

西双版纳热带森林空心树形成概率及其影响因素

刘俊雁^{1,2} 郑 征² 牛燕芬³ 董廷发^{1*}

(¹西南野生动植物资源保护教育部重点实验室, 西华师范大学生命科学学院, 四川南充 637009; ²中国科学院西双版纳热带植物园热带森林生态学重点实验室, 云南勐腊 666303; ³昆明学院农学院, 昆明 650214)

摘 要 空心树是森林生态系统的重要结构组分,它在维持森林动物群落的物种多样性方面起着重要作用。选取西双版纳 20 hm² 热带森林动态监测样地为研究对象,采用地面观测法调查了样地内所有胸径≥5 cm 的活体乔木,研究热带森林主要空心树形成概率及其影响因素。运用逻辑斯蒂回归模型探讨空心树形成概率与胸径的关系;再结合地形数据,拟合空心树形成概率的最优模型。结果表明:该样地森林的空心树形成概率与物种有关,空心树形成概率最高的 4 个种分别是红锥(*Castanopsis hystrix*) (21.23%)、黑毛柿(*Diospyros hasseltii*) (13.53%)、毛猴欢喜(*Sloanea tomentosa*) (12.06%) 和短刺锥(*C. echidnocarpa*) (11.99%);空心树形成概率随着树木胸径的增加而增加,相同径阶下各树种空心树形成概率不同;根据拟合的最优模型,空心树形成概率主要受胸径、坡度、坡向的影响。这些结果表明,空心树形成概率不仅与树木本身的生长有关,还受到地形因子的影响。提出对热带森林多样性的保护与管理的建议。

关键词 空心树; 生物多样性; 保护; 胸径; 热带森林

Likelihood and influencing factors of tree cavities in tropical forest in Xishuangbanna, Southwest China. LIU Jun-yan^{1,2}, ZHENG Zheng², NIU Yan-fen³, DONG Ting-fa^{1*} (¹ Key Laboratory of Southwest China Wildlife Resources Conservation, Ministry of Education, College of Life Sciences, China West Normal University, Nanchong 637009, Sichuan, China; ² Key Laboratory of Tropical Forest Ecology, Xishuangbanna Tropical Botanical Garden, Chinese Academy of Sciences, Mengla 666303, Yunnan, China; ³ College of Agriculture, Kunming University, Kunming 650214, China).

Abstract: Hollow-bearing trees (HBT) are important components in forest ecosystems, playing a crucial role in maintaining animal diversity. To quantify the probability and influencing factors of tree cavities in tropical forests, we conducted a ground-based observation in a 20-hm² tropical forest community in Xishuangbanna, Southwest China. We used Logistic models to study the relationship between the probability of tree cavities and the diameter at breast height (DBH). The results showed that the probability of tree cavities was positively related with DBH, and varied across different tree species. The four species with the highest probability of tree cavities were *Castanopsis hystrix* (21.23%), *Diospyros hasseltii* (13.53%), *Sloanea tomentosa* (12.06%) and *C. echidnocarpa* (11.99%). In an optimal fitting model, tree cavities were strongly correlated with DBH, slope and aspect of the tree location. Our results indicate that tree cavities are related with tree traits and topographic factors, and therefore have implication for the conservation and management of biodiversity in tropical forests.

Key words: hollow-bearing tree; biodiversity; conservation; diameter at breast height (DBH); tropical forest.

