

浙江天童常绿阔叶林中11种常绿乔灌木 叶片虫食状分析

王宏伟^{1,2} 蔡永立^{1,2*} 李 恺^{2,3} 江 红^{1,2} 田玉鹏^{1,2}

1 (华东师范大学资源与环境学院, 上海 200062)

2 (上海市城市化生态过程与生态恢复重点实验室, 上海 200062)

3 (华东师范大学生命科学学院, 上海 200062)

摘要: 为探讨昆虫对植物叶片的取食行为和伤害方式, 作者选择浙江天童常绿阔叶林内的11种常绿乔灌木为对象, 对叶片虫食状类型和格局进行分析。结果如下: (1)共发现16种虫食状类型, 每种植物叶片虫食状类型数在10-13种之间, 每种虫食状出现频率在0.5-28.7%之间。缘食状出现频率最高(28.7%), 虫瘿和泡状出现频率最低(0.5%)。 (2)叶片虫食状分布格局可分为3种类型, 即一种虫食状占绝对优势的单优格局, 如马银花(*Rhododendron ovatum*)和榿木(*Loropetalum chinense*); 两种虫食状(缘食状和顶食状)共占优势的双优格局, 仅有木荷(*Schima superba*); 3种及3种以上虫食状占优势的多优格局(其余8种植物)。 (3)叶片虫食状多样性指数变化在1.57-2.23之间, 最高为苦槠(*Castanopsis sclerophylla*), 最低为马银花; 乔木的多样性指数(2.040)高于灌木(1.882), 优势种多样性指数高于伴生种, 但差异均不显著; 多样性指数反映了虫食状类型和出现频率的综合差异。 (4)16种虫食状类型中有8对显著正相关, 4对显著负相关, 可能反映出不同类型昆虫取食植物的趋同和差异。

关键词: 亚热带常绿阔叶林, 叶片虫食状, 多样性, 分布格局

Insect herbivory patterns on leaves of 11 plant species in the evergreen broad-leaved forests of Tiantong National Forest Park, Zhejiang

Hongwei Wang^{1,2}, Yongli Cai^{1,2*}, Kai Li^{2,3}, Hong Jiang^{1,2}, Yupeng Tian^{1,2}

1 School of Resources and Environmental Science, East China Normal University, Shanghai 200062

2 Shanghai Key Laboratory for Ecology of Urbanization Process and Eco-restoration, Shanghai 200062

3 School of Life Science, East China Normal University, Shanghai 200062

Abstract: In order to study behavior of insect herbivory and its damage to leaves, we investigated herbivory patterns on the leaves of 11 evergreen plant species in subtropical evergreen broad-leaved forests of Tiantong National Forest Park, Zhejiang Province. The results were as follows: (1) A total of 16 herbivory patterns were found, and for each tree species, herbivory patterns ranged from 10 to 13. The frequency of each herbivory patterns varied from 0.5% to 28.7%. The frequency of Edge Defoliation (ED) was the highest (28.7%), while that of Gall and Bloth-shaped mine (BM) were the lowest (0.5%). (2) Three distribution patterns could be classified according to the number of dominant herbivory patterns in a tree species: mono-dominant distribution (with only one dominant pattern), such as Edge Defoliation on *Rhododendron ovatum* and *Loropetalum chinense* leaves; bi-dominant (with two dominant patterns), such as Edge Defoliation and Top Defoliation on *Schima superba* leaves; and multi-dominant (with three or more dominant herbivory patterns), such as in the other eight tree species. (3) Shannon-Wiener diversity index of herbivory patterns varied from 1.57 to 2.23 among 11 tree species, with the highest in *Castanopsis sclerophylla* and the lowest in *Rhododendron ovatum*. Shannon-Wiener diversity index was higher in the six arbor species (2.040) than in five shrub species (1.882), and higher in dominant species than in companion species, however, the differences

收稿日期: 2005-06-27; 接受日期: 2006-01-25

基金项目: 国家自然科学基金项目(30570329)

* 通讯作者 Author for correspondence. E-mail: ylcai@geo.ecnu.edu.cn

were not significant. (4) Correlation analysis showed that there were significant positive correlations among eight pairs of herbivory patterns and significant negative correlation among four pairs, suggesting similarities and differences in selection by herbivorous insects.

