

不同干扰强度生境中啮齿动物对苦槠种子的取食和扩散*

刘 滨^{1,2} 王 嵘^{1,2} 刘映良³ 徐高福⁴ 陈小勇^{1,2**}

(¹ 华东师范大学环境科学系, 上海 200062; ² 浙江天童国家森林公园生态系统野外观测研究站, 上海 200062; ³ 贵州师范大学生命科学院, 贵阳 550001; ⁴ 浙江省千岛湖国家森林公园, 浙江淳安 311700)

摘 要 在浙江省千岛湖地区, 选择了受人类活动干扰较轻、中度和严重的 3 个生境, 采用金属片标记法研究了啮齿动物对苦槠种子的取食和扩散。结果表明: 在研究点捕获的取食种子的啮齿动物为针毛鼠 (*Niviventer fulvescens*), 尽管捕获的数量少, 但种子被取食和扩散的速率很快, 3 个样地内的种子均在 2 d 内被取食或扩散完毕; 中等干扰强度的生境中, 被就地取食的种子最多, 占鉴别种子总数的 37.8%。种子扩散距离大多 <5 m, 最大扩散距离为 24.76 m, 3 个样地种子扩散均符合负指数分布, 且样地间没有显著差异; 饱满种子与虫蛀种子被就地取食与搬运后取食的命运没有显著差异, 但饱满种子的最大扩散距离均显著大于虫蛀种子 ($P < 0.05$), 除中等干扰样地中饱满种子与虫蛀种子平均扩散距离没有显著差异外, 其余 2 个样地中饱满种子的平均扩散距离均显著大于虫蛀种子, 显示啮齿动物对饱满种子与虫蛀种子有一定的区分能力。

关键词 干扰强度; 种子取食; 扩散距离; 啮齿类; 苦槠

中图分类号 Q143.1 **文献标识码** A **文章编号** 1000-4890(2011)8-1668-06

Seed dispersal and predation of *Castanopsis sclerophylla* by small rodents in habitats with different disturbance intensity. LIU Bin^{1,2}, WANG Rong^{1,2}, LIU Ying-liang³, XU Gao-fu⁴, CHEN Xiao-yong^{1,2**} (¹Department of Environmental Sciences, East China Normal University, Shanghai 200062, China; ²Zhejiang Tiantong National Observation Station of Forest Ecosystems, Shanghai 200062, China; ³School of Life Sciences, Guizhou Normal University, Guiyang 550001, China; ⁴Qiandao Lake National Forest Park, Chun'an 311700, Zhejiang, China). *Chinese Journal of Ecology*, 2011, 30(8): 1668–1673.

Abstract: In this study, the *Castanopsis sclerophylla* seeds in three habitats under slight, moderate, and serious disturbances in Qiandaohu area of Zhejiang Province were tagged and tracked to investigate the impacts of disturbance intensity on the predation and dispersal of *C. sclerophylla* seeds by rodents. The rodents trapped were identified as the members of *Niviventer fulvescens*. In the three habitats, all the seeds were eaten *in situ* or dispersed by the rodents within 2 days. In the habitat under moderate disturbance, the seeds eaten *in situ* had the highest percentage (37.8% of identified seeds). The seed dispersal distance in the three habitats was mostly <5 m, with the largest being 24.76 m, and the seed dispersal all presented negative exponential distribution, with no significant difference among the habitats. The fate (eaten *in situ* or dispersed) of sound and infested seeds in the three habitats had no significant difference, but the maximum dispersal distance of sound seeds was significantly larger than that of infested seeds. Except in the habitat under moderate disturbance, where the mean dispersal distances of sound and infested seeds had no significant difference, the mean dispersal distances of sound seeds in the other two habitats were significantly larger than those of infested seeds, indicating that rodents had definite capability in distinguishing sound and infested *C. sclerophylla* seeds.

Key words: disturbance intensity; seed predation; seed dispersal; rodent; *Castanopsis sclerophylla*.

