云南松树冠受害表征与有害生物复合危害的关系*

刘宇杰[1**] 宗世祥[1] 任利利[1] 俞琳锋[1] 高丙涛[1] 泽桑梓[2] 骆有庆[1***]

（1. 北京林业大学林木有害生物防治北京市重点实验室，北京 100083；2. 云南省林业有害生物防治检疫局，昆明 650032）

摘 要 **【目的】** 云南松 *Pinus yunnanensis* Franch 是我国西南地区重要的生态林造林树种之一。钻蛀性害虫松墨天牛 *Monochamus alternatus* Hope、几种切梢小蠹 *Tomicus* spp.、微红梢斑螟 *Dioryctria rubella* Hampson 和一种病害松针褐斑病 *Lecanosticta acicola* 能在云南松人工林内严重发生，对森林健康构成威胁。本研究选取树冠枯梢率作为云南松树势的评价标准，筛选出引起树冠枯梢的主要因子，建立云南松树冠受害表征与不同种类（数量）有害生物复合危害之间的关系，以期探索对云南松有害生物进行遥感监测预警的精准判别方法。**【方法】** 设置标准地，抽样选择 35 株受害状为局部枝梢枯萎和 29 株系统性萎蔫的云南松，分别调查其上有害生物的种类和数量。使用 Pearson 相关性分析等方法研究云南松枯梢率与各致害因子（松墨天牛、切梢小蠹、微红梢斑螟和松针褐斑病）之间的关系。通过多元线性逐步回归的方法，筛选出导致云南松树冠局部枯梢的主要因子，建立枯梢率关于主要有害生物种群数量的反演模型。**【结果】** 局部枝梢枯萎植株的树冠枯梢率与两种切梢小蠹的种群数量均呈高度正相关，与树木胸径和其他致害因子呈较弱或无相关性。分析标准地每木调查结果发现，树冠有无病梢不能显著影响枯梢率情况。建立了通过枯梢率（Y）反演云南松树冠两种切梢小蠹混合种群数量（X）的回归模型：Y=12.0984+0.9835 X，Adj-R^2=0.8081。明确了在蛀梢阶段，云南松树势随着切梢小蠹种群数量上升而下降。在蛀干阶段，切梢小蠹和松墨天牛的钻蛀活动主要集中在濒死木和枯立木上。**【结论】** 引起树冠局部枯梢、树势下降的主要因子为横坑切梢小蠹和云南切梢小蠹成虫的蛀梢活动；引起树冠系统性萎蔫、树木死亡的主要原因是松墨天牛与切梢小蠹的蛀干活动。应用本研究模型可通过判别云南松树冠枯梢率估算两种切梢小蠹在蛀梢期的混合种群数量，为航天遥感或无人机监测虫情提供可靠的理论基础。

关键词 云南松，钻蛀性害虫，复合危害，线性逐步回归模型，枯梢率

The relationship between degrees of *Pinus yunnanensis* canopy dieback and the types of damage caused by specific pests

LIU Yu-Jie[1**] ZONG Shi-Xiang[1] REN Li-Li[1] YU Lin-Feng[1]
GAO Bing-Tao[1] ZE Sang-Zi[2] LUO You-Qing[1***]

(1. Beijing Key Laboratory for Forest Pest Control, Beijing Forest University, Beijing 100083, China;
2. Forestry Pest Control and Quarantine Bureau of Yunnan Province, Kunming 650032, China)

Abstract **[Objectives]** *Pinus yunnanensis* Franch is an important tree species in plantation forests in southwestern China. Recently, outbreaks of wood boring pests such as *Monochamus alternatus* Hope, *Tomicus* spp., *Dioryctria rubella* Hampson and brown-spot needle blight have been found in *P. yunnanensis* plantations, threatening local forest health. This study used the dieback rate of the tree canopy as an indicator of tree condition and identified the main factors that cause canopy dieback. A mathematical relationship between the degree of canopy damage and the species and abundance of pest insects was developed to improve the precision

*资助项目 Supported projects：公益性行业科研专项：重大森林虫灾监测预警的关键技术研究（201404401）

**第一作者 First author，E-mail：yujieliu@bjfu.edu.cn

***通讯作者 Corresponding author，E-mail：youqingluo@126.com

收稿日期 Received：2017-09-28，接受日期 Accepted：2017-11-01

of pest monitoring methods and provide accurate early warning of pest infestation in *P. yunnanensis* plantations. **[Methods]** In the sample areas, 35 *P. yunnanensis* with partly withered canopies and 29 completely withered trees were investigated. Species and amounts of different pests in the canopies and trunks of these trees were identified and counted. The correlation between dieback rate and damage factors was analyzed using Pearson correlation coefficients. A multiple linear stepwise regression was used to identify the main factors causing canopy dieback and model the major pest populations based on canopy dieback. **[Results]** A highly positive relationship between dieback rate and *Tomicus* spp. abundance was found, whereas a weak, or no, relationship was found between dieback rate and diameter at breast height, shoot disease rate and other factors. A chi-square test showed that shoot disease didn't influence shoot dieback significantly. We developed a regression model to estimate the population abundance of *Tomicus* spp. from dieback rate: Y=12.0984+0.9835 X, Adj-R^2=0.8081. This indicated that tree vigor declined as *Tomicus* spp. abundance increased during the shoot feeding phase. *Tomicus* spp. and *M. alternatus* mainly damaged trunks of dying and withered trees during the trunk colonization phase. **[Conclusion]** The shoot feeding behavior of *Tomicus* spp. causes partial withering of the canopy and a decline in the vigor of *P. yunnanensis*, whereas complete withering of the canopy and death follows colonization of the trunk by *M. alternatus* and *Tomicus* spp. The dieback model developed in this study can help estimate the mixed population of *Tomicus* spp. in canopies during the shoot feeding phase and provide a reliable theoretical foundation for pest space remote sensing or unmanned aerial vehicle monitoring.