四川省青年科技基金资助项目(2012JQ0045)和中国科学院知识创新工程重要方向性项目(KSCX2-YW-Z-1019)资助。

收稿日期: 2016-02-25 接受日期: 2016-07-06

* 通讯作者 E-mail: dongtf@aliyun.com

空心树(hollow-bearing trees 或 cavity trees)是指树干或树枝上有树洞(直径 ≥ 2 cm)的木本植物(Harper *et al.*, 2005)。空心树对维持森林生态系统物种多样性方面起着重要作用(Remm *et al.*, 2011)。它能为许多动物(包括哺乳类、昆虫和其他一些洞巢居类群)提供栖息、繁殖及逃避天敌的场所(Gibbons *et al.*, 1996; Sedgeley, 2001; 王海涛等, 2003; Goldingay *et al.*, 2009)。Newton (1998)发现,全球有9%~18%的鸟类生存与树洞有关。空心树的数量直接影响了树洞巢居动物的多样性和丰富度(Braithwaite *et al.*, 1984; Sedgeley, 2001; 王海涛等, 2003)。因此,对空心树丰富度及其影响因素的研究有助于森林经营管理和生物多样性保护(Lindenmayer *et al.*, 2006; Remm *et al.*, 2011)。然而,目前对空心树的研究多来自温带地区(Gibbons *et al.*, 2002; Harper *et al.*, 2005; Lindenmayer *et al.*, 2006; 杨廉雁等, 2010),对热带地区的研究甚少(Pattanavi-bool *et al.*, 1996; Boyle *et al.*, 2008)。另一方面,对空心树的形成机制及其影响因素还不明确(Bednarz *et al.*, 2004; Remm *et al.*, 2011)。

已有研究表明:胸径是影响空心树形成最主要的因素,空心树形成概率随着胸径的增加而增加(Braithwaite *et al.*, 1984)。除了植物本身的生长特征外,树洞的形成还受到一些环境因子的影响,比如海拔、坡度等地形因子的不同而导致的环境差异也会影响空心树形成概率(Harper *et al.*, 2005);另一方面,由于树洞往往是由于机械损伤后木质部腐烂形成,这些机械损伤的过程往往来自于生物(如白蚁、啄木鸟等)和非生物(如风、雪等)等因子(Gibbons *et al.*, 1996; Jackson *et al.*, 2004),这些过程又往往跟物种的种类、木质密度有关(Remm *et al.*, 2011)。

目前,国内对空心树的相关研究较少(张树斌等, 2008; Zheng *et al.*, 2009; 杨廉雁等, 2010),尤其是对热带森林生态系统的研究基本尚属空白,仅见刘俊雁等(2012)。热带森林生态系统物种多样性高,空心树对热带森林生态系统结构和功能的意义不容忽视(Boyle *et al.*, 2008)。研究发现,热带森林有较高的树洞密度(刘俊雁等, 2012)。本文调查了中国科学院西双版纳20 hm²热带森林动态监测样地内所有的空心树,并对热带森林主要空心树形成概率及其影响因素进行探究,为热带森林生态系统的结构和功能提供理论依据,也能为热带森林生物

多样性的保育提供建议。

1 研究地区与研究方法

1.1 研究区概况

研究地点位于云南省南部,该区地处东南亚热带北缘,气候类型属热带季风气候,雨季和旱季交替明显(Cao *et al.*, 2006)。主要森林类型为热带季节雨林、热带季雨林和热带山地季风常绿阔叶林(朱华, 2007)。

本研究选取在西双版纳热带森林动态监测样地进行。该研究样地位于西双版纳傣族自治州勐腊县补蚌村南贡山东部斑马山脚,样地地理位置为21°36'42" N—21°36'58" N, 101°34'26" E—101°34'47" E,样地面积为20 hm²,分为500个20 m×20 m的样方。样地内海拔变幅较大,最低点海拔为709.27 m,最高点海拔为869.14 m。样地树种组成丰富,共有468个树种,隶属于213个属和70个科,其中优势种有望天树(*Parashorea chinensis*)、假海桐(*Pittosporopsis kerrii*)、短刺锥(*Castanopsis echidnocarpa*)、毛猴欢喜(*Sloanea tomentosa*)和蚁花(*Mezzettiopsis creaghii*)等(兰国玉等, 2008)。

1.2 调查方法

对20 hm²样地内所有胸径 ≥ 5 cm的活体乔木进行树洞的调查,对于位置较高的洞口,则利用望远镜(10×25)进行地面观察。为尽可能减少实验误差,树洞的观测选在林内光照强的时段(10:00—16:00)进行观测,并只有在3个观察者重复确认后才记录。把树干或大枝上具有1个或者1个以上直径 ≥ 2 cm树洞的乔木定义为空心树(Harper *et al.*, 2005)。

