

# 千岛湖地区破碎化生境对瘿蜂寄主植物分布与虫瘿数量的影响\*

杨剑舟\*\* 程子琛 龙承鹏 王义平\*\*\*

(浙江农林大学林业与生物技术学院, 杭州 311300)

**摘要** 【目的】探究生境破碎化产生的岛屿面积效应和岛屿边缘效应能否“自下而上 (Bottom-up impact)”影响瘿蜂群落结构与分布。【方法】对不同岛屿面积和岛屿内外样带上白栎 *Quercus fabri* 和枹栎 *Q. serrata* 的 12 组叶功能性状进行测定, 结合样带寄主植物上瘿蜂虫瘿的数量, 分析面积效应与边缘效应对于瘿蜂群落的影响。【结果】(1) 白栎和枹栎在不同面积岛屿内外样带上的分布密度无差异 ( $P>0.05$ )。 (2) 白栎的叶氮含量和枹栎的叶绿素含量与岛屿面积呈显著正相关 ( $P<0.05$ ), 白栎的叶干重和枹栎的叶厚度与岛屿面积呈显著负相关 ( $P<0.05$ ), 但白栎和枹栎的叶功能性状在岛屿边缘与内部之间均未出现显著差异 ( $P>0.05$ )。 (3) 白栎与枹栎上的致虫瘿瘿蜂均为纹瘿蜂属 *Andricus*, 其中白栎上 3 种, 枹栎上 5 种。 (4) 瘿蜂虫瘿数量在岛屿内外样带上没有显著差异 ( $P>0.05$ ), 但会随着岛屿面积的增大而变多, 与白栎的叶氮含量、叶面积和比叶面积显著正相关 ( $P<0.05$ ), 与枹栎的叶绿素、叶面积和比叶面积显著正相关 ( $P<0.05$ ), 与白栎和枹栎的叶组织密度呈显著负相关 ( $P<0.05$ ), 与二者第一主成分显著正相关 ( $P<0.05$ )。【结论】生境破碎化造成的岛屿边缘效应不能明显影响瘿蜂的群落结构与分布, 岛屿面积效应通过寄主植物对瘿蜂产生影响; 瘿蜂产卵造瘿的偏好与寄主植物对光资源利用能力的强弱存在一定关系。

**关键词** 瘿蜂; 面积效应; 边缘效应; 叶功能性状; 自下而上; 虫瘿

## The effects of habitat fragmentation on the distribution of gall wasp host plant and the number of cynipid galls in Thousand Island Lake

YANG Jian-Zhou\*\* CHENG Zi-Chen LONG Cheng-Peng WANG Yi-Ping\*\*\*

(School of Forestry and Biotechnology, Zhejiang A&F University, Hangzhou 311300, China)

**Abstract** 【Aim】To investigate if the island area and island edge effects caused by habitat fragmentation can have a “bottom-up impact” on the distribution and structure of the cynipid gall wasp community. 【Methods】Twelve sets of functional leaf traits for *Quercus fabri* and *Q. serrata* were measured from sample belts interior and on the edge of different sized islands in Thousand Island Lake. The influence of the area effect and edge effect on the gall wasp community was analyzed using the combined number of gall wasps on host plants from all the sample belts. 【Results】(1) There was no difference in the distribution densities of *Q. fabri* or *Q. serrata* between the interior and edge transects for the different sized islands ( $P>0.05$ ). (2) The nitrogen content of *Q. fabri* and the chlorophyll content of *Q. serrata* showed a significant positive correlation with island area ( $P<0.05$ ), while the leaf dry weight of *Q. fabri* and the leaf thickness of *Q. serrata* were significantly negatively correlated with island area ( $P<0.05$ ). However, there was no significant difference in leaf functional traits between the island edge and the interior for either species ( $P>0.05$ ). (3) The gall wasps present on *Q. fabri* and *Q. serrata* all belonged to the genus *Andricus*, of these three species were found on *Q. fabri* and five species on *Q. serrata*. (4) There was no difference in the number of gall wasp galls between the interior and edge island sample belts ( $P>0.05$ ). However, the

\*资助项目 Supported project: 国家自然科学基金项目 (32270469)

\*\*第一作者 First author, E-mail: 792030827@qq.com

\*\*\*通讯作者 Corresponding author, E-mail: wyp@zafu.edu.cn

收稿日期 Received: 2023-12-12; 接受日期 Accepted: 2024-05-24

number of galls increased with island size. Gall wasp number was significantly positively correlated with the leaf nitrogen content, leaf area, and specific leaf area of *Q. fabri* ( $P < 0.05$ ), and with chlorophyll content, leaf area, and specific leaf area of *Q. serrata* ( $P < 0.05$ ). In contrast, gall wasp number was significantly negatively correlated with leaf tissue density ( $P < 0.05$ ) and significantly positively correlated with the first principal component for both tree species ( $P < 0.05$ ). [Conclusion] The island edge effect, resulting from habitat fragmentation, did not have an obvious effect on the community structure or distribution of gall wasps. However, the island area effect influenced gall wasps by affecting their host plants. Gall wasp host preference for egg-laying and gall formation is related to the ability of host plants to utilize light resources.