Key words *Pinus yunnanensis*, wood boring pests, compound damage, linear stepwise regression model, dieback rate

云南松 *Pinus yunnanensis* Franch 是我国西南地区的乡土树种，在云南省的亚热带高原海拔 700~3 200 m 地区大面积分布。作为云贵高原造林的先锋树种，云南松不仅具有较强的水土保持、水源涵养能力，同时提供了大量的建筑用材和林副产品，在区域经济发展和生态建设中发挥着重要作用。近年来，全球气候变化尤其是云南地区旱情严峻，使得云南松人工林中有害生物的发生范围和频率不断增加，云南松人工林的生存受到严重威胁（郑元等，2013）。

在危害云南松的诸多有害生物中，松墨天牛 *Monochamus aternatus* Hope，几种切梢小蠹 *Tomicus* spp.，微红梢斑螟 *Dioryctria rubella* Hampson 以及一些松枯梢病等病虫害常导致云南松树势衰弱，大量枝梢枯萎甚至整株死亡，这些有害生物已经受到国内外学者的密切关注。大量研究报道了几种切梢小蠹在蛀梢期蛀食树冠枝梢补充营养和在蛀干期侵入树干钻蛀坑道的生物学、生态学习性（Ye, 1991; Ye and Li，1994；Långström *et al*.，2002; Ye *et al*., 2004;韩平定等，2009；曹鹏等，2012；高艳飞等，2012；Zhao and Långström，2012；贾平等；2014）。次期性害虫松墨天牛及其携带的松材线虫 *Bursaphlenchus xylophilus*（Steiner & Buhrer）Nickle 的危害也被广泛研究（Ikeda *et al*.，1980；Anbutsu and Togashi，2000；丁玉洲等，2001；林仲桂等，2006；王健敏等，2012）。钻蛀性害虫危害树木常造成不同的危害状，一般情况下，蛀食局部的枝梢会引起树冠非系统性的枯梢，即“局部枯梢”；而一些次期性害虫钻蛀主干会使整株树水分、营养物质传输受阻，导致树冠系统性枯萎、死亡。

有关有害生物复合危害的研究主要集中在农作物生产中（王瑞琪等，1998；黄涛和王兴琴，2013）。国内外对林业有害生物，尤其是不同分类阶元下的有害生物共同危害同一寄主树木的情况研究较少。刘爱华等（2013）通过回归分析研究了野苹果林受害与苹果小吉丁 *Agrilus mali* Matsumura 及苹果腐烂病 *Valsa mali* Miyabe *et* Yamada 复合危害关系；马姝岑（2014）明确了香梨优斑螟 *Euzophera pyriella* Yang 的寄主选择及其与香梨腐烂病 *Valsa ceratosperma* sensu Kobayashi 混合发生的规律。有多种有害生物危害同一寄主的研究，往往是利用生态位指数研究昆虫对寄主的资源划分和昆虫自身的种间关系（袁菲等，2011）。

目前，尚未有关于几种有害生物复合危害云南松，并探讨云南松相对应受害表征的研究案例。本研究从这个角度切入，试图解决三个问题：首先，使用相关性分析筛选出导致云南松树冠局部枯梢的主要因子。其次，通过多元线性逐步回归的方式建立云南松树冠枯梢率关于主要有害生物种群数量的反演模型；最后，结合样木、标准地受害情况和病虫害的种群数据，分析并明确云南松树冠局部枯梢、系统性枯萎的情况与有害生物种类、种群数量及危害特征的关系。本研究的结果旨在探索对云南松有害生物进行遥感监测预警的精准判别方法。

1　材料与方法

1.1　试验地概况

试验地位于云南省昆明市石林彝族自治区鹿阜镇林场内（北纬 25°19′，东经 100°54′）。石林县位于云南省东部，昆明市东南部，海拔 1 500~2 150 m，高原山地季风气候，年平均气温 16.3℃，年平均降雨量 939.5 mm。全县有林地面积 56 451.6 hm²。通过对鹿阜镇林场的林分踏查发现，林内主要优势树种为云南松，树龄 15 年左右，胸径 6~12 cm，树高 5~7 m。有害生物主要有松墨天牛、云南切梢小蠹 *Tomicus yunnanensis* Kirkendall & Faccoli、横坑切梢小蠹 *Tomicus minor* Hartig、微红梢斑螟和松针褐斑病 *Lecanosticta acicola*。在调查区域内并未发现有松材线虫入侵和危害。

