

DOI: 10.3969/j.issn.2095-3704.2013.01.011

# 松树营养物质及次生代谢物质含量与思茅松毛虫 危害关系的判别分析

郑 宏

(福建省龙岩市新罗区林业局, 福建 龙岩 350200)

**摘要:** 为了掌握思茅松毛虫 [*Dendrolimus kikuchii* (Matsumura)] 的发生危害及其与寄主植物松树之间的关系, 了解松树受害后应激反应的变化过程, 探讨其与抗性有关的营养指标以及次生代谢物质的关系, 以期提出有效的防治技术措施。在福建光泽华桥林场和南平市茂地乡两地分别设置 4 块样地, 轻、中、重度受害及未受害各 1 块, 在 2008 年 4 月中旬和 8 月中旬, 采集思茅松毛虫幼虫不同危害程度的松针, 测定松针营养物质及次生物质含量, 进行判别分析。结果分析表明, 松树在思茅松毛虫危害胁迫下, 随着受害程度的加重松针内黄酮、单宁、总酚含量呈上升趋势, 可溶性糖、多糖、蛋白质含量呈现下降趋势。依据有关指标进行判别分析, 能够准确地对松树被害程度进行分级。由此得出结论: 松树营养物质以及次生代谢物质与松树危害程度有密切相关, 能够反映其变化指标的重要性依次是: 总酚、多糖、单宁、黄酮、蛋白质、可溶性糖。判别分析对于多指标、多对象、多组别的分析, 较方差分析和多重比较综合性强, 能体现多指标的共同作用。

**关键词:** 思茅松毛虫; 松树; 营养物质; 次生代谢物; 判别分析

中图分类号: S763.3 文献标志码: A 文章编号: 2095-3704 (2013) 01-0045-08

## Discriminant Analysis for the Relationship between the Damaged Degree of *Dendrolimus kikuchii* Matsumura and the Contents of Nutrition and Secondary Metabolites in Pine Needles

ZHENG Hong

(Forest Bureau of Xinluo District, Fujian Province, Longyan 364000, China)

**Abstract:** In order to find out the relationship between *Dendrolimus kikuchii* Matsumura and its host plants, to learn the change process of the pine's stress response after the plants had been damaged, to explore the nutrients and secondary substances that related to its resistance towards the damage by the pest, and to propose effective measures for prevention and pest-control technology, four sample plots were set up separately in two places including Guangze Forest Farm of Returned Overseas Chineses and Maodi Town in Nanping City of Fujian Province, including one mild site, one moderate site, one heavily damaged site and one undamaged site, respectively. In mid-April and mid-August of 2008, the pine needles with different damaged-degrees were collected, the contents of the nutrients were examined, and secondary substances was discriminately analyzed. The results showed that when pines were damaged by *Dendrolimus kikuchii* Matsumura, the contents of tannin, phenol in the pine needles showed an accent tendency as the damaged-degree increased, but soluble sugar polysaccharide,

收稿日期: 2013-01-22

基金项目: 福建省科技厅重大科技专项 (2006NZ0001-2) 和福建省林业厅林木种苗攻关项目 (2003-07)

作者简介: 郑宏, 男, 高级工程师, 主要从事森林病虫害防控与森林植物检疫研究, E-mail: xlqsfjyz@163.com.

flavanone and protein decreased. The classification of damaged degree could be done accurately based on the discriminant analysis of the indicators. It could be concluded that the indicators tested had close relationship with the damaged degree of pine. The important indicators were phenol, polysaccharide, tannin, flavanone, protein and soluble sugar as orders. The discriminant analysis was more comprehensive than the variance analysis and multiple comparisons for the multi-indicators, multi-objects and multi-groups. The method could give the interaction of multiple indicators comprehensively.

**Key words:** *Dendrolimus kikuchii* Matsumura; *Pinus massoniana* Lamb; nutrients; secondary substances; discriminant analysis

