

DOI:10.13275/j.cnki.lykxyj.2021.01.010

赤松宜林地昆嵛山腮扁叶蜂虫基指数的评估

胡瑞瑞^{1,2}, 梁 军^{1,3*}, 谢 宪¹, 车吉明³, 苑晓雯³, 张星耀^{1,3}

(1. 中国林业科学研究院森林生态环境与保护研究所 国家林业和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 300384; 3. 昆嵛山森林生态系统定位研究站, 烟台 264100)

摘要: [目的] 通过构建昆嵛山腮扁叶蜂虫基指数——立地因子评价体系, 定量评估赤松宜林地潜在遭受昆嵛山腮扁叶蜂危害程度的等级, 进而避免在严重为害的宜林地中种植赤松。[方法] 基于昆嵛山腮扁叶蜂虫基指数曲线群图, 查找每块样地的虫基指数。通过相关性分析筛选关键立地因子, 运用数量化理论 I 分别建立昆嵛山腮扁叶蜂虫基指数与全部立地因子和关键立地因子的关系方程, 并对方程模型做出评价。[结果] (1) 相关性分析表明, 海拔、坡度、腐殖质层厚度和土壤质地对虫基指数具有极显著的影响 ($P < 0.01$), 且对其贡献力呈依次增大的趋势。(2) 全部立地因子和关键立地因子与虫基指数的多元线性回归模型在统计学上均达到极显著水平 ($P < 0.01$), 决定系数 (R^2) 分别为 0.823 和 0.730, 说明模型的拟合效果较好, 且可用 4 个关键立地因子代替全部立地因子作为方程自变量。(3) 对由关键立地因子所建模型推算出的虫基指数进行评价, 结果表明平均预估误差 (MPE) 是 5.87%, 即预估精度为 94.13%, 且 TRE 值均趋近于 0, 模型较可靠。[结论] 昆嵛山腮扁叶蜂虫基指数——立地因子评价体系可以定量评估赤松宜林地潜在遭受昆嵛山腮扁叶蜂为害的程度, 能够为适地适树地栽植赤松林以及预防昆嵛山腮扁叶蜂提供理论基础。

关键词: 昆嵛山腮扁叶蜂; 虫基指数; 立地因子; 赤松宜林地

中图分类号: S763.43

文献标志码: A

文章编号: 1001-1498(2021)01-0080-08

昆嵛山腮扁叶蜂 (*Cephalcia kunyushanica* Xiao) 是仅分布在昆嵛山的食叶昆虫, 属昆嵛山特有^[1], 1983 年首次于该森林生态系统中发现, 属膜翅目 Hymenoptera 扁叶蜂科 Pamphiliidae, 在昆嵛山一年发生一代; 每年 6—8 月为害, 能够持续 50~60 天, 蛹期有 15~25 天^[2-3]。该食叶害虫咬食松针后, 发生较轻时, 松树呈枯黄状态, 发生严重时则会导致松树死亡, 幼虫会在松针基部以吐丝结网的形式筑巢。

虫基指数 (Pest based index, PBI) 是指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虫基指数指标, 其值域为 0~100。在前期发表的论文中已确立了昆嵛山腮扁叶蜂与冠幅的关系方程, 即昆嵛山腮扁叶蜂虫基指数主曲线^[4], 它是本研究建立虫基指数曲线群的基础。

立地因子对森林病虫害的发生具有重要作用^[5-6]。因此, 为了在实际营林过程中, 避免因树种和立地不匹配, 出现害虫严重为害林木的现象, 需对种植在宜林地中的特定树种与宜林地的适合性做出预判。本研究以昆嵛山腮扁叶蜂虫基指数模型^[4]为基

收稿日期: 2020-03-06 修回日期: 2020-04-24

基金项目: 国家重点研发计划课题 (2017YFD0600104); 中央级公益性科研院所基本科研业务费专项资金项目 (CAFYBB2019sy023-2); 国家自然科学基金面上项目 (31270682); 山东昆嵛山森林生态系统国家定位观测研究站运行补助 (2019132127)

* 通讯作者: Email: liangjun@caf.ac.cn

础, 建立其与立地因子的关系方程。用于定量预测某宜林地种植赤松后, 其遭受昆嵛山腮扁叶蜂的危害程度, 从而能够选择在昆嵛山腮扁叶蜂为害程度低的宜林地种植赤松。

1 研究区概况与研究方法

1.1 研究区概况

昆嵛山 (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, 山脉地跨威海和烟台两界, 总面积 15416.5 hm²。该区域受暖温带季风气候影响, 气候温和, 年均气温 12.3 °C, 年降水量为 800~1200 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 (*Pinus densiflora* Sieb. et Zucc.) 林、黑松 (*Pinus thunbergii* Parl.) 林、日本落叶松 (*Larix kaempferi* (Lamb.) Carr) — 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。赤松林作为昆嵛山的主要建群种, 从山麓至海拔 800 m 均有分布。