1.2　研究方法

1.2.1　调查方法　试验开始于 2016 年 8 月上旬，此时正处于两种切梢小蠹成虫的蛀梢期与松墨天牛幼虫的蛀干期。在林内设置 3 块标准地，每块标准地中的云南松均在 100 株以上。在所有标准地内采取“Z”字型抽样的方法，3 块标准地共选取 35 株云南松作为调查样株。抽样调查样株树冠每一轮主枝中当年生枝梢 10 个。对于虫害，解析枝梢并确定其中钻蛀性害虫的种类、虫态及数量；对于针叶病害，根据针叶是否有圆形褪色或褐色段斑判断枝梢是否感病（李传道等，1986）。根据调查结果，结合抽样枝梢数与该轮主枝总枝梢数的比例估计受害云南松树冠的枯梢率、病梢率和各类钻蛀性害虫的虫口数量。以 Kirkendall 等（2008）所描述的切梢小蠹形态特征为依据鉴定切梢小蠹的种类。同时，对 3 块标准地内共 325 株云南松进行每木调查，观察并记录每一株树是否存在枯梢或病梢情况。上述树冠枝梢的抽样调查及对标准地云南松每木调查的结果用于分析树冠局部枯梢与有害生物复合危害关系。

另在 3 块标准地中选择 29 株树冠系统性枯萎的云南松，将其伐倒后剥皮解析。记录主干上松墨天牛的羽化孔、横坑切梢小蠹与云南切梢小蠹的母坑道数量。这部分结果用于树冠系统性枯萎与有害生物复合危害关系的分析。

1.2.2　建模方法　参照《林业有害生物发生及成灾标准》中云南松受云南切梢小蠹危害的评级标准，结合本研究中的有害生物复合危害的具体情况，对 35 株树冠局部枯梢和 29 株系统性枯萎的云南松进行树势分级（表 1）。将树势等级和树冠枯梢率分别作为定性和定量描述云南松树冠受害程度的指标。

对于树冠局部枯梢的云南松样株，选择胸径、树冠病梢率、两种切梢小蠹和微红梢斑螟的

表 1　云南松树势的分级标准

Table 1　Tree vigor rating standard of *Pinus yunnanensis*

树势等级 Tree vigor level	健康 Healthy	轻度受害 Lightly damaged	中度受害 Moderately damaged	重度受害 Heavily damaged	濒死木 Dying trees	枯立木 Withered trees
划分标准 Classification standard	枯梢率<10% 树冠针叶浓绿	枯梢率 11%-20% 少量枝梢枯黄	枯梢率 21%-50% 部分枝梢枯黄	枯梢率>51% 大量枝梢红黄，但仍有部分健康梢	枯梢率为 100% 呈现出“红冠”	树冠针叶全部枯萎几近脱落

种群数量作为自变量 X，树冠枯梢率作为因变量 Y（表 2），建立多元线性回归方程：

$$Y=\beta_0+\beta_1X_1+\beta_2X_2+\cdots\beta_nX_n+\varepsilon$$

式中：$\beta_1, \beta_2, \cdots, \beta_n$ 为各因子的偏回归系数；β_0 为回归方程中的常数项；ε 为扰动项；n=1, 2, …, 5。

表 2 回归方程中各变量代号

Table 2 Variables code for the regression equation

X_1	X_2	X_3	X_4	X_5	Y
胸径（cm） Diameter at breast height (cm)	病梢率（%） Shoot disease rate (%)	横坑切梢小蠹成虫数量（头） Quantity of *T. minor* adults	云南切梢小蠹成虫数量（头） Quantity of *T. yunnanensis* adults	微红梢斑螟幼虫数量（头） Quantity of *D. rubella* larvae	树冠枯梢率（%） Canopy dieback rate (%)

使用 Pearson 相关性分析得到相关系数矩阵并查看各变量之间的线性相关程度。之后，通过赤池信息量准则（Akaike information criterion，简称 AIC）对模型进行优化和评估，优先考虑选择 AIC 值最小的模型。模型优化原理为：在具体计算中，依据自变量对因变量贡献大小，由大到小依次引入回归方程。每次引入都对回归方程中每一个自变量的作用进行 F 检验，对方程中作用不显著的自变量予以剔除。如此反复直到既不能引入新的变量，也不能从方程中剔除自变量为止。

1.2.3 数据分析 使用 IBM SPSS Statistics Version 23 进行数据统计分析。通过 Duncan's 新复极差法进行数据差异性比较，t-检验进行相同树势等级下两种切梢小蠹种群数量的差异性比较。以独立样本四格表的形式对枯梢和病梢的比例进行卡方检验。使用 GraphPad Prism Version 6 绘图。

