文章

奥地利林地经营收益的干扰效应

Petri P. Kärenlampi [1]*

[1] Lehtoi Research，芬兰* 通信作者：
petri.karenlampi@professori.fi

摘要： 本文运用概率论分析严重干扰对多年生林分中林木收成资本回报率的影响。本文讨论两种经营制度：一是同龄林木的轮伐，二是异龄半稳态。干扰的影响似乎有双重作用，既影响收益，也影响资本化。本文使用一项近期发表的研究数据，展示了奥地利云杉（欧洲云杉）森林的相关结果。本文的经济结果与该数据来源论文的结论不同，表明连续覆盖林业在经济上不如轮伐林业。任何严重干扰都可能引发从连续覆盖林业向同龄林业的制度转变。如果不接受这种制度转变，干扰损失会降低利润，但不会影响资本化，因此连续覆盖林业在财务上对干扰更为敏感。碳租收益有利于碳储量较高的经营制度。本文介绍的方法可应用于任何数据集，不受地点和树种限制。

关键词： 毛利润；资本化；资本回报率；期望值；概率密度。

简介

近期，干旱和树皮甲虫的共同作用导致中欧森林进行了大规模灾后采伐 [1, 2, 3]。长期干旱也导致野火风险增加 [4, 5, 6]。此外，风倒木和树皮甲虫的共同作用也造成了毁灭性影响 [7, 8]。然而，一份欧洲报告显示，从2000年到2015年，虫害和野火有所减少，而雪害和风害有所增加 [9]。在比较不同种类的经营制度时，显然值得考虑这类林分替代性干扰。

森林林分遭受的严重干扰通常由多种因素共同引发，例如干旱、火灾、风、雪、山体滑坡、洪水、火山喷发、昆虫、病原体，有时还有哺乳动物 [10, 11, 12, 13, 14, 15, 16, 17]。并非所有大规模干扰都需要导致林分更替 [18, 19]。不同年代的风害率可能存在显著差异 [20]。一些作者认为，移除数个百分点树干体积的死亡事件属于

灾难性的，并表现为与背景死亡率 [21, 22] 的相互作用。在北方林区，主要的林分替代性干扰是火灾，其自然重现间隔为数十年或数百年 [23, 24, 25, 26, 27, 参见 28]。风倒的重要性似乎随着向温带推进而增加，且常与树皮甲虫相互作用 [29, 30, 8, 31, 32]。林分替代性干扰之间的间隔延长似乎会导致林隙更新 [33, 18, 34,35, 25, 19, 36, 37, 38]。不同机制往往分别控制林隙形成和林隙扩展[25]。

系统从任何干扰中恢复的速率自然取决于干扰的类型。在林分间伐（非林分替代性干扰）的背景下，蓄积量损失在密度相对较低的幼龄林分中恢复得最快，同时也受降水和温度的影响 [39]。

另一个问题是发生干扰时的财务表现。多项研究从树干数量的角度探讨森林树木的死亡情况 [40]。然而，忽略枯死树木的大小会降低此类研究的适用性；从林分价值和林分生产力的角度来看，由种内竞争导致的单株树木死亡主要发生在小径木以及生长速率缓慢的树木中 [41, 42, 43, 19, 44, 45, 46, 47, 48, 49, 50, 51, 52, 15, 53]。不过，不同树种的主要死亡因素各不相同 [54, 55, 56, 57, 53, 58]。随着树木尺寸增大，物理性死亡驱动因素似乎会增加，而生物因素的影响则会减弱 [35, 59]。枯死树木可能仍然直立，也可能已经倒下，其位置分布也可能呈聚集状 [37, 60]。林分老化似乎会提高其对干扰的敏感性 [61, 62, 63, 64]。然而，与老龄森林和大树相比，幼龄森林和小树似乎对高温和干旱更敏感 [65, 66, 67]。另一方面，不利天气条件可能产生长期影响，并可能与病原体、昆虫和竞争相互作用 [68, 13, 48, 45, 69, 70, 71, 72, 73]。有人提出，功能过程的瓦解可能是其因果解释 [74]。热气流比温和的气流更致命 [75]。一些观测表明，低温会导致死亡 [67]。森林林分可观测指标与种群动态过程之间的关系会随时间变化，这可能是由于气候变化所致 [76, 11, 12, 30, 77, 69, 78, 79]。

严重的非预期干扰可能需要，也可能不需要通过新的幼苗进行培育。如果在连续覆盖林业中确实需要培育，则至少会暂时转变为同龄林业。在同龄轮伐林业中，再生性扰动不会引发任何制度转变。然而，林木收成可能全部或部分损失。

从再生性扰动中恢复所需的时间可以如下处理。在轮伐林业中，已发生的更新干扰的恢复时间期望值为

$$\langle RT \rangle = \int_{0}^{\tau} k(a) a da \qquad (1),$$

其中，$k(a)$ 是在轮伐期内发生更新干扰的概率密度τ 。在更新干扰均匀分布的情况下，恢复时间的期望值将趋近于轮伐期的一半；其他类型的分布也同样可行 [61, 62, 2]。