昆虫依靠植物获得营养成分, 且对植物营养成分的种类和含量有一定要求。当植物受到昆虫危害后会产生一系列的应激反应变化, 其次生物物质和营养物质的含量也随之产生明显变化, 以抵御昆虫的危害。因此, 植物的化学物质性状被看作是一种潜在抗性因素。戈峰等<sup>[1]</sup>报道了油松(*Pinus tabulaeformis*)、马尾松(*Pinus massoniana*)、华北落叶松(*Larix principis-rupprechtii* Mayr) 3种松树在受到松毛虫中等程度的危害后, 针叶中昆虫生存所必需的还原糖、氨基酸、脂肪酸、Vc等营养物质减少, 寄主能迅速产生诱导抗性。王自力等<sup>[2]</sup>研究表明白蜡虫雌虫生长发育与无机盐、蛋白质、脂肪、纤维素和糖类物质密切相关。张文辉等<sup>[3]</sup>研究认为, 许多次生物物质如果随昆虫取食而在其体内积累, 或延缓昆虫生长发育, 或降低昆虫繁殖率, 甚至会导致昆虫死亡。Carmona等<sup>[4]</sup>研究表明植物次生物物质在防御植食者的进攻中起到重要的作用。Traw<sup>[5]</sup>和Cipoflini等<sup>[6]</sup>研究发现植物在遭受植食者进攻后, 植物体内防御性次生物物质含量发生了变化。吴耀军等<sup>[7]</sup>评估桉树枝瘿姬小蜂产卵对桉树缩合单宁含量的影响, 认为昆虫危害引起桉树缩合单宁含量的显著增加。

思茅松毛虫[*Dendrolimus kikuchii* (Matsumura)]是我国南方松树的重要害虫之一, 在福建省常与马尾松毛虫(*D. punctatus* Walker)混合发生危害<sup>[8-9]</sup>。为了探讨松树受思茅松毛虫危害后的应激反应变化过程, 本文应用判别分析法研究了松树受思茅松毛虫不同程度危害后, 其松针次生物物质和营养物质含量的变化特点, 及其与松树被害程度的关系, 探讨其与抗性有关的次生物物质指标及营养物质指标, 为筛

选、培育抗虫品种及综合防治害虫提供参考。

## 1 材料与方法

### 1.1 供试材料

**1.1.1 试验地概况** 试验地8块分别设在思茅松毛虫常发区的光泽县华桥林场、南平市茂地乡, 土壤类型为山地红壤。光泽华桥林场试验地4块(轻、中、重度受害及未受害各1块), 每块0.1 hm<sup>2</sup>, 设在大禾山工区的8年生人工纯松林, 胸径8~10 cm, 树高5~7 m, 坡度21°, 坡向为东南坡, 海拔高度810~830 m; 延平区茂地乡试验地4块(轻、中、重度受害及未受害各1块), 每块0.1 hm<sup>2</sup>, 设在宝珠村11年生的人工纯松林, 胸径8~11 cm, 树高6~7 m, 坡度18°, 坡向为西北坡, 海拔高度690~720 m。地被物主要有铁芒萁(*Dicranopteris linearis*)、桃金娘(*Rhodomyrtus entosa*)、菝葜(*Smilax* sp.)等<sup>[8]</sup>。

**1.1.2 松林被害程度分级标准** 轻度危害: 针叶30%以下被食; 中度危害: 针叶31%~50%被食; 重度危害: 针叶50%以上被食。

**1.1.3 样品采集及处理** 采样时间: 2008年4月中旬越冬代幼虫危害盛期、8月中旬第1代幼虫危害盛期。取样方法及处理: 在各样地不同受害程度和未危害的植株各选4株, 于树冠中部东、西、南、北4个方向的当年生枝条上采摘松针100束, 组成混合样品。将采来的松针用清水洗净晾干, 放入烘箱内以60℃温度干燥48 h, 取出充分粉碎, 过40目筛, 将样品装袋, 放入干燥器中待测<sup>[8]</sup>。

### 1.2 测定方法

酮测定采用亚硝酸钠-硝酸铝比色法; 单宁测定采用钨酸钠-磷酸18比色法; 总酚测定采用Folin-酚法; 可溶性糖和多糖含量采用蒽酮比色法测定, 蛋白质含量的测定采用凯氏定氮法<sup>[10-12]</sup>。各样品重复测定6次。