* 国家自然科学基金项目(30970430)资助。

** 通讯作者 E-mail: xychen@des.ecnu.edu.cn

收稿日期: 2011-01-19 接受日期: 2011-04-19

种子扩散是植物世代更替的重要环节,在种群更新中起着重要作用(Wang & Smith,2002)。除初次扩散外,许多植物种子(尤其是重力散布的)往往还经历2次扩散过程,这一过程通常由啮齿类等小型哺乳动物完成。这些动物对植物种子的2次扩散作用带来复杂的后果,一方面,在这一过程中,啮齿动物捕食种子将减少存活种子的数量,对植物种群的更新和扩散带来不利影响,极端情况下种子悉数被食,导致植物种群更新困难(Terborgh *et al.*, 2001);另一方面,这些动物在搬运和埋藏种子的过程中,降低了植物个体间的竞争,减少了Janzen-Connell效应带来的不利影响,提高种子萌发率和幼苗存活率,并可扩大种群的分布范围(Price *et al.*, 2000)。因此,研究啮齿动物对种子的取食以及扩散是分析植物种群的更新格局、动态和机制的重要环节。

啮齿动物对种子的取食、搬运和贮藏过程受多种因素的影响和制约。许多研究表明,种子大小、质量和营养物质含量(Xiao *et al.*, 2005, 2008)、生境类型(张天澍等, 2006; 赵雪峰等, 2009)、被捕食的风险(Lima & Dill, 1990)以及时间和季节(Lu & Zhang, 2004)等,都会影响啮齿动物扩散种子行为的特征,进而影响到植物种子的命运和植物群落的结构(Forget & Vander Wall, 2001)。干扰(特别是人为干扰)是当前十分普遍的现象,是影响天然生态系统重要的综合性因素。干扰不仅可能直接改变或破坏生态系统的组成和结构,改变生物系统的资源基础和环境状况(Pickett & White, 1985),即使是非破坏性的影响,也可通过间接影响改变生态系统过程,带来潜在不利的生态系统后果。研究表明,受干扰生境中动物的种类、多度和行为可能发生改变,若它们是种子扩散动物,显然可能改变植物种子扩散的格局,进而影响到种子萌发、幼苗生长和种群更新,这在一些温带和热带森林生态系统中得到证实(Terborgh *et al.*, 2001)。然而,这种现象的普遍性,特别是我国以壳斗科为优势种的常绿阔叶林生态系统中是否存在类似格局,需要进一步研究。

我国东部地区是干扰十分频繁的区域,长期经济发展和社会活动使得该区域原生植被基本丧失殆尽,次生常绿阔叶林面积也很小,因此,研究这种人为干扰情况下优势种种子扩散格局可以了解常绿阔叶林的更新和维持提供基础信息。苦槠(*Castan-*

opsis sclerophylla)为壳斗科常绿乔木,广泛生长于我国长江流域及以南各省丘陵1000 m以下山地。苦槠是我国亚热带低丘地区常绿阔叶林优势树种之一,是干扰后次生演替中常绿阔叶林的先锋物种,并可长期形成以苦槠为优势种的常绿阔叶林,特别是在我国亚热带东部区域,苦槠是地带性植被的优势种,组成了青冈-苦槠林(吴征镒, 1980)。

本文在浙江西部淳安县石林镇选择人为干扰影响程度不同的3个样地,研究了啮齿动物对苦槠种子的取食和传播作用,旨在探究不同人为干扰强度下苦槠种子的存留动态、鼠类在不同干扰强度的生境中对苦槠种子取食、搬运、贮藏的差异、不同生境中鼠类对饱满与虫蛀种子的捕食差异和选择性,以期为森林资源保护和生态恢复提供理论依据。

1 研究地区与研究方法

1.1 研究区概况

研究地点位于浙江省淳安县石林镇,该地处于中亚热带季风气候区的北缘,气候温暖湿润,四季分明。年均降水量1430 mm,年均蒸发量1340 mm,平均相对湿度76%,年均气温17.0℃,7月平均气温28.9℃,1月平均气温5℃,极端最高气温41.8℃,极端最低气温-7.6℃,年平均无霜期263 d,日照时数1951 h,≥0℃的活动积温5409.9℃,绝对积温6231.4℃,无霜期长,雨量充沛,热量丰富(徐高福, 2003)。

淳安县位于青冈(*Cyclobalanopsis glauca*)、苦槠栽培植被区(吴征镒, 1980),地形以低山丘陵为主,地形切割强,山体走向、地貌和小气候复杂。山地土壤主要是红壤、黄壤和岩性土,土层厚度为50~120 cm,有机质含量9~120 g·kg⁻¹,平均31.1 g·kg⁻¹,pH值为5.15(徐高福, 2003)。该地区执行了较严格的封山育林,目前森林覆盖率较高,生态环境较好,但在局部地区,仍存在不同程度的人为干扰。