**Key words** gall wasp; area effect; edge effect; leaf functional trait; bottom-up; gall

一个原本连续的生境在人为或者非人为条件影响下被分割成多块相互隔离的小面积生境, 生活在上面的生物群落会如何变化? 这在景观生态学中是一个相当经典的问题 (Laurance, 2008; Maldonado-López, 2016)。为回答该问题, 面积效应、隔离效应 (MacArthur and Wilson, 1963)、边缘效应 (Beecher, 1942)、生境异质性 (Williams, 1964) 以及生境数量 (Fahrig, 2013) 等假说被相继提出。其中, 面积效应和边缘效应是研究生境破碎化的 2 个热门方向 (Rossetti *et al.*, 2017; Griffin and Haddad, 2021)。植物作为生态系统中的第一营养级, 在维持系统稳定中发挥着重要作用。然而, 生境破碎化会对植物群落产生诸多负面影响, 例如生境面积减小, 易引发植物群落出现近交现象 (Kittelson *et al.*, 2015), 或是单一生境条件造成土壤营养降低 (Pérez-Solache *et al.*, 2023)。叶作为植物敏锐的感觉器官, 能通过改变自身形态结构适应不利环境, 这些不利影响常常通过叶功能性状的改变而表现出来 (王雪艳, 2020; García-Jain *et al.*, 2021)。

植食性昆虫与植物关系密切, 其中专食性昆虫的选择较为单一, 对于植物营养质量的变化有更为敏锐的感知 (Bagchi *et al.*, 2018)。例如, 专食性昆虫金针瘿蝇 *Eurosta solidaginis* 往往会选择生理活性更高的植物寄生 (Torgerson *et al.*, 1993)。因此, 不少学者猜测生境破碎化对专食性生物群落的影响很大程度上通过对寄主植物的改变产生“自下而上”的影响 (Stone *et al.*, 2002; Askew *et al.*, 2013; Maldonado-López *et al.*, 2015)。瘿蜂是膜翅目 Hymenoptera 瘿蜂总科 Cynipoidea 瘿蜂科 Cynipidae 的一类特殊昆虫, 通常只在一种或几种近缘植物上寄生, 名称来源于其能刺激植物产生特异性组织——虫瘿 (郭瑞,

2012; 鞠晓雪, 2021; 潘柯宇等, 2023)。由于瘿蜂在寄主植物选择上较为单一, 并且寄生后会在植物上留下明显的虫瘿, 这使得它们成为研究植物与昆虫关系的理想模型之一 (Maldonado-López *et al.*, 2015)。

目前, 国内关于生境破碎化如何影响造瘿生物的研究较少。为了研究生境破碎化对瘿蜂群落的影响, 本研究在千岛湖中典型破碎化区域选择合适岛屿, 通过叶片上虫瘿的数量判断瘿蜂的活动 (Eliason and Potter, 2000; Maldonado-López *et al.*, 2016)。拟探究以下科学问题: (1) 生境破碎化引发的面积效应以及边缘效应是否通过寄主植物对瘿蜂的群落结构和分布生“自下而上” (Bottom-up impact) 的影响? (2) 如果是, 寄主植物的哪些功能性状会影响瘿蜂的选择?

## 1 材料与方法

### 1.1 研究区概况与样岛设置

千岛湖位于浙江省杭州市淳安县 ( $29^{\circ}11'30''02''N$ ,  $118^{\circ}20'119''20''E$ ), 以其湖内众多岛屿而得名。由于是人工蓄水形成的湖泊, 千岛湖内的岛屿边界清晰, 形成时间一致, 是研究生境破碎化的理想平台 (Zhang *et al.*, 2007)。岛上自然植被丰富, 拥有较多种类的壳斗科植物, 其中白栎 *Quercus fabri* 和枹栎 *Q. serrata* 的分布不受岛屿面积的影响 (孙雀等, 2008), 是研究生境破碎化对瘿蜂影响的良好材料。

在千岛湖破碎化湖区挑选不同面积的岛屿, 将其分为微岛 ( $0.1 \text{ hm}^2$ )、小岛 ( $0.4 \text{ hm}^2$ )、中岛 ( $2.0 \text{ hm}^2$ ) 和大岛 ( $8.0 \text{ hm}^2$ ) 4 个不同层次, 表示生境破碎化程度从高到低。在选定的样岛边缘和内部分别设置长 100 m, 宽 4 m 的样带, 设

置样带数量与岛屿面积的对数成正比,且拥有 1 对以上样带的岛屿,样带之间的距离大于 100 m (Schoereder *et al.*, 2004; 任鹏, 2022)。样带设置分别为(1)微岛和小岛 1 对;(2)中岛 2 对;(3)大岛 3 对。为保持采样面积的一致性,设置了(1)3 个微岛;(2)3 个小岛;(3)2 个中岛(其中一个岛屿只设置一对样带);(4)1 个大岛。样岛的详细设置情况见表 1。

表 1 样岛设置  
Table 1 Sample island setup

| 名称<br>Name       | 面积 (hm <sup>2</sup> )<br>Area (hm <sup>2</sup> ) | 样带 (对)<br>Sample transect (pair) | 数量<br>Number |
|------------------|--------------------------------------------------|----------------------------------|--------------|
| 微岛 Tiny island   | 0.1                                              | 1                                | 3            |
| 小岛 Small island  | 0.4                                              | 1                                | 3            |
| 中岛 Middle island | 2.0                                              | 2                                | 2            |
| 大岛 Large island  | 8.0                                              | 3                                | 1            |

