

DOI:10.13275/j.cnki.lykxyj.2020.05.003

# 昆嵛山腮扁叶蜂虫基指数模型

胡瑞瑞<sup>1,2</sup>, 梁军<sup>1,3\*</sup>, 谢宪<sup>1</sup>, 张英军<sup>3</sup>, 张星耀<sup>1,3</sup>

(1. 中国林业科学研究院森林生态环境与保护研究所, 国家林业与草原局森林保护学重点实验室, 北京 100091;

2. 天津市植物保护研究所, 天津 300000; 3. 昆嵛山森林生态系统定位研究站, 山东 烟台 264100)

**摘要:** [目的] 为通过构建昆嵛山腮扁叶蜂虫基指数 (Pest based index, PBI) 评价体系, 定量评价出与林分因子共同作用后, 立地因子对赤松纯林中昆嵛山腮扁叶蜂发生程度的作用等级。[方法] 本研究基于森林虫害发生的基本原理, 将影响昆嵛山腮扁叶蜂的结果归因于林分因子和立地因子的综合作用。在相同龄阶的赤松纯林生态系统中设立临时样地, 筛选影响昆嵛山腮扁叶蜂发生的关键林分因子, 建立关键林分因子与昆嵛山腮扁叶蜂虫情指数的函数关系, 选取最优模型作为主曲线; 将主曲线等比值拉伸得昆嵛山腮扁叶蜂虫基指数曲线群, 其自下而上依次表示不同的虫基指数, 即立地对昆嵛山腮扁叶蜂发生程度的作用等级。[结果] 1) 基于森林虫害发生的基本原理, 提出了虫基指数的概念。2) 确定了昆嵛山腮扁叶蜂虫基指数的定量方法, 它包含样地的设立、虫情指数的调查、林分因子和立地因子的调查、关键林分因子的筛选、基准点的确定、备选主曲线模型的建立、主曲线模型的确定和评价、主曲线的绘制及曲线群的建立共 9 个步骤。3) 逐步回归和偏相关分析确定冠幅是影响昆嵛山腮扁叶蜂发生的关键林分因子, 依据所提定量方法建立主曲线方程:  $Q=75.53/(1+e^{-0.84x+3.40})$ , 决定系数  $R^2=0.523 0$ , 说明拟合方程较可靠, 用该模型预估昆嵛山腮扁叶蜂的虫情指数时, 平均预估精度是 89.28%。4) 将昆嵛山腮扁叶蜂虫基指数主曲线等比值拉伸得曲线群, 即建立了定量评价体系。体系中的 5 条曲线自下而上分别表示腮扁叶蜂发生的不同程度。[结论] 昆嵛山腮扁叶蜂虫基指数主曲线模型和曲线群图可以定量评价赤松林的立地因子对昆嵛山腮扁叶蜂的潜在发生程度的作用等级, 为赤松纯林合理、有效的管理提供理论基础, 它将成为森林有害生物生态控制方法的重要组成部分。

**关键词:** 赤松纯林; 昆嵛山腮扁叶蜂; 虫基指数; 昆嵛山

**中图分类号:** S763.43

**文献标志码:** A

**文章编号:** 1001-1498(2020)05-0021-07

昆嵛山腮扁叶蜂 (*Cephalcia kunyushanica*) 是昆嵛山特有的食叶昆虫, 于 1983 年首次在昆嵛山森林生态系统中被发现, 为膜翅目 (Hymenoptera) 扁叶蜂科 (Pamphiliidae) 昆虫<sup>[1]</sup>。在昆嵛山地区, 昆嵛山腮扁叶蜂从每年 6 月份开始为害, 直到 8 月份结束, 为害时间可持续 50~60 d<sup>[2-3]</sup>。该食叶害虫发生较轻时, 松树呈枯黄状态, 发生严重时则会使松树致死。昆嵛山腮扁叶蜂的幼虫会在松针基部以吐丝结网的形式筑巢。

森林虫害的暴发主要是由虫口密度失调引起的, 而害虫的虫口密度既受生物因素的影响, 又受环境因素的作用。如: 植食性昆虫多定居在寄主植物丰富、营养资源充足的林分中<sup>[4-5]</sup>; 非寄主植物挥发物对害虫的拒避或引诱行为影响害虫在林分中的分布和数量<sup>[6]</sup>; 人类作为重要的生物因素之一, 其活动显著影响森林生态系统, 例如木产品贸易活动会增加害虫的引进率<sup>[7]</sup>; 天敌也被证明对害虫的数量具有重要的调控作用<sup>[8]</sup>。因此, 上述因子中的