1.2 样点选择和种子的布置

人类活动对森林的干扰常与离村落的距离存在相关性,距离越近,受人类活动干扰强度越大(Thapa & Chapman, 2001),基于此,本研究选择了离村落距离不同的3个地点为研究样地,3个地点均以苦槠为优势种。研究样地1(119°04'56.6"N, 29°27'50.8"E)为3个样地中干扰最大的,离村落距

离约为 800 m,主要优势种为毛竹 (*Phyllostachys heterocycla*)、苦槠;研究样地 2 (29°27′41.4″N,119°04′11.4″E) 干扰中等,离村落 1800 m,位于一个风水林内,主要优势种为苦槠、青冈;研究样地 3 (29°27′42.2″N,119°04′905″E) 离村落最远,相距 2300 m,群落优势种也为苦槠、青冈。

2006 年 11 月,在该地区苦槠种子雨完全结束、地表苦槠种子基本消失以后研究种子取食和扩散。本研究采用金属片标签法(肖治术和张知彬,2006)追踪啮齿类对苦槠种子的传播。在种子的一端钻一小孔,用长约 5 cm 的铜丝($\Phi=0.4\text{ mm}$)拴一个标写编号的金属圆片($d=1\text{ cm}$)用于跟踪种子的命运。金属片与铜丝的重量之和为 $0.1035\text{ g}\pm0.0042\text{ g}$ ($n=20$),该重量仅为苦槠种子重量($1.23\text{ g}\pm0.56\text{ g}$, $n=1509$)的 8.4%,对啮齿动物的取食和扩散行为影响很小。

采集到的苦槠种子的虫蛀率约为 20%,因此,在种子布设时按照饱满种子与虫蛀种子 4 : 1 的比例布置。每个研究样地中设 2 条样带,样带间相距 5 m;每个样带上设 5 个样点,样点之间也相距 5 m。每个样点上放置一个直径约 15 cm 的纸盘,从所在样点就地取土覆盖纸盘以与背景一致。每个纸盘中放置虫蛀种子 10 粒,饱满种子 40 粒,即每个样地共放置种子 500 粒,在所连金属片上标明所处样点等信息。从布下种子的第 2 天起,每天观察种子被取食或扩散情况,直到盘中种子全部被取食或扩散为止。在种子扩散过程结束后,对 3 个样地所有种子的命运进行调查。在离种子布设点 50 m 范围内寻找标签,测量扩散距离。种子命运分为就地取食、搬运后取食和搬运后贮藏 3 类。

1.3 捕食动物的确定

为确定捕食苦槠种子的动物种类,种子扩散研究结束后,在每个样地布置 30 个鼠笼捕捉啮齿类。鼠笼之间相距 2 ~ 3 m,鼠笼内放置 1 粒苦槠种子,啮齿动物进入笼中取食时触动机关被捕获。每天观察一次捕获情况,连续观察 3 d。记录捕获鼠类的数量,并鉴定种类。

1.4 数据处理

采用存活分析法(survival analysis)研究各样地苦槠种子的存留动态。用 Manny-Whitney U 检验法检验不同样地间种子扩散距离以及种子命运的差异。以独立样本非参数检验法对各样带中饱满与虫蛀种子的命运差异进行检验。以上分析均采用软件

SPSS 11.5 for Windows 完成。

种子扩散大体上呈负指数分布(Sork,1984),采用该分布拟合不同样地中苦槠种子的扩散格局,不同样地间种子扩散曲线差异显著性采用 Bertin (2005)的方法进行检验,程序以 R 语言平台编写(R Development Core Team,2009)。

2 结果与分析

本研究中仅捕获到鼠类 2 只,均为针毛鼠(*Niviventer fulvescens*)。种子布设 1 d 后,3 个样地中 98% 以上的种子被搬运或被就地取食。2 d 后,种子盘里的种子全部被搬运或被就地取食。3 个样地间种子的中位存留时间和消失速率均没有显著差异($P>0.05$)。