表 2 植物叶功能性状  
Table 2 Plant leaf functional traits

| 叶功能性状<br>Leaf functional traits | 单位<br>Units                      | 含义<br>Meaning                                                                                                                 |
|---------------------------------|----------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 叶氮含量 LNC                        | g·kg <sup>-1</sup>               | 与植物光合速率和植物生长代谢有关 (张姗姗, 2022)<br>Related to photosynthetic rates and plant growth metabolism                                   |
| 叶碳含量 LCC                        | g·kg <sup>-1</sup>               | 与植物的寿命有关 (杨致远, 2021)<br>Related to plant longevity                                                                            |
| 碳氮比 C : N                       |                                  | 反映植物同化养分中碳的能力 (陈妮娜等, 2023)<br>Reflecting the plant's ability to assimilate carbon from nutrients                              |
| 叶鲜重 LFW                         | g                                | 与植物的生物量有关<br>Related to plant biomass                                                                                         |
| 叶干重 LDW                         | g                                | 与植物的生物量有关<br>Related to plant biomass                                                                                         |
| 叶面积 LA                          | cm <sup>2</sup>                  | 影响叶片与外界进行物质和能量的交换 (李永华等, 2012)<br>Affecting the exchange of substances and energy between leaves and the external environment |
| 叶厚度 LT                          | cm                               | 影响叶片与外界进行物质和能量的交换<br>Affecting the exchange of substances and energy between leaves and the external environment              |
| 叶绿素 CC                          | SPAD                             | 与光合作用有关<br>Related to photosynthesis                                                                                          |
| 比叶面积 SLA                        | cm <sup>2</sup> ·g <sup>-1</sup> | 与有效利用光资源的能力有关 (李永华等, 2012; 杨致远, 2021)<br>Related to the capacity for efficient utilization of light resources                 |
| 干物质含量 LDMC                      | g·g <sup>-1</sup>                | 与植物利用资源的能力有关 (Wilson <i>et al.</i> , 1999)<br>Related to the plant's ability to utilize resources                             |
| 叶体积 LV                          | cm <sup>3</sup>                  | 与植物的生物量有关<br>Related to plant biomass                                                                                         |
| 叶组织密度 LTD                       | g·cm <sup>-3</sup>               | 与植物的物理防御能力有关 (宋琪, 2020)<br>Related to the plant's physical defense capabilities                                               |

LNC: Leaf nitrogen content; LCC: Leaf carbon content; C : N: Carbon to nitrogen ratio; CC: Chlorophyll content; LA: Leaf area; LFW: Leaf fresh weight; LDW: Leaf dry weight; LDMC: Leaf dry matter content; SLA: Specific leaf area; LT: Leaf thickness; LV: Leaf volume; LTD: Leaf tissue density. 下表同。The same below.

1.2 虫瘿采集及寄主叶片收集和测定

2023 年春天 2 月开始试验,从高、中、低不同片层分别选择 1 根当年生的寄主白栎和枹栎的枝条,并从顶端开始的 50 片叶上收集虫瘿 (García-Jain *et al.*, 2021),对于 3 月至 4 月间的瘿蜂春季世代每周收集一次。将收集到的虫瘿连同少部分相连的枝叶放入网袋中,记录好采集时间、岛屿类型、位置和寄主等重要信息。之后,通过物种形态与分子技术鉴定瘿蜂的种类(郭瑞, 2012)。

为了分析植物叶片的功能性状(表 2),从每棵样树的中间片层选择 5-10 片无明显病虫害的叶片,记录岛屿类型、位置和种类等重要信息。及时测定白栎或者枹栎叶片的鲜重(Leaf Fresh weight, LFW)、叶厚度(Leaf thickness, LT)。使用 SPAD502 便携式叶绿素测定仪测定叶绿素

含量 (Chlorophyll content, CC)。使用相机扫描叶片(佳能 5D 相机搭配腾龙 90 mm 微距镜头),再用图像处理(Adobe Photoshop 2023)计算其所占的像素,乘以像素大小以得出叶面积 (Leaf area, LA) (罗光浪, 2021)。将新鲜叶片擦净,放入 105 °C 恒温箱内杀青 20 min,之后放入 75 °C 烘箱内烘至恒重,称量叶片干重 (Leaf dry weight, LDW) (王连珍等, 2017)。计算比叶面积 (Specific leaf area, SLA) (叶面积/叶干重)、干物质含量 (Leaf dry matter content, LDMC) (叶干重/叶鲜重)、叶体积 (Leaf volume, LV) (叶面积×叶厚度)和叶组织密度 (Leaf tissue density, LTD) (叶干重/叶体积) (杨致远, 2021)。将来自同一岛屿类型、同一位置和同一寄主种类的烘干叶片混匀后分成 3 组,每组重量大于 1.5 g,送至武汉多米诺生物科技公司测定叶片的全氮 (Leaf nitrogen content, LNC) 和全碳含量 (Leaf carbon content, LCC), 计算碳氮比 (Carbon to nitrogen ratio, C : N)。

### 1.3 数据分析

记录每条样带上白栎和枹栎的数量,使用独立样本  $t$  检验和 ANOVA 单因素方差分析,检验不同面积和不同位置的白栎或枹栎的密度差异。密度计算公式为  $D=HN/TA$ , 其中  $D$  代表密度,  $HN$  指寄主植物的数量,  $TA$  为样带面积。