收稿日期: 2019-08-27 修回日期: 2019-11-15

基金项目: 中央级公益性科研院所基本科研业务费专项资金项目 (CAFYBB2019SY023-02), 国家重点研发计划课题 (2017YFD0600104), 国家自然科学基金面上项目 (31270682)

\* 通讯作者: Email: liangjun@caf.ac.cn

任何一项或几项都有可能引起害虫种群密度的骤然增大,造成虫害的暴发<sup>[9]</sup>。但在众多因子中,我们无法定量判断每一项因子(林分因子、立地因子或气候因子等)对虫害产生的作用等级,为此,需要有一种方法,能够将影响虫害发生的某项因子从综合因子中分离出来,定量评价其对该区域的病害潜在发生程度的作用等级。

森林害虫的种群密度由生物因素和非生物因素共同决定。具体来说,包括寄主植物、害虫的特性、环境条件及人类活动,因为对同一研究区域的纯林生态系统而言,气候条件相似,特定害虫对同一种寄主植物的侵染能力相同,且同一树种感、抗虫的能力亦相同。同时,本文将所研究的样地选定在处于自然演化状态或人为干扰方式、强度一致的纯林生态系统中,即影响同一研究区域纯林中虫害发生的四大因素基本相同。但在同一森林生态系统内部,常出现因林分结构和立地条件的不同而使虫害的发生程度不同的现象。所以,此时可将影响特定虫害发生状况的差异归因于纯林林分因子和立地因子的综合作用。

基于森林虫害发生的基本原理,将影响同一研究区域内纯林发生特定虫害严重程度的差异归因于林分因子和立地因子的综合作用。为了定量评价与某纯林林分因子共同作用后,立地因子对特定虫害的潜在发生程度的作用等级而提出的指标,将其称为虫基指数(Pest based index, PBI),其值域为0~100,定量描述其作用等级的前提是对该指标进行量化。

## 1 研究区概况与研究方法

### 1.1 研究区概况

昆崙山(121°41'34"~121°48'04" E, 37°11'50"~37°17'22" N)位于山东半岛东部,东与黄海毗邻,

北与渤海相望,总面积 15 416.5 hm<sup>2</sup>。昆崙山区气候温和,年均温为 12.3 ℃,年降水量为 800~1 200 mm,年均相对湿度 62.6%,无霜期 200~220 d。土壤多为棕壤,且大部分为沙质壤土。森林类型有赤松(*P. densiflora* SIEB. et ZUCC.)林、黑松(*Pinus thunbergii* Parl.)林、日本落叶松(*Larix kaempferi* (Lamb.) Carr)林、杉木(*Cunninghamia lanceolata* (Lamb.) Hook.)林、针叶树——麻栎(*Quercus acutissima* Carruth.)林、针叶树——杂木林和阔叶林 6 种。赤松林作为昆崙山的主要建群种,从山麓至海拔 800 m 均有分布。

昆崙山腮扁叶蜂的发生情况如表 1 所示。

### 1.2 研究方法

1.2.1 样地设置 依据昆崙山二类森林资源调查数据提供的信息,于 2017 年 5 月—8 月进行样地的选取并展开调查工作。选取龄阶相同、林相整齐、空间分布均匀的赤松纯林,设立 121 个临时调查样地(30 m×30 m)。

1.2.2 昆崙山腮扁叶蜂的调查、记录 在每块样地内的 4 角和中心各取 2 株赤松,利用目测和望远镜相结合的方法,统计上述 10 株赤松的虫巢数,因为虫巢内常有 2~4 头幼虫,所以平均株虫口密度按 3 倍虫巢数计算<sup>[10]</sup>;然后按五级分级加权平均数法<sup>[11]</sup>对虫情指数进行计算,虫害分级标准见表 2。虫情指数计算公式如下:

$$\text{虫情指数} = \frac{\sum(\text{各级虫害株数} \times \text{各级代表值})}{\text{总株数} \times \text{最高病级代表值}} \times 100 \quad (1)$$