3 个样地中能确定命运种子的比例为 42.2% ~ 57.8%,其余标牌未被搜获。能确定命运的种子中就地取食的种子比例为 6.8% (3 号样地) ~ 37.8% (2 号样地)(图 1)。干扰程度严重和等中的 1 号和 2 号样地中就地取食的种子比例没有显著差异,但均显著高于 3 号样地($P<0.001$)。被搬运后取食的种子比例在 3 个样地间也具有些差异,但均未达到统计显著水平。3 个样地中被贮藏的种子数量很少,分别仅有 8 粒、6 粒和 7 粒种子被贮藏,不同样地间差异不显著($P>0.05$)。

总体而言,苦槠种子的扩散距离较小(表 1)。最大扩散距离为 24.76 m,出现在 3 号样地;2 号样地最大扩散距离仅 14.20 m。2 号样地中绝大部分种子在 5 m 范围以内,3 号样地种子的分布主要也在 5 m 以内,但分布范围和扩散要大于 2 号样地;1 号样地种子扩散距离相对较大,在 5 m 以外还有较多的种子分布。1、2 和 3 号样地累积种子百分比

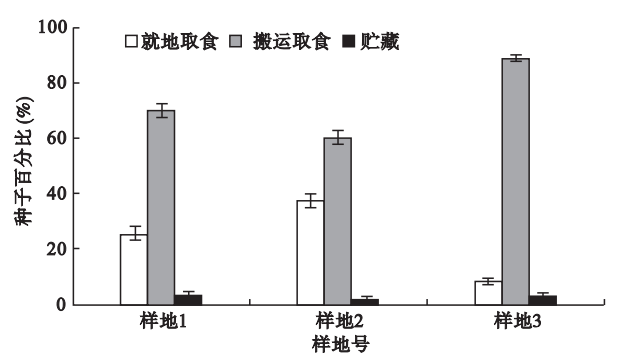


图 1 不同干扰强度样地中不同命运苦槠种子百分比
Fig.1 Percentages of seed fate of *Castanopsis sclerophylla* in plots of different disturbance intensity
数值为平均值±标准误。

表 1 不同干扰强度样地中苦槠种子的扩散格局
Table 1 Seed dispersal characteristics of *Castanopsis sclerophylla* in plots of different disturbance intensity

样地	离村落 距离 (m)	干扰 强度	平均距离 (m)	中位扩散 距离 (m)	最大扩散 距离 (m)
1	800	大	2.74±0.30 a	0.92	22.41
2	1800	中等	1.02±0.13 b	0.51	14.20
3	2300	小	1.68±0.20 b	0.54	24.76

数值为平均值±标准误;同列数据相同字母表示无显著差异,不同字母表示数据间存在显著差异。

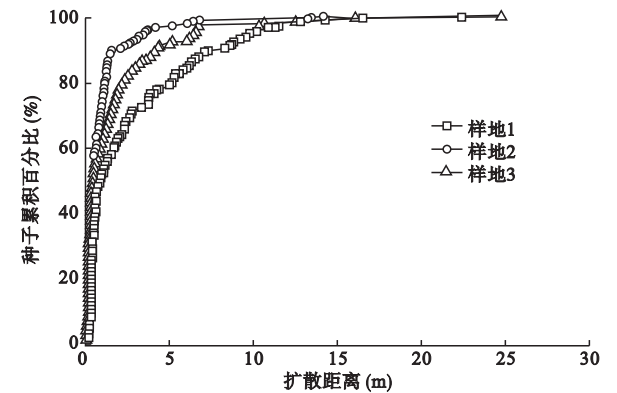


图 2 不同干扰强度样地中苦槠种子的扩散距离
Fig. 2 Seed dispersal patterns of *Castanopsis sclerophylla* plots of different disturbance intensity

(y)与扩散距离(x)间分别存在如下关系: $y = \exp(-0.593/x)$ ($R^2 = 0.932$)、 $y = \exp(-0.321/x)$ ($R^2 = 0.981$)、 $y = \exp(-0.362/x)$ ($R^2 = 0.962$),均达到显著程度,但 3 个回归方程间没有显著差异($P>0.05$) (图 2)。

苦槠种子平均扩散距离为 1.03 m (样地 2) ~ 2.75 m (样地 1),其中干扰程度中等的 2 号样地与干扰较小的 3 号样地间,种子扩散距离没有显著差异($P=0.072$),但均显著小于干扰程度较大的 1 号样地($P<0.001$)。3 号样地种子的最大扩散距离与 1 号和 2 号样地都没有显著差异,但 1 号和 2 号样地间存在显著差异($P=0.028$)。