2 结果与分析

2.1 树冠局部枯梢影响因子的相关性分析

通过 Pearson 相关性分析，得到云南松枯梢率与各因子的相关矩阵（表 3）。

由表 3 可知，横坑切梢小蠹数量（X_3）、云南切梢小蠹数量（X_4）与枯梢率（Y）呈显著高度正相关（0.805，0.842）。（注：相关系数 0.7~1.0 为高度相关，0.4~0.7 为中度相关，0.2~0.4 为低度相关）。病梢率（X_2）与枯梢率（Y）呈显著中度正相关（0.407），而其他自变量与枯梢率呈低度正相关或负相关。说明枯梢率与横坑切梢小蠹、云南切梢小蠹成虫数量关系密切，而松针褐斑病也有可能在一定程度上会影响枯梢率。横坑切梢小蠹数量（X_3）与云南切梢小蠹数量（X_4）存在中度正相关（0.646），这意味着在进行线性回归时，两种切梢小蠹的种群数量可能存在多重共线性。一般来说，研究中这样的多重共线性会使参数估计值的方差增大，使模型难以估计准确，本文选择 AIC 准则排除共线性问题。

表 3 树冠枯梢率与各影响因子的相关矩阵

Table 3 Correlation matrix between canopy dieback rate and other factors

因子 Factors	X_1	X_2	X_3	X_4	X_5	Y
X_1	1.000					
X_2	-0.126	1.000				
X_3	-0.102	0.407*	1.000			
X_4	0.058	0.312	0.646*	1.000		
X_5	0.367	-0.138	0.220	0.245	1.000	
Y	-0.104	0.407*	0.805*	0.842*	0.158	1.000

N=35，*表示在 α=0.01 水平下相关性显著。

N=35, * indicates the correlation coefficient is significant at the level of α=0.01.

2.2 枯梢率关于各因子的多元线性逐步回归模型

建立多元线性逐步回归模型时，使用 AIC 准则可以有效排除两种切梢小蠹种群数量的共线性问题。在对模型检验时选用残差平方和 RSS，AIC 值和校正决定系数 Adj-R^2等评价指标，得到逐步回归结果（表 4）。

表 4　基于 AIC 原则的逐步回归方程中各项评价指标值

Table 4　Summary statistics updated with each step for the regression model based on AIC

参与变量 Variables	残差平方和 RSS	AIC 值 AIC value	*P* 值 *P* value	校正决定系数 Adj-R^2	*F* 值 *F* value	自由度 Degree of freedom
$X_1+X_2+X_3+X_4+X_5$	9.05	159.65	1.344e-10	0.809 3	29.86	29
$X_1+X_2+X_3+X_4$	8.93	157.89	2.215e-11	0.814 4	38.32	30
$X_1+X_3+X_4$	8.85	156.38	3.447e-12	0.817 8	51.87	31
X_3+X_4	8.93	156.12	7.434e-13	0.825 4	75.66	32

由表 4 可知，逐步回归过程中，每一个回归方程显著性 *P* 值都远小于 0.01 水平，方程通过显著性检验。但依据 AIC 值最小，校正决定系数 Adj-R^2最大的原则，应该优先考虑的模型是枯梢率（*Y*）关于自变量横坑切梢小蠹成虫数量（X_3）、云南切梢小蠹成虫数量（X_4）的模型：Y=12.205 9+1.419 2 X_3 +0.811 1 X_4，该模型的校正决定系数 Adj-R^2达到了 0.825 4，说明两种切梢小蠹的种群数量与枯梢率呈现出较好的线性关系，且由于 X_3、X_4 均存在于最后的方程中，故自变量 X_3、X_4 之间并不存在多重共线性。

由于横坑切梢小蠹、云南切梢小蠹的蛀梢期大致重合，均在 5 月至 10 月。可以认为在大部分的时间里，两种切梢小蠹同时危害树冠。为了实际应用方便，达到减少自变量的要求，同时也为了解决本研究的问题之一——通过树冠枯梢率反演云南松主要有害生物的种群数量，将两种切梢小蠹的种群数量 X_3、X_4 相加作为单独一个自变量 *X*，对其与枯梢率 *Y* 进行一元线性回归，得到方程：Y=12.098 4+0.983 5 X，Adj-R^2=0.808 1，P=1.391e−13<0.01（图 1）。

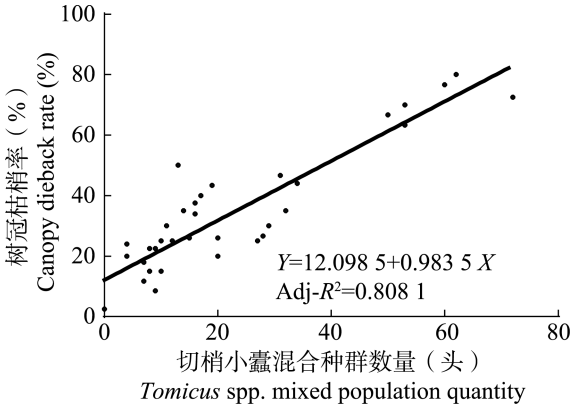

图 1　枯梢率关于切梢小蠹混合种群数量的回归模型

Fig. 1　Regression model for dieback rate to estimate *Tomicus* spp. mixed population quantity