Key words: subtropical evergreen broad-leaved forest, insect herbivory patterns, diversity, distribution type

昆虫取食叶片导致叶片缺失或叶组织损伤的现象十分普遍 (Cyr & Pace, 1993), 而叶面积的损伤又直接影响到植物的光合作用, 进而减弱植物的生长和竞争能力, 并最终导致植物适合度下降 (Strauss *et al.*, 2001; Thomson *et al.*, 2003; Avila-Sakar *et al.*, 2003)。昆虫与植物在长期的相互作用、协同进化过程中形成十分复杂的种间关系, 这种关系在塑造热带森林的生物多样性和群落结构方面具有重要作用 (Coley & Barone, 1996)。

在植食性昆虫中, 既有仅取食1种或少数几种植物的专食性或狭食性昆虫 (specialist), 也有食性不专的广食性类型 (generalist) (阎凤鸣, 2003)。这种食性的差异使得群落中植物叶片的虫食状格局复杂多样。

由于昆虫口器和取食行为的差异, 不同类型的昆虫取食叶片后通常在叶片上留下不同形态和大小的痕迹, 即虫食状 (insect herbivory pattern) 或取食状 (eating pattern) (于晓东等, 2001; 江红等, 2005)。Houard、Buhr和Schnaider曾分别描述了欧洲和地中海地区植物遭受昆虫危害产生的虫瘿、潜叶及其他虫食状, 并给出了根据这些虫食状鉴定昆虫种类的方法 (于晓东等, 2001)。Needham和Herring分别介绍了潜叶昆虫的生活史以及与叶片的关系, 提出根据植物叶片上潜叶痕迹判断昆虫种类的方法 (于晓东等, 2001)。Skuhravy'等在斯洛伐克西南部9种栎树的叶片上发现78种昆虫 (于晓东等, 2001); 于晓东等 (2001) 在温带森林的辽东栎 (*Quercus liaotungensis*) 叶片上识别出9种虫食状类型及相应的5目15科20多种昆虫; 江红等 (2005) 在亚热带常绿阔叶林中的石栎 (*Lithocarpus glaber*) 上识别出15种虫食状类型。可见, 分析叶片的虫食状可以间接地帮助我们认识植食性昆虫的类型, 并可能作为监测森林虫害的有用指标。

常绿阔叶林是我国亚热带地区的地带性植被, 其中孕育着丰富多样的植物和昆虫种类。尽管目前人们对常绿阔叶林群落和生态系统已进行了大量的研究, 但多集中于植物方面的探讨, 关于植物

叶片虫食状类型及其与取食昆虫之间相互关系的研究却鲜见报道。本项研究对浙江天童常绿阔叶林中11种常见常绿乔灌木叶片的虫食状类型、分布格局及种间差异进行了初步的分析, 为进一步研究植食性昆虫与植物之间的相互关系提供基础资料。

1 研究区概况

天童国家森林公园位于浙江省鄞县东南部 (29°48' N, 121°47' E), 距宁波市28 km, 面积349 hm²。主峰太白山海拔653.3 m, 一般山峰海拔300 m左右。年均温为16.2℃, 年均降雨量1,374.7 mm。地带性土壤为山地黄红壤。该区森林植被保存良好, 植物种类丰富, 共有种子植物148科506属968种; 地带性植被为以栲树 (*Castanopsis fargesii*)、米槎 (*C. carlesii*) 和木荷 (*Schima superba*) 为建群种组成的常绿阔叶林 (宋永昌和王祥荣, 1995)。据初步统计, 该区植食性昆虫有8目90科272种 (未发表数据)。

本研究选择常绿阔叶林中较为常见的11种常绿乔灌木为取样对象, 其中乔木6种, 3种为优势种, 即木荷、栲树和米槎, 3种为伴生种, 即石栎、苦槠 (*Castanopsis sclerophylla*) 和青冈 (*Cyclobalanopsis glauca*); 灌木5种, 2种为优势种, 即连蕊茶 (*Camellia fraterna*) 和马银花 (*Rhododendron ovatum*), 3种为伴生种, 即檵木 (*Loropetalum chinense*)、细齿桉 (*Eurya nitida*)、细枝桉 (*E. loquaiana*)。