饱满种子与虫蛀种子的被就地取食与搬运后取食在 3 个样地中没有显著差异,所有被贮藏的种子都是饱满种子。尽管不同样地中饱满种子与虫蛀种子的中位扩散距离在 3 个样地中均无显著差异,但 3 个样地中饱满种子的最大扩散距离均显著大于虫蛀种子的($P<0.05$);除 2 号样地中饱满种子与虫蛀种子的平均扩散距离没有显著差异外,1 号和 3 号样地中,饱满种子的平均扩散距离均显著大于虫蛀种子的($P<0.01$)。

3 讨论

淳安地区报道的啮齿动物包括社鼠 (*Niviventer confucianus*)、针毛鼠、青毛鼠 (*Berylmys bowersi*)、中华姬鼠 (*Apodemus draco*)、白腹巨鼠 (*Leopoldamys edwardsi*)、黑腹绒鼠 (*Eothenomys melanogaster*) 等 (赵庆洋等,2009)。从就地取食和搬运后被取食种子残片上的咬痕以及分散贮藏的特征来看,全部是啮齿动物所为,但本研究中啮齿动物的捕获率较低,仅为 0.02 只·笼⁻¹·d⁻¹,且均为针毛鼠。较低的啮齿类捕获率可能与捕获时机有关,为避免影响种子取食和扩散的估算,本文在种子扩散完毕后才开始啮齿动物数量的估算,此时,啮齿动物已取食或贮存了较多的种子,因而可能降低对种子的寻觅。这也可从种子命运得到部分支持,本次调查中约 1/2 的种子命运未知,这些种子可能被贮存起来,维持啮齿动物度过食物短缺的冬季。若在种子扩散实验前或实验中捕获啮齿动物来估算密度,则会干扰啮齿动物的取食,影响对种子取食和扩散的估算。如何取舍这 2 方面的误差取决于研究者所关注的问题。总体而言,在种子取食和扩散实验之后进行研究能够较好地估算取食和扩散速率、距离等信息;同时,取食和扩散速率等也能部分反映种子取食动物的密度,弥补后期估算中的误差。

尽管捕获的啮齿动物数量不多,但种子被取食/搬运的速度很快,3 个样地中所有的种子均在 2 d 内完全被取食或搬离放置点,表明该地区啮齿动物对苦槠种子取食的压力十分大。啮齿动物对壳斗科植物种子的快速取食在我国亚热带、温带地区都有报道 (王巍等,2000; Lu & Zhang, 2004; 李宏俊等,2006; 张天澍等,2006),说明啮齿动物在我国亚热带和温带森林更新中起着重要作用。啮齿动物捕获率低,但种子被取食或移出速率快的另一个原因是鸟类可能也参与了种子取食和扩散,这在其他壳斗科植物种子扩散中已有报道 (王巍和马克平,1999; Wang et al., 1999; 马杰等,2004)。在本研究地区也存在取食坚果的鸟类,如松鸦 (*Garrulus glandarius*)、环颈雉 (*Phasianus colchicus*) 等 (李必成,2007),但鸟类的取食所占比重不大,尤其是本研究中极短时间内的取食。本研究也提示在种子取食和扩散中应考虑鸟类的作用,应当通过适当实验设计,分辨啮齿动物和鸟类,甚至蚂蚁等动物在种子取食和扩散中的作用。

样地2的干扰程度介于样地1和样地3之间,但样地1与样地3在种子被食和扩散方面似乎更接近,而与样地2存在较大(甚至为显著)差异。样地2中苦槠种子具最高的就地取食比例,种子平均扩散距离、中位扩散距离和最大扩散距离都最小,且与其他2个样地差异显著(表1)。这一现象与随干扰强度增加,相关参数可能呈现梯度变化的设想不一致,其原因可能与啮齿动物面临的捕食风险有关。啮齿动物的取食行为受捕食者压力影响,在食物的发现点就地取食,会增大被捕食的风险,因此在高风险环境中,啮齿动物往往减少就地取食的比例(王中磊和高贤明,2006),将种子搬运到较远的地方较隐蔽的环境取食或者贮藏(Lima & Dill, 1990; Leaver, 2004)。