1.2 研究方法

1.2.1 样地设置 依据昆嵛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。选取林龄相对一致 (34 ± 2) a、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 昆嵛山腮扁叶蜂虫基指数的获得 依据昆嵛山腮扁叶蜂虫基指数曲线群图 (图 1), 已知各林分的平均冠幅和虫情指数后, 在图中对应找出每块样地的虫基指数, 各样地所对应的虫基指数如表 1 所示。

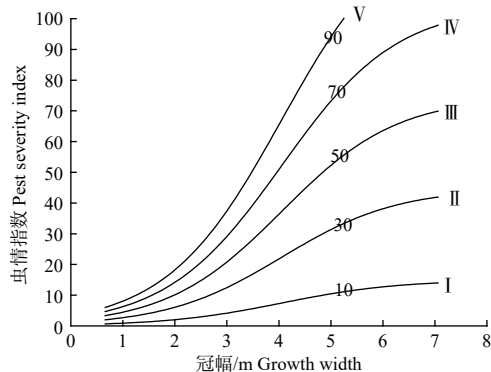


图 1 昆嵛山腮扁叶蜂虫基指数曲线群

Fig. 1 PBI curve group of *Cephalcia kunyushanica*

1.2.3 立地因子项目和类目的选择 该步骤选择地形地貌因素: 海拔、坡度、坡向、坡位和坡形; 选择土壤因子: 土壤质地、土层厚度和腐殖质层厚度为数量化模型的因子项目。并对各个定性因子进行分级处理, 连同协变量, 共 19 个类目 (表 2)。

1.2.4 自变量的筛选 在数量化理论 I 输出结果的因子方差分析表中, 通过各项目对昆嵛山腮扁叶蜂虫基指数影响的显著性大小, 筛选出对虫基指数具有显著影响的立地因子, 将其作为模型的自变量。

1.2.5 昆嵛山腮扁叶蜂虫基指数——立地因子模型的建立 数量化模型表示为:

$$y_i = \widehat{b}_0 + \sum_{j=1}^{p_1} \delta_{i(j,k)} b_{jk} + \sum_{j=p_1+1}^p \widehat{b}(j) \times x_j \quad (1)$$

式中: y_i 为因变量, 是第 i 块样地的虫基指数; \widehat{b}_0 为方程系数; $\delta_{i(j,k)}$ 为类目反应值, 当第 i 个标准地中, j 项目的定性数据为 k 类目的反应时, 取值为 1, 否则为 0; b_{jk} 为 j 项目 k 类目的得分值, ($j = 1, 2, \dots, m; k = 1, 2, \dots, r_j$); x_j 是定量因子的值。方程模型由 80% 的样本数据拟合而成。

1.2.6 模型评价 模型的评价包含两部分: 第一,

表 1 各样地虫基指数一览

Table 1 A list of PBI in each plot

样地号 Plot No.	冠幅 Canopy cover/m	虫情指数 PSI	虫基指数 PBI	样地号 Plot No.	冠幅 Canopy cover/m	虫情指数 PSI	虫基指数 PBI
1	4.66	85	90	62	6.27	45	30
2	2.18	0	10	63	7.06	65	50
3	4.15	75	90	64	5.16	67.5	50
.....
60	3.44	6.25	10	121	4.10	35	50
61	3.83	55	70				

表2 各立地因子项目及类目划分标准

Table 2 The criteria for classification of each site factor item and category

项目 Item	代号 Code	类目等级 Category hierarchy			
		1	2	3	4
坡形 Slope form	x_1	平直 Flat	凹 Concave	凸 Convex	复合 Composite
坡向 Slope exposure	x_2	阳坡 Sunny	半阴坡 Semishaded	半阳坡 Semisunny	阴坡 Shaded
坡位 Slope position	x_3	下坡位 Lower	中坡位 Middle	上坡位 Upper	
土壤质地 Soil texture	x_4	壤土 Loam	砂壤土 Sandy loam	砂土 Sandy	粘土 Clay
海拔 Elevation/m	x_5				
坡度 Slope degree/ $^\circ$	x_6				
土层厚度 Soil depth/cm	x_7				
腐殖质层厚度 Humus depth/cm	x_8				