2.3　枯梢与病梢的相关性分析

Pearson 相关性分析结果表明树冠枯梢率与病梢率呈中度正相关，但由于自变量病梢率（X_3）不属于基于 AIC 准则的最优回归方程中。所以，中度正相关不一定意味着松针褐斑病的发生能显著改变树冠的枯梢率，为了确定枯梢与病梢的关系，分析各样株树冠枯梢率和病梢率（图 2）。

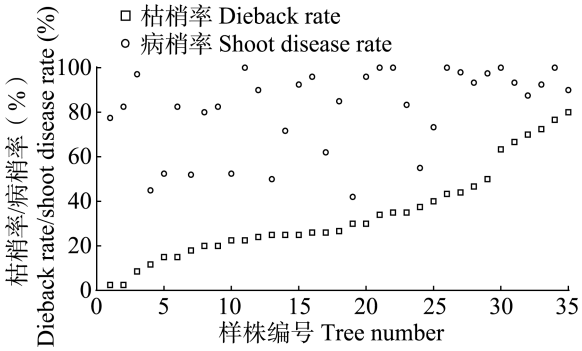

图 2　各样株树冠的枯梢率（病梢率）情况的散点图

Fig. 2　Scatter plots of dieback rate and shoot disease rate of sample tree canopies

结果表明随着样株枯梢率上升，其对应的病梢率并无明显的变化趋势，而是较无规律地分布在 40%~100%。

记录标准地内云南松有、无病梢和有、无枯梢情况出现的频数（表 5）。对数据进行卡方检验，χ^2=0.452，P=0.502>0.05；接受原假设，即有无病梢并不能对枯梢情况造成显著影响。综

表 5 标准地病梢与枯梢情况的独立样本四格表
Table 5 Four fold table for shoot disease and shoot dieback information in the sample areas

频率 Frequency	有枯梢 With dieback	无枯梢 Without dieback	合计 Total	比例（%） Proportion (%)
有病梢 With shoot disease	209	55	264	79.17
无病梢 Without shoot disease	46	15	61	75.41
合计 Total	255	70	325	78.46

上，松针褐斑病广泛分布在云南松树冠针叶上，但并不能显著影响树冠枯梢率。由此推断，所调查标准地内的云南松受松针褐斑病影响不严重或正处于病害危害的初期。

2.4 几种钻蛀性害虫在不同树势等级云南松上的种群数量

2.4.1 蛀梢危害——树冠局部枯梢 两种切梢小蠹蛀梢危害阶段是云南松树冠局部枯梢的阶段（健康-重度受害）。分析蛀梢期两种切梢小蠹种群数量与云南松树势等级的关系，发现横坑切梢小蠹、云南切梢小蠹成虫可蛀梢危害从健康到重度受害的云南松，且种群数量越多，树势越衰弱（图 3）。高种群数量的切梢小蠹加剧了树木树势下降，使树冠枯梢率增加，也为有害生物钻蛀主干提供了有利条件。各树势等级之间，两种切梢小蠹成虫种群数量差异性显著。这表明本研究所采用的树势分级标准在云南松树冠局部枯梢阶段中能有效地区分切梢小蠹的种群量。另经过 *t*-检验，云南切梢小蠹种群数量在中度、重度受害木上显著高于横坑切梢小蠹，说明在云南松中度受害后（枯梢率>21%），云南切梢小蠹开始成为树冠中的优势种群。

2.4.2 蛀干危害——树冠系统性萎蔫 调查结果表明（图 4），仅在濒死木和枯立木上发现有松墨天牛与两种切梢小蠹蛀干危害，而在其他树势等级上并未发现有其蛀干危害的痕迹。松树钻蛀性害虫多属于次期性害虫，偏好选择树势衰弱的寄主。因此，从时间生态位的角度来看，松墨

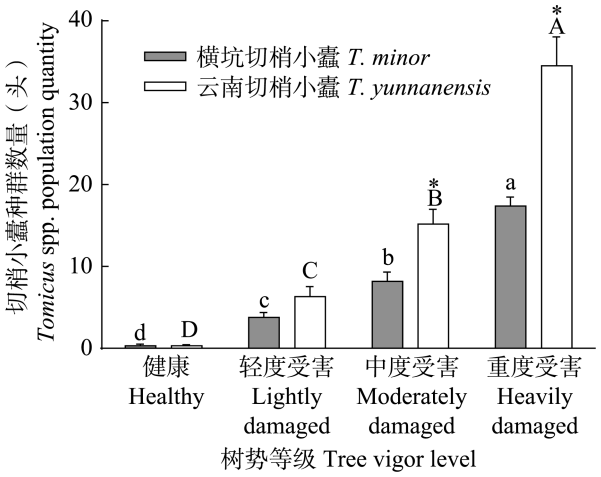

图 3 蛀梢危害不同树势等级云南松的两种切梢小蠹种群数量（±SE）
Fig. 3 Population quantity (± SE) of *Tomicus* spp. damaging shoots in *Pinus yunnanensis* of different tree vigor levels

柱上标有不同大写（小写）字母表示在 α=0.05 水平上不同树势等级之间云南切梢小蠹（横坑切梢小蠹）种群数量差异性显著。*表示在 α=0.05 水平上同一树势等级中两种切梢小蠹种群数量差异性显著。

Histograms with different upper (lowercase) letters indicate statistically significant difference in population quantity of *T. yunnanensis* (*T. minor*) across tree vigor levels at the level of α=0.05. * indicates statistically significant difference in population quantity of *T. yunnanensis* and *T. minor* within the same tree vigor level at the level of α=0.05.