为后续分析,将原始数据进行对数化转换,即  $\ln(x+1)$ 。使用独立样本  $t$  检验分析岛屿内外不同样带上的植物叶功能性状和虫瘿数量的差异。使用 ANOVA 单因素方差分析,以及利用最小显著性差异法进行事后多重比较,检验岛屿面积对叶功能性状和虫瘿数量的影响;采用 Pearson 相关性分析,检验虫瘿数量与植物性状之间的相关性;利用主成分分析计算不同样带上主要的叶功能性状的综合得分 (张姗姗, 2022),以每条样带及其在第一主成分轴上的得分作为变量与虫瘿数量进行 Pearson 相关性分析 (Ramos, 2019),进一步验证叶功能性状与虫瘿数量之间的关系。所有数据分析均在软件 IBM SPSS statistics 26 上进行。图像绘制使用 WPS office 2023、Origin 2021 和 R 4.3.2。

## 2 结果与分析

### 2.1 寄主植物密度

记录不同面积不同样带寄主植物密度 (表 3)。白栎密度在内外位置 ( $t = 1.135$ ,  $P = 0.269$ ) 和在不同岛屿面积上 ( $F = 1.679$ ,  $P = 0.203$ ) 无显著差异 (表 4, 表 5); 同样,枹栎密度在内外

表 3 不同岛屿样带寄主植物密度

Table 3 Host plant density on different island transects

| 岛屿面积 (hm <sup>2</sup> )<br>Island area (hm <sup>2</sup> ) | 样带位置<br>Transect position | 白栎密度<br>Density of <i>Q. fabri</i> | 枹栎密度<br>Density of <i>Q. serrata</i> |
|-----------------------------------------------------------|---------------------------|------------------------------------|--------------------------------------|
| 0.1                                                       | 外 Edge                    | 0.010 0                            | 0.020 0                              |
| 0.1                                                       | 外 Edge                    | 0.012 5                            | 0.015 0                              |
| 0.1                                                       | 外 Edge                    | 0.007 5                            | 0.025 0                              |
| 0.1                                                       | 内 Interior                | 0.022 5                            | 0.020 0                              |
| 0.1                                                       | 内 Interior                | 0.012 5                            | 0.032 5                              |
| 0.1                                                       | 内 Interior                | 0.005 0                            | 0.012 5                              |
| 0.4                                                       | 外 Edge                    | 0.015 0                            | 0.010 0                              |
| 0.4                                                       | 外 Edge                    | 0.020 0                            | 0.020 0                              |
| 0.4                                                       | 外 Edge                    | 0.015 0                            | 0.015 0                              |
| 0.4                                                       | 内 Interior                | 0.010 0                            | 0.015 0                              |
| 0.4                                                       | 内 Interior                | 0.015 0                            | 0.025 0                              |
| 0.4                                                       | 内 Interior                | 0.020 0                            | 0.015 0                              |
| 2.0                                                       | 外 Edge                    | 0.015 0                            | 0.040 0                              |
| 2.0                                                       | 外 Edge                    | 0.012 5                            | 0.010 0                              |
| 2.0                                                       | 外 Edge                    | 0.017 5                            | 0.002 5                              |
| 2.0                                                       | 内 Interior                | 0.017 5                            | 0.005 0                              |
| 2.0                                                       | 内 Interior                | 0.015 0                            | 0.012 5                              |
| 2.0                                                       | 内 Interior                | 0.012 5                            | 0.007 5                              |
| 8.0                                                       | 外 Edge                    | 0.017 5                            | 0.002 5                              |
| 8.0                                                       | 外 Edge                    | 0.020 0                            | 0.005 0                              |
| 8.0                                                       | 外 Edge                    | 0.010 0                            | 0.005 0                              |
| 8.0                                                       | 内 Interior                | 0.005 0                            | 0.010 0                              |
| 8.0                                                       | 内 Interior                | 0.002 5                            | 0.012 5                              |
| 8.0                                                       | 内 Interior                | 0.005 0                            | 0.010 0                              |

“外”和“内”分别指代样带在样岛的边缘及内部的布局设置。

The terms “edge” and “interior” denote the arrangement of transects edge and within the sampling island, respectively.

表 4 岛屿内部和边缘位置上白栎、枹栎的密度差异分析

Table 4 Density difference analysis of *Quercus fabri* and *Quercus serrata* at interior and edge of the island

|                      | 自由度 <i>df</i> | <i>t</i> 值 <i>t</i> -value | <i>P</i> 值 <i>P</i> -value |
|----------------------|---------------|----------------------------|----------------------------|
| 白栎 <i>Q. fabri</i>   | 22            | 1.135                      | 0.269                      |
| 枹栎 <i>Q. serrata</i> | 22            | - 0.161                    | 0.873                      |

表 5 不同岛屿面积上白栎、枹栎的密度差异分析

Table 5 Density difference analysis of *Quercus fabri* and *Quercus serrata* among different island area

|                      | 自由度 <i>df</i> | <i>F</i> 值 <i>F</i> -value | <i>P</i> 值 <i>P</i> -value |
|----------------------|---------------|----------------------------|----------------------------|
| 白栎 <i>Q. fabri</i>   | 3             | 1.679                      | 0.203                      |
| 枹栎 <i>Q. serrata</i> | 3             | 2.733                      | 0.071                      |