调查样地的林分密度、平均树高、胸径、枝下高、郁闭度、冠幅 6 个林分因子。其中,树高、枝下高、胸径和冠幅通过调查上述 10 株样本木获得,郁闭度使用 CI-110 冠层数字成像仪(CID Inc., Vancouver, Washington State USA)测得。

表 1 昆崙山腮扁叶蜂发生特征

Table 1 Occurrence characteristics of Kunyushan web-spinning sawfly

有虫株率/% PI/%	样地数/个 The number of Plots	占调查样地比例/% The proportion of survey plots	虫口密度/(头·株 <sup>-1</sup> ) Population density	样地数/个 The number of Plots	占调查样地比例/% The proportion of survey plots
PI=0	34	28.11	0	34	28.11
0<PI≤20	18	14.87	1~10	33	27.27
20<PI≤40	22	18.19	11~30	37	30.58
40<PI≤60	20	16.52	31~50	10	8.26
PI>60	27	22.31	>50	7	5.78

表2 昆嵛山腮扁叶蜂为害株分级标准

Table 2 Standard for strain classification of *Cephalcia kunyushanica*

虫级 Pest classification	代表值 Representative value	分级依据/(头·株 <sup>-1</sup> ) Classification basis
I	0	0
II	1	1~10
III	2	11~30
IV	3	31~50
V	4	>50

### 1.3 虫基指数定量方法

虫基指数的定量方法包含以下9个步骤:

1) 样地的设立。在林龄相对一致的纯林生态系统中选定标准样地, 并以特定虫害作为研究对象。

2) 虫情指数的调查、记录。调查特定纯林中主要虫害的发生情况, 然后按五级分级加权平均数法求出虫情指数, 用它作为虫基指数模型的纵坐标。

3) 林分因子的调查。指标和方法参照 1.2.2。

4) 关键林分因子的筛选。通过逐步回归法对上述林分因子进行筛选, 将选出的某个关键林分因子或某几个关键林分因子组成的综合变量作为虫基指数模型的自变量。

5) 基准点的确定。基准点对虫基指数模型的影响十分显著, 选择不当会影响对虫情指数的准确评价。本研究将基准点定义为主曲线的虫情指数为 50 时对应的关键林分指标值。

6) 备选主曲线模型的建立。先通过 80% 的样本数据点在散点图中的分布趋势, 初步确定主曲线的类型, 然后在 Origin 8.0 中建立下列 3 个模型, 将其作为备选主曲线。

$$Q = a / (1 + b \times e^{cx+k}) \quad (2)$$

$$Q = ax^2 + bx + c \quad (3)$$

$$Q = a * \ln(x+b) \quad (4)$$

式中  $x$  为经逐步回归分析后, 筛选的某个关键林分因子或由某几个关键林分因子组成的综合变量。

7) 主曲线模型的确定和评价。主曲线模型的评价包含两部分: 第一, 对所构建的虫基指数模型本身的评价, 主要通过决定系数  $R^2$  和均方根误差  $RMSE$  来评价; 第二, 利用未参加建模的数据 (20% 样本数据) 对由虫基指数模型推算出的虫情指数进行评价, 除  $R^2$  和  $RMSE$  外, 还选用平均误差  $MAE$ 、总体相对误差  $TRE$  和平均预估误差  $MPE$

3 个指标, 确定模型的拟合效果和可靠性<sup>[11-12]</sup>。检验公式为:

决定系数:

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^N (Q_i - \widehat{Q}_i)^2}{\sum_{i=1}^N (Q_i - \bar{Q})^2} \quad (5)$$

均方根误差:

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (\widehat{Q}_i - Q_i)^2}{n - 1 - p}} \quad (6)$$

平均误差:

$$MAE = \frac{1}{n} \sum |\widehat{Q}_i - Q_i| \quad (7)$$

总体相对误差:

$$TRE = \frac{\sum (Q_i - \widehat{Q}_i)}{\sum \widehat{Q}_i} \times 100\% \quad (8)$$

平均预估误差:

$$MPE = t_\alpha \times \frac{S}{\bar{Q}} / \sqrt{n} \times 100\% \quad (9)$$

8) 主曲线的绘制。通过选定的方程模型绘制主曲线图。

9) 曲线群的建立。采用等比值法, 以虫情指数为 50 时的林分要素值为基准点, 以主曲线为中心, 通过等比值法分别向上、向下各拟合出 2 个函数模型, 共 5 个函数模型。