1.3 数据处理

采用 SPSS 17.0 版软件进行了判别分析，采用 MATLAB 7.1 编程运算进行非参数检验：Kruskal-Wallis 检验。

2 结果与分析

2.1 松针次生物质及营养物质含量测定结果

受思茅松毛虫不同程度危害后松针次生物质及营养物质含量的变化，见表 1 和表 2。

表 1 4 月份受思茅松毛虫不同程度危害后松针次生物质及营养物质含量 /mg·g<sup>-1</sup>

针叶受害程度	样本株编号	黄酮 (X <sub>1</sub> )	单宁 (X <sub>2</sub> )	总酚 (X <sub>3</sub> )	可溶性糖 (X <sub>4</sub> )	多糖 (X <sub>5</sub> )	蛋白质 (X <sub>6</sub> )
重度	1	14.56	28.06	27.95	43.86	13.64	23.85
	2	14.39	28.21	28.12	43.53	13.51	23.94
	3	15.11	28.19	28.26	44.66	13.48	24.12
	4	14.78	28.07	27.98	43.61	13.55	23.99
	$\bar{X} \pm S$	14.71±0.31*	28.13±0.08	28.08±0.14	43.92±0.52*	13.55±0.07*	23.98±0.11*
中度	1	14.14	29.07	29.01	44.09	14.11	24.66
	2	13.64	28.43	28.94	44.32	14.24	24.57
	3	13.72	28.69	29.23	44.26	14.08	24.74
	4	13.88	28.77	29.07	44.18	14.15	24.58
	$\bar{X} \pm S$	13.85±0.22*	28.74±0.26*	29.06±0.12*	44.21±0.10*	14.15±0.07*	24.64±0.08*
轻度	1	12.71	30.02	30.11	44.87	14.38	24.91
	2	12.86	29.35	30.26	44.72	14.32	24.86
	3	12.91	29.71	30.06	44.98	14.29	25.15
	4	12.85	29.58	30.15	44.85	14.31	25.02
	$\bar{X} \pm S$	12.83±0.99	29.67±0.28*	30.15±0.09*	44.86±0.11	14.33±0.04	24.99±0.13
未受害	1	12.16	27.89	27.21	45.63	15.05	25.32
	2	12.58	27.68	27.04	45.28	14.96	25.51
	3	12.42	28.03	27.16	45.31	15.18	25.43
	4	12.41	27.82	27.09	45.29	15.08	25.44
	$\bar{X} \pm S$	12.39±0.17	27.86±0.15	27.13±0.08	45.38±0.17	15.07±0.09	25.43±0.08

注：表中\*为 P<0.05 同一指标各列与未受害组的比较差异显著。

2.1.1 不同程度受害松针次生物质含量变化 从表 1 和表 2 可以看出：在思茅松毛虫危害胁迫下，松针中黄酮含量随着受害程度的加重，呈上升趋势，受害越重松针叶黄酮含量增加越多。在 4 月中旬越冬代幼虫危害盛期，重度危害的针叶黄酮含量达到最大值，平均为 14.71 mg/g，到 8 月中旬第 1 代幼虫危害盛期，仍为 13.74 mg/g，均明显高于轻、中度受害和未受害的针叶。可见松树受思茅松毛虫危害后，针叶黄酮含量的增加是寄主受害后的一种应激反应，且随着受害程度的加重，反应更明显。

受害松树针叶单宁含量与未受害相比较，也呈上升趋势。在 4 月中旬越冬代幼虫危害盛期，轻度

危害针叶单宁含量达到最大值，平均为 29.67 mg/g，明显高于重、中度受害和未受害的针叶；到 8 月中旬第 1 代幼虫危害盛期，仍为 29.13 mg/g，也均明显高于重、中度受害和未受害的针叶。针叶单宁含量的增加是寄主受害后的一种应激反应，但单宁含量增加的多少与寄主受害程度不呈正相关。寄主受害初期，针叶单宁含量明显增加，而后随着寄主受害加重，单宁含量减少。

针叶中总酚含量变化，在不同危害时期不同，在 4 月中旬越冬代幼虫危害盛期，轻度危害的针叶总酚含量达到最大值，平均为 30.15 mg/g，明显高于重、中度受害和未受害；到 8 月中旬第 1 代幼虫

危害盛期，轻度危害的仍为 29.96 mg/g，也明显高于重、中度受害和未受害的。可见松树受思茅松毛虫危害后，针叶总酚含量的增加也是寄主受害后的一种应激反应，但总酚含量增加的多少与寄主受害程度也不呈正相关，松树轻度受害后，其针叶总酚含量明显增加的，然后随着总酚增加量的减少，寄主受害加重。

**2.1.2 不同程度受害松针营养物质含量变化** 从表 1 和表 2 可以看出：在 4 月中旬越冬代幼虫危害盛期不同受害的松树针叶可溶性糖含量与未受害相

比较，可溶性糖含量均呈下降趋势，被害越重针叶可溶性糖含量越少；重度危害的平均值为 43.92 mg/g，明显低于中、轻度受害和未受害松叶可溶性糖含量；到 8 月中旬第 1 代幼虫危害盛期，重度危害的可溶性糖含量继续下降，仅为 42.33 mg/g，均明显低于中、轻度受害和未受害的松叶可溶性糖含量；可见松树受思茅松毛虫中、重危害后，针叶可溶性糖含量呈明显下降趋势，而轻度受害的针叶，则略有增加。