位置 ( $t = -0.161$ ,  $P = 0.873$ ) 和在不同岛屿面积上 ( $F = 2.733$ ,  $P = 0.071$ ) 也无显著性差异。

## 2.2 岛屿边缘效应与面积效应对寄主植物叶功能性状的影响

**2.2.1 边缘效应对寄主植物叶功能性状的影响**  
对比岛屿边缘和内部的白栎 (表 6) 和枹栎 (表 7) 的叶功能性状数据发现, 叶功能性状之间无显著差异 ( $P > 0.05$ )。边缘效应对白栎和枹栎这 2 种寄主植物影响较小。

**2.2.2 面积效应对寄主植物叶功能性状的影响**  
根据面积将岛屿分为微岛 ( $0.1 \text{ hm}^2$ )、小岛 ( $0.4 \text{ hm}^2$ )、中岛 ( $2 \text{ hm}^2$ )、大岛 ( $8 \text{ hm}^2$ )。

表 6 岛屿内部与边缘白栎叶功能性状差异分析

Table 6 Difference analysis of leaf functional traits of *Quercus fabri* between interior and edge of island

| 叶功能性状<br>Leaf functional traits | 自由度<br><i>df</i> | <i>t</i> 值<br><i>t</i> -value | <i>P</i> 值<br><i>P</i> -value |
|---------------------------------|------------------|-------------------------------|-------------------------------|
| 叶氮含量 LNC                        | 22               | - 0.509                       | 0.616                         |
| 叶碳含量 LCC                        | 22               | 1.815                         | 0.083                         |
| 碳氮比 C : N                       | 22               | 1.233                         | 0.231                         |
| 叶绿素 CC                          | 22               | 1.898                         | 0.075                         |
| 叶面积 LA                          | 22               | - 0.115                       | 0.910                         |
| 叶鲜重 LFW                         | 22               | 0.844                         | 0.408                         |
| 叶干重 LDW                         | 22               | 0.867                         | 0.395                         |
| 叶干物质含量 LDMC                     | 22               | - 0.400                       | 0.693                         |
| 比叶面积 SLA                        | 22               | - 0.438                       | 0.666                         |
| 叶厚度 LT                          | 22               | 1.060                         | 0.301                         |
| 叶体积 LV                          | 22               | 0.561                         | 0.581                         |
| 叶组织密度 LTD                       | 22               | - 0.398                       | 0.694                         |

表 7 岛屿内部与边缘枹栎叶功能性状差异分析

Table 7 Difference analysis of leaf functional traits of *Quercus serrata* between interior and edge

| 叶功能性状<br>Leaf functional traits | 自由度<br><i>df</i> | <i>t</i> 值<br><i>t</i> -value | <i>P</i> 值<br><i>P</i> -value |
|---------------------------------|------------------|-------------------------------|-------------------------------|
| 叶氮含量 LNC                        | 22               | 0.851                         | 0.404                         |
| 叶碳含量 LCC                        | 22               | - 0.568                       | 0.575                         |
| 碳氮比 C : N                       | 22               | - 1.030                       | 0.314                         |
| 叶绿素 CC                          | 22               | - 0.458                       | 0.652                         |
| 叶面积 LA                          | 22               | - 1.440                       | 0.164                         |
| 叶鲜重 LFW                         | 22               | - 1.657                       | 0.112                         |
| 叶干重 LDW                         | 22               | - 0.245                       | 0.809                         |
| 叶干物质含量 LDMC                     | 22               | 1.033                         | 0.313                         |
| 比叶面积 SLA                        | 22               | - 1.054                       | 0.303                         |
| 叶厚度 LT                          | 22               | 0.479                         | 0.637                         |
| 叶体积 LV                          | 22               | - 1.346                       | 0.192                         |
| 叶组织密度 LTD                       | 22               | 0.915                         | 0.370                         |

白栎在大岛上的叶氮含量 (图 1: A) 显著高于微岛 ( $P < 0.05$ ); 在 4 个不同岛屿面积上, 白栎的叶碳含量 (图 1: B) 和碳氮比 (图 1: C) 无显著差异 ( $P > 0.05$ ); 叶绿素 (图 1: D) 在微岛和大岛间差异显著 ( $P < 0.05$ ), 且随岛屿面积增大而增加; 小岛上白栎的叶面积 (图 1: E) 和叶鲜重 (图 1: F) 显著高于其他 3 组 ( $P < 0.05$ ); 微岛上的叶干重 (图 1: G) 与小岛、中岛和大岛间差异显著 ( $P < 0.05$ ), 但小岛、中岛和大岛间无显著差异 ( $P > 0.05$ ); 微岛上白栎叶片干物质含量 (图 1: H) 显著高于小岛和中岛 ( $P < 0.05$ ), 与大岛无显著差异 ( $P > 0.05$ ); 微岛上的比叶面积 (图 1: I) 显著低于小岛、中岛和大岛 ( $P < 0.05$ ); 叶厚度 (图 1: G) 在 4 组岛屿面积之间无显著差异 ( $P > 0.05$ ); 在叶体积 (图 1: K) 和叶组织密度 (图 1: L) 上, 小岛与微岛和大岛间差异显著 ( $P < 0.05$ )。