对所构建模型本身的评价, 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) 对由昆崙山腮扁叶蜂虫基指数——立地因子模型推算出的虫基指数进行评价, 除 R^2 和 $RMSE$ 外, 还选用绝对平均误差 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^[7-8]。检验公式为:

$$\text{决定系数: } R^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^N (Q_i - \widehat{Q}_i)^2}{\sum_{i=1}^N (Q_i - \bar{Q})^2} \quad (2)$$

$$\text{均方根误差: } RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (\widehat{Q}_i - Q_i)^2}{n-1-p}} \quad (3)$$

$$\text{绝对平均误差: } MAE = \frac{1}{n} \sum |\widehat{Q}_i - Q_i| \quad (4)$$

$$\text{总体相对误差: } TRE = \frac{\sum (Q_i - \widehat{Q}_i)}{\sum \widehat{Q}_i} \times 100\% \quad (5)$$

$$\text{平均预估误差: } MPE = t_\alpha \times \frac{S}{\bar{Q}} / \sqrt{n} \times 100\% \quad (6)$$

式中, Q 为实际测量值, \widehat{Q}_i 为模型估计值, \bar{Q} 为样

本平均值, n 为调查样本个数, p 为模型参数个数, t_α 为置信水平 α 时的 t 值。

1.3 数据分析

昆崙山腮扁叶蜂虫基指数在各关键因子中的分布特征通过单因素方差分析, 并进行 Tukey 多重比较, 差异在 5% 的水平上显著。以上操作全部在 SPSS v22.0 (美国, IBM) 中完成。

数量化方法 I 既可以处理海拔、坡度、土壤厚度等定量的立地因子, 又可以处理坡向、坡位和土壤质地等定性的立地因子, 通过 F 检验来筛选对因变量有显著影响作用的因子, 并建立因变量对自变量的回归方程^[9], 此过程通过 Forstat 2.1 完成。

2 结果与分析

2.1 关键立地因子的筛选

通过 F 检验可知, 立地因子中, 海拔、坡度、腐殖质层厚度和土壤质地对虫基指数的影响极显著。由平方和的值可知, 4 个关键立地因子对虫基指数的贡献大小顺序是土壤质地 > 腐殖质层厚度 > 坡度 > 海拔 (表 3)。

2.2 虫基指数与关键立地因子的关系

为明确昆崙山腮扁叶蜂虫基指数在各关键立地

表3 关键立地因子的筛选

Table 3 The screening of key site factors

虫基指数 PBI	海拔 Elevation	坡度 Slope degree	土层厚度 Soil depth	腐殖质层厚度 Humus depth	坡形 Slope forms	坡向 Slope exposure	坡位 Slope position	土壤质地 Soil texture
平方和 SS	2 434.880	3 244.512	228.793	3 510.292	900.440	461.781	200.188	6 510.292
F值 F value	12.138	16.175	1.141	16.274	1.496	0.767	0.499	32.455
P值 P value	<0.01	<0.01	0.288	<0.01	0.220	0.515	0.609	<0.01

$F = 27.549 P < 0.01$

因子中的分布情况,将各立地因子按实际分布范围进行分组。图 2A 表明虫基指数在低海拔林分 (< 100 m)、中海拔林分 (100~200 m, 200~300 m) 和高海拔林分 (> 300 m) 的分布情况。研究海拔对昆嵛山腮扁叶蜂虫基指数的影响,表明虫基指数在不同海拔分组间差异显著 ($F=27.258, P<0.01$),且二者呈正相关。虫基指数以高海拔林分最高,平均值为 71.76,属于 IV 级,表明该立地条件下,昆嵛山腮扁叶蜂严重发生,危害等级高。图 2B 表明,昆嵛山腮扁叶蜂虫基指数受不同的坡度分组影响极显著 ($F=6.775, P<0.01$)。缓坡上赤松林的昆嵛山腮扁叶蜂虫基指数高于陡坡。坡

度在 0~25° 范围内,昆嵛山腮扁叶蜂虫基指数在各组间无显著差异;但虫基指数值在坡度大于 26° 的样地上显著低于坡度小于 15° 的样地上。将土壤质地分为壤土、砂壤土、砂土和粘土 4 种类型。由图 2C 可知,虫基指数在生长于粘土的赤松林分中发生最轻 (12.73),属于 I 级;壤土和砂壤土中发生最重 (66.67 和 61.28),均属于 IV 级。总体上,不同分组的土壤质地对赤松发生的影响极显著 ($F=47.036, P<0.01$)。图 2D 显示,虫基指数随土壤腐殖质层厚度的增大而显著增大 ($F=54.594, P<0.01$)。