2 取样方法

2.1 叶片采集

取样在2004年10月上中旬完成, 每种在林内随机选择5株样木, 每株冠层取2-3个枝条, 统一收集当年成熟的所有叶片。为了检验植株冠层取样方位可能对取样结果的影响, 选择栲树和木荷为代表植物, 分别从每株大树的东、南、西、北和中5个不同方位各采2-3个枝条, 共收集木荷叶片629片、栲树叶片1,983片。利用ANOVA检验, 发现取样方位对栲树和木荷叶片虫食状类型和频率无显著性影响 (栲树 $F = 0.769$, $P = 0.582 > 0.05$; 木荷 $F = 0.836$, $P =$

0.541>0.05)。因此对其余种类的采样不再考虑方位,但尽可能采集冠层阳面的枝条,每种植物采集的叶片数不低于400片,样本数高于Morrow等(1978)的取样要求。

2.2 叶片虫食状的鉴定

昆虫取食叶片后在叶片上留下各种不同的取食痕迹,根据留下的痕迹大小、形状、位置和排列进行识别、分类。对少数难区别的类型采取多人鉴定的方法,尽可能减少人为因素的干扰。

2.3 叶片虫食状多样性分析

为反映每种植物叶片虫食状在类型和出现频率上的综合差异,本文选择多样性指数(Shannon-Wiener指数)来加以度量,即

$$H=-\sum_{i=1}^n P_i \log_2 P_i$$

式中 P_i 是第*i*种虫食状类型在所有虫食状类型中的比例, n 是虫食状类型总数。

2.4 虫食频率

虫食频率(%)=100×某种虫食状所占的叶片数/所有虫食状所占的叶片总数。本文所有数据分析和

作图在Excel和SPSS软件上完成。

3 结果与分析

3.1 叶片虫食状类型及分布

11种常绿乔灌木叶片上共识别出16种虫食状类型(表1,图1)。每种植物叶片的虫食状类型在10–13种之间,最多的13种(包括栲树、米槎和细枝桉),最少的10种(仅有榿木)(表2)。

不同植物之间既可能拥有相同的虫食状,也可能具有不同的虫食状类型。16种虫食状类型中,缘食状、顶食状、掏食状、切叶状、小孔状、大孔状和阴面食状在11种植物叶片上均有分布,阳面食状仅在马银花上未出现,叶中脉状在石栎和榿木上未出现;泡状和潜叶状仅出现在乔木种类叶片上,虫瘿仅出现在连蕊茶、细齿桉和细枝桉3种灌木的叶片上,长条状、细长条状虽在多种植物叶片上出现,但频率并不高(表1)。

对所有11种植物叶片虫食状的统计结果表明,缘食状、顶食状、掏食状、切叶状、大孔状、小孔状、阴面食状和阳面食状不仅出现在大多数植物上,

表1 叶片虫食状的类型和分布
Table 1 Type and distribution of insect herbivory patterns in 11 plant species

虫食状类型 Type of insect herbivory pattern	虫食频率 Herbivory frequency (%)											平均值 Mean
	Cf	Ss	Cc	Cs	Lg	Cg	Lc	Caf	Ro	En	El	
缘食状 Edge defoliation (ED)	27.3	32.4	28.3	13.1	22.7	16.2	44.4	29.7	51.7	26.5	24.1	28.7
顶食状 Top defoliation (TD)	15.5	28.4	11.3	17.9	25.7	11.1	13.7	17.6	8.0	10.3	7.2	15.2
掏食状 Excavating defoliation (EX)	10.1	6.9	2.4	7.9	0.2	29.3	10.1	12.6	16.5	14.2	7.2	10.7
切叶状 Leaf cutting (LC)	3.6	5.1	8.9	15.1	19.6	8.1	6.0	13.5	9.2	9.7	5.1	9.5
大孔状 Big perforation (BP)	8.3	9.8	10.4	11.0	8.1	6.1	0.8	9.0	4.2	17.1	5.1	8.2
小孔状 Small perforation (SP)	5.9	3.2	15.2	10.0	6.1	8.1	11.7	8.6	6.1	11.6	20.0	9.7
阴面食状 Lower epidermis defoliation (LED)	3.0	4.9	9.5	9.0	1.7	10.6	2.4	2.3	1.1	5.8	12.3	5.7
阳面食状 Upper epidermis defoliation (UED)	2.5	8.3	3.6	8.7	0.7	6.6	10.1	4.5	0.0	0.6	5.6	4.7
细长条状 Slender defoliation (SLD)	15.6	0.0	2.4	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.4	1.0	0.0	1.8
长条状 Striped defoliation (STD)	5.6	0.0	5.1	0.0	0.2	0.0	0.4	0.0	0.4	0.0	0.5	1.1
连续小孔状 Successive pinhole (SUP)	0.0	0.0	0.0	0.0	12.6	0.0	0.0	0.0	1.1	0.0	0.5	1.3
叶中脉状 Middle vein defoliation (MVD)	1.3	0.7	1.5	1.8	0.0	1.0	0.0	0.5	0.4	1.0	1.0	0.8
泡状 Bloth-shaped mine (BM)	0.7	0.2	1.2	1.5	1.1	1.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.5
潜叶状 Leaf mine (LM)	0.5	0.0	0.3	3.6	0.0	2.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.6
褶皱状 Rugate defoliation (RD)	0.0	0.0	0.0	0.3	1.3	0.0	0.4	0.5	0.8	0.3	9.2	1.2
虫瘿 Gall	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	1.4	0.0	1.9	2.1	0.5