将岛屿面积进行自然对数转化后, 利用 Pearson 相关性分析显示, 岛屿面积与白栎的叶氮含量显著正相关 ( $P < 0.05$ ) (图 2: A), 与其叶干重显著负相关 ( $P < 0.05$ ) (图 2: G)。说明随着岛屿面积增大, 白栎的叶氮含量增加, 而叶干重降低。

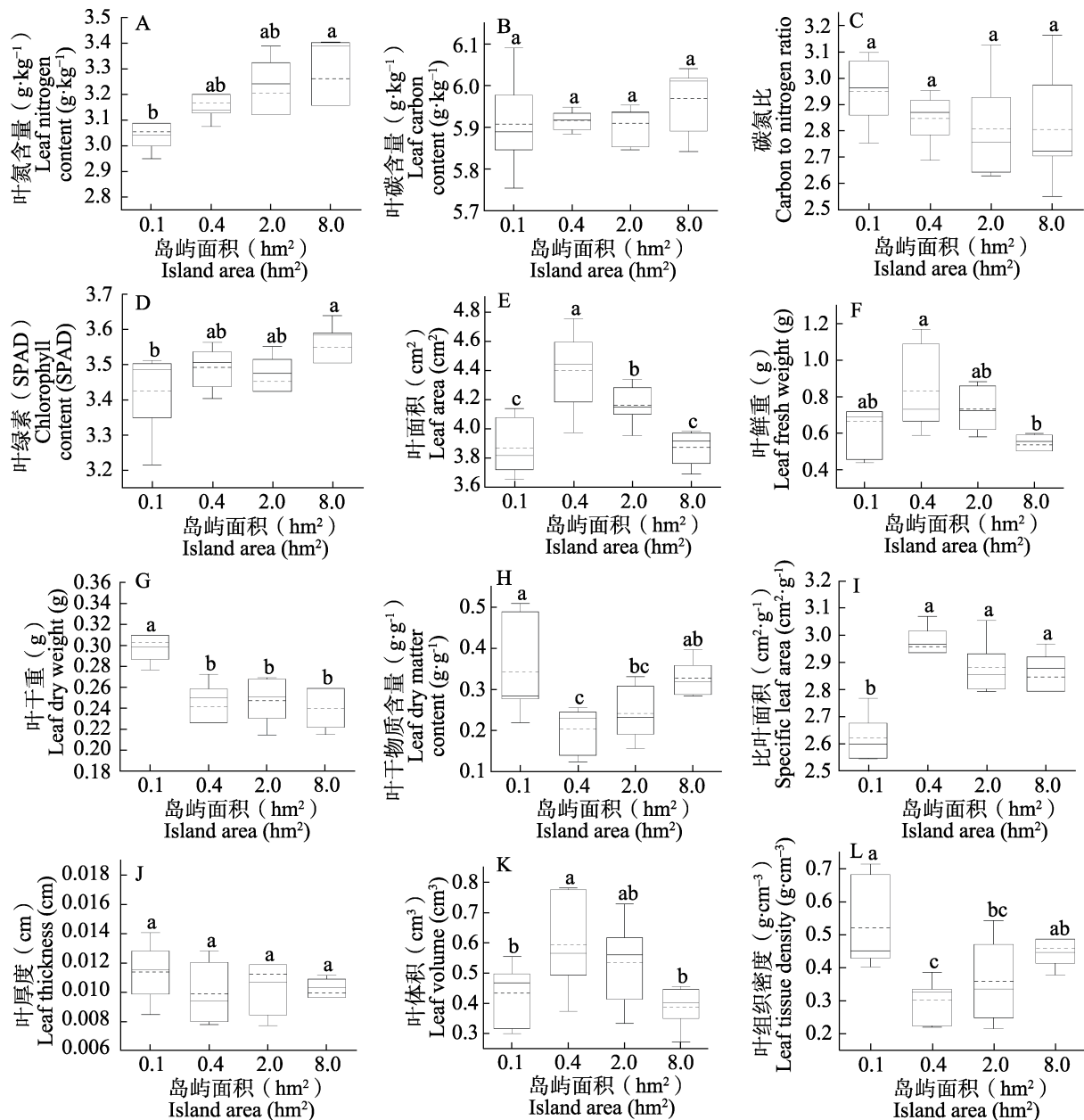


图 1 不同岛屿面积下白栎叶功能性状的差异

Fig. 1 Differences in leaf functional traits of *Quercus fabri* between different island areas

A-L 分别展示了在以岛屿面积为分组依据的条件下, 白栎树种的 12 项叶片功能性状所展现出的差异性。采用 ANOVA 单因素方差分析以及最小显著性差异法进行事后多重比较。图中不同小写字母表示差异显著 ( $P < 0.05$ ), 实线代表中直线, 虚线代表均值线。图 3 和图 6 同。D 中纵坐标轴中 SPAD 值反应叶片 652 和 940 nm 波长下的吸光度差异, 数值越大表示叶绿素含量越高, 下同图。

A-L demonstrate the variability exhibited by 12 leaf functional traits of the *Q. fabri*, grouped according to island area, respectively. Different lowercase letters in the figures indicate significant differences ( $P < 0.05$ ) by ANOVA single-factor analysis and the least significant difference method for post hoc multiple comparisons. Solid lines represent the median, while dashed lines represent the mean. The same for Fig. 3 and Fig. 6. In panel D, the SPAD value on the vertical axis represents the differential absorbance of leaves at 652 and 940 nm wavelengths, where higher values indicate greater chlorophyll content. The same below.