1.3 数据处理

空心树形成概率即空心树的数量占全部树木的比率。运用逻辑斯蒂回归模型探讨样地内重要值前20位树种的空心树形成概率(P)与胸径(DBH)的关系,回归方程式:

$$P = e^z / (1 + e^z) \quad (1)$$

式中, $z = a + b \times DBH$, a 为常数, b 是变量 DBH 的系数。

再结合样地地形数据(以10 m×10 m的小样方为单位),利用逻辑斯蒂回归模型分析空心树形成概率与胸径、地形因素(海拔 E 、凹凸度 C 、坡度 S 和坡向 A)之间的关系,回归方程式:

$$P = e^B / (1 + e^B) \quad (2)$$

式中, $B = a + b \times DBH + c \times E + d \times C + e \times S + f \times A$, a 为常数,

$b、c、d、e、f$ 分别是变量 $DBH、E、C、S、A$ 的系数。根据模型拟合结果筛选出对树木发生空心概率影响显著的地形因子,再分别分析每一个因子与树木发生空心概率之间的关系。方法依据 Harper 等(2005) 。

在分析 95%置信区间时,是基于在一定概率下的地形因子存在置信上限和置信下限,根据统计公式可计算出该概率值下地形因子值的置信上限值和下限值。具体公式依据刘庆明等(2015) 。

由于数据量太大,式(2) 逻辑斯蒂回归模型拟合用 R2.14.0 (<https://www.r-project.org>) 软件处理,其余数据处理在 SPSS 17.0 (SPSS 公司,美国) 下进行。

2 结果与分析

2.1 空心树特点

总共调查了胸径 ≥ 5 cm 的乔木 27745 株,其中空心树 1725 株,占调查树木总数的 6.22%。空心树包括 208 个树种(占种类总数的 53.9%) ,隶属于 123 个属和 55 个科。其中,重要值前 20 位的树种总的植株和具有树洞的植株(空心树) 的树木分别为 16166 和 847 株,空心树形成的概率为 5.24%,平均胸径为 17.14 cm (表 1) 。在这 20 个树种中,假海桐的总数量最多(4483 株) ,大叶锥总的植株数最少(142 株) 。尽管这些树种间树木数量差异较大,但每个树种都具有丰富的样本数。

空心树在种间的分配不均匀。蚁花和木奶果的空心树数量最多,分别为 144 和 118 株,而钝叶桂和网脉肉托果树种最少,分别为 6 和 9 株空心树。空心树形成概率最高的 4 个种分别是红锥(21.23%) 、黑毛柿(13.53%) 、毛猴欢喜(12.06%) 和短刺锥(11.99%) (表 1) 。

从表 1 可以看出,空心树在种间的平均胸径从 7.0~33.3 cm。平均胸径最高的 5 个种是毛猴欢喜(32.7 cm) 、绒毛番龙眼(30.2 cm) 、短刺锥(26.5 cm) 、大叶锥(33.3 cm) 和红锥(27.5 cm) 。

2.2 空心树形成概率与胸径

根据式(1) 分别拟合重要值前 20 位树种的空心树形成概率与胸径的逻辑斯蒂方程,各方程均达到显著差异(表 2) 。根据这 20 位树种生长的最大高度将其划分为不同的垂直结构(Cao *et al.*,2006) ,图 1a、1b、1c、1d 分别代表了小乔木层(5~10 m) 、林下乔木层(10~20 m) 、低林冠层(20~30 m) 、高林冠层(30~45 m) 树种空心树形成概率与胸径的关系(图 1) 。从图 1a 可以看出,小乔木层 4 个树种空心

表 1 重要值前 20 位树种植株数、空心树数、形成概率和平均胸径

Table 1 Total and hollow-bearing individual number, DBH and likelihood of being hollow-bearing tree (LHT) of 20 main 20 tree species