表 2 8 月份受思茅松毛虫不同程度危害后松针次生物质及营养物质含量 /mg·g<sup>-1</sup>

针叶受害程度	样本株编号	黄酮 (X <sub>1</sub> )	单宁 (X <sub>2</sub> )	总酚 (X <sub>3</sub> )	可溶性糖 (X <sub>4</sub> )	多糖 (X <sub>5</sub> )	蛋白质 (X <sub>6</sub> )
重度	1	13.86	27.89	27.68	42.21	13.56	22.86
	2	13.75	27.96	27.85	42.54	13.45	23.18
	3	13.62	28.11	27.73	42.31	13.39	22.93
	4	13.74	27.92	27.71	42.24	13.51	23.02
	$\bar{X} \pm S$	13.74±0.10*	27.97±0.10	27.74±0.07*	42.33±0.15*	13.4±0.07*	23.00±0.14*
中度	1	12.95	28.56	28.89	43.36	13.63	23.97
	2	12.88	28.18	28.93	43.24	13.76	23.89
	3	13.32	28.33	28.56	43.15	13.87	23.78
	4	12.89	28.42	28.66	43.29	13.75	23.85
	$\bar{X} \pm S$	13.01±0.21*	28.37±0.16*	28.76±0.18*	43.26±0.09*	13.75±0.10*	23.87±0.08*
轻度	1	12.26	29.06	29.94	45.39	14.88	24.43
	2	12.42	29.14	30.06	45.87	14.81	24.28
	3	12.46	29.21	29.87	45.26	14.94	24.41
	4	12.33	29.11	29.98	45.41	14.82	24.31
	$\bar{X} \pm S$	12.37±0.09	29.13±0.06*	29.96±0.08*	45.48±0.27*	14.86±0.06*	24.36±0.07*
未受害	1	12.12	27.36	27.13	46.52	15.67	25.22
	2	12.01	27.49	27.09	46.71	15.86	25.44
	3	11.73	27.54	26.94	46.43	15.41	25.53
	4	12.03	27.41	27.05	46.55	15.55	25.38
	$\bar{X} \pm S$	11.97±0.17	27.45±0.08	27.05±0.08	46.55±0.12	15.62±0.19	25.39±0.13

注：表中\*为 P<0.05 同一指标各列与未受害组的比较差异显著。

研究表明，针叶被害越重多糖含量越低。在 4 月中旬越冬代幼虫危害盛期，重度危害的针叶多糖含量平均为 13.55 mg/g，明显低于中、轻度受害和未受害针叶；到 8 月中旬第 1 代幼虫危害盛期，未受害和轻度危害的针叶多糖含量有所上升，而重、中度受害的针叶多糖含量却继续下降。可见松树受思茅松毛虫危害后，针叶多糖含量的减少是寄主受

害后的一种应激反应。早期针叶多糖含量下降的多少与寄主受害程度有关，针叶多糖含量低的受害程度较重；而到 8 月中旬第 1 代幼虫危害盛期，可能重、中度受害的松林由于光合作用下降和自身的养分消耗，多糖含量又明显减少；而未受害和轻度受害的松林，由于光合作用正常，针叶多糖含量却不同程度增加。

受害松针叶蛋白质含量与未受害相比，呈下降趋势，被害越重松针叶蛋白质含量越低。在8月中旬第1代幼虫危害盛期，重度危害的针叶蛋白质含量达到最低值，平均为23.00 mg/g，明显低于中、轻度受害和未受害针叶；在4月中旬越冬代幼虫危害盛期，重、中度受害的针叶蛋白质含量低于轻度受害和未受害的针叶；说明不同受害程度针叶蛋白质含量随着的思茅松毛虫的持续危害，逐渐下降。

### 2.2 4月份不同受害植株次生物质及营养物质含量的判别分析

对表1进行判别分析，每个指标（变量）在不同组中的平均数的差异性，即F值和相应概率见表3。考虑到样本数相对较少对各组平均数相等性检验的影响，对各指标又进行了非参数检验：Kruskal-Wallis检验，检验概率见表3最后一列，下同。

表3 各组平均数相等性检验

变量	Wilks' Lambda系数	F值	df <sub>1</sub> 值	df <sub>2</sub> 值	Sig.值	Kruskal-Wallis Sig系数
黄酮(X <sub>1</sub> )	0.041	94.682	3	12	0	0.002 7
单宁(X <sub>2</sub> )	0.064	58.731	3	12	0	0.002 6
总酚(X <sub>3</sub> )	0.007	555.849	3	12	0	0.002 8
可溶性糖(X <sub>4</sub> )	0.155	21.730	3	12	0	0.004 5
多糖(X <sub>5</sub> )	0.012	324.615	3	12	0	0.002 7
蛋白质(X <sub>6</sub> )	0.027	143.671	3	12	0	0.002 8

从表3 F 检验结果来看，黄酮(X<sub>1</sub>)、单宁(X<sub>2</sub>)、总酚(X<sub>3</sub>)、可溶性糖(X<sub>4</sub>)、多糖(X<sub>5</sub>)、蛋白质(X<sub>6</sub>) 6个指标在危害程度为重度、中度、轻度和未受害4个组别间具有显著差异。Kruskal-Wallis 检验结果