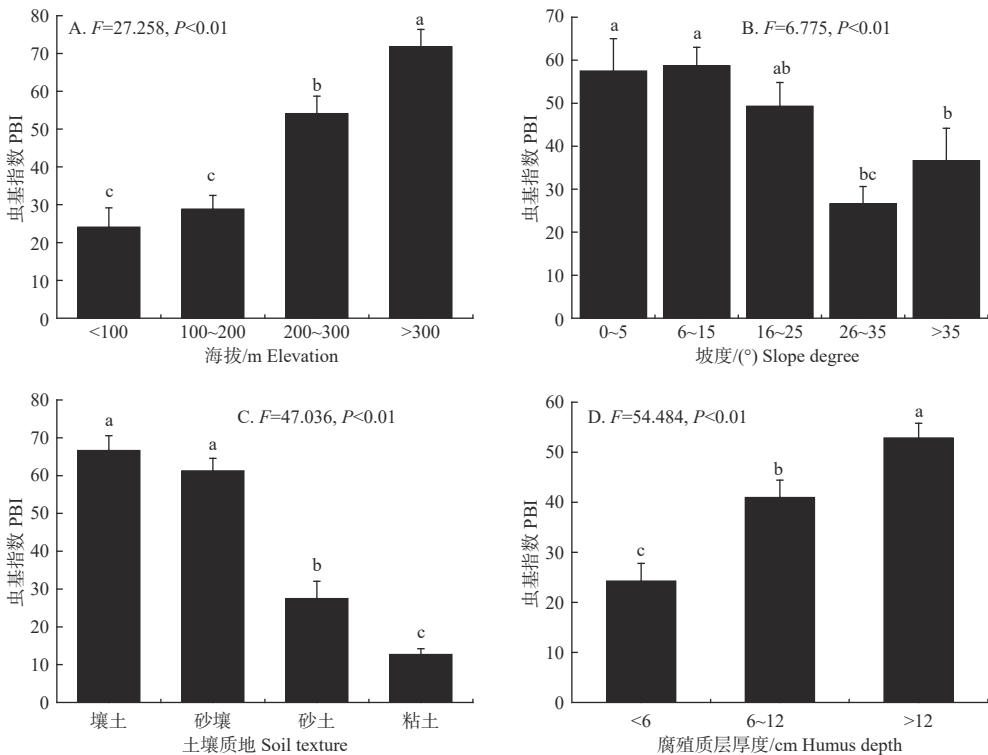


图 2 虫基指数与关键立地因子的关系

Fig. 2 The relationship between PBI and key site factors

2.3 宜林地虫基指数方程的建立

因为每个项目的最后一个类目是多余的,所以得分为 0。由表 4 可知,宜林地的虫基指数与全部立地因子构建的方程模型的表达式 (1) 为: $y = 15.270 - 7.920 x_{11} - 6.969 x_{12} - 5.849 x_{13} + 4.698 x_{21} - 2.145 x_{22} + 1.850 x_{23} + 3.080 x_{31} + 2.096 x_{32} + 28.000 x_{41} + 25.585 x_{42} + 5.318 x_{43} + 0.042 x_5 - 0.533 x_6 - 0.139 x_7 + 2.131 x_8$ 。其中,在所有类目中,平直坡、壤土、砂壤土、海拔、坡度和腐殖质层厚度的 P 值均较

小 ($P<0.05$)。

利用 4 个关键立地因子建立其与昆嵛山腮扁叶蜂虫基指数的方程,表达式 (2) 为: $y = 5.187 + 27.236 x_{41} + 29.914 x_{42} + 7.816 x_{43} + 0.048 x_5 - 0.497 x_6 + 2.157 x_8$ 。其中,壤土、砂壤土、海拔、坡度和腐殖质层厚度的 P 值均趋近于 0,说明这些参数不等于 0 的可靠性接近 100%,对虫基指数的影响极显著 (表 5)。