天牛与两种切梢小蠹对主干的钻蛀危害发生在树冠高枯梢率导致的树势下降之后。同时也说明云南松树冠系统性萎蔫（重度受害-濒死木、枯立木）是由几种钻蛀性害虫复合危害导致。经过 Duncan's 多重比较，松墨天牛羽化孔、横坑切梢小蠹坑道在枯立木上的数量显著大于濒死木（P<0.05）。说明其危害痕迹从濒死木到枯立木显著增加，这体现了危害痕迹的累积效应。但这种效应并未体现在云南切梢小蠹的坑道数量上（其坑道数量在濒死木、枯立木上无显著性差异，P>0.05），说明对于云南切梢小蠹来说，在濒死木时就已经达到了其生态位负荷量。

综合图 3、图 4 发现，仅在健康-重度受害的云南松树冠上发现有两种切梢小蠹的成虫；仅在濒死木、枯立木上发现有松墨天牛的羽化孔和两种切梢小蠹的坑道。由此说明，切梢小蠹的蛀梢危害引起云南松树冠局部枯梢、树势衰弱，其与

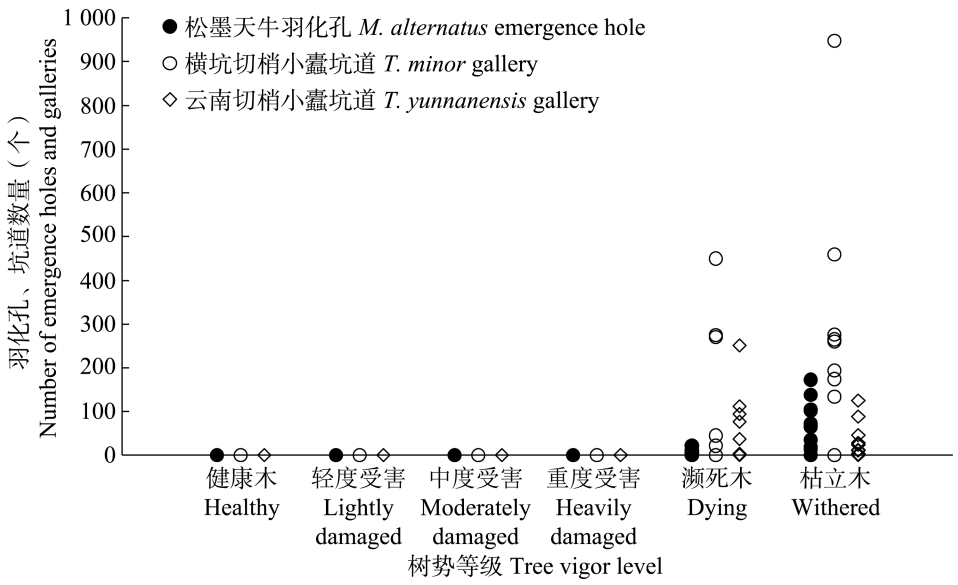

图 4　蛀干危害不同树势等级云南松的有害生物种群数量

Fig. 4　Population quantity of pests colonizing trunks in *Pinus yunnanensis* of different tree vigor levels

天牛的共同蛀干危害导致云南松系统性萎蔫、死亡。

3　讨论

在云南松人工林生态系统中，尤其是树势衰弱的区域，通常是多种有害生物同时发生、复合危害。以本研究为例，松墨天牛、云南切梢小蠹、横坑切梢小蠹这 3 种钻蛀性害虫在石林县的云南松人工林内均大量发生。这些有害生物遵循各自的发生规律和危害特点，其中蛀干导致树冠的系统性萎蔫，切梢小蠹的蛀梢则引起树冠局部枯梢。此时如果以单一有害生物作为研究对象分析云南松枯梢的原因，则容易产生误判。此外，若要使用中小尺度的航空遥感手段，如无人机巡航等监测云南松树冠健康状态时，复合危害的情况也会造成监测结果的误判。本研究为分析树冠受害表征与有害生物种群数量的关系，使用云南松树冠枯梢率这一个指标作为树势等级的评价标准，易于分级，并在不同尺度进行观测。这样的指标，适合与 3S 技术耦合并在大尺度内监测松林有害生物的发生动态。

在模型的建立方面，使用相关性分析和多元线性逐步回归等多种分析手段，不但能在导致云南松树冠枯梢的众多因子中去掉弱相关或负相关的因子，筛选出较为重要的因子，明确导致云南松树冠两种受害表征即局部枯梢和系统性枯萎的致害因子。而且，通过树冠枯梢率反演切梢小蠹的混合种群数量，对前期遥感监测、后期调控和防治小蠹虫群分布有较大的实用价值。但在另一方面，有害生物的发生与林分因子也有着密不可分的关系。立地条件、气候条件、植被组成、天敌以及人为因素（包括森林经营管理、防治策略及措施的决策等）都能不同程度地影响有害生物在林间的种群数量（阎伟等，2009）。理论上来说，要想最大化地体现多元线性逐步回归模型的优势，更多自变量的引入和筛选可以增加模型在不同环境条件下的适用性和精度。