Knoke 等人 [80] 的图 5a 表明，发生更新干扰后，连续覆盖林业恢复到半稳态至少需要 60 年，这相当于同龄林经营中的一个完整轮伐周期。

财务表现确实是另一个主题。Knoke 等人 [80] 的图 5a 表明，随着接近半稳态，连续覆盖林业的财务表现会恶化。相应地，恢复时间与财务表现没有任何直接关系，这里的财务表现是以资本回报率来衡量的。

森林的经济价值由 Knoke 等人 [80] 给出，即

$$C(b) = \int_{b}^{\infty} \frac{dR}{dt} \exp(-rt) dt \quad (2),$$

其中，表示毛利润的时间率，r 为贴现率，b 为当前时点。这种对经济价值的估计在很大程度上取决于贴现率。另一个复杂因素是，毛利率不仅随时间变化，还会受到多种因素影响，包括林龄。可以通过对林分年龄分布上的毛利率进行积分，得出期望值，从而克服后一个复杂因素。

$$\left\langle \frac{dR}{dt} \right\rangle (b) = \int_{0}^{\tau} p(a) \frac{dR}{dt} da \quad (3),$$

其中，a 为林分年龄，$p(a)$ 为其概率密度，τ 为轮伐年龄。

在此阶段，贴现率 r 尚未知。然而，在发达市场中，森林价值 C 已知为市场价值。随后，可根据公式 (2) 轻松求得贴现率的期望值，

$$\langle r \rangle (b) = \frac{\left\langle \frac{dR}{dt} \right\rangle (b)}{\langle C \rangle (b)} \quad (4),$$

此时，它获得了在时间 b 的期望资本回报率的解释。这种期望资本回报率可以通过概率密度函数的坍缩应用于单个林地地块。另一方面，由于它是根据林地资产的市场价值确定的，因此可以将其视为市场上的资本回报率要求。

在本文的其余部分，我们将运用概率论，推导讨论林分替代性干扰对预期资本回报率影响的方法。这个问题并非简单，因为干扰既会影响毛利率（式（3）），也会影响资本化（式（2））。我们将推导出具有普适性的方法；不过，本文将使用 Knoke 等人 [80] 最近发表的研究中的数据，给出奥地利两种云杉林经营制度的相关结果。本文讨论的两种经营制度是

- 具有人工更新的同龄林业——具有不均龄林结构的连续覆盖林业

结构。

值得注意的是，此处讨论的连续覆盖林业不同于 Knoke 等人 [80] 所讨论的部分采用人工更新、部分采用天然更新的延长轮伐期制度。

材料与方法

导致作物损失的再生性扰动会产生财务影响。式（3）中出现的林分年龄概率密度显然会受到影响，而且影响的不仅是毛利率，还有资本化。式（4）中出现的资本化预期价值自然可以写成

$$\langle C \rangle = \int_{0}^{\tau} p(a) C da \quad (5).$$

那么，若将$p(a)$视为不存在更新干扰时的林分年龄概率密度，则存在干扰时的概率密度变为

$$p'(a) = p(a), if\ \frac{dM}{dt} = 0$$

$$p'(a) = \frac{\frac{dM}{dt}\exp(-a\frac{dM}{dt})}{1-\exp(-\tau\frac{dM}{dt})}, if\ \frac{dM}{dt} > 0 \qquad (6),$$

where $\frac{dM}{dt}$ is the rate of regenerating disturbance density, $\exp(-a\frac{dM}{dt})$ is the 林分存活至年龄a的概率，而( ) $\left[1- \quad -\tau \quad \right]\frac{dM}{\exp(\ )dt\ dMp\ a\ dt}$是概率密度归一化因子。若将未受干扰的林分年龄概率密度( )pa 视为常数（对应于林分年龄均匀分布），则归一化因子可写成如下形式。将式（6）代入式（3）和式（5），再进一步代入式（4），即可直接处理干扰的影响。

一个问题是，上述方程是否适用于连续覆盖林业。式（2）、（3）、（4）和（5）确实适用，但作为参数的轮伐期τ 值得进一步讨论。在半稳态连续覆盖林业中，实际采用的轮伐期对应于采伐轮伐期，而非树木生命周期。式（1）和式（6）讨论的是更新干扰。在连续覆盖林业中，任何更新干扰都会导致经营制度暂时改变，至少在通过培育辅助更新的情况下如此。

然而，假设干扰是分散发生的，且不会通过培育得到补偿，则可以将更新干扰密度dM dt 这一速率应用于连续覆盖林业。此时可以假设，从毛利率中扣除干扰损失率$dM\ Cdt$ ，从而得到受干扰影响的毛利率

$$\left(\frac{dR}{dt}\right)' = \frac{dR}{dt} - \frac{dM}{dt}C \qquad (7).$$

这里假设，在$dR\ dM\ Cdt\ dt \geq$ 成立的情况下，任何干扰都只会降低毛利率，而不会影响连续覆盖经营制度下的资本化。

接下来，我们来看 Knoke 等人 [80] 近期发表的研究，以明确奥地利云杉林的典型输入变量。首先，[80] 的表2显示，更新费用为 2000 欧元/公顷。[80] 的图5显示，裸地价值为 10000 欧元/公顷，树木在 60 年树龄时的价值为 18000 欧元/公顷。在这一范围内，该图得出的资本化预期价值为 21000 欧元/公顷。关于连续覆盖林业，图5a显示，半稳态下的资本化价值为 24000 欧元/公顷。表2显示，半稳态下的毛利率为 154 欧元/(公顷*a)。