表4 各立地因子的数量化得分

Table 4 Quantitative score of each site factor

项目 Item	类目 Category	得分 Score	T值 T value	P值 P value	项目 Item	类目 Category	得分 Score	T值 T value	P值 P value
坡形 Slope form(x_1)	平直 Flat	-7.920	-2.041	0.044	土壤质地 Soil texture(x_4)	壤土 Loam	28.000	5.921	<0.001
	凹 Concave	-6.969	-1.615	0.109		砂壤土 Sandy loam	25.585	5.400	<0.001
	凸 Convex	-5.849	-1.449	0.150		砂土 Sandy	5.318	1.170	0.245
	复合 Composite	0.000				粘土 Clay	0.000		
坡向 Slope exposure(x_2)	阳坡 Sunny	4.698	0.868	0.387	海拔 Elevation(x_5)		0.042	3.484	<0.001
	半阴坡 Semishaded	-2.145	-0.438	0.662	坡度 Slope degree(x_6)		-0.533	-4.022	<0.001
	半阳坡 Semisunny	1.850	0.351	0.726	土层厚度 Soil depth(x_7)		-0.139	-1.068	0.288
	阴坡 Shaded	0.000			腐殖质层厚度 Humus depth(x_8)		2.131	6.013	<0.001
坡位 Slope position(x_3)	下 Lower	3.080	0.982	0.329	截距 Intercept		15.270	4.697	<0.001
	中 Middle	2.096	-0.438	0.550					
	上 Upper	0.000							

表5 关键立地因子数量化得分

Table 5 Quantitative score of key site factors

项目 Item	类目 Category	得分 Score	T值 T value	P值 P value	项目 Item	得分 Score	T值 T value	P值 P value
土壤质地 Soil texture(x_4)	壤土 Loam	29.914	6.612	<0.001	海拔 Elevation(x_5)	0.048	4.019	<0.001
	砂壤土 Sandy loam	27.236	6.280	<0.001	坡度 Slope degree(x_6)	-0.497	-3.898	<0.001
	砂土 Sandy	7.816	1.820	0.071	腐殖质层厚度 Humus depth(x_8)	2.157	6.423	<0.001
	粘土 Clay	0.000			截距 Intercept	5.187	5.187	<0.001

2.4 宜林地虫基指数方程模型的评价

F 检验表明 (表 6), 模型 (1) 和 (2) 的复相关系数 R 分别是 0.907 和 0.854, 且 $P < 0.01$, 说明回归方程非常显著, 而且复相关关系紧密, 故所建立的两个预测方程均有实际意义。同时, 决定系数 R^2 分别是 0.823 和 0.730, 均方根误差 $RMSE$ 分别是 6.832 和 7.091, 表明方程均较可靠。以上评价指标说明用关键立地因子和用全部立地因子所建方程的拟合效果相近, 所以, 用 4 个关键立地因子表示其与昆嵛山腮扁叶蜂虫基指数的方程模型既符合精度要求又减少了工作量。

依据方程 $y = 5.187 + 27.236 x_{41} + 29.914 x_{42} +$

表6 立地因子——昆嵛山腮扁叶蜂虫基指数模型拟合结果

Table 6 Fitting results of site factors-pest based index of *Cephalcia kunyushanica*

模型 Model	评价指标 Evaluation index			
	R	P	R^2	$RMSE$
(1)	0.907	<0.01	0.823	6.832
(2)	0.854	<0.01	0.730	7.091

$7.816 x_{43} + 0.048 x_5 - 0.497 x_6 + 2.157 x_8$, 分别根据所调查的 4 个关键立地因子, 求出未参与建模的 24 个样地的立地预估等级, 并和实测等级进行比较 (表 7)。因为立地对昆嵛山腮扁叶蜂发生的评估等级是依据不同区间的虫基指数划分所得, 所以只要虫基指数落在同一区间范围内, 则评估等级就相同。结果表明, 在 24 个调查样地中, 只有 3 个样地对虫害发生的评估等级有错误, 则样本平均正确率为 87.50%。对模型推算出的虫基指数进行评价, 5 个统计指标分别为: $R^2 = 0.705$, $RMSE = 8.681$, $MAE = 5.610$, $TRE = 0.12\%$, $MPE = 5.87\%$ 。 TRE 较小, 且为正值, 说明实际观测的虫基指数稍大于预估值; MPE 表明平均预估精度是 94.34%。图 3 表明模拟值与实测值之间的符合度高, 相关系数达 0.923, 当昆嵛山腮扁叶蜂虫基指数的实测值较高 (70 和 90) 时, 通过方程模型计算出的预测值则偏低低于实测值。

2.5 宜林地虫基指数方程的应用

为了定量评估特定立地条件下种植赤松人工林后昆嵛山腮扁叶蜂发生程度的作用等级, 将虫基指

表 7 所建模型用于昆嵛山腮扁叶蜂虫基指数预测时的评价指标

Table 7 Evaluation indices of developed models for predicting PBI of *Cephalcia kunyushanica*