Cf: 栲树; Ss: 木荷; Cc: 米槎; Cs: 苦槠; Lg: 石栎; Cg: 青冈; Lc: 榿木; Caf: 连蕊茶; Ro: 马银花; En: 细齿桉; El: 细枝桉
Cf, *Castanopsis fargesii*; Ss, *Schima superba*; Cc, *Castanopsis carlesii*; Cs, *Castanopsis sclerophylla*; Lg, *Lithocarpus glaber*; Cg, *Cyclobalanopsis glauca*; Lc, *Loropetalum chinense*; Caf, *Camellia fraterna*; Ro, *Rhododendron ovatum*; En, *Eurya nitida*; El, *Eurya loquaiana*

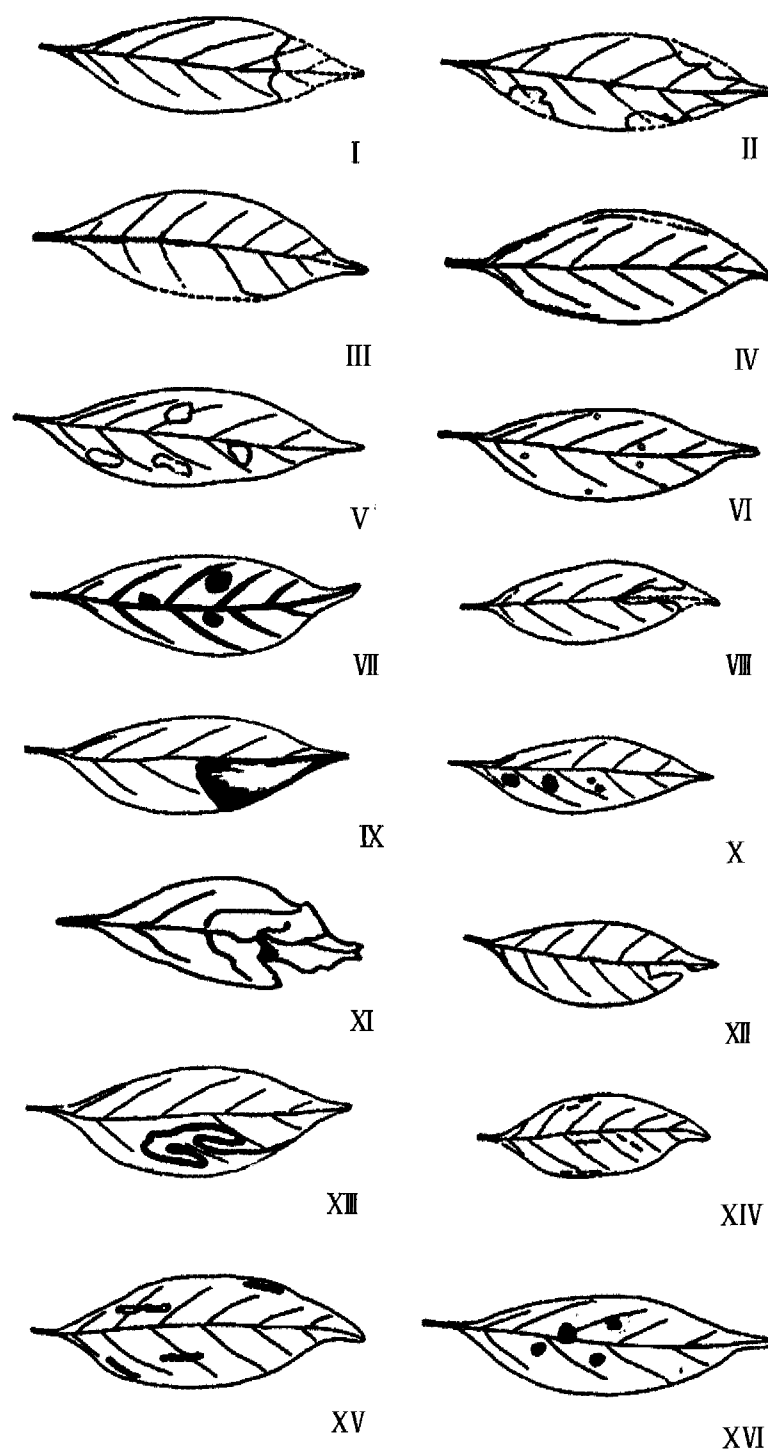


图1 11种常绿乔灌木叶片上的16种虫食状示意图

Fig. 1 Sketch map for 16 insect herbivory patterns of 11 plant species

I: 顶食状; II: 缘食状; III: 切叶状; IV: 连续小孔状; V: 大孔状; VI: 小孔状; VII: 阴面食状; VIII: 叶中脉状; IX: 泡状; X: 阳面食状; XI: 褶皱状; XII: 掏食状; XIII: 潜叶状; XIV: 细长条状; XV: 长条状; XVI: 虫瘿

I, Top defoliation; II, Edge defoliation; III, Leaf cutting; IV, Successive pinhole; V, Big perforation; VI, Small perforation; VII, Lower epidermis defoliation; VIII, Middle vein defoliation; IX, Bloth-shaped mine; X, Upper epidermis defoliation; XI, Rugate defoliation; XII, Excavating defoliation; XIII, Leaf mine; XIV, Slender defoliation; XV, Striped defoliation; XVI, Gall

表2 11种植物叶片虫食状多样性
Table 2 Diversity of insect herbivory pattern in 11 plant species