Knoke 等人[80] 的出版物未说明木材蓄积量或 CO_2的储存量。鉴于不同经营制度之间资本化期望值相差 3000 欧元/公顷，可以估算木材蓄积量差异约为 50 m^3/ha。

在同龄轮伐林业经营制度下，毛利率的期望值自然可通过公式 (3) 得出，而资本化的期望值则依据公式 (5) 得出。

结果

图1显示了两种经营模式下，资本回报率期望值随干扰密度率$dM\ \ dt$ 变化的情况。在没有干扰的情况下，同龄轮伐林业的资本回报率是连续覆盖林业的两倍。连续覆盖林业对干扰的敏感度高得多，因为预期年度损失会根据式（7）直接降低毛利润：在图1所示的干扰密度范围内，干扰使预期毛利润最多降低86%，资本回报率也相应降低。在同龄轮伐林业中，干扰对资本回报率期望值的影响要温和得多，图1中仅降低了20%。

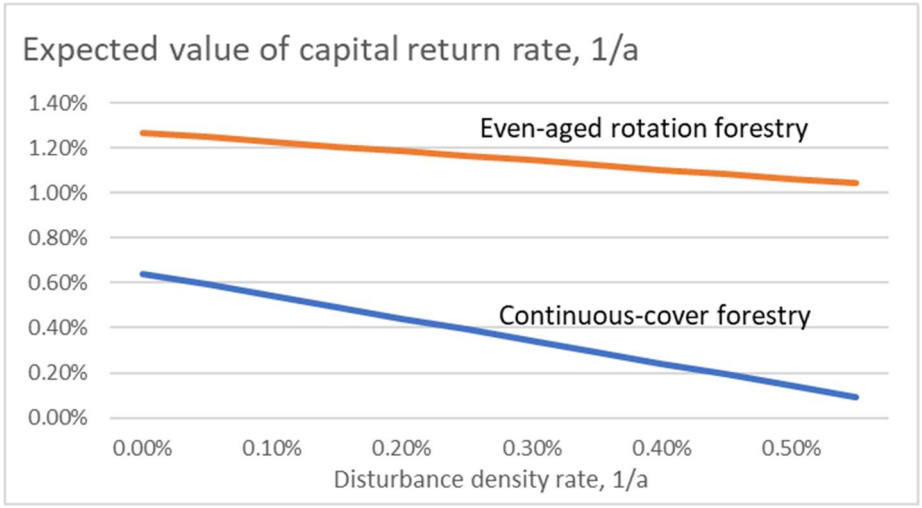

图1. 干扰对两种机制下资本回报率期望值的影响。

讨论

根据公式（7），干扰对连续覆盖林业财务状况的影响相当简单，而同龄轮伐林业的情况则更值得深入讨论，其中涉及毛利率、资本化、单个林分存活概率以及林分年龄概率密度的变化。

图2显示，根据公式（5），资本化略有下降。资本回报率最多降低18%，毛利率最多降低20%。根据公式（4），资本回报率与毛利率的变化之差源于资本化的变化。

有趣的是，干扰造成的最大变化体现在林分存活至最终采伐的存活概率上，降幅最多达28%（图2）。考虑到正收益仅来自最终采伐（参见[80]中的图5），人们可能会问，为什么毛利率受到的影响不像林分存活概率那么大。答案自然在于林分年龄的概率密度。

在图3中，即使单个林分的存活概率降低了28%，成熟林分的出现密度也仅降低了16%。造成这一差异的原因是，随着干扰的发生，新建林分的概率密度增加了17%。相应地，每年更新的林分数量更多。成熟林分的概率密度可以通过以下方式验证：将新更新林分的概率密度乘以存活概率。