序号 No.	实测等级 True grade	预测等级 Predicted grade	是否正确 Correct or not	序号 No.	实测等级 True grade	预测等级 Predicted grade	是否正确 Correct or not
1	III	III	是	13	II	II	是
2	I	I	是	14	III	III	是
3	V	IV	否	15	II	II	是
4	I	I	是	16	IV	IV	是
5	IV	IV	是	17	IV	IV	是
6	III	III	是	18	III	III	是
7	V	V	是	19	III	III	是
8	I	I	是	20	IV	III	否
9	I	I	是	21	IV	IV	是
10	IV	IV	是	22	V	V	是
11	V	V	是	23	IV	IV	是
12	I	I	是	24	IV	III	否
正确率%	87.50						
R^2	0.705						
RMSE	8.681						
MAE	5.610						
TRE/%	0.12						
MPE/%	5.87						

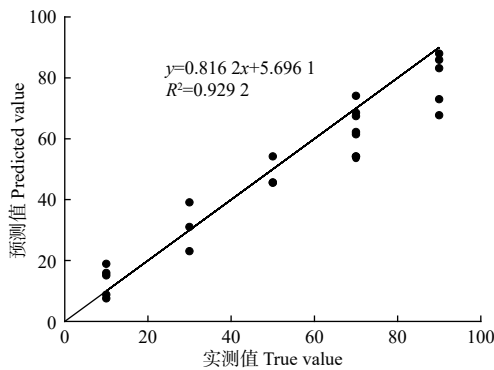


图 3 昆嵛山腮扁叶蜂虫基指数的预测值和实测值

Fig. 3 Predicted—Measured value of pest based index of *Cephalcia kunyushanica*

数分成 I、II、III、IV 和 V 5 个级别, 依次代表极轻度、轻度、中度、重度和特重度。所以在宜林地模型中, 也将虫基指数的值域 (0~100) 平均划分为 5 个区间, 即 5 个等级。如果测量一块宜林地的各项立地指标, 海拔是 310 m, 土壤质地为砂土, 坡度是 15°, 腐殖质层厚度是 24 cm, 则代入公式 $y = 5.187 + 7.816 \times 1 + 0.048 x_5 - 0.497 x_6 + 2.157 x_8$ 得虫基指数 $y = 72.19$, 表明昆嵛山腮扁叶蜂在此类

立地下种植赤松人工林将遭受的虫害等级为 IV 级 (重度发生)。

对昆嵛山区营造赤松纯林而言, 要使其极轻度或轻度遭受昆嵛山腮扁叶蜂的为害, 则需将赤松选择在低海拔的陡坡, 且土壤质地为粘土, 腐殖质层厚度薄的宜林地中种植, 将调查样地中符合上述立地条件的最值代入公式求得此时的虫基指数 $y = 0.06$ 。此时, 立地对昆嵛山腮扁叶蜂潜在发生程度的作用等级是 I 级, 为极轻度发生; 即, 在这类立地中种植的赤松遭受昆嵛山腮扁叶蜂为害的程度极低。但需避免在高海拔处的平坡、土壤质地为壤土且腐殖质层厚的区域种植赤松, 如赤松纯林在昆嵛山区分布的最高海拔是 660 m, 当在处于该海拔处的林地中选择坡度为 3°、土壤质地为壤土和腐殖质层厚度是 15 cm 的样地时, 代入公式得虫基指数 $y = 94.12$ 。此时, 立地对昆嵛山腮扁叶蜂潜在发生程度的作用等级是 IV 级, 为重度发生。但考虑到实践中粘土和腐殖质层薄的样地会降低赤松的生产力甚至影响其健康生长, 所以需综合考虑, 达到在能满足赤松健康生长的同时, 亦能将昆嵛山腮扁叶

蜂控制在轻度发生的范围内的目的。

3 讨论

生境因子中的地形地貌因子在一定程度上控制着太阳辐射和地表水分的空间再分配,形成局部生态环境的小气候条件,是导致各种生态现象和过程发生变化的根本性因素^[10]。如空气湿度随着海拔的升高而下降^[11];因此,空间尺度较小时,立地因子可能成为影响病虫害发生的主要生境因子。