物种	平均胸径 DBH (cm)	乔木 数量	空心树 数量	空心树 形成概率 LHT (%)
红锥 <i>Castanopsis hystrix</i>	27.5	212	45	21.23
黑毛柿 <i>Diospyros hasseltii</i>	16.7	399	54	13.53
毛猴欢喜 <i>Sloanea tomentosa</i>	32.7	282	34	12.06
短刺锥 <i>Castanopsis echidnocarpa</i>	26.5	592	71	11.99
蚁花 <i>Mezzettia creaghii</i>	11.8	1558	144	9.24
大叶锥 <i>Castanopsis megaphylla</i>	33.3	142	12	8.45
木奶果 <i>Baccaurea ramiflora</i>	9.8	1400	118	8.43
韶子 <i>Nephelium chryseum</i>	16.3	387	31	8.01
绒毛番龙眼 <i>Pometia tomentosa</i>	30.2	207	15	7.25
披针叶楠 <i>Phoebe lanceolate</i>	7.0	677	44	6.50
滇南溪桫 <i>Chisocheton siamensis</i>	12.2	329	19	5.78
垂穗金刀木 <i>Barringtonia pendula</i>	16.24	259	12	4.63
青藤公 <i>Ficus langkokensis</i>	11.2	576	25	4.34
滇南桫 <i>Eurya austroyunnanensis</i>	9.94	410	16	3.90
望天树 <i>Parashorea chinensis</i>	20.2	1432	50	3.49
网脉肉托果 <i>Semecarpus reticulate</i>	17.6	265	9	3.40
云树 <i>Garcinia cowa</i>	10.8	1540	49	3.18
红光树 <i>Knema furfuracea</i>	12.2	617	15	2.43
假海桐 <i>Pittosporopsis kerrii</i>	7.0	4483	78	1.74
钝叶桂 <i>Cinnamomum bejolghota</i>	13.6	399	6	1.50
合计	17.14	16166	847	5.24

表 2 重要值前 20 位树种空心树形成概率与胸径的逻辑斯蒂模型

Table 2 Logistic regression models for likelihood of being hollow-bearing tree and DBH for each of main 20 main tree species

物种	模型	P 值
红锥	$P=e^z/(1+e^z)$, $z=-3.292+0.065DBH$	<0.001
黑毛柿	$P=e^z/(1+e^z)$, $z=-3.06+0.063DBH$	<0.001
毛猴欢喜	$P=e^z/(1+e^z)$, $z=-2.986+0.025DBH$	<0.001
短刺锥	$P=e^z/(1+e^z)$, $z=-3.108+0.039DBH$	<0.001
蚁花	$P=e^z/(1+e^z)$, $z=-3.085+0.063DBH$	<0.001
大叶锥	$P=e^z/(1+e^z)$, $z=-3.558+0.03DBH$	<0.001
木奶果	$P=e^z/(1+e^z)$, $z=-3.840+0.133DBH$	<0.001
韶子	$P=e^z/(1+e^z)$, $z=-3.837+0.066DBH$	<0.001
绒毛番龙眼	$P=e^z/(1+e^z)$, $z=-4.405+0.044DBH$	<0.001
披针叶楠	$P=e^z/(1+e^z)$, $z=-3.620+0.134DBH$	<0.001
滇南溪桫	$P=e^z/(1+e^z)$, $z=-3.770+0.07DBH$	<0.001
垂穗金刀木	$P=e^z/(1+e^z)$, $z=-5.134+0.102DBH$	<0.001
青藤公	$P=e^z/(1+e^z)$, $z=-5.222+0.152DBH$	<0.001
滇南桫	$P=e^z/(1+e^z)$, $z=-5.086+0.166DBH$	<0.001
望天树	$P=e^z/(1+e^z)$, $z=-3.942+0.21DBH$	<0.001
网脉肉托果	$P=e^z/(1+e^z)$, $z=-3.737+0.02DBH$	<0.001
云树	$P=e^z/(1+e^z)$, $z=-5.137+0.13DBH$	<0.001
红光树	$P=e^z/(1+e^z)$, $z=-5.575+0.114DBH$	<0.001
假海桐	$P=e^z/(1+e^z)$, $z=-4.814+0.106DBH$	<0.001
钝叶桂	$P=e^z/(1+e^z)$, $z=-5.225+0.061DBH$	<0.001