与方差分析结果一致，6个指标都具有显著性。但经过筛选法可知，最佳判别函数变量组合是黄酮(X<sub>1</sub>)、总酚(X<sub>3</sub>)、多糖(X<sub>5</sub>)、蛋白质(X<sub>6</sub>)。判别函数组如下：

$$\begin{cases} F_1 = -206.488X_1 + 3\ 914.039X_3 + 10\ 057.690X_5 + 5\ 948.842X_6 - 192\ 858.330 \\ F_2 = -252.454X_1 + 4\ 055.622X_3 + 10\ 419.549X_5 + 6\ 191.142X_6 - 207\ 146.422 \\ F_3 = -295.838X_1 + 4\ 174.674X_3 + 10\ 592.655X_5 + 6\ 327.718X_6 - 215\ 944.893 \\ F_4 = -325.414X_1 + 3\ 934.330X_3 + 10\ 707.980X_5 + 6\ 493.600X_6 - 214\ 565.523 \end{cases} \quad (1)$$

对判别函数检验，具有显著性(P=0.015)，对表1中的16株松树的不同危害程度判别分组正确率为100%。F<sub>1</sub>、F<sub>2</sub>、F<sub>3</sub>、F<sub>4</sub>分别代表第1组、第2组、第3组和第4组，按观察值分组的时候，将每一个观察值代入4个判别函数，以函数的大小作比较，函数值最大值，表明该对象属于该组。

单宁(X<sub>2</sub>)、可溶性糖(X<sub>4</sub>)。但从判别函数组成的指标变量来看，却没有单宁(X<sub>2</sub>)和可溶性糖(X<sub>4</sub>)，而且判别函数判别正确率为100%，可见判别函数更能够精确反映各指标对分组的重要性。

### 2.3 8月份不同受害植株次生物质及营养物质含量的判别分析

对表2进行判别分析，每个指标（变量）在不同组中的平均数的差异性，即F值和相应概率见表4。

如果依据F大小，6个指标的重要性依次为：总酚(X<sub>3</sub>)、多糖(X<sub>5</sub>)、蛋白质(X<sub>6</sub>)、黄酮(X<sub>1</sub>)、

表4 各组平均数相等性检验

变量	Wilks' Lambda系数	F值	df <sub>1</sub> 值	df <sub>2</sub> 值	Sig.值	Kruskal-Wallis Sig系数
黄酮(X <sub>1</sub> )	0.036	106.973	3	12	0	0.002 6
单宁(X <sub>2</sub> )	0.022	177.115	3	12	0	0.002 5
总酚(X <sub>3</sub> )	0.008	509.017	3	12	0	0.002 8
可溶性糖(X <sub>4</sub> )	0.007	529.705	3	12	0	0.002 5
多糖(X <sub>5</sub> )	0.014	288.346	3	12	0	0.002 6
蛋白质(X <sub>6</sub> )	0.012	333.606	3	12	0	0.002 7

从表4 F 检验结果来看，黄酮(X<sub>1</sub>)、单宁(X<sub>2</sub>)、总酚(X<sub>3</sub>)、可溶性糖(X<sub>4</sub>)、多糖(X<sub>5</sub>)、蛋白质(X<sub>6</sub>)

6个指标在危害程度为重度、中度、轻度和未受害4个组别间具有显著差异。Kruskal-Wallis 检验结果与方差分析结果一致，6个指标都具有显著性。经

$$\left\{ \begin{aligned} F_1 &= 1\ 873.942X_1 + 3\ 833.208X_2 + 3\ 555.312X_3 - 308.485X_4 + 1\ 836.927X_5 + 2\ 125.863X_6 - 146\ 096.786 \\ F_2 &= 1\ 844.277X_1 + 3\ 896.491X_2 + 3\ 653.189X_3 - 320.452X_4 + 1\ 927.035X_5 + 2\ 172.778X_6 - 152\ 062.087 \\ F_3 &= 1\ 741.254X_1 + 4\ 020.954X_2 + 3\ 728.275X_3 - 274.625X_4 + 2\ 138.784X_5 + 2\ 147.444X_6 - 160\ 989.977 \\ F_4 &= 1\ 598.699X_1 + 3\ 590.950X_2 + 3\ 074.583X_3 + 47.481X_4 + 2\ 153.299X_5 + 2\ 322.805X_6 - 147\ 861.001 \end{aligned} \right. \quad (2)$$