### 1.4 数据分析

采用 Microsoft Excel 2007 处理实验数据, 采用 SPSS 软件 (22.0 版) 进行逐步回归分析, 采用 Origin 作昆嵛山腮扁叶蜂虫情指数与关键林分因子的曲线图。

## 2 结果与分析

### 2.1 昆嵛山腮扁叶蜂虫基指数主曲线

2.1.1 影响昆嵛山腮扁叶蜂关键林分因子的筛选  
在揭示昆嵛山腮扁叶蜂的发生与赤松纯林林分因子的关系中, 胡瑞瑞等<sup>[13]</sup>已经通过逐步回归法证明枝下高、林分密度和冠幅能较准确地估计虫情指数的变化; 且偏相关分析表明虫情指数与冠幅的偏相关程度最高。所以, 本研究选择冠幅为昆嵛山腮扁叶蜂虫基指数模型的横坐标。

2.1.2 昆嵛山腮扁叶蜂虫基指数主曲线模型的确定和评价  
利用 80% 的样本数据分别拟合模型

(2)~(4)式,并根据(5)和(6)式计算决定系数 $R^2$ 和均方根误差 $RMSE$ ,其结果见表3。综合各拟合方程的决定系数 $R^2$ 和均方根误差 $RMSE$ 以及林地中虫害随平均冠幅发生的实际规律,确定冠幅——虫情指数的主曲线方程为 $Q=75.53/(1+e^{-0.84x+3.40})$ ,计算得平均冠幅基准点为4.85 m,表示在该平均冠幅值下,赤松林样地遭受昆嵛山腮扁叶蜂为害的严重程度是50。拟合模型的0.5230根据总决定系数等于1的原理,则误差项的决定系数为 $1-0.5230=0.4770$ 。表明影响昆嵛山腮扁叶蜂虫情指数的52.30%是由冠幅引起的,尚有47.70%是由以立地因子为主的其他因素和误差所致。

表3 各主曲线拟合结果

Table 3 The fitting result of each guide curve

主曲线 Guide curves	$R^2$	$RMSE$
$Q=75.53/(1+e^{-0.84x+3.40})$	0.523 0	15.427 6
$Q=-0.21x^2+13.39x-14.63$	0.508 1	15.244 5
$Q=27.33*\ln(x-0.24)$	0.462 3	16.199 0

确定主曲线方程的表达式后,用未参与建模的24个样地的数据对进行场外检验。5个评价指标分别是 $R^2=0.5040$ , $RMSE=16.6062$ , $MAE=9.5770$ , $TRE=-2.66\%$ , $MPE=10.72\%$ 。 $MPE=10.72\%$ 说明平均预估精度为89.28%, $TRE$ 的值较趋近于0,说明所拟合方程可信度较高。

2.1.3 昆嵛山腮扁叶蜂主曲线的绘制 在确定最优主曲线方程后绘制主曲线图(图1)。由主曲线可知,当平均冠幅小于2.00 m时,虫情指数随平均冠幅的增加而缓慢上升;当平均冠幅在2.00~

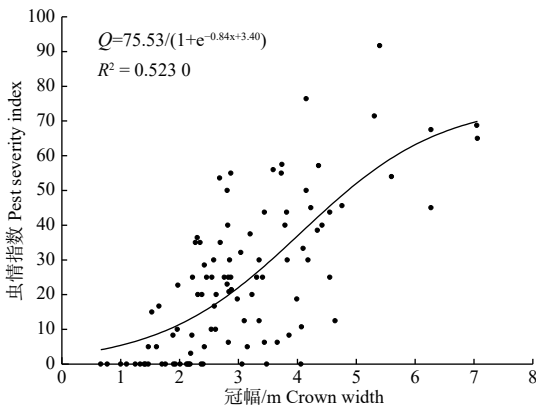


图1 昆嵛山腮扁叶蜂虫基指数主曲线

Fig. 1 Guide PBI curve of Japanese red pine needle blight

6.00 m之间时,虫情指数随着平均冠幅的增大而显著增大;当平均冠幅大于6.00 m时,虫情指数的增加幅度减小,说明此时平均冠幅对虫情指数的影响作用较小。

## 2.2 昆嵛山腮扁叶蜂虫基指数曲线群的绘制

由主曲线 $Q=75.53/(1+e^{-0.84x+3.40})$ 得:

$$Q_I = 15.10 / (1 + e^{-0.84x+3.40}) \quad (10)$$

$$Q_{II} = 45.31 / (1 + e^{-0.84x+3.40}) \quad (11)$$

$$Q_{III} = 75.53 / (1 + e^{-0.84x+3.40}) \quad (12)$$

$$Q_{IV} = 105.74 / (1 + e^{-0.84x+3.40}) \quad (13)$$

$$Q_V = 135.95 / (1 + e^{-0.84x+3.40}) \quad (14)$$

$Q_I$ 、 $Q_{II}$ 、 $Q_{III}$ 、 $Q_{IV}$ 和 $Q_V$ 分别表示曲线群中5条虫基指数曲线的虫情指数。曲线群图(图2)所示,虫基指数V所反映的立地状况非常适合昆嵛山腮扁叶蜂的发生,它对昆嵛山腮扁叶蜂的潜在发生程度的作用等级为V级;代入公式(14)得,当冠幅大于3.45 m时,该样地的虫情指数就达50以上,说明这类立地与赤松不匹配。对虫基指数I的林地而言,昆嵛山腮扁叶蜂在这类立地中极轻度发生;虫情指数在冠幅小于5.50 m的范围内有较小幅度的增加,之后趋于平缓。所以在虫基指数I的林地中,具有任意平均冠幅的赤松林均较小程度的遭受昆嵛山腮扁叶蜂的为害。

## 2.3 昆嵛山腮扁叶蜂虫基指数的应用

根据虫基指数的定义,凡位于2条中线范围内的点均表示同一等级的虫基指数。为更准确、简便地在虫基指数曲线群图中判断出任一赤松(34±

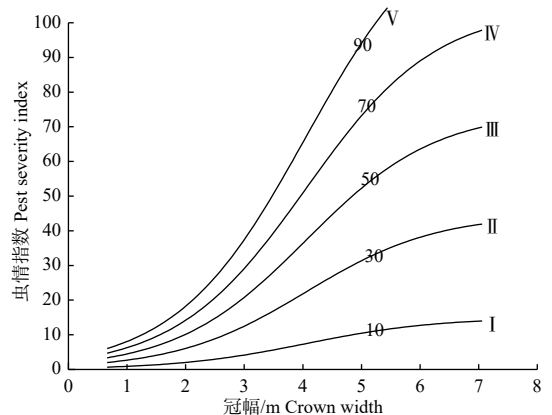


图2 昆嵛山腮扁叶蜂虫基指数曲线群

Fig. 2 PBI curve group of Japanese red pine needle blight

2 a) 纯林地的虫基指数状况, 需在上述虫基指数曲线群 (图 2) 的基础上, 继续按等比值法扩展出 4 条中线 (图 3), 4 条中线的表达式如下:

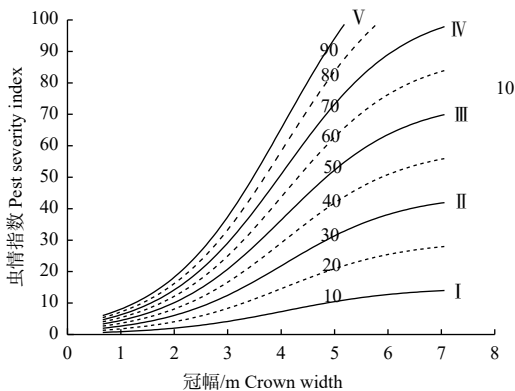


图 3 昆嵛山腮扁叶蜂虫基指数曲线群 (含中线)

Fig. 3 PBI curve group of Japanese red pine needle blight (Containing midcourtline)

$$Q_{20}=30.21/(1+e^{-0.84x+3.40}) \quad Q_{40}=60.42/(1+e^{-0.84x+3.40});$$

$$Q_{60}=90.63/(1+e^{-0.84x+3.40}); \quad Q_{80}=120.85/(1+e^{-0.84x+3.40})$$

其中,  $Q_{20}$ 、 $Q_{40}$ 、 $Q_{60}$  和  $Q_{80}$  均表示冠幅基准点处的虫情指数, 分别为 20、40、60 和 80。即若样本点落在  $Q_{20}$  以下时, 则该赤松林地的虫基指数为 I; 若样本点落在  $[Q_{20}, Q_{40})$  区间内, 则该赤松林地的虫基指数为 II; 若样本点落在  $[Q_{40}, Q_{60})$  区间内, 则该赤松林地的虫基指数为 III; 若样本点落在  $[Q_{60}, Q_{80})$  区间内, 则该赤松林地的虫基指数为 IV; 当样本点落在中线  $Q_{80}$  及以上, 则该赤松林地的虫基指数为 V。