蛀梢期是切梢小蠹生活史中最长的一个危害活动时期，最长可达 10 个月之久。在这个时期中，树冠针叶缓慢发生不同程度的枯萎变红。据报道，切梢小蠹蛀干的成功率随受害梢率的增加而增高，存在攻击阈值。当超过 60%的枯梢率时，树冠上切梢小蠹的种群密度总是足够使其成功定殖并最终使云南松致死（Lieutier *et al.*，2003）。所以，在切梢小蠹蛀梢的前中期开展对云南松树冠健康状况的监测具有重要意义。本研究已明确了云南松树冠的局部枯梢主要由两种切梢小蠹同时蛀梢危害引起。下一步可尝试以小蠹蛀梢期受害梢针叶的变色机制为切入点，进行遥感技术的应用研究。

参考文献 (References)

Anbutsu H, Togashi K, 2000. Deterred oviposition response of *Monochamus alternatus* (Coleoptera: Cerambycidae) to oviposition scars occupied by eggs. *Agricultural & Forest Entomology*, 2(3): 217–223.

Cao P, Han PD, Zhang Z, Wu W, 2009. Comparison study on stem attacking by *Tomicus* spp. in the period of shoot feeding to stem attacking. The Entomological Society of Yunnan. Yunnan. [曹鹏, 韩平定, 张真, 吴伟, 2009. 三种切梢小蠹梢转干期蛀干习性比较. 云南省昆虫学会 2009 年年会论文集. 云南.]

Ding YZ, Lv CH, Han B, Pu HP, Wu ML, 2001. Relationship between growth potential of pine population density of *Momochamus alternatus* and pathogenicity of *Bursaphlenchus xyloophilus*, *Chinese Journal of Applied Ecology*, 12(3): 351–354. [丁玉洲, 吕传海, 韩斌, 濮厚平, 吴木林, 2001. 树木生长势与松墨天牛种群密度及松材线虫发病程度关系. 应用生态学报, 12(3): 351–354.]

Gao YF, Zhang Y, Zhang Z, Wu W, 2012. Shoot feeding by *Tomicus* (Coleoptera: Scolytinae) on *Pinus yunnanensis* trees. *Journal of Northeast Forestry University*, 40(6): 81–84. [高艳飞, 张英, 张真, 吴伟, 2012. 切梢小蠹蛀食云南松枝梢行为研究. 东北林业大学学报, 40(6): 81–84.]

Han PD, Cao P, Liu Y, Zhang Z, Wu W, 2009. Shoot of selection and survival analysis of *Tomicus yunnanensis* Kirkendall & Faccoli (Curculionidae, Scolytinae). *Journal of Henan Forestry Science and Technology*, 29(3): 7–8. [韩平定, 曹鹏, 刘悦, 张真, 吴伟, 2009. 云南切梢小蠹枝梢选择和存活分析初探. 河南林业科技, 29(3): 7–8.]

Huang T, Wang XQ, 2013. Analysis on control index of *Sogatella furcifera* and *Canphalocrocis medinalis* Guenee at the same time. *Modern Agricultural Science and Technology*, (6): 110–111. [黄涛, 王兴琴, 2013. 白背飞虱和稻纵卷叶螟同时危害时的复合防治指标分析. 现代农业科技, (6): 110–111.]

Ikeda T, Enda N, Yamane A, Oda K, Toyoda T, 1980. Attractants for the Japanese pine sawyer, *Monochamus alternatus* Hope. *Japanese Society of Applied Entomology and Zoology*, 15(3): 358–361.

Jia P, Li JZ, Tong Q, Dai YJ, Wan LM, Liu Y, 2014. The occurrence and distribution patterns of *Tomicus brevipilosus* adult in tree tops. *Journal of Southwest Forest University*, (6): 70–74. [贾平, 李俊忠, 童清, 戴永军, 万岭梅, 刘悦, 2014. 短毛切梢小蠹蛀梢期成虫发生及分布特征研究, 西南林业大学学报, (6): 70–74.]

Kirkendall LR, Faccoli M, Ye H, 2008. Description of the Yunnan shoot borer, *Tomicus yunnanensis* Kirkendall & Faccoli sp. n. (Curculionidae, Scolytinae), an unusually aggressive pine shoot beetle from southern China, with a key to the species of *Tomicus*. *Zootaxa*, 1819: 25–39.

Långström B, Li LS, Liu HP, 2002. Shoot feeding ecology of *Tomicus piniperda* and *T. minor* (Col. Scolytidae) in southern China. *Journal of Applied Entomology*, 126(7/8): 333–342.

Li CD, Zhu XQ, Han ZM, Zhang JN, Shen BK, 1986. Investigation on brown-spot needle blight of pines in China. *Journal of Nanjing Institute of Forestry*, 10(2): 11–18. [李传道, 朱熙樵, 韩政敏, 张九能, 沈伯葵, 1986. 松针褐斑病调查和病原鉴定, 南京林学院学报, 10(2): 11–18.]