	植物种 Plant species										
	<i>Cf</i>	<i>Ss</i>	<i>Cc</i>	<i>Cs</i>	<i>Lg</i>	<i>Cg</i>	<i>Lc</i>	<i>Caf</i>	<i>Ro</i>	<i>En</i>	<i>El</i>
叶片数 No. of sample	503	476	463	408	496	496	459	450	412	480	464
虫食状 No. of herbivory pattern	13	10	13	12	12	11	10	11	12	12	13
Shannon-Wiener指数 Shannon-Wiener index	2.13	1.80	2.15	2.23	1.88	2.06	1.69	1.96	1.57	2.02	2.17

物种代号同表1。 Symbol of species refer to Table 1.

而且出现频率也较高(均在4.0%以上), 其中出现频率最高的是缘食状, 占28.7%; 其他8种虫食状频率均低于1.8%, 其中频率最低的为虫瘿和泡状, 仅占0.5%(表1)。此外, 某些虫食状在某些植物种占有相对较高的频率, 如栲树的细长条状占15.6%、石栎的连续小孔状占12.6%和细枝枞的褶皱状占9.2%(表1)。

16种虫食状可分为3种类型: (1)一种虫食状占绝对优势的单优格局, 如马银花和榿木, 在这两种植物上缘食状所占比例分别达到51.7%和44.4%; (2)两种虫食状(缘食状和顶食状)占优势的类型, 即双优格局, 仅有木荷, 两种虫食状之和占50%以上; (3)其余8种植物为3种或3种以上虫食状占优势的多优格局。

3.2 叶片虫食状多样性分析

11种植物叶片虫食状多样性指数变化在1.57~2.23之间, 最高为苦槠(2.23), 最低为马银花(1.57)。总体上看, 虫食状类型多的, 多样性指数也高, 但二者的相关性不显著($F=0.578$, $P=0.062$)(表2)。马银花、榿木和木荷等的多样性指数较低, 是由于虫食状类型较少而且为单优或双优的格局所致(表2)。虫食状类型与多样性高低并非呈明显的正相关, 多样性指数大小基本反映了这种植物虫食状的多样性特征。

尽管6种乔木的平均虫食状多样性(2.040)高于5种灌木(1.882), 但叶片虫食状多样性指数高低在乔木和灌木之间无显著差异($F=1.637$, $P=0.233$)。优势种和伴生种之间也无显著性差异($F=0.424$, $P=0.531$, 表2)。