若调查某赤松 ( $34 \pm 2$  a) 纯林的平均冠幅是 4.55 m, 虫情指数为 25, 则基于昆嵛山腮扁叶蜂虫基指数曲线群 (含中线) 图 (图 3), 此点落在中线  $Q_{20}$  以上和  $Q_{40}$  以下, 所以按照上述虫基指数曲线群图的应用依据, 可知该样地虫基指数为 30, 潜在遭受昆嵛山腮扁叶蜂为害的程度为 II 级, 即虫害在此立地条件下轻度发生; 若调查林地的平均冠幅是 3.79 m, 虫情指数为 24, 则此点落在中线  $[Q_{40}, Q_{60})$  区间内, 说明该样地的虫基指数为 50, 立地对昆嵛山腮扁叶蜂潜在发生程度的作用等级为 III 级。

### 3 讨论

昆嵛山森林生态系统在将近 40 年的封山育林过程中, 没有通过喷施化学农药的方法对森林病虫

害进行处理, 且整个林区森林人为干扰少, 基本上处于自然演化的状态, 在全国比较罕见。昆嵛山森林的自然生长状态为研究森林演替过程, 病虫害的发生规律及生物多样性的变化提供了理想的场所。昆嵛山是我国赤松天然林的原生地 and 分布中心, 在该地区的分布面积有 11 546.3  $\text{hm}^2$ 。大面积的赤松天然林为本研究提供了充足的纯林样地, 且在昆嵛山区的赤松纯林中, 病虫害种类较少, 可以减少对所研究虫害相关指标的干扰; 又因气候条件在同一研究区域的纯林生态系统中相似, 所以可不将其作为影响因子。

以昆嵛山区相对同龄的赤松纯林为研究对象建立虫基指数模型, 林分因子的逐步回归分析表明, 影响昆嵛山腮扁叶蜂发生的重要林分因子有冠幅、枝下高和林分密度, 偏相关分析进一步证明冠幅是影响昆嵛山腮扁叶蜂发生最关键的因子, 所以将它作为昆嵛山腮扁叶蜂虫基指数模型的横坐标。依据本研究提出的虫基指数模型的建立方法, 建立昆嵛山腮扁叶蜂虫基指数主曲线模型和曲线群图。主曲线的表达式为:  $Q=75.53/(1+e^{-0.84x+3.40})$ ,  $R^2=0.5230$ ,  $RMSE=15.4276$ 。模型的 5 个场外检验指标值亦证明该模型符合精度要求和虫害随冠幅发生的实际规律, 为后续开展与此相关的研究提供了准确性保障。

主曲线代表“所有立地条件下的各样本虫害的发生程度与关键林分因子之间的关系”。理论上, 如果每个样地的虫情指数的差异均由林分因子引起, 则主曲线图中各点应落在主曲线上。但实际中很多点没有落在主曲线上, 且距主曲线有不同的离差, 这种现象正是由各样地的立地对虫害的发生具有不同的作用及误差所引起。因此在昆嵛山腮扁叶蜂虫基指数主曲线的基础上, 采用等比值法建立曲线群图。依据昆嵛山腮扁叶蜂虫基指数曲线群图, 基于关键林分因子影响下的纯林有林地发生虫害的程度, 来评价其所处立地对虫害的潜在发生程度的作用等级。

与以往用有虫株率、虫情指数或虫口密度来评价森林虫害的发生状况<sup>[14-16]</sup>相比, 本研究在主曲线的基础上所形成的由 5 条曲线组成的曲线群图不仅能查找出以定量数值表示的虫基指数, 还可以定量评价出不同的立地对虫害的影响程度或作用等级。同时, 本研究以立地因子为评价要素, 为后续研究中预测无林地种植赤松后遭受昆嵛山腮扁叶蜂为害