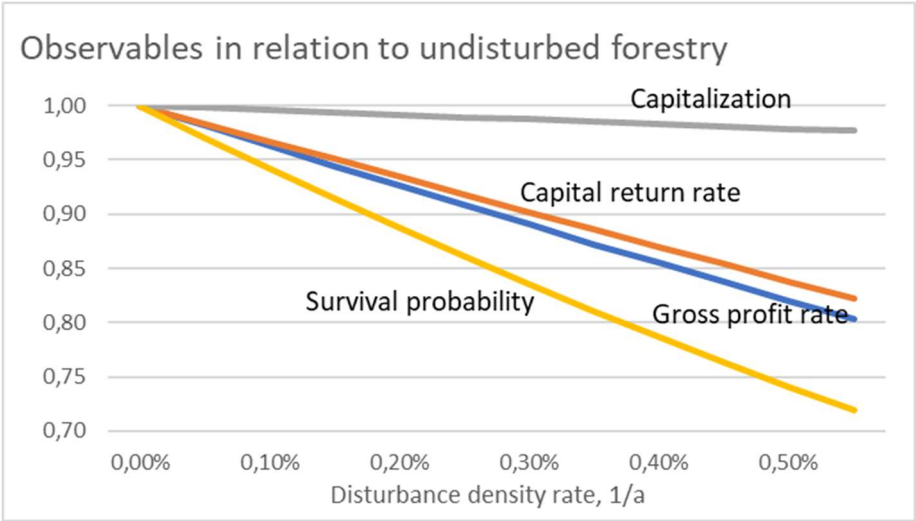

图2。干扰对同龄轮伐林业中的资本化、资本回报率、毛利率和存活概率的影响。

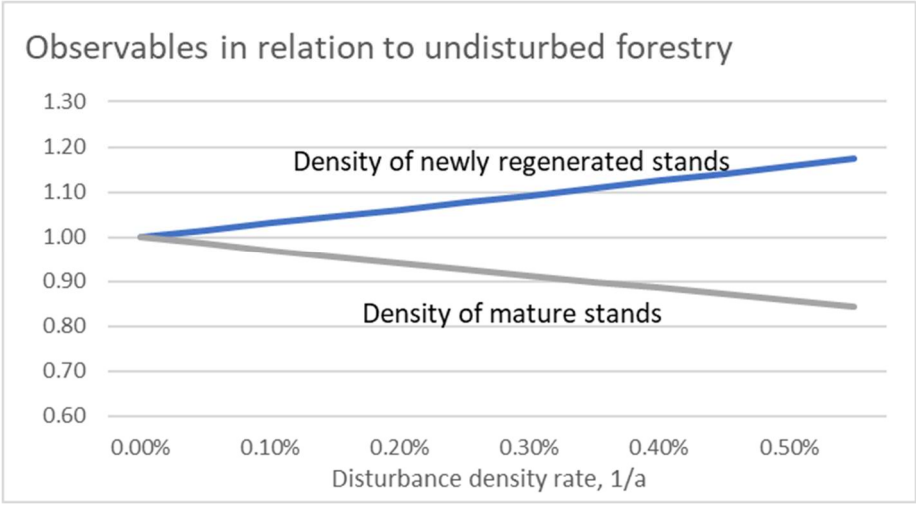

图3。干扰对新更新林分和达到采伐成熟的林分的表观密度变化的影响。

值得探讨的一个问题是这两种经营制度在碳封存和储存方面的适用性。在 Knoke 等人[80], 所描述的两种实施方案中，连续覆盖林业的半稳态具有更高的资本化程度和更大的木材蓄积，相较之下，轮伐林业中的期望值则较低。较高的木材蓄积（或碳储量）可以通过碳租获得补偿。假设每公顷额外增加50吨碳储量，并按照2欧元/（吨·年）的标准获得碳租补偿，那么连续覆盖林业的年收入将增加100欧元/公顷。这部分额外收入将提高连续覆盖林业的资本回报率，并使图1发生变化，如图4所示。研究发现，资本

连续覆盖林业（CCF）的收益率仍低于轮伐林业（RF），且对干扰仍然更加敏感。显然，可以通过轮伐林业来提高碳储量。然而，关于这一尝试的具体细节超出了本研究的范围。

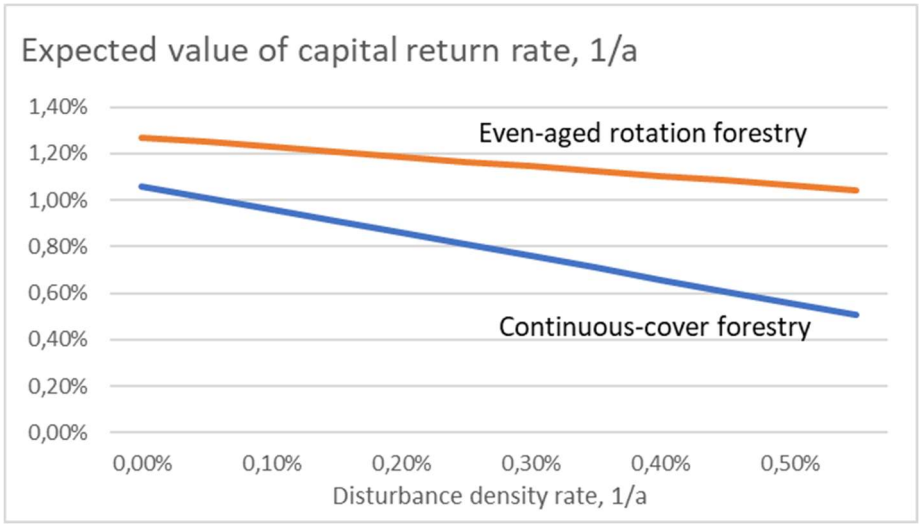

图4. 当连续覆盖林业（CCF）较高的碳储量以每公顷每年100欧元的碳租予以补偿时，干扰对两种经营制度资本回报率期望值的影响。

目前的处理极为简化。首先，或许有人会问，将未受干扰森林的林分年龄概率密度( )pa视为常数，是否会造成偏差。严格来说，恒定性对应于假设森林具有正常林结构 [81]。然而，这一假设并非必要；任何单个林分都可以在任一轮伐周期内的随机时刻被观察到，对应于恒定的林分年龄概率密度 [82, 83]。另一方面，上述方法允许任何分析者使用适当的林分年龄概率密度重复这一过程。