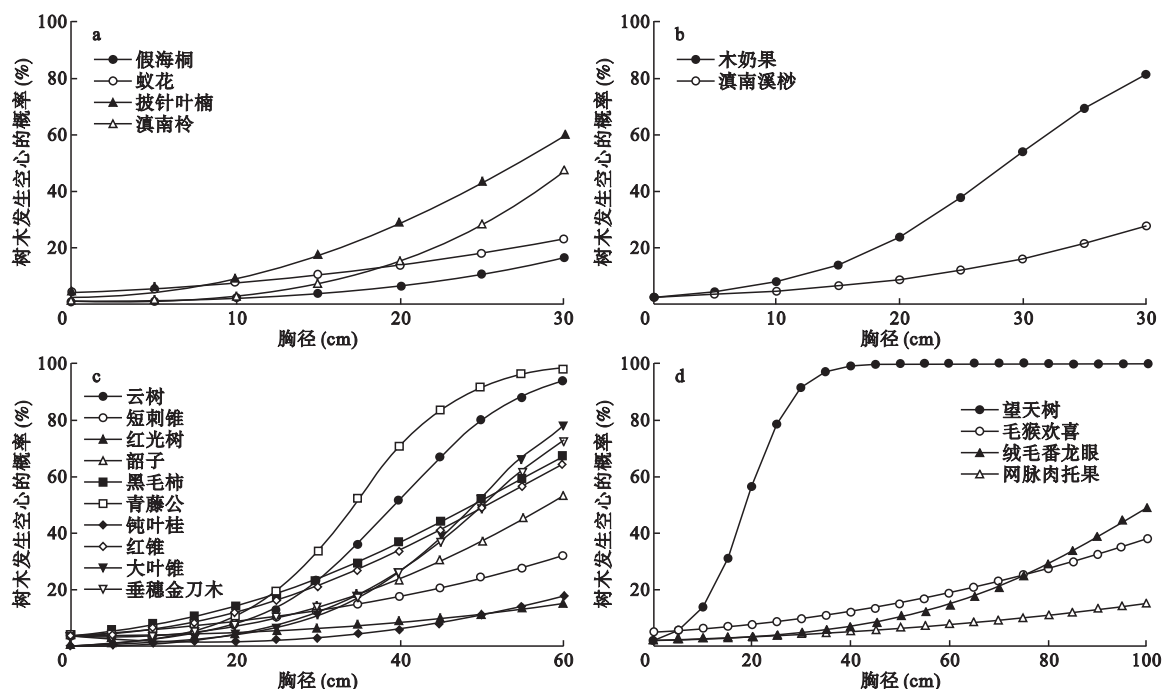


图1 重要值前20位树种空心树形成概率随平均胸径的变化

Fig.1 Change of likelihood of being hollow-bearing tree with DBH in 20 main tree species

a.小乔木层, b.林下乔木层, c.低林冠层, d.高林冠层。

树形成概率均随着树木胸径的增加而增加,但相同径级下,披针叶楠空心树形成概率最高,而假海桐最低。林下乔木层的木奶果在各胸径下空心树形成概率均比滇南溪桫高(图1b)。低林冠层的10个树种中,青藤公和云树的空心树形成概率最高,在胸径为50 cm时高达91.51%和79.62%;而大叶锥和钝叶桂两个树种空心树形成概率最低,在胸径为50 cm时仅为11.32%和10.20%;此外,红光树和垂穗金刀木、黑毛柿和红锥空心树形成概率随胸径的变化趋势都很相似(图1c)。高林冠层的网脉肉托果空心树形成概率随胸径的变化趋势十分平缓,即使胸径高达100 cm时,其空心树出现概率仅为14.98%;毛猴欢喜、绒毛番龙眼的变化趋势比较接近,在胸径75 cm之前,毛猴欢喜出现空心的概率略高于网脉肉托果,但在其之后却相反;空心树出现概率最高的是望天树,在胸径为30 cm时就高达91.36%,之后缓慢增加接近100.00%(图1d)。

结合表2和图1,可以发现,当树木胸径尽可能小接近零时,回归方程(1)中常数 a 值越大,树木发生空心的概率则越高;而 b 值则反映了树木发生空心的概率随胸径的变化趋势, $b > 0$ 表示树木发生空心的概率随胸径的增加而逐渐增加,同一胸径下,

b 值越大则表明该树种树木发生空心的概率越大。

2.3 空心树形成概率与地形因素

根据式(2)拟合出的空心树形成概率的逻辑斯蒂回归模型中,选择具有最小AIC值的回归等式为最佳回归模型(Boyce *et al.*, 2002),即最优模型为:

$$P = e^B / (1 + e^B)$$

$$B = 2.92146 + 0.45239DBH + 0.07282S + 0.06915A$$

(3)