的严重程度提供可靠的理论支撑。5条曲线在基准点的值分别为10、30、50、70、90,此值代表了昆嵛山腮扁叶蜂在赤松纯林中由于立地的不同而表现的潜在发生程度,或是立地对该虫害潜在发生程度的作用等级,即不同的虫基指数值。自下而上分别表示为:Ⅰ级——极轻度虫害发生、Ⅱ级——轻度虫害发生、Ⅲ级——中度虫害发生、Ⅳ级——重度虫害发生、Ⅴ级——特重度虫害发生。由虫基指数Ⅰ的曲线可知,生长在这类立地中的赤松不易遭受昆嵛山腮扁叶蜂的为害,所以这类立地对昆嵛山腮扁叶蜂的作用等级最小。理论上讲,该曲线显示任一平均冠幅的赤松林发生虫害的严重程度均无较大程度的变化。曲线簇图可以为赤松纯林合理、有效的管理提供理论基础,通过调控不同类型林地的冠幅大小而使得虫害的发生程度保持在一个较低水平。

昆嵛山腮扁叶蜂虫基指数指标及模型为阐明昆嵛山腮扁叶蜂的发生机理提供新思路,突破以往单纯依赖人工措施调控虫害的观念,完善了昆嵛山腮扁叶蜂的防治理论和生态学理论。将森林保护学与生态学紧密结合,运用生态学理论与方法,从全新的视角解析昆嵛山腮扁叶蜂受林分因子、立地条件的影响过程。但本研究所选赤松纯林样地属于临时样地,由于临时样地的相关数据是在短期内测量完成的,使昆嵛山腮扁叶蜂虫基指数模型的误差增加,加之该模型目前只适用指导昆嵛山区赤松的种植。因此,今后的研究需在特定区域内设立固定样地,以提高模型的精度;同时需继续建立昆嵛山腮扁叶蜂感染其它针叶树种的虫基指数曲线群,进而达到通过配置合适的树种,人为减少森林虫害的目标。

## 4 结论

(1)对虫基指数概念的定性描述是合理的,它可定量评价赤松林的立地因子对昆嵛山腮扁叶蜂的潜在发生程度的作用等级。(2)依据所提虫基指数的定量方法建立昆嵛山腮扁叶蜂虫基指数主曲线模型,对所建模型进行检验,证明模型可靠,说明定量方法是正确的。(3)昆嵛山腮扁叶蜂虫基

指数主曲线模型和曲线群图可以为赤松纯林合理、有效的管理提供理论基础,将昆嵛山腮扁叶蜂发生的严重程度控制在一个较低的水平,从而达到真正实现森林有害生物生态控制的目的。

## 参考文献:

- [1] 萧刚柔. 中国扁叶蜂: 膜翅目: 扁叶蜂科[M]. 北京: 中国林业出版社, 2002: 60-62
- [2] 萧刚柔. 中国叶蜂四新种(膜翅目, 广腰亚目: 扁叶蜂科、叶蜂科)[J]. 林业科学研究, 1990, (6): 548-552.
- [3] 王传珍, 王京刚, 杨隽, 等. 昆嵛山腮扁叶蜂生物学特性研究[J]. 森林病虫通讯, 2000, 19(4): 20-22.
- [4] Root R B. Organization of a plant-arthropod association in simple and diverse habitats: The fauna of Collards (*Brassica Oleracea*)[J]. Ecological Monographs, 1973, 43: 95-124.
- [5] O'Rourke M E, Petersen M J. Extending the 'resource concentration hypothesis' to the landscape-scale by considering dispersal mortality and fitness costs[J]. Agriculture, Ecosystems and Environment, 2017, 249: 1-3.
- [6] 张献英, 霍治国, 犹昌艳, 等. 20种非寄主植物挥发物对褐飞虱拒避与引诱行为的影响[J]. 华南农业大学学报, 2014, 35(3): 63-68.
- [7] Potter C, Urquhart J. Tree disease and pest epidemics in the Anthropocene: A review of the drivers, impacts and policy responses in the UK[J]. Forest Policy and Economics, 2017, 79: 61-68.
- [8] Dainese M, Schneider, K J, et al. Complementarity among natural enemies enhances pest suppression[J]. Scientific Reports, 2017, 7: 81-72.
- [9] Evans A M. The speed of invasion: rates of spread for thirteen exotic forest insects and diseases[J]. Forests, 2016, 7: 1-11.
- [10] 孙志强, 张星耀, 林琳, 等. 赤松纯林林分特征对昆嵛山腮扁叶蜂发生量的影响[J]. 生态学报, 2010, 30(4): 857-866.
- [11] 惠刚盈, 张连金, 胡艳波, 等. Richards 多形地位指数模型研建新方法——参数置换法[J]. 林业科学研究, 2010, 23(4): 481-486.
- [12] 马克西, 曾伟生, 侯晓巍. 青海省林木胸径生长量与生长率模型研究[J]. 林业资源管理, 2018, (4): 22-27.
- [13] 胡瑞瑞, 梁军, 谢宪, 等. 昆嵛山腮扁叶蜂发生与赤松纯林林分因子的关系[J]. 生态学杂志, 2019, 38(5): 1285-1291.
- [14] 罗永松, 黄昌华, 温小遂, 等. 萧氏松茎象幼虫有虫株率与虫口密度相关关系[J]. 中国森林病虫, 2006, 25(5): 15-18.
- [15] 柴建萍, 余凌翔, 谢道燕, 等. 桑红蜘蛛、桑蓟马在云南省不同地域桑园的发生规律及防控要点[J]. 蚕业科学, 2010, 36(3): 475-480.
- [16] Shi Y, Huang W, Luo J, et al. Detection and discrimination of pests and diseases in winter wheat based on spectral indices and kernel discriminant analysis[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2017, 141: 171-180.