本研究中,伴随干扰带来的影响啮齿动物取食压力格局存在差异。人为干扰较大的样地1离村庄较近,人类活动以及家养动物(如猫、狗等)对啮齿动物和野生肉食动物(如蛇类、臭鼬等)影响较大,进而影响啮齿动物的取食行为。而干扰最轻的样地3位于大面积森林的核心地带,处于食物链更高层次的啮齿动物天敌(蛇类、臭鼬等)可能相对较丰富,对啮齿动物产生较大的捕食压力。有研究表明,越接近食物链顶端的物种对生境片断化越敏感,更容易从片断生境中消失(Lopez & Terborgh, 2007),这一现象部分支持了本研究中观察到的现象。因此,尽管样地1和样地3影响啮齿动物取食行为的因素不同,但对啮齿动物的取食和搬运种子的行为带来相似的后果。

种子质量也可能影响啮齿动物的取食和扩散行为。尽管有人认为小型啮齿动物不具备鉴别种子好坏的能力(Semel & Andersen, 1988),但不少研究确实观察到与种子饱满程度相关的取食和扩散差异。Stele等(1996)发现,啮齿动物可以鉴别饱满与虫蛀种子,并倾向于搬运和贮藏饱满种子,而虫蛀种子多被就地消耗;肖治术等(2003)的研究也支持了上述观点。本研究中,虫蛀种子就地取食的比例在各生境中都没有显著差异,但被贮藏的种子全部为饱满种子,与以前研究结果相符;3个样地中,饱满种子与虫蛀种子的中位扩散距离都没有显著差异,但饱满种子的最大扩散距离都大于虫蛀种子,且样地1和样地3中饱满种子的平均扩散距离显著大于虫蛀种子,这些结果支持啮齿动物对饱满和虫蛀种子具有分辨能力的观点。

壳斗科植物种子大、富含淀粉,是啮齿动物秋冬季节的主要食物来源之一,而啮齿动物的强度取食影响壳斗科植物的更新,二者间长期的协同进化形成了不同的适应特征,例如,在壳斗科植物中存在较普遍的大小年结实现象就是对动物取食和扩散种子适应方式之一(Kelly & Sork, 2002)。这种种子取食与扩散关系及其变化也可能带来不同的生态效应,苦槠种子在干扰较大森林中被搬运的距离相对较远,有利于苦槠在干扰生境中分布范围的扩大,这可能是常绿阔叶林受损后次生恢复过程中,苦槠往往是最先形成的常绿阔叶林或常绿、落叶阔叶混交林优势种的重要原因之一。

致谢 承华东师范大学环境科学系祝龙彪教授鉴定啮齿类种类,苗苑、高邦权、高大伟、艾斌等协助野外实验和调查,德国 Helmholtz Centre for Environmental Research 的 Miao-miao Shi 修改摘要,谨此感谢。

参考文献

- 李必成. 2007. 千岛湖岛屿鸟类多样性格局与海南鵝繁殖生态学研(博士学位论文). 杭州: 浙江大学.
- 李宏俊, 张洪茂, 张知彬. 2006. 鼠类对辽东栎橡子的搬运. 兽类学报, **26**(1): 8-12.
- 马杰, 李庆芬, 孙儒泳, 等. 2004. 啮齿动物和鸟类对东灵山地区辽东栎种子丢失的影响. 生态学杂志, **23**(1): 107-110.
- 王巍, 马克平, 高贤明. 2000. 东灵山地区脊椎动物对辽东栎坚果捕食的时空格局. 植物学报, **42**(3): 289-293.
- 王巍, 马克平. 1999. 岩松鼠和松鸦对辽东栎坚果的捕食和传播. 植物学报, **41**(10): 1142-1144.
- 王中磊, 高贤明. 2006. 啮齿动物对锐齿槲栎坚果的取食模式及坚果命运. 生态学报, **26**(11): 3533-3541.
- 吴征镒. 1980. 中国植被. 北京: 科学出版社.
- 肖治术, 张知彬, 王玉山. 2003. 啮齿动物鉴别虫蛀种子的能力及其对坚果植物更新的潜在影响. 兽类学报, **23**(4): 312-320.
- 肖治术, 张知彬. 2006. 金属片标签法: 一种有效追踪鼠类扩散种子的方法. 生态学杂志, **25**(10): 1292-1295.
- 徐高福. 2003. 千岛湖常绿阔叶林主要树种及其景观效果的研究. 中南林业调查规划, **22**(2): 61-62.
- 张天澍, 李恺, 王群, 等. 2006. 浙江天童山鼠类对栲树种子的捕食和扩散. 生态学杂志, **25**(2): 161-165.
- 赵庆洋, 鲍毅新, 孙波. 2009. 千岛湖岛屿小型兽类群落分布格局及其影响因素. 动物学研究, **30**(6): 671-678.
- 赵雪峰, 路纪琪, 乔王铁, 等. 2009. 生境类型对啮齿动物扩散和贮藏栓皮栎坚果的影响. 兽类学报, **29**(2): 160-166.
- Bertin N. 2005. Analysis of the tomato fruit growth response to

