUE L, FENG H F, ZHENG W G, et al. Water capacity characteristic of the broken crown and litter in a *Cunninghamia lanceolata* stand suffered from ice-snow damage in North Guangdong Province[J]. Scientia Silvae Sinicae, 2008, 44(11):82-86.
- [25] 杨锋伟, 鲁绍伟, 王兵. 南方雨雪冰冻灾害受损森林生态系统生态服务功能价值评估[J]. 林业科学, 2008, 44(11):101-110.
- YANG F W, LU S W, WANG B. Value estimation of service function of forest ecosystem damaged by frozen rain and snow in the South China [J]. Scientia Silvae Sinicae, 2008, 44(11):101-110.
- [26] 陆钊华, 徐建民, 韩超, 等. 南方桉树人工林雨雪冰冻经济损失评估与分析[J]. 林业科学, 2008, 44(11):36-41.
- LU Z H, XU J M, HAN C, et al. Economic losing evaluation of *Eucalyptus* plantations subjected to the frozen catastrophe in Southern China[J]. Scientia Silvae Sinicae, 2008, 44(11):36-41.
- [27] 徐凤兰, 钱国钦, 杨伦增. 冰冻灾害造成森林生态服务价值损失的经济评估——以福建省受灾森林为例[J]. 林业科学, 2008, 44(11):193-201.
- XU F L, QIAN G Q, YANG L Z. Economical assessment of the Lose's Value Brought by the Blizzard and frozen disasters to the forest in the ecosystem services-take the disaster forest of Fujian Province as the example[J]. Scientia Silvae Sinicae, 2008, 44(11):193-201.
- [28] 骆土寿, 张国平, 吴仲民, 等. 雨雪冰冻灾害对广东杨东山十二度水保护区常绿与落叶混交林凋落物的影响[J]. 林业科学, 2008, 44(11):177-183.
- LUO T S, ZHANG G P, WU Z M, et al. Effects of the frozen rain and snow disaster to the litterfall of evergreen and deciduous broadleaved mixed forest in Yangdongshan Shierdushui Nature Reserve of Guangdong [J]. Scientia Silvae Sinicae, 2008, 44(11):177-183.
- [29] 王旭, 黄世能, 周光益, 等. 冰雪灾害对杨东山十二度水自然保护区栲类林建群种的影响[J]. 林业科学, 2009,

- 45(9):41-47.
- WANG X, HUANG S N, ZHOU G Y, et al. Effects of the frozen rain and snow disaster on the dominant species of *Castanopsis* forests in Yangdongshan Shierdushui Provincial Nature Reserve of Guangdong[J]. *Scientia Silvae Sinicae*, 2009, 45(9):41-47.
- [30] 温远光, 和太平, 谭伟福. 广西热带和亚热带山地的植物多样性及群落特征[M]. 北京: 气象出版社, 2004.
- WEN Y G, HE T P, TAN W F. Plant biodiversity and community characteristics in tropical and subtropical mountains in Guangxi[M]. Beijing: China Meteorological Press, 2004.
- [31] 温远光, 李婉舒, 朱宏光, 等. 特大冰冻干扰对大明山常绿阔叶林树冠及林冠层状况的影响[J]. *广西科学*, 2014, 21(5):454-462.
- WEN Y G, LI W S, ZHU H G, et al. Effects of a severe ice storm disturbance on crown and canopy condition of an evergreen broad-leaved forest in Damingshan Nature Reserve of Guangxi Province[J]. *Guangxi Sciences*, 2014, 21(5):454-462.
- [32] STRENG D R, GLITZENSTEIN J S, HARCOCOME P A. Woody seedling dynamics in an east Texas floodplain forest[J]. *Ecological Monographs*, 1989, 59(2):177-204.
- [33] SZWAGRZYK J, SZEWCZYK J, BODZIARCZYK J. Dynamics of seedling banks in beech forest: Result of a 10-year study on germination, growth and survival[J]. *Forest Ecology and Management*, 2001, 141(3):237-250.
- [34] HARPER J L. Population biology of plants[M]. London: Academic Press, 1977.
- [35] 李晓亮, 王洪, 郑征, 等. 西双版纳热带森林树种幼苗的组成、空间分布和旱季存活[J]. *植物生态学报*, 2009, 33(4):658-671.
- LI X L, WANG H, ZHENG Z, et al. Composition, spatial distribution and survival during the dry season of tree seedlings in a tropical forest in Xishuangbanna, SW China[J]. *Chinese Journal of Plant Ecology*, 2009, 33(4):658-671.
- [36] 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.
- LIU S C, DUAN W B, FENG J, et al. Effects of forest gap on tree species regeneration and diversity of mixed broadleaved *Korean pine* forest in Xiaoxing'an Mountain[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2011, 22(6):1381-1388.
- [37] 雷相东, 唐守正, 李冬兰, 等. 影响天然林下层植物物种多样性的林分因子的研究[J]. *生态学杂志*, 2003, 22(3):18-22.
- LEI X D, TANG S Z, LI D L, et al. Stand variables affecting understorey plant species diversity in natural forests[J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2003, 22(3):18-22.
- [38] BROSOFSKE K D, CHEN J, CROW T R. Understorey vegetation and site factors: Implications for a managed Wisconsin landscape[J]. *Forest Ecology and Management*, 2001, 146(1/2/3):75-87.
- [39] 区余端, 苏志尧, 解丹丹, 等. 雪灾后粤北山地常绿阔叶林优势树种幼苗更新动态[J]. *生态学报*, 2011, 31(10):2708-2715.
- OU Y D, SU Z Y, XIE D D, et al. Dynamics of dominant tree seedlings in montane evergreen broadleaved forest following a snow disaster in North Guangdong[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2011, 31(10):2708-2715.
- [40] 梁建萍, 王爱民, 梁胜发. 干扰与森林更新[J]. *林业科学研究*, 2002, 15(4):490-498.
- LIANG J P, WANG A M, LIANG S F. Disturbance and forest regeneration[J]. *Forest Research*, 2002, 15(4):490-498.
- [41] MINORE D, WEATHERLY H G, CARTMILL M. Seeds, seedlings, and growth of Pacific yew (*Taxus brevifolia*) [J]. *Northwest Science*, 1996, 70(3):223-229.
- [42] PASCARELLA J B. Hurricane disturbance and the regeneration of *Lysiloma latisiliquum* (Fabaceae): A tropical tree in south Florida[J]. *Forest Ecology and Management*, 1997, 92(1/2/3):97-106.
- [43] PASCARELLA J B, AIDE T M, ZIMMERMAN J K. Short-term response of secondary forests to hurricane disturbance in Puerto Rico, USA[J]. *Forest Ecology and Management*, 2004, 199(2/3):379-393.

(责任编辑: 陆雁)