Lieutier F, Ye H, Yart A, 2003. Shoot damage by *Tomicus* sp. (Coleoptera: Scolytidae) and effect on *Pinus yunnanensis* resistance to subsequent reproductive attacks in the stem. *Agricultural & Forest Entomology*, 5(3): 227–233.

Lin ZG, Zhu X, Li JW, 2006. *Monochamus alternatus* adults' habits of biting nidi and its damage on host. *Forest Pest and Disease*, 25(1): 11–13. [林仲桂, 朱巽, 黎家文, 2006. 松墨天牛成虫咬筑刻槽习性及对寄主的危害. 中国森林病虫, 25(1): 11–13.]

Liu AH, Zhang XP, Wen JB, Yue CY, ALM, Jiao SP, Zhang JW, Ke RM, 2014. Preliminary research on the composite damage of *Agrilus mali* Matsumura and *Valsa mali* Miyabe et Yamada in wild apple trees in Tianshan mountain. *Xinjiang Agricultural Sciences*, 51(12): 2240–2244. [刘爱华, 张新平, 温俊宝, 岳朝阳, 阿里木, 焦淑萍, 张静文, 克热曼, 2014. 山野苹果林苹果小吉丁与苹果腐烂病复合危害研究. 新疆农业科学, 51(12): 2240–2244.]

Ma SC, 2014. Host selection of *Euophera priella* and its relationship with *Valsa* canker of fragrant pear. Master dissertation. Beijing: Beijing Forestry University. [马姝岑, 2014. 香梨优斑螟寄主选择及其与香梨腐烂病的关系. 硕士学位论文. 北京: 北京林业大学.]

Wang JM, Chen XM, Liu J, Yang ZX, Duan ZY, He YH, Chen F, 2012. Decomposition effects of *Monochamus alternatus* on *Pinus yunnanensis*. *Forest Research*, 25(6): 756–760. [王健敏, 陈晓敏, 刘娟, 杨子详, 段兆尧, 和玉华, 陈飞, 2012. 松墨天牛对云南松的分解作用分析. 林业科学研究, 25(6): 756–760.]

Wang RQ, Zhang SF, Fan XX, Huang MS, Wang P, 1998. Interactive effect of compound damages by multi-pest in cotton field and application of compound control indicators for "two red pests". *Chinese Journal of Applied Ecology*, 9(4): 405–410. [王瑞琪, 张仕福, 樊孝贤, 黄民松, 石尚柏, 万鹏, 1998. 棉田多虫复合危害互作效应及"两红"复合防治指标应用研究. 应用生态学报, 9(4): 405–410.]

Yan W, Zong SX, Luo YQ, Cao CJ, Li ZW, Guo QL, 2009. Application of stepwise regression model in predicting the movement of *Artemisia ordosica* boring insects. *Journal of Beijing Forestry University*, 31(3): 140–144. [阎伟, 宗世祥, 骆有庆, 曹川健, 李占文, 郭琪林, 2009. 逐步回归模型在油蒿钻蛀性害虫预测中的应用. 北京林业大学学报, 31(3): 140–144.]

Ye H, 1991. On the bionomy of *Tomicus piniperda* (L.) (Col. Scolytidae) in the Kunming region of China. *Journal of Applied Entomology*, 112(1/5): 366–369.

Ye H, 1996. Studies on the biology of *Tomicus piniperda* (Col., Scolytidae) in the shoot-feeding period. *Acta Entomologica Sinica*, 16(1): 58–62. [叶辉, 1996. 纵坑切梢小蠹蛀梢期生物学研究. 昆虫学报, 16(1): 58–62.]

Ye H, Li LS, 1994. The distribution of *Tomicus piniperda* (L.) population in the crown of Yunnan pine during the shoot feeding period. *Acta Entomologica Sinica*, 37(3): 311–316. [叶辉, 李隆术, 1994. 纵坑切梢小蠹蛀梢期空间分布. 昆虫学报, 37(3): 311–316.]

Yuan F, Luo YQ, Shi J, Kari H, 2011. Spatial ecological niche of main insect borers in larch of Aershan. *Acta Ecologica Sinica*, 31(15): 4342–4349. [袁菲, 骆有庆, 石娟, Kari Heliovaara, 2011. 阿尔山落叶松主要蛀干害虫的种群空间生态位. 生态学报, 31(15): 4342–4349.]

Zhao T, Långström B, 2012. Performance of *Tomicus yunnanensis* and *Tomicus minor* (Col., Scolytinae) on *Pinus yunnanensis* and *Pinus armandii* in Yunnan. Southwestern China, *Psyche: A Journal of Entomology*, doi:10.1155/2012/363767.

Zheng Y, Huang XH, Wang DW, Li GQ, 2013. Research advance and prospects of *Pinus yunnanensis* Franch. *Modern Agricultural Sciences and Technology*, (13): 169–171. [郑元, 黄新会, 王大玮, 李根前, 2013. 云南松研究进展和展望. 现代农业科技, (13): 169–171.]