3.3 叶片虫食状间相关性分析

16种虫食状间的相关分析表明有8对虫食状类型显著正相关, 它们是阴面食状—叶中脉状, 阴面

食状—小孔状, 细长条状—长条状, 切叶状—连续小孔状, 潜叶状—叶中脉状, 潜叶状—泡状, 褶皱状—小孔状, 褶皱状—虫瘿; 有4对虫食状类型间显著负相关, 即缘食状—阴面食状, 缘食状—泡状, 缘食状—潜叶状, 顶食状—小孔状; 其他类型间无显著相关性(表3)。

4 讨论

由于口器和取食方式的不同, 植食性昆虫通常被分为咀嚼类(chewers)、潜叶类(miners)、刺吸类(sucking insects)、造瘿类(gall-makers)和穿洞类(borer)五大类(Abrahamson,1989), 其中前四类都有取食叶片的类型, 每种类型的昆虫在取食叶片后会留下不同形态的虫食状。其中咀嚼类昆虫可因口器大小、取食行为不同, 还可以形成形态各异的虫食状。本项研究在11种植物中共识别出16种虫食状类型, 仅比江红等(2005)观察到的15种虫食状多出造瘿类一种类型, 与于晓东(2001)观察到的9种虫食状相比, 增加的8种类型都是咀嚼类昆虫取食形成的。但本研究未对蚜虫等刺吸类昆虫形成的虫食状进行识别。本文的分类方法基本上涵盖了本区植物叶片的虫食状类型, 可作为今后研究的参考。本次识别出石栎的12种虫食状类型少于江红等(2005)观察到的15种类型数, 可能是由于样本数和取样时间不同所致, 需要进一步研究。

16种叶片虫食状类型出现的频率存在明显差异, 而且在不同植物种类间存在着差异。在11种植物叶片上出现频率较高的虫食状类型有8种, 即缘食状、顶食状、掏食状、切叶状、大孔状、小孔状、阴面食状和阳面食状, 其中缘食状是最常见的类型, 出现频率最高, 其次是顶食状, 其他6种虫食状出现的频率依次降低; 这与于晓东等(2001)和江红

表3 16种叶片虫食状之间的相关性

Table 3 The Pearson correlations among insect herbivory patterns of 11 plant species

	TD	EX	LC	BP	SP	LED	UED	SLD	STD	SUP	MVD	BM	LM	RD	Gall
ED	-0.186	-0.002	-0.323	-0.473	-0.164	-0.627*	-0.162	-0.033	0.006	-0.127	-0.585	-0.660*	-0.631*	-0.103	-0.133
TD		-0.443	0.360	0.174	-0.638*	-0.373	0.208	-0.036	-0.159	0.468	-0.241	0.245	0.010	-0.352	-0.383
EX			-0.259	-0.137	-0.174	0.138	0.053	-0.063	-0.286	-0.433	0.026	-0.177	0.269	-0.190	0.032
LC				0.263	-0.171	-0.212	-0.268	-0.408	-0.361	0.684*	-0.169	0.442	0.257	-0.187	-0.071
BP					-0.051	0.157	-0.335	0.074	0.067	-0.043	0.500	0.207	0.137	-0.267	0.321
SP						0.654*	0.124	-0.203	0.107	-0.243	0.289	-0.084	-0.040	0.683*	0.579
LED							0.337	-0.186	0.044	-0.345	0.674*	0.339	0.461	0.463	0.272
UED								-0.257	-0.235	-0.412	0.115	0.078	0.417	0.020	-0.197
SLD									0.798*	-0.141	0.326	0.137	-0.051	-0.175	-0.192
STD										-0.158	0.439	0.317	-0.113	-0.156	-0.274
SUP											-0.499	0.293	-0.188	0.053	-0.184
MVD												0.520	0.624*	-0.006	0.037
BM													0.698*	-0.299	-0.554
LM														-0.203	-0.315
RD															0.620*

虫食状代号参见表1. *表示在0.05水平上相关性显著($P < 0.05$) Symbol of herbivory pattern refer to Table 1. * At the 0.05 level, correlations are significant