对于枹栎来说 (图 3), 微岛的叶氮含量 (图 3: A) 显著低于其余 3 个面积尺度 ( $P < 0.05$ ),

在其余面积之间叶氮含量无显著差异 ( $P > 0.05$ ); 中岛的叶碳含量 (图 3: B) 显著低于小岛和大

岛 ( $P < 0.05$ ), 剩余面积之间无显著差异; 碳氮 著差异 ( $P < 0.05$ ); 叶绿素 (图 3: D) 随面积 比之间 (图 3: C), 只有微岛和中岛之间存在显 尺度增大而增大, 微岛和小岛之间无显著差

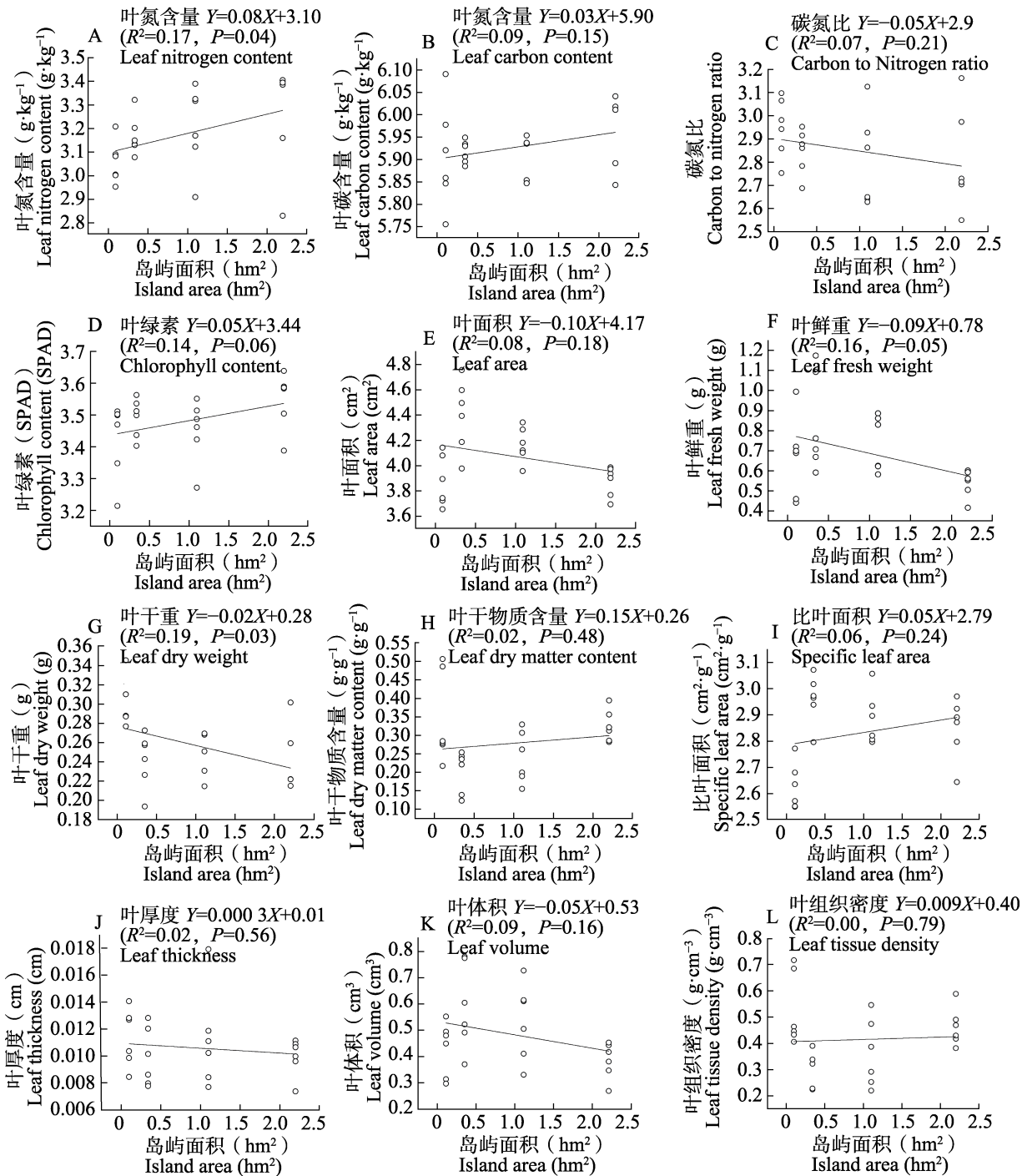


图 2 岛屿面积与白栎叶功能性状的相关性

Fig. 2 The correlation between the size of island area and leaf functional traits of *Quercus fabri*

A-L 分别展示了白栎树种的 12 项叶片功能性状与岛屿面积之间是否具有显著的相关性。采用 Pearson 相关性分析,  $P < 0.05$  表示具有显著相关性。图 4、图 7、图 8 和图 11 同。

A-L demonstrate whether there is a significant correlation between 12 leaf functional traits of *Q. fabri* and island area, respectively.  $P < 0.05$  indicates significant correlation by Pearson correlation analysis. The same for Fig. 4, Fig. 7, Fig. 8 and Fig. 11.