对判别函数检验，具有极显著性 ( $P=0.001$ )，对表2中的16株松树的不同危害程度判别分组正确率为100%。利用(1)式判别函数对表2进行判别，结果重度、中度、轻度和未受害4个组别的正确判别率分别为：100%、0%、100%、100%。说明8月份中度受害植株营养物质以及次生物质含量与4月份相比较有了较大变化，无法用原来的判别函数对它进行有效判别分析。特别是注意到“中度”这个指标，在重度和轻度之间的过度出现了“交融区域”现象，说明4月份到8月份次生物质以及营养物质含量从轻度到中度再重度变化的连续性，变化界限不是很明显。利用(2)式判别函数对表1进行判别，结果重度、中度、轻度和未受害4个组别的正确判别率分别为：100%、100%、100%、100%。比较(1)式判别函数和(2)式判别函数的变量，发现(2)式判别函数的变量包含黄酮( $X_1$ )、单宁( $X_2$ )、总酚( $X_3$ )、可溶性糖( $X_4$ )、多糖( $X_5$ )、蛋白质( $X_6$ )6个指标，(1)式判别函数仅包含黄

酮( $X_1$ )、单宁( $X_2$ )、总酚( $X_3$ )、可溶性糖( $X_4$ )、多糖( $X_5$ )、蛋白质( $X_6$ )6个指标。判别函数组如下：

酮( $X_1$ )、总酚( $X_3$ )、多糖( $X_5$ )、蛋白质( $X_6$ )4个指标，说明松树受到思茅松毛虫危害从4月份到8月份时，不同受害植株次生物质以及营养物质含量已经发生了变化。单宁( $X_2$ )、可溶性糖( $X_4$ )原来在4月份时对判别分组还没作用，但到8月份时对判别分组具有重要作用。可见黄酮( $X_1$ )、单宁( $X_2$ )、总酚( $X_3$ )、可溶性糖( $X_4$ )、多糖( $X_5$ )、蛋白质( $X_6$ )6个指标对危害程度的判别分组都具有重要性。

如果依据F大小，6个指标的重要性依次为：可溶性糖( $X_4$ )、总酚( $X_3$ )、蛋白质( $X_6$ )、多糖( $X_5$ )、单宁( $X_2$ )、黄酮( $X_1$ )。

#### 2.4 4月份和8月份不同受害植株次生物质及营养物质含量的判别分析

把表1和表2合在一起同时进行判别分析，每个指标(变量)在不同组中的平均数的差异性，即F值和相应概率见表5。

表5 各组平均数相等性检验

变量	Wilks' Lambda系数	F值	df <sub>1</sub> 值	df <sub>2</sub> 值	Sig.值	Kruskal-Wallis Sig系数
黄酮( $X_1$ )	0.198	37.832	3	28	0	0
单宁( $X_2$ )	0.122	67.313	3	28	0	0
总酚( $X_3$ )	0.019	470.408	3	28	0	0
可溶性糖( $X_4$ )	0.224	32.391	3	28	0	0
多糖( $X_5$ )	0.102	82.398	3	28	0	0
蛋白质( $X_6$ )	0.211	34.898	3	28	0	0

从表5 F 检验结果来看，黄酮( $X_1$ )、单宁( $X_2$ )、总酚( $X_3$ )、可溶性糖( $X_4$ )、多糖( $X_5$ )、蛋白质( $X_6$ )6个指标在危害程度为重度、中度、轻度和未受害4个组别间具有显著差异。Kruskal-Wallis 检验结果

$$\left\{ \begin{aligned} F_1 &= -409.366X_1 + 810.441X_2 + 1\ 946.761X_3 - 53.672X_4 + 676.732X_5 - 381.055X_6 - 34\ 563.302 \\ F_2 &= -449.336X_1 + 821.401X_2 + 2\ 037.860X_3 - 69.318X_4 + 715.543X_5 - 358.728X_6 - 37\ 295.396 \\ F_3 &= -487.079X_1 + 856.794X_2 + 2\ 141.092X_3 - 73.735X_4 + 749.017X_5 - 365.251X_6 - 40\ 995.135 \\ F_4 &= -484.818X_1 + 811.136X_2 + 1\ 845.891X_3 - 66.151X_4 + 724.668X_5 - 252.045X_6 - 34\ 102.280 \end{aligned} \right. \quad (3)$$

与方差分析结果一致，6个指标都具有显著性。经过筛选法可知，最佳判别函数变量组合是黄酮( $X_1$ )、单宁( $X_2$ )、总酚( $X_3$ )、可溶性糖( $X_4$ )、多糖( $X_5$ )、蛋白质( $X_6$ )。判别函数组如下：