等(2005)研究的结果基本一致。我们根据每种植物中优势虫食状数的差异,首次将11种植物叶片虫食状分布格局分为3种类型,即单优格局、双优格局和多优格局,反映出昆虫对叶片的取食在不同植物间既存在明显的共性,也有一定的差异。

植食性昆虫既有专食性(specialist)又有广食性(generalist)(钦俊德,1987),群落中的每种植物都可能受到两种类型昆虫的共同取食,也可能仅受到一种昆虫类型的取食,结果就可能在叶片上遗留的虫食状类型的相互关系中得以反映。因此虫食状的相关性就可能是昆虫食性分化和昆虫相互关系的具体体现。本研究中的16种虫食状类型间的相关分析表明有8对虫食状之间显著正相关,4对显著负相关。正相关反映不同类型的昆虫可能取食相同的食物和分化的生活空间,从而可以共同存在;而负相关反映出昆虫间取食食物的差异以及相似的生活空间,从而互相排斥,虫食状的相关性结果不仅有助于我们对昆虫食性选择性的认识,而且可以加深理解不同种类昆虫的相互关系。

江红等(2005)的研究和本项研究都未对昆虫作相应的观察,尽管我们发现少数虫食状与取食昆虫之间存在很好的对应关系,如本区的潜叶状由北美斑潜蝇所为(私人观察),但由于昆虫取食的复杂性,

不同的虫食状(如缘食状、顶食状和掏食状)可能是一种昆虫所为,也可能是口器相似的不同昆虫所致,如同种昆虫取食叶片后留下顶食、掏食、缘食等不同的虫食状,这些虫食状都从叶的边缘开始取食。有些昆虫在低龄时由于取食能力差,只产生阴面食状和阳面食状,而长大后可以留下缘食状的取食痕迹,也可将叶片吃穿,产生孔状取食痕迹(私人观察),也就是说虫食状类型与昆虫之间的关系相当复杂。

参考文献

- Abrahamson WG (1989) *Plant-Animal Interactions*, pp. 123-162. McGraw-Hill, New York.
- Avila-Sakar G, Leist LL, Stephenson AG (2003) Effects of the spatial pattern of leaf damage on growth and reproduction: nodes and branches. *Journal of Ecology*, **91**, 867-879.
- Coley PD, Barone JA (1996) Herbivory and plant defenses in tropical forests. *Annual Review of Ecology and Systematics*, **27**, 305-335.
- Cyr H, Pace ML (1993) Magnitude and patterns of herbivory in aquatic and terrestrial ecosystems. *Nature*, **361**, 148-150.
- Jiang H(江红), Cai YL(蔡永立), Li K(李恺), Wang H(王红), Wang L(王亮) (2005) Intensity and patterns of leaf area eaten of *Lithocarpus glaber* by insects, at Tiantong Forest Park, Zhejiang. *Chinese Journal of Ecology*(生态学杂志), **24**, 989-993. (in Chinese with English abstract)
- Morrow PA, LaMarche VC (1978) Tree ring evidence for chronic insect suppression of productivity in subalpine

- Eucalyptus. *Science*, **210**, 1244–1245.
- Qin JD (钦俊德) (1987) *Insect and Plant Interactions* (昆虫与植物的关系). Science Press, Beijing. (in Chinese)
- Song YC (宋永昌), Wang XR (王祥荣) (1995) *Vegetation and Flora of Tiantong National Forest Park, Zhejiang Province* (浙江天童国家森林公园的植被和区系). Shanghai Science and Technology Literature Press, Shanghai. (in Chinese)
- Strauss SY, Conner JK, Lehtila KP (2001) Effects of foliar herbivory by insects on the fitness of *Raphanus raphanistrum*: damage can increase male fitness. *The American Naturalist*, **158**, 496–504.
- Thomson VP, Cunningham SA, Ball MC, Nicotra AB (2003) Compensation for herbivory by *Cucumis sativus* through increased photosynthetic capacity and efficiency. *Oecologia*, **134**, 167–175.
- Yan FM (阎凤鸣) (2003) *Chemical Ecology* (化学生态学). Science Press, Beijing. (in Chinese)
- Yu XD(于晓东), Zhou HZ(周红章), Luo TH(罗天宏) (2001) Patterns of damage by phytophagous insects on leaves of *Quercus liaotungensis*. *Acta Phytoecologica Sinica*(植物生态学报), **25**, 553–560. (in Chinese with English abstract)

(责任编辑: 周红章 责任编辑: 闫文杰)