- temperature and plant fruit load in relation to cell division, cell expansion and DNA endoreduplication. *Annals of Botany*, **95**: 439–447.
- Forget PM, Vander Wall SB. 2001. Scatter-hoarding rodents and marsupials: Convergent evolution on diverging continents. *Trends in Ecology & Evolution*, **16**: 65–67.
- Kelly D, Sork VL. 2002. Mast seeding in perennial plants: Why, how, where? *Annual Review of Ecology and Systematics*, **33**: 427–447.
- Leaver LA. 2004. Effects of food value, predation risk, and pilferage on the caching decisions of *Dipodomys merriami*. *Behavioral Ecology*, **15**: 729–734.
- Lima SL, Dill LM. 1990. Behavioral decision made under the risk of predation: A review and prospectus. *Canadian Journal of Zoology*, **68**: 619–640.
- Lopez L, Terborgh J. 2007. Seed predation and seedling herbivory as factors in tree recruitment failure on predator-free forested islands. *Journal of Tropical Ecology*, **23**: 129–137.
- Lu JQ, Zhang ZB. 2004. Effects of habitat and seasons on hoarding and dispersal of seeds of wild apricot (*Prunus armeniaca*) by small rodents. *Acta Oecologica*, **26**: 247–254.
- Pickett STA, White PS. 1985. The Ecology of Natural Disturbance and Patch Dynamics. New York: Academic Press.
- Price MV, Waser NM, McDonald S. 2000. Seed caching by heteromyid rodents from two communities: Implications for coexistence. *Journal of Mammalogy*, **81**: 97–106.
- R Development Core Team. 2009. R: A language and environment for statistical computing. Vienna, Austria: R Foundation for Statistical Computing.
- Semel B, Andersen DC. 1988. Vulnerability of acorn weevils (Coleoptera: Curculionidae) and attractiveness of weevils and infested *Quercus alba* acorns to *Peromyscus leucopus* and *Blarina brevicauda*. *American Midland Naturalist*, **119**: 385–393.
- Sork VL. 1984. Examination of seed dispersal and survival in red oak, *Quercus rubra* (Fagaceae), using metal-tagged acorns. *Ecology*, **65**: 1020–1022.
- Steele MA, Hadj-Chikh LZ, Hazwltine J. 1996. Caching and feeding decisions by *Sciurus carolinensis*: Responses to weevil-infested acorns. *Journal of Mammalogy*, **77**: 305–314.
- Terborgh J, Lopez L, Nunez P, et al. 2001. Ecological meltdown in predator-free forest fragments. *Science*, **294**: 1923–1926.
- Thapa S, Chapman DS. 2010. Impacts of resource extraction on forest structure and diversity in Bardia National Park, Nepal. *Forest Ecology and Management*, **259**: 641–649.
- Wang BC, Smith TB. 2002. Closing the seed dispersal loop. *Trends in Ecology & Evolution*, **17**: 379–385.
- Wang W, Ma KP, Liu CR. 1999. Removal and predation of *Quercus liaotungensis* acorns by animals. *Ecological Research*, **14**: 225–232.
- Xiao ZS, Chang G, Zhang ZB. 2008. Testing the high-tannin hypothesis with scatter-hoarding rodents: Experimental and field evidence. *Animal Behavior*, **75**: 1235–1241.
- Xiao ZS, Zhang ZB, Wang YS. 2005. Effects of seed size on dispersal distance in five rodent-dispersed Fagaceous species. *Acta Oecologica*, **28**: 221–229.

作者简介 刘 滨,男,1985年生,硕士研究生。主要从事恢复生态学与生态监测研究。E-mail: akesuhe@163.com

责任编辑 刘丽娟