对判别函数检验, 具有极显著性( $P=0.002$ ), 对表1和表2中的32株松树的不同危害程度判别分组正确率为100%。利用(1)式判别函数对8月份结果(表2)不能完全正确判别, 利用(2)式判别函数对4月份结果(表1)能完全正确判别, 利用(3)式判别函数对4份和8月份都能有效判别, 说明松树受到思茅松毛虫危害后的4月份黄酮( $X_1$ )、单宁( $X_2$ )、总酚( $X_3$ )、可溶性糖( $X_4$ )、多糖( $X_5$ )、蛋白质( $X_6$ )6个指标, 随时间的变化而变化, 特别是单宁( $X_2$ )和可溶性糖( $X_4$ ), 但是直到8月份, 这种变化是很有限的, 黄酮( $X_1$ )、单宁( $X_2$ )、总酚( $X_3$ )、可溶性糖( $X_4$ )、多糖( $X_5$ )、蛋白质( $X_6$ )6个指标的含量变化对区分松树的危害程度, 都具有重要性。

如果依据 $F$ 大小, 6个指标的重要性依次为: 总酚( $X_3$ )、多糖( $X_5$ )、单宁( $X_2$ )、黄酮( $X_1$ )、蛋白质( $X_6$ )、可溶性糖( $X_4$ )。

### 3 结论与讨论

通过以上对实验结果的分析, 可以得出以下基本结论:

(1) 松树针叶在受到思茅松毛虫危害后的4月份, 随危害程度的加重, 针叶黄酮含量、单宁含量、总酚含量与未受害相比较, 均呈上升趋势, 可溶性糖含量、多糖含量、蛋白质含量与未受害相比较, 均呈下降趋势。判别分析能够正确区分不同危害程度的指标是: 总酚( $X_3$ )、多糖( $X_5$ )、蛋白质( $X_6$ )、黄酮( $X_1$ ); 依据方差分析 $F$ 大小, 6个指标的重要性依次为: 总酚( $X_3$ )、多糖( $X_5$ )、蛋白质( $X_6$ )、黄酮( $X_1$ )、单宁( $X_2$ )、可溶性糖( $X_4$ )。

(2) 松树针叶在受到思茅松毛虫危害后的8月份, 随危害程度的加重, 总酚( $X_3$ )、多糖( $X_5$ )、单宁( $X_2$ )、黄酮( $X_1$ )、蛋白质( $X_6$ )、可溶性糖( $X_4$ )6个指标值的变化与4月份基本相同。松针营养物质以及次生物质含量, 与4月份相比, 单宁( $X_2$ )和可溶性糖( $X_4$ )的变化相对较大。判别分析能够正确区分不同危害程度的指标是: 黄酮( $X_1$ )、单宁( $X_2$ )、总酚( $X_3$ )、可溶性糖( $X_4$ )、多糖( $X_5$ )、蛋白质( $X_6$ ); 依据方差分析 $F$ 大小, 6个指标的重要性依次为: 可溶性糖( $X_4$ )、总酚( $X_3$ )、蛋白质( $X_6$ )、多糖( $X_5$ )、单宁( $X_2$ )、黄酮( $X_1$ )。

(3) 4月份和8月份合在一起的判别分析表明, 说明松树受到思茅松毛虫危害后的4月份松针次生

物质以及营养物质含量6个指标, 随时间的变化而变化, 特别是单宁( $X_2$ )和可溶性糖( $X_4$ ), 但是直到8月份, 这种变化是很有限的。黄酮( $X_1$ )、单宁( $X_2$ )、总酚( $X_3$ )、可溶性糖( $X_4$ )、多糖( $X_5$ )、蛋白质( $X_6$ )6个指标的含量变化对区分松树针叶的受害程度, 都具有重要性。

(4) 判别分析对于多指标、多对象、多组别的分析, 较方差分析和多重比较综合性强, 能体现多指标的共同作用, 分析结果更加全面。

(5) 周索等<sup>[13]</sup>研究得出的6种次生及营养物质的重要性, 与本研究有所不同, 主要原因是: 研究对象不同, 前者是研究针叶次生及营养物质含量对思茅松毛虫种群参数的影响及其关系, 本试验是研究6种次生及营养物质在不同危害程度中的含量变化及其对危害类别区分的重要性。其次不同的统计方法对分析结果也有一定的差异。

(6) 通过查阅国内外文献, 关于植物受到危害后植物体内物质的变化有过很多报道, 但大多是对单一物质的分析, 或方差分析, 缺少综合性和动态性分析。本研究采用判别分析法, 按害虫不同的危害世代和季节变化进行动态综合分析, 所得结果更全面准确科学, 具有一定的实际价值和学术价值。