即空心树的形成显著地受胸径(DBH)、坡度(S)和坡向(A)的影响,而海拔(E)和凹凸度(C)对其影响不显著,因此模型中未引入该两个参数(表3)。

图2表明,随着坡度的增加,空心树形成概率逐渐增加。其中,树木在坡度60°时的空心发生概率约为坡度1°时的1.3倍。而坡向对空心树形成概率的影响表现为生长在南面的空心树形成概率最大,约为北面的4.5倍(图2)。

表3 空心树形成概率的模型

Table 3 Model for likelihood of being hollow-bearing tree

参数	系数	估计值	P 值
常数	a	-2.92146	<0.001
平均胸径	b	0.45239	<0.001
坡度	e	0.07282	<0.001
坡向	f	0.06915	<0.001

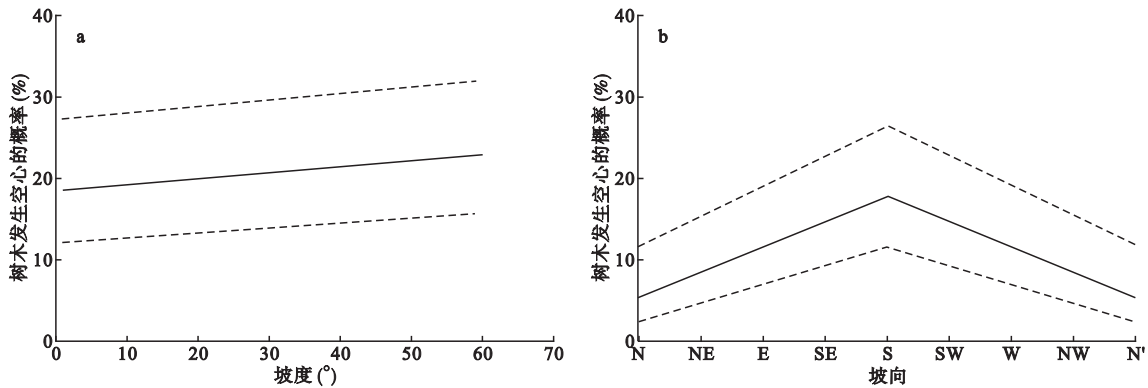


图2 空心树形成概率与坡度、坡向

Fig.2 Relationship of likelihood of being hollow-bearing trees with slope or aspect

虚线为置信区间(95%),式(3)中其他变量取其平均值;N和N'.北,NE.东北,E.东,SE.东南,S.南,SW.西北,W.西,NW.西北。

3 讨论

3.1 空心树形成概率与胸径、树种的关系

本研究发现,热带森林生态系统空心树形成概率随着胸径的增加而增加,这与其他森林类型的研究结果一致(Fan *et al.*, 2003; Lindenmayer *et al.*, 2006; Zheng *et al.*, 2009)。可能的解释是,由于树木胸径与年龄的正相关关系(Wormington *et al.*, 2003),胸径越大的树木可能受到环境干扰(机械损伤等)的几率就越大,同时年龄大的树木受干扰后形成树洞抵抗力越较弱,往往容易形成更多、更大的树洞,从而空心树形成概率越高(Inions *et al.*, 1989; Atkinson *et al.*, 1992)。

此外,由逻辑斯蒂模型可以看出,空心树形成概率在种间也存在明显差异,即使相同径阶下各树种空心树形成概率也有所不同。一方面可能是,各树种的平均胸径存在差异,胸径是影响空心树形成概率的最主要因素(Zheng *et al.*, 2009);另一方面,树种自身的特征如木材密度、木材基质等也会影响空心树形成概率,树干密度小即树干力量弱的树种,遇到风雪灾害等容易形成断顶、折枝,这些折断的树易受到分解者的侵袭,从而更易形成空心树(Fan *et al.*, 2003; Remm *et al.*, 2011)。作者查询了与本研究20个种或同属种的数据库(<http://db.worldagro-forestry.org/wd/>)后发现,本研究中空心树形成的概率高的树种,其木质密度往往较低,但不同地区的同种木质密度可能有差异,西双版纳不同空心树种的木质密度的差异还有待进一步研究。