其次，或许有人会问，假设更新干扰密度率$dM\ \ dt$相对于林分年龄为常数，会带来什么后果。众所周知，森林会随着林分年龄增长而更易受到干扰 [61, 62, 63, 64]。然而，此处采用的轮伐年龄可能不足以使这类影响显现。同样，欢迎任何分析者代入所需的随年龄变化的干扰率。

第三个问题是如何定义“更新干扰”。与此密切相关的是最终可能获得的灾后采伐收入。在公式（6）中，更新干扰会使局部林分年龄归零，并产生更新费用。任何灾后采伐收入都未计入。实际上，灾后采伐往往会带来收入。另一方面，有些干扰并不会导致更新。之所以可以直接忽略灾后采伐收入，是因为这种做法弥补了未计入的、由非更新干扰造成的损失。连续覆盖林业也是如此：未计入的灾后采伐收入弥补了未通过采伐挽回的非更新性损害。

不能保证本研究所用数据能够代表奥地利的云杉林。特别是，连续覆盖林业半稳态下出现的交叉利润和资本化是否可持续，尚存疑问 [84, 85]。必须认识到，此处所用数据描述的是一个示例案例。上述方法可直接应用于任何可获得的、对应不同经营制度的交叉利润和资本化数据集。

关于发生干扰时财务韧性的结果，与 Knoke 等人 [80]的研究截然不同。一个显而易见的原因是，本文的分析纯粹着眼于财务层面，而 Knoke 等人 [80] 则采用了经济标准与时滞标准相结合的方法。另一个主要区别是，本文讨论的是将连续覆盖林业作为一种经营制度，而非采用延长轮伐期，并结合部分人工更新和部分天然更新。

结论

本文根据概率论，制定了评估严重干扰对生长林木收成的多年生林分造成的财务后果的方法。文中讨论了两种经营制度：一方面是同龄林木的轮伐，另一方面是异龄半稳态。任何干扰的影响似乎都有双重作用，既影响收益，也影响资本化。文中使用一项近期发表的研究中的数据，展示了研究结果；该研究涉及奥地利的云杉（欧洲云杉）森林。经济结果与原论文中呈现数据时的结论不同：本文显示，连续覆盖林业在财务上不如轮伐林业。任何严重干扰都可能引发从连续覆盖林业向同龄林业的制度转变。如果不接受这种制度转变，干扰损失会减少利润，但不会影响资本化，因此连续覆盖林业在财务上对干扰更加敏感。以碳租形式计算的收入有利于碳储量较高的经营制度。本文介绍的方法可应用于任何数据集，不受地点和树种的限制。

资助：本研究部分由 Niemi 基金会资助。**数据可用性声明：** 所用数据集已在上文引用的早期论文中介绍。

e.

利益冲突：作者声明不存在利益冲突。

参考文献

1. Jakoby O, Lischke H, Wermelinger B（2019）气候变化改变了欧洲云杉小蠹（Ips typographus）的海拔分布物候模式。《全球变化生物学》25:4048- 4063 2. Netherer S, Panassiti B, Pennerstorfer J, Matthews B（2019）急性干旱是奥地利挪威云杉林分中小蠹虫侵染的重要驱动因素。《森林与全球变化前沿》2。 3. Lindner M, Verkerk H（2022）气候变化对欧盟森林产生了怎样的影响？未来可能会发生什么？欧洲森林研究所, https://efi.int/forestquestions/q4，访问于2022年11月21日。 4. Fernandes PM（2019）葡萄牙大规模火灾所对应的加拿大火险天气指数阈值变化。《森林》10:838。 5. Moreira F, Ascoli D, Safford H 等（2020）地中海型地区的野火管理：亟需范式转变。《环境研究快报》15 011001。 6. San-Miguel-Ayanz J, Moreno JM, Camia A（2013）欧洲地中海景观中大型火灾分析：经验教训与展望。《森林生态与管理》294:11-22 7. Thom D, Seidl R, Steyrer G, Krehan H, Formayer H（2013）中欧森林生态系统自然扰动制度的缓慢与快速驱动因素，《森林生态与管理》307:293-302 https://doi.org/10.1016/j.foreco.2013.07.017。