# Pest Based Index Model of *Cephalcia kunyushanica* in Kunyushan Mountains

HU Rui-rui<sup>1,2</sup>, LIANG Jun<sup>1,3</sup>, XIE Xian<sup>1</sup>, ZHANG Ying-jun<sup>3</sup>, ZHANG Xing-yao<sup>1,3</sup>

(1. Research Institute of Forest Ecology, Environment and Protection, Chinese Academy of Forestry, Key Laboratory of Forest Protection of National Forestry and Grassland Administration, Beijing 100091, China; 2. Institute of Plant Protection, Tianjin Academy of Agricultural Sciences, Tianjin 300000, China; 3. Kunyushan Forest Ecosystem Research Station, Yantai 264100, Shandong, China)

**Abstract:** [Objective] To establish a pest based index (PBI) evaluation system of Kunyushan web-spinning sawfly (*Cephalcia kunyushanica*) and to quantitatively evaluate the effects of site factor on the occurrence degree of *C. kunyushanica* co-affected with other stand factors in pure forest. [Method] Based on the basic principles of forest pest occurrence, the results affecting the occurrence of *C. kunyushanica* were attributed to the comprehensive effect of stand factor and site factor. Temporary sample plots were set up in the pure forest ecosystem of Japanese red pine (*Pinus densiflora*) with the same age-gradation to choose the key stand factors affecting the occurrence of *C. kunyushanica*, the functional relationship between the key stand factors and the pest severity index of *C. kunyushanica* were establish, and the optimal model was select as the guide curve. The PBI curve group of *C. kunyushanica* was obtained by stretching the guide curve in an equal proportion, and the bottom up of the curve showed different PBIs, i.e. the effect level of site factors on the occurrence degree of *C. kunyushanica*. [Result] (1) Based on the basic principle of forest pest occurrence, the concept PBI was proposed. (2) The PBI quantitative method of *C. kunyushanica* was determined, which contained 9 steps: setting sample, investigating the pest severity index of stands, investigating the site factor and stand factor, screening the key stand factor, determining the data of stand factor, establishing the alternative guide curve model, determining and evaluating guide curve model, drawing the guide curve, and establishing the curve groups. (3) Stepwise regression and partial correlation analysis showed that crown width was the key stand factor affecting the occurrence of *C. kunyushanica*. The guide curve equation was established according to the proposed quantitative method:  $Q=75.53/(1+e^{-0.84x+3.40})$ , and the determination coefficient was  $R^2=0.5230$ , indicating that the fitting equation was reliable. The average estimation accuracy of this model was 89.28% when using it to estimate the pest severity index. (4) A quantitative evaluation system was established by stretching the main curves of the PBI of red spot blight in equal proportions to form a curve group. The five curves in the system represented the different degrees of occurrence of *C. kunyushanica* respectively from bottom to top. [Conclusion] This study indicates that the guide curve model and curve group diagram of the PBI of *C. kunyushanica* can quantitatively evaluate the effect of site factors on the potential occurrence degree of *C. kunyushanica*, and can be used as an important tool in the ecological control of forest pests.

**Keywords:** *Pinus densiflora*; *Cephalcia kunyushanica*; pest based index; Kunyushan

(责任编辑: 崔 贝)