3.2 空心树形成概率与地形因素的关系

先前的研究发现,地形因素(坡向、坡度)会影

响空心树的形成(Lindenmayer *et al.*, 1993, 2009; Goldingay *et al.*, 2009),这与本研究结果一致。本研究中,生长在南面的树木空心树形成概率远大于北面树木,这可能是因为西双版纳盛行西南季风,因此南面的树木相比北面树木更容易长期暴露在强风下,造成枝条断裂,树干创伤后,分解生物(如真菌、白蚁等)对木质部的分解作用会导致树洞的形成和发展(Remm *et al.*, 2011; 王顺忠等, 2014),从而加速空心树的形成(Harper *et al.*, 2005)。另外,生长在陡坡上的树木空心树形成概率大于平坡上的树木,可能是因为陡坡上的树木更受邻近倒木的影响,树干遭受到损伤,也会更易形成树洞(Fan *et al.*, 2003);加之雨季期间样地内倒木现象非常频繁,这就容易导致更多的树木遭受损伤,从而形成树洞。

3.3 对该地区森林经营管理的启示及建议

热带森林生态系统物种多样性高,较高的空心树分布概率对维持物种多样性,尤其是动物类群的多样性具有重要意义(Goldingay *et al.*, 2009),然而随着人类对森林砍伐等干扰加剧,全球许多森林中空心树的数量逐渐减少(Lindenmayer *et al.*, 2009)。本研究发现,空心树的形成与胸径呈正相关关系。因此,有必要制定合理的森林保护措施,加强对大树、老林的保护以维持树洞巢居动物的生境需要,从而促进森林生态系统生物多样性的保育。