在8项立地因子中, F 检验筛选出土壤质地、腐殖质层厚度、坡度和海拔为影响昆崙山腮扁叶蜂虫基指数大小的显著因子。昆崙山腮扁叶蜂的虫基指数随着海拔的升高而加重,这一结果与孙志强等^[12]的研究结果相一致。在所调查的赤松纯林样地中,海拔500 m以上的林地中仅有3块样地出现昆崙山腮扁叶蜂,而多数赤松纯林分布在海拔500 m以下;所以因不同海拔产生的温度差可以忽略不计。调查发现,海拔较低处(<100 m和100~200 m)的赤松纯林遭受昆崙山腮扁叶蜂为害的程度较轻。可能由于立地调控的景观水平具有“联合抗性”,所以昆崙山腮扁叶蜂的虫口密度在低海拔、阴坡的林分内较低^[13]。林间温度、湿度和光照受坡向的影响显著。Cescatti等^[14]也已证明云杉(*Picea abies* Mast.)林所处的海拔强烈影响腮扁叶蜂的侵染。昆崙山腮扁叶蜂的老熟幼虫于当年8月至次年4月在土壤中越冬^[15],所以土壤性质对其生活史的顺利进行有非常重要的作用。土壤腐殖质层厚度大,可以使营养富集,从而增加昆崙山腮扁叶蜂的虫基指数。土壤腐殖质层厚度反映土壤侵蚀程度和颗粒组成,土壤腐殖质层厚度小说明土壤侵蚀程度小和沙粒质量分数大^[16]。所以在与之相对应的沙土或粘土中,昆崙山腮扁叶蜂虫基指数较小。与砂土和粘土相比,壤土和砂壤土不仅营养丰富,而且孔隙度大小合适,有利于昆崙山腮扁叶蜂老熟幼虫和蛹的存活。

在描述立地因子与虫基指数关系时,运用数量化理论 I 建立多元线性回归模型,使用数量化方法使一些定性指标定量化,有效避免了人为的主观性,使结论更加科学、合理。本研究分别使用全部立地因子和筛选出的4个关键立地因子建立昆崙山腮扁叶蜂虫基指数预测模型,模型检验结果表明,两个方程的决定系数 R^2 和均方根误差 $RMSE$ 均较相近,所以,选用由4个关键立地因子建立的模型既满足精度要求,又能简化模型,减少了野外调查

的工作量。对由虫基指数——立地因子模型推算出的虫基指数进行评价,结果显示模型精度高,但因为实测等级较高的样地与其预测等级出现了偏差,所以立地等级的预测正确率为87.50%。可能由于在所调查的样地中,75%的样地潜在遭受昆崙山腮扁叶蜂为害的等级在IV级以下,所以,在预测方程模型中,会使部分虫基指数高的样地出现等级偏差的现象。

本研究提出了一种精确评估昆崙山腮扁叶蜂在不同立地中的潜在发生程度的新思路,对指导昆崙山区赤松的经营管理和昆崙山腮扁叶蜂的防治具有重要意义。但在指导选择赤松种植的立地类型时须综合考虑,使在满足赤松健康生长的同时,亦能将昆崙山腮扁叶蜂控制在轻度发生的范围内。另外,该模型的虫基指数由查找赤松纯林中昆崙山腮扁叶蜂的虫基指数曲线群图获得,所以只适用指导昆崙山区赤松的种植。因此,未来可将这种方法推广到不同区域、不同的树种以及不同的生物灾害中去。

4 结论

在描述立地因子与虫基指数的关系时,运用数量化理论 I 建立多元线性回归模型。4个关键立地因子与昆崙山腮扁叶蜂虫基指数建立的关系模型的 R^2 和 $RMSE$ 分别是0.730和7.091;对模型推算出的虫基指数进行评价,5个统计指标分别为: $R^2 = 0.705$, $RMSE = 8.681$, $MAE = 5.610$, $TRE = 0.12\%$, $MPE = 5.87\%$ 。说明所建模型经检验具有良好的拟合效果,可以便捷、准确地判断宜林地潜在遭受昆崙山腮扁叶蜂发生的程度。

虫基指数代表了立地导致虫害发生的程度,其与立地因子的相关性分析表明,海拔、坡度、腐殖质层厚度和土壤质地极显著影响虫基指数的大小($P < 0.01$)。其中,虫基指数的值在高海拔、缓坡、壤土和腐殖质层厚度厚的样地类型中较大,说明这种类型的立地对昆崙山腮扁叶蜂潜在发生程度的作用等级较大,为重度或特重度危害,应该避免在此类宜林地中种植赤松。虫基指数的值在低海拔、陡坡、粘土和腐殖质层厚度薄的样地类型中较小,适合营造赤松林。