8. Økland B, Nikolov C, Krokene P, Vakula J（2016）从风倒木驱动转变为斑块驱动的欧洲云杉小蠹（Ips typographus）暴发动态，《森林生态与管理》363:63-73 https://doi.org/10.1016/j.foreco.2015.12.007。 9. FOREST EUROPE（2020）《2020年欧洲森林状况》。 https://foresteurope.org/state-of-europes-forests/10. Turner MG, Dale VH（1998）比较大型、低频干扰：我们学到了什么？《生态系统》1:493–496 11. Williams AP, Allen CD, Millar CI 等（2010）美国西南部干旱与高温加剧背景下的森林响应。《美国国家科学院院刊》107:21289–21294 12. Cansler CA, McKenzie D（2014）气候、火灾规模和生物物理环境决定了美国喀斯喀特山脉北部的火灾严重程度及空间格局。《生态学应用》24:1037–1056。 13. Allen CD, Macalady AK, Chenchouni H 等（2010）。全球概述：干旱和高温导致的树木死亡揭示了森林面临的新兴气候变化风险。《森林生态与管理》259:660–684 https://doi.org/10.1016/j.foreco.2009.09.00114. Barbeito I, Dawes MA, Rixen C 等（2012）。驱动林线树木死亡和生长的因素：一项历时30年、涉及92 000株针叶树的实验。《生态学》93(2):389–401 http://dx.doi.org/10.1890/11-0384.115. Das AJ, Stephenson NL, Davis KP（2016）树木为何死亡？背景树木死亡的驱动因素特征。《生态学》97:2616–2627 https://doi.org/10.1002/ecy.149716. Jactel H, Bauhus J, Boberg J 等（2017）树木多样性增强林分抵御自然干扰的能力。《当代林业报告》3:223–243。 https://doi.org/10.1007/s40725-017-0064-117. Reilly MJ, Spies TA（2016）干扰、树木死亡及其对太平洋西北地区当代区域森林变化的影响，《森林生态与管理》374:102-110 18. Caron, MN, Kneeshaw DD, De Grandpré L, Kauhanen H, Kuuluvainen T（2009）芬诺斯堪的亚北部老龄欧洲云杉林分的林冠空隙特征与干扰动态：森林是否处于准平衡状态？《芬兰植物学年刊》第46卷（4）：251-262 19. Fraver S, Jonsson BG, Jonsson M, Esseen P（2008）北方森林老龄欧洲云杉林的种群动态与干扰历史。《植被科学杂志》19:789–798。 20. Buchman RG, Pederson SP, Walters NR（1983）一种树木存活模型及其在五大湖地区树种中的应用。《加拿大森林研究杂志》13:601-608。 21. Lugo AE, Scatena FN（1996）热带湿润林、潮湿林和雨林中的背景树木死亡与灾难性树木死亡。《生物热带》28:585–599 22. Csilléry K, Seignobosc M, Lafond V, Kunstler G, Courbaud B（2013）在贝叶斯状态空间模型中结合定期清查数据与采伐报告，估算长期树木死亡率时间序列。《森林生态与管理》292:64–74https://doi.org/10.1016/j.foreco.2012.12.02223. Whitney GG（1986）密歇根州殖民定居前松林与基质及干扰历史的关系。《生态学》67:1548–1559 24. Pitkänen A, Huttunen P, Tolonen K, Jugner H（2003）芬兰Ulvinsalo严格自然保护区云杉优势林的长期火灾频率。《森林生态与管理》176: 305–319 25. Worrall JD, Lee TD, Harrington TC（2005）美国新罕布什尔州克劳福德峡谷欧洲云杉林中引发并扩展林冠空隙的森林动态与驱动因素。《生态学杂志》93:178–190 26. Senici D, Chen HYH, Bergeron Y, Cyr D（2010）中部北方森林火灾频率的时空变化。《生态系统》13:1227– 1238 27. Wallenius TH, Pitkänen A, Kuuluvainen T, Pennanen J, Karttunen H（2005）无人管理的欧洲云杉林的火灾历史与林龄分布——欧洲云杉晚期演替优势景观中树木死亡的对比模式。《加拿大森林研究杂志》35:1540–1552