致谢 感谢中国科学院西双版纳热带雨林生态系统研究站在实验过程中提供的帮助。

参考文献

兰国玉, 胡跃华, 曹敏, 等. 2008. 西双版纳热带森林动态监测样地: 树种组成与空间分布格局. 植物生态学报,

- 32(2): 287–298.
- 刘俊雁, 郑征. 2012. 西双版纳热带森林树洞丰富度及其分配特点. *生态学杂志*, 31(2): 271–275.
- 刘庆明, 刘丽斌, 汪建平, 等. 2015. 烟酸粉尘云爆炸极限的逻辑回归分析. *兵工学报*, 36(3): 523–529.
- 王海涛, 高玮, 万冬梅, 等. 2003. 利用天然树洞繁殖的五种鸟的巢位特征及繁殖成功率(英文). *生态学报*, 23(7): 1377–1385.
- 王顺忠, 谷会岩, 桑卫国. 2014. 粗木质残体贮量和分解进展. *生态学杂志*, 33(8): 2266–2273.
- 杨廉雁, 郑征, 张树斌. 2010. 哀牢山中山湿性常绿阔叶林树洞数量的初步研究. *云南大学学报: 自然科学版*, 32(S1): 399–404.
- 张树斌, 郑征. 2008. 哀牢山中山湿性常绿阔叶林空心树木质残体呼吸作用初步研究. *山地学报*, 26(3): 300–307.
- 朱华. 2007. 论滇南西双版纳的森林植被分类. *云南植物研究*, 29(4): 377–387.
- Atkinson PR, Nixon KM, Shaw MJP. 1992. On the susceptibility of *Eucalyptus* species and clones to attack by *Macrotermes natalensis* Haviland (Isoptera: Termitidae). *Forest Ecology and Management*, 48: 15–30.
- Bednarz JC, Ripper D, Radley PM. 2004. Emerging concepts and research directions in the study of cavity-nesting birds: Keystone ecological processes. *Condor*, 106: 1–4.
- Boyce MS, Vernier PR, Nielsen SE, et al. 2002. Evaluating resource selection functions. *Ecological Modelling*, 157: 281–300.
- Boyle WA, Ganong CN, Clark DB, et al. 2008. Density, distribution and attributes of tree cavity in an old-growth tropical rain forest. *Biotropica*, 40: 241–245.
- Braithwaite LW, Turner J, Kelly J. 1984. Studies on the arboreal marsupial fauna of eucalypt forests being harvested for woodpulp at Eden, N.S.W. III. Relationships between faunal densities, eucalypt occurrence and foliage nutrients and soil parent material. *Australian Wildlife Research*, 11: 41–48.
- Cao M, Zou X, Matthew W, et al. 2006. Tropical forests of Xishuangbanna, China. *Biotropica*, 38: 306–309.
- Fan Z, Shifley SR, Spetich MA, et al. 2003. Distribution of cavity trees in midwestern old-growth and second-growth forests. *Canadian Journal of Forest Research*, 33: 1481–1494.
- Gibbons P, Lindenmayer DB. 1996. A review of issues associated with the retention of trees with hollows in wood production forests. *Forest Ecology and Management*, 83: 245–279.
- Gibbons P, Lindenmayer DB, Barry SC, et al. 2002. Hollow selection by vertebrate fauna in forests of southeastern Australia and implications for forest management. *Biological Conservation*, 103: 1–12.
- Goldingay RL, Stevens JR. 2009. Use of artificial tree hollows by Australian birds and bats. *Wildlife Research*, 36: 81–97.
- Harper MJ, McCarthy MA, van der Ree R. 2005. The abundance of hollow-bearing trees in urban dry sclerophyll forest and the effect of wind on hollow development. *Biological Conservation*, 122: 181–192.
- Inions GB, Tanton MT, Davey SM. 1989. Effects of fire on the availability of hollows in trees used by the Common Brush-tail Possum, *Trichosurus vulpecula* Kerr, 1792, and the Ringtail Possum, *Pseudocheirus peregrinus* Boddaerts, 1785. *Australian Wildlife Research*, 16: 449–458.
- Jackson JA, Jackson BJS. 2004. Ecological relationships between fungi and woodpecker cavity sites. *Condor*, 106: 37–49.
- Lindenmayer DB, Cunningham RB, Donnelly CF, et al. 1993. The abundance and development of cavities in *Eucalyptus* trees: A case study in the montane forests of Victoria, southeastern Australia. *Forest Ecology and Management*, 60: 77–104.
- Lindenmayer DB, Ough K. 2006. Salvage logging in the montane ash *Eucalypt* forest of the Central Highlands of Victoria and its potential impacts on biodiversity. *Conservation Biology*, 20: 1005–1015.
- Lindenmayer DB, Welsh A, Donnelly C, et al. 2009. Are nest boxes a viable alternative source of cavities for hollow-dependent animals? Long-term monitoring of nest box occupancy, pest use and attrition. *Biological Conservation*, 142: 33–42.
- Newton I. 1998. Population Limitation in Birds. London: Academic Press.
- Pattanaibool A, Edge WD. 1996. Single-tree selection silviculture affects cavity resources in mixed deciduous forests in Thailand. *Journal of Wildlife Management*, 60: 67–73.
- Remm J, Lõhmus A. 2011. Tree cavities in forests—The broad distribution pattern of a keystone structure for biodiversity. *Forest Ecology and Management*, 262: 579–585.
- Sedgeley JA. 2001. Quality of cavity microclimate as a factor influencing selection of maternity roosts by a tree-dwelling bat, *Chalinolobus tuberculatus*, in New Zealand. *Journal of Applied Ecology*, 38: 425–438.
- Wormington KR, Lamb D, McCallum HI, et al. 2003. The characteristics of six species of living hollow-bearing trees and their importance for arboreal marsupials in the dry sclerophyll forests of southeast Queensland, Australia. *Forest Ecology and Management*, 182: 75–92.
- Zheng Z, Zhang SB, Yang GP, et al. 2009. Abundance and distribution of cavity trees in an old-growth subtropical montane evergreen broadleaved forest. *Canadian Journal of Forest Research*, 39: 2234–2245.

作者简介 刘俊雁,女,1986年生,硕士,主要从事植物生态学研究。E-mail: liujunyan2300@163.com

责任编辑 张敏