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] 胡瑞瑞, 梁 军, 谢 宪, 等. 昆嵛山区昆嵛山腮扁叶蜂虫基指数模型[J]. 林业科学研究, 2020, 33(5): 21-27.
- [5] Hu R R, Liang J, Xie X, *et al.* Stand characteristics and soil properties in Japanese red pine (*Pinus densiflora*) pure forests with different disease severity index in Kunyushan mountains region, China[J]. International Journal of Agriculture and Biology, 2019, 21: 726-732.
- [6] Hu R R, Liang J, Xie X, *et al.* Stand characteristics and soil properties affecting the occurrence of web-spinning sawfly (*Cephalcia kunyushanica*) in Japanese red pine (*Pinus densiflora*) pure forests in the Kunyushan mountains, China[J]. Forests, 2018, 9(12): 1-13.
- [7] 惠刚盈, 张连金, 胡艳波, 等. Richards多形地位指数模型构建新方法——参数置换法[J]. 林业科学研究, 2010, 23(4): 481-486.
- [8] 曾伟生, 唐守正. 立木生物量模型的优度评价和精度分析[J]. 林业科学, 2011, 47(11): 106-113.
- [9] 唐守正, 郎奎建, 李海奎. 统计和生物数学模型计算[M]. 科学出版社, 2009.
- [10] Gong X, Brueck H, Giese K M, *et al.* Slope aspect has effects on productivity and species composition of hilly grassland in the Xilin River Basin, Inner Mongolia, China[J]. Journal of Arid Environments, 2008, 72(4): 483-493.
- [11] Hikosaka K, Nagamatsu D, Ishii H S, *et al.* Photosynthesis-nitrogen relationships in species at different altitudes on Mount Kinabalu, Malaysia[J]. Ecological Research, 2002, 17(3): 305-313.
- [12] 孙志强, 张星耀, 林 琳, 等. 赤松纯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): 0857-0866.
- [13] Wang Q G, Xu Y Z, Lu Z J, *et al.* Disentangling the effects of topography and space on the distributions of dominant species in a subtropical forest[J]. Chinese Science Bulletin, 2014, 59(35): 5113-5122.
- [14] Cescatti A, Battisti A. Distribution and ecology of *Lymantria monacha* L. and *Cephalcia* spp. in non-outbreak areas of Trentino (N-Italy)[J]. Journal of Pest Science, 1992, 65: 92-99.
- [15] 杨 隽, 邵凌松, 刘德玲, 等. 昆嵛山腮扁叶蜂生物学特性及防治技术研究[J]. 山东林业科技, 2001, 31(3): 41-44.
- [16] 王旭艳, 王志强, 宋维念, 等. 东北典型黑土耕层颗粒组成与腐殖质层厚度的关系[J]. 中国水土保持科学, 2011, 9(1): 39-44.

Evaluate the Pest Based Index of *Cephalcia kunyushanica*

HU Rui-rui^{1,2}, LIANG Jun^{1,3}, XIE Xian¹, CHE Ji-ming³, YUAN Xiao-wen³, ZHANG Xing-yao^{1,3}

(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. Tianjin Institute of Plant Protection, Tianjin 300384, China;

3. Kunyushan Forest Ecosystem Research Station, Yantai 264100, Shandong China)

Abstract: [Objective] To quantitatively evaluate the degree of potential damage of *Cephalcia kunyushanica* Xiao and construct a evaluation system of pest based index (PBI) - site factors of *C. kunyushanica*. [Method] The pest based index of each sample plot was found based on the PBI curve group graph of *C. kunyushanica*. The key site factors were screened through correlation analysis, and the equations of PBI-all site factors and PBI-key site factors of *C. kunyushanica* were established respectively by using the theory of quantification I. [Result] (1) Correlation analysis showed that the elevation, gradient, humus depth and soil texture had extremely significant influence on pest based index ($P < 0.01$), and their contributions to PBI increased in turn. (2) The multiple linear regression model of all site factors, key site factors and pest based index reached the extremely significant level statistically ($P < 0.01$). The determination coefficient (R^2) was 0.823 and 0.730, respectively, indicating that the model had a good fitting effect, and 4 key site factors could be used to replace all site factors as the independent variables of the equation. (3) The pest basis index calculated by the model of key site factor was evaluated, and the result showed that the average estimation error (MPE) was 5.87%, indicating that the estimation accuracy could reach 94.13%. TRE values were all close to 0, indicating that the model is reliable. [Conclusion] Pest based index - site factors evaluation system can quantitatively evaluate the potential infection of *C. kunyushanica*, which can provide theoretical basis for optimum planting and prevention of *C. kunyushanica*.

Keywords: *Cephalcia kunyushanica*; pest based index; site factor; *Pinus densiflora* pure forest

(责任编辑: 崔 贝)