<escape>28. Mast JN, Veblen TT (1994) 一种研究树木死亡模式的树木年轮年代学方法。《自然地理学》15:529–542 29. Annila E, Petäistö R-L (1978) 1975年12月风暴后芬兰西部风倒树木遭受的昆虫侵袭。《芬兰森林研究所通讯》94. 24页 30. Seidl R, Schelhaas M-J, Rammer W, Verkerk PJ (2014) 欧洲森林扰动的增加及其对碳储存的影响。《自然气候变化》4:806-810 31. Zhang Q, Pregitzer KS, Reed DD (1999) 密歇根州上半岛欧洲定居前森林中的灾难性扰动。《加拿大森林研究杂志》29:106–114 32. Seischab FK, Orwig D (1991) 纽约州西部欧洲定居前森林中的灾难性扰动。《托里植物学会公报》118:117-122 33. Hofgaard A (1993) 瑞典北方云杉原始林50年来的变化。《植被科学杂志》4:773–782 34. Syrjänen K, Kalliola R, Puolasmaa A, Mattson J (1994) 俄罗斯欧洲部分亚大陆泰加林的景观结构与森林动态。《芬兰动物学年鉴》31:19–34 35. Palik BJ, Pederson N (1996) 长叶松生态系统中的上层林木死亡与林冠扰动。《加拿大森林研究杂志》26:2035–2047 36. Lilja S, Wallenius T, Kuuluvainen T (2006). 芬诺斯堪的亚北部北方林区老龄欧洲云杉林的结构与发育。《生态科学》13:181–192 37. Battles JJ, Fahey TJ (2000) 森林衰退后的林隙动态：红云杉林的案例研究。《生态学应用》10:760–774. 38. Kuuluvainen T (1994) 芬兰北方针叶林的林隙扰动、地表微地形与更新动态：一篇综述。《芬兰动物学年鉴》31:35–51. 39. Seidl R, Vigl F, Rössler G, Neumann M, Rammer W (2017) 通过对间伐试验进行基于模型的再分析评估挪威云杉林的韧性。《森林生态与管理》388:3-12 40. Avila OB, Burkhart HE (1992) 对间伐和未间伐火炬松人工林中火炬松树木存活情况的建模。《加拿大森林研究杂志》22:1878-1882. 41. Harcombe PA (1987) 树木生命表。《生物科学》37:557–568 42. Peet, R.K. & Christensen, N.L. 1987. 竞争与树木死亡。《生物科学》37:586–595. 43. Zhang S, Amateis RL, Burkhart HE (1997) 对火炬松人工林单木胸径生长量和存活模型的约束。《森林科学》43(3):414-423 44. Nothdurft A (2013) 基于长期样地、气候变化情景和参数化脆弱性建模的树木死亡时空预测。《森林生态与管理》291:43-54 45. Ruiz-Benito P, Lines ER, Gómez-Aparicio L, Zavala MA, Coomes DA (2013) 伊比利亚森林中的树木死亡模式及其驱动因素：气候效应受到竞争的调节。《公共科学图书馆·综合》8 e56843.https://doi.org/10.1371/journal.pone.005684346. Wyckoff PH, Clark JS (2000) 根据胸径生长预测树木死亡：最大似然法与贝叶斯方法的比较。《加拿大森林研究杂志》30:156– 167 47. Bravo-Oviedo A, Sterba H, Del Río M, Bravo F (2006) 地中海海岸松和欧洲赤松的竞争诱发的死亡。《森林生态与管理》222:88– 98 https://doi.org/10.1016/j.foreco.2005.10.01648. Lännenpää A, Aakala T, Kauhanen H, Kuuluvainen T (2008) 芬诺斯堪的亚北部原始挪威云杉林中的树木死亡因子。《芬兰森林》42:151–163 49. Luo Y, Chen, HYH (2011) 竞争、种间相互作用和老化控制着北方森林中的树木死亡。《生态学杂志》99:1470–1480 https://doi.org/10.1111/j.1365-2745.2011.01882.x50. Stephenson NL, van Mantgem PJ, Bunn AG et al (2011) 森林生产力与树木死亡率之间相关性的原因及其意义。《生态学专论》81:527–555 https://doi.org/10.1890/10-1077.1</escape>

51. Guan BT, Gertner GZ（1991a）使用并行分布式处理系统模拟单木死亡。《森林科学》37(3):871-885。52. Guan BT, Gertner GZ（1991b）利用人工神经网络模拟赤松树木存活。《森林科学》37(5):1429-1440。53. Hülsmann L, Bugmann H, Brang P（2017）如何根据清查数据预测树木死亡——系统评估欧洲树木死亡模型的启示。《加拿大森林研究杂志》900:890–900 https://doi.org/10.1139/cjfr-2016-022454. Dursky, J（1997）云杉和山毛榉纯林及混交林中死亡过程的建模。Allg. Jagd- und Forstzeitung 168:131-134。55. Dietze MC, Moorcroft PR（2011）美国东部和中部的树木死亡：模式与驱动因素。《全球变化生物学》17:3312–3326 https://doi.org/10.1111/j.1365-2486.2011.02477.x56. Condés S, Del Río M（2015）气候会改变欧洲山毛榉和欧洲赤松纯林及混交林中的树木相互作用，具体表现为断面积生长和死亡。《欧洲森林研究杂志》134:1095–1108 https://doi.org/10.1007/s10342-015-0912-0 57. Archambeau J, Ruiz-Benito, P, Ratcliffe S 等（2020）。欧洲各地的背景死亡率模式大体相似，其中欧洲山毛榉主要受干旱驱动，而欧洲赤松则受干旱与竞争共同驱动。《农业与森林气象学》280, 107772。https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2019.10777258. Chen C, Weiskittel A, Bataineh M, MacLean DA（2017）评估不同程度的云杉蚜虫落叶对美国缅因州和加拿大新不伦瑞克省单木年化生长和死亡的影响。《森林生态与管理》396:184-194 59. Acker SA, Boetsch JR, Bivin M, Whiteaker L, Cole C, Philippi T（2015）华盛顿州西部成熟林和老龄林近期的树木死亡与更新。《森林生态与管理》336:109-118 60. Aakala T, Kuuluvainen T, De Grandpre L, Gauthier S（2007）魁北克东北部北方老龄林中的立枯树木：空间格局、死亡率及时间变化。《加拿大森林研究杂志》37:50–61 61. Sirén G（1955）芬兰北部粗腐殖质立地上云杉林的发育及其生态学。Acta Forestalia Fennica 62:1–408 62. Ozolincius R, Miksys V, Stakenas V（2005）立陶宛森林树种与生长无关的死亡。《斯堪的纳维亚森林研究杂志》20:153–160 63. Greenwood DL, Weisberg PJ（2008）矮松—杜松林中的密度制约树木死亡。《森林生态与管理》255:2129–2137 64. Juknys R, Vencloviene J, Jurkonis N, Bartkevicius E, Sepetiene J（2006）污染与非污染环境中单木死亡与树木特征的关系。《环境监测与评估》121:519–542 65. Luo Y, Chen HYH（2013）来自老龄林的观测低估了气候变化对树木死亡的影响。《自然·通讯》4:1655–1656https://doi.org/10.1038/ncomms268166. van Mantgem PJ, Stephenson NL, Byrne JC 等（2009）美国西部树木死亡率普遍上升。《科学》323(5913):521–524https://doi.org/10.1126/scien ce.116500067. Neumann M, Mues V, Moreno A, Hasenauer H, Seidl R（2017）气候变率驱动欧洲近期的树木死亡。《全球变化生物学》23:4788–4797。https://doi.org/10.1111/gcb.137246 8. Loehle C, LeBlanc, D（1996）气候变化对森林的影响：批判性综述。美国：N. p., 1996. Web. doi:10.2172/206412。69. Young DJN, Stevens JT, Earles JM 等（2017）长期气候和竞争解释了极端干旱条件下的森林死亡模式。《生态学通讯》20:78–86https://doi.org/10.1111/ele.12711