植食性昆虫依靠植物获得营养成分, 其中可溶性糖含量的多寡对昆虫的生长发育起着重要的作用<sup>[14-15]</sup>。研究表明, 松树受思茅松毛虫危害后其针叶可溶性糖含量、多糖含量与健康植株相比含量极显著减少。由于糖类物质是昆虫生长发育的重要物质, 思茅松毛虫在取食松树针叶时, 会直接引起松树糖类物质的减少, 这可能是受害植株可溶性糖含量, 多糖含量减少的原因之一。本研究表明, 思茅松毛虫危害引起了松树针叶蛋白质含量发生了变化。由于蛋白质是幼虫生长发育的重要营养物质之一, 受害植株的蛋白质含量下降, 一方面是被幼虫取食消耗所致, 另一方面可能是更多的蛋白质合成其它物质, 以抵御该虫的取食。

研究表明, 随着思茅松毛虫危害程度的加重, 松针叶黄酮含量与未受害相比较, 均呈上升趋势。这是由于松树受到危害时产生的一种应激反应, 导致抗性物质黄酮含量增加, 进而对思茅松毛虫起到防御作用<sup>[4, 6, 16-17]</sup>。研究还表明, 随着思茅松毛虫危害程度的加剧, 松针叶单宁含量呈减少趋势; 在轻度受害时, 单宁含量比未受害和其它受害程度的含

量高,这说明寄主在受害初期以增加单宁含量来抵御思茅松毛虫的进一步危害,但随着受害程度的加重,松树的生理代谢受到严重的破坏,合成单宁含量就减少,抵御害虫危害的功能也降低<sup>[18]</sup>。

**致谢:** 承蒙河南南阳师范学院生命科学与技术学院杜瑞卿副教授协助数据处理分析;福建农林大学陈顺立教授审阅全文,并提出修改意见,课题组张潮巨同志参加部分研究工作;特此致谢。

#### 参考文献:

- [1] 戈峰,李镇宇,谢映平,等.我国主要松树诱导抗虫性的一些规律比较[J].北京林业大学学报,2002,24(3):161-165.
- [2] 王自力,王绍云,叶寿德,等.白蜡虫营养需求与寄主植物的营养关系[J].林业科学研究,2005,18(4):421-424.
- [3] 张文辉,刘光杰.植物抗虫性次生物质的研究概况[J].植物学通报,2003,20(5):522-530.
- [4] Carmona D, Lajeunesse M J, Johnson T J. Plant traits that predict resistance to herbivores[J]. Functional Ecology, 2011, 25: 358-367.
- [5] Traw M B, Dawson T E. Differential induction of trichomes by three herbivores of black Mustard[J]. Oecologia, 2002, 131: 526-532.
- [6] Cipollini D, Mbagwu J, Barto K. Expression of constitutive and Inducible chemical defenses in native and invasive populations of *Alliaria Petiolata*[J]. Journal of Chemical Ecology, 2005, 31: 1255-1267.
- [7] 吴耀军,常明山,李德伟,等.桉树枝瘿姬小蜂危害对桉树缩合单宁含量的影响[J].南京林业大学学报:自然科学版,2010,34(6):40-43.
- [8] 张潮巨.松树受害后针叶化学物质的变化及其对思茅松毛虫种群参数的影响[D].福州:福建农林大学,2009:23-24.
- [9] 伍澄.宁化县思茅松毛虫发生情况分析[J].福建林业科技,2006,33(1):235-236.
- [10] 郝建军,康宗利,于洋.植物生理学实验技术[M].北京:化学工业出版社,2007:141-142.
- [11] 李国清,王荫长.营养和次生物质与植物的抗虫性[J].植物生理学通报,1997(6):113-115.
- [12] 李合生.植物生理生化实验原理和技术[M].北京:高等教育出版社,2001:184-185.
- [13] 周索,陈顺立,陈德兰,等.受害马尾松针叶营养及次生物质含量与思茅松毛虫种群参数的相关分析[J].昆虫学报,2012,55(4):435-443.
- [14] 娄永根,程家安.植物的诱导抗虫性[J].昆虫学报,1997,40(3):320-331.
- [15] 杨勇,陈顺立,吴晖,等.栗瘿蜂危害下锥栗叶片中黄酮含量的变化[J].福建林学院学报,2005,25(2):125-127.
- [16] 赵成华,阎云花.马尾松针叶中的挥发物质对马尾松毛虫产卵行为的影响[J].林业科学,2003,39(6):91-93.
- [17] 李会平,王志刚,杨敏生,等.杨树单宁与酚类物质种类及含量与光肩星天牛危害之间关系的研究[J].河北农业大学学报,2003,26(1):36-39.
- [18] 张凤娟,陈凤新,徐东生,等.植物组织结构与抗虫性的关系综述[J].河北科技师范学院学报,2006,20(2):71-76.