70. Garzón B、González Muñoz M、Wigneron N 等（2018）。经历过负水力安全边际的种群所承受的水分亏缺遗留效应。全球生态学与生物地理学 27:346–356 https://doi.org/10.1111/geb.1270171. Jump AS、Ruiz-Benito P、Greenwood S、Allen CD 等（2017）。树木生长的结构性超调、气候变率与全球范围内干旱诱发的森林衰亡谱。《全球变化生物学》23:3742–3757 https://doi.org/10.1111/gcb.1363672. Wood JD、Knapp BO、Muzika RM、Stambaugh MC、Gu L（2018）。干旱与病原体相互作用对欧扎克边缘地区橡树死亡事件的驱动作用。《环境研究快报》13 015004 https://doi.org/10.1088/1748-9326/aa94fa73. Anderegg WRL、Hicke JA、Fisher RA 等（2015）。气候变化背景下，干旱、昆虫及其相互作用导致的树木死亡。《新植物学家》208:674–683https://doi.org/10.1111/nph.1347774. Güneralp B、Gertner G（2007）。两种树木死亡模型的反馈回路主导性分析：结构与行为之间的关系。《树木生理学》27:269-80 75. Allen CD、Breshears DD、McDowell NG（2015）。关于低估人类世高温干旱造成的全球树木死亡与森林衰亡脆弱性。《生态圈》6:1–55https://doi.org/10.1890/ES15-00203.176. Clark JS、Bell DM、Hersh MH、Nichols L（2011）。森林生物多样性的气候变化脆弱性：气候与竞争对种群动态率的追踪。《全球变化生物学》17:1834–1849 https://doi.org/10.1111/j.1365-2486.2010.02380.x77. Seidl R、Thom D、Kautz M 等（2017）。气候变化背景下的森林扰动。《自然·气候变化》第7卷：395–402 78. Etzold S、Ziemińska K、Rohner B 等（2019）。瑞士一个世纪的森林监测数据揭示了气候诱发的树木死亡在物种和地点层面的趋势。《植物科学前沿》10:307 https://doi.org/10.3389/fpls.2019.0030779. Astigarraga J、Andivia E、Zavala MA 等（2020）。气候与森林响应之间存在非平稳关系的证据：伊比利亚森林对气候变化的敏感性增强。《全球变化生物学》26:5063–5076. https://doi.org/10.1111/gcb.1519880. Knoke T、Paul C、Gosling E 等（2022）。评估不同经营制度对严重森林扰动的经济韧性。《环境与资源经济学》 https://doi.org/10.1007/s10640-022-00719-581. Leslie A（1966）。正常林概念综述。《澳大利亚林业》30(2):139-147 82. Kärenlampi PP（2022a）。北方森林碳储存经济学的两组初始条件。《PLOS 气候》1(2): e0000008。https://journals.plos.org/climate/article?id=10.1371/journal.pclm.000000883. Kärenlampi PP（2022b）。碳森林资产资本化中市场溢价的两种表现形式。《能源》2022(15):3212 https://doi.org/10.3390/en1509321284. Hynynen J、Eerikäinen K、Mäkinen H、Valkonen S（2019）。同龄林与异龄林经营下挪威云杉林分对间伐的生长响应。《森林生态与管理》437:314-323 85. Bianchi S、Huuskonen S、Siipilehto J、Hynynen J（2020）。轮伐林业与连续覆盖林业下挪威云杉树木生长的差异。《森林生态与管理》458, 117689。7页。