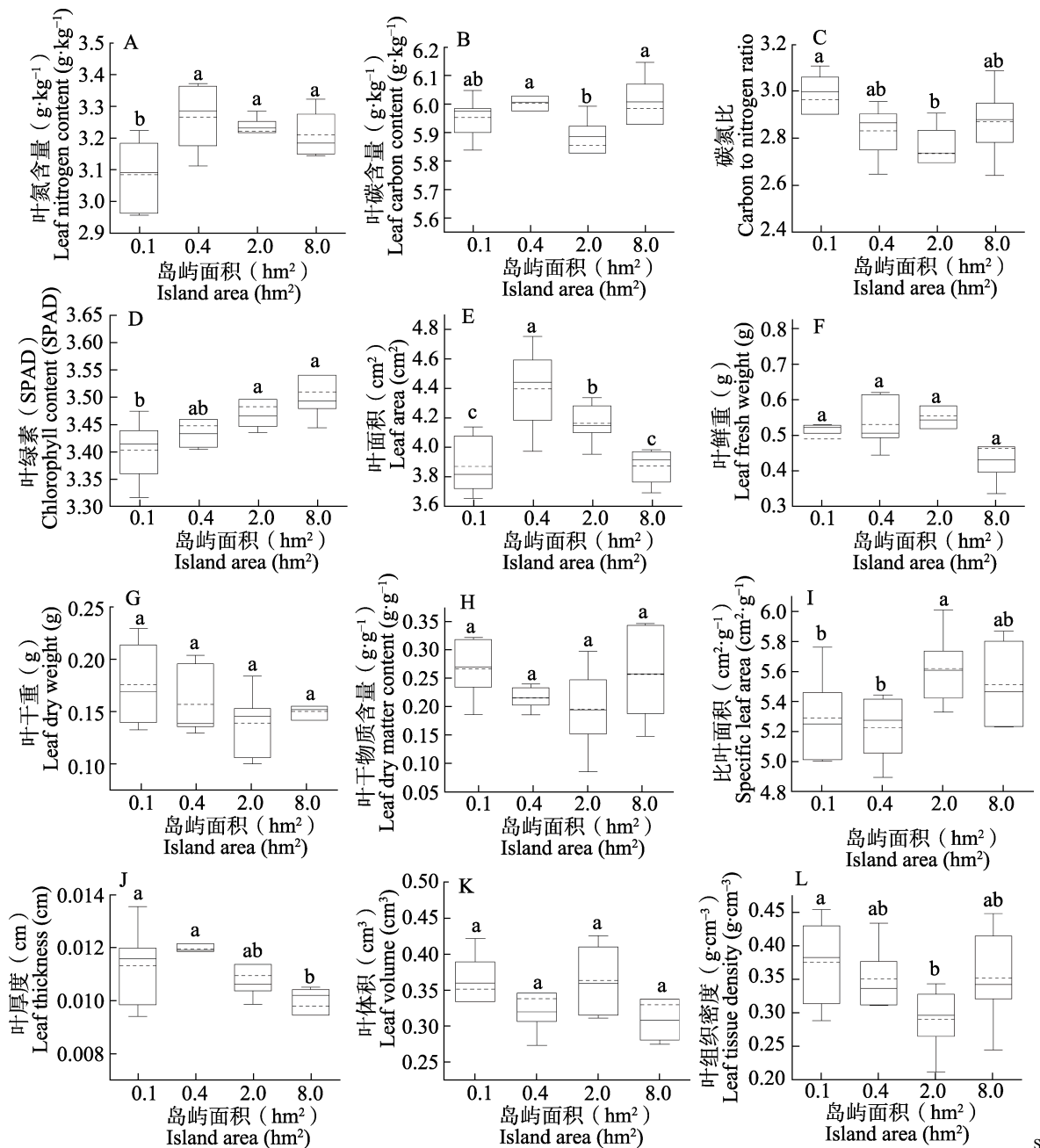


图 3 不同岛屿面积下枹栎叶功能性状的差异

Fig. 3 Differences in leaf functional traits of *Quercus serrata* between different island areas

A-L 分别展示了在以岛屿面积为分组依据的条件下, 枹栎树种的 12 项叶片功能性状所展现出的差异性。

A-L demonstrate the variability exhibited by 12 leaf functional traits of the *Q. serrata*, grouped according to island area, respectively.

异, 但与中岛和大岛则有显著差异 ( $P < 0.05$ ); 小岛、中岛以及大岛上枹栎叶面积之间 (图 3: E) 有显著差异 ( $P < 0.05$ ); 叶鲜重 (图 3: F)、叶干重 (图 3: G)、叶干物质含量 (图 3: H) 以及叶体积 (图 3: K) 在 4 个岛屿面积尺度上均无显著差异 ( $P > 0.05$ ); 小岛与中岛在比叶面

积 (图 3: I) 上有显著差异 ( $P < 0.05$ ); 大岛上的叶厚度 (图 3: J) 显著低于微岛和小岛 ( $P < 0.05$ ), 在 4 个面积层次上叶厚度最低; 中岛与微岛的叶组织密度 (图 3: L) 有显著差异 ( $P < 0.05$ )。

将岛屿面积进行对数自然转化后, 利用



Pearson 相关性分析枹栎叶功能性状与面积之间显著的中等正相关性 ( $P < 0.05$ ), 与叶厚度的关系, 发现岛屿面积与叶绿素 (图 4: D) 有 (图 4: J) 有显著的中等负相关性 ( $P < 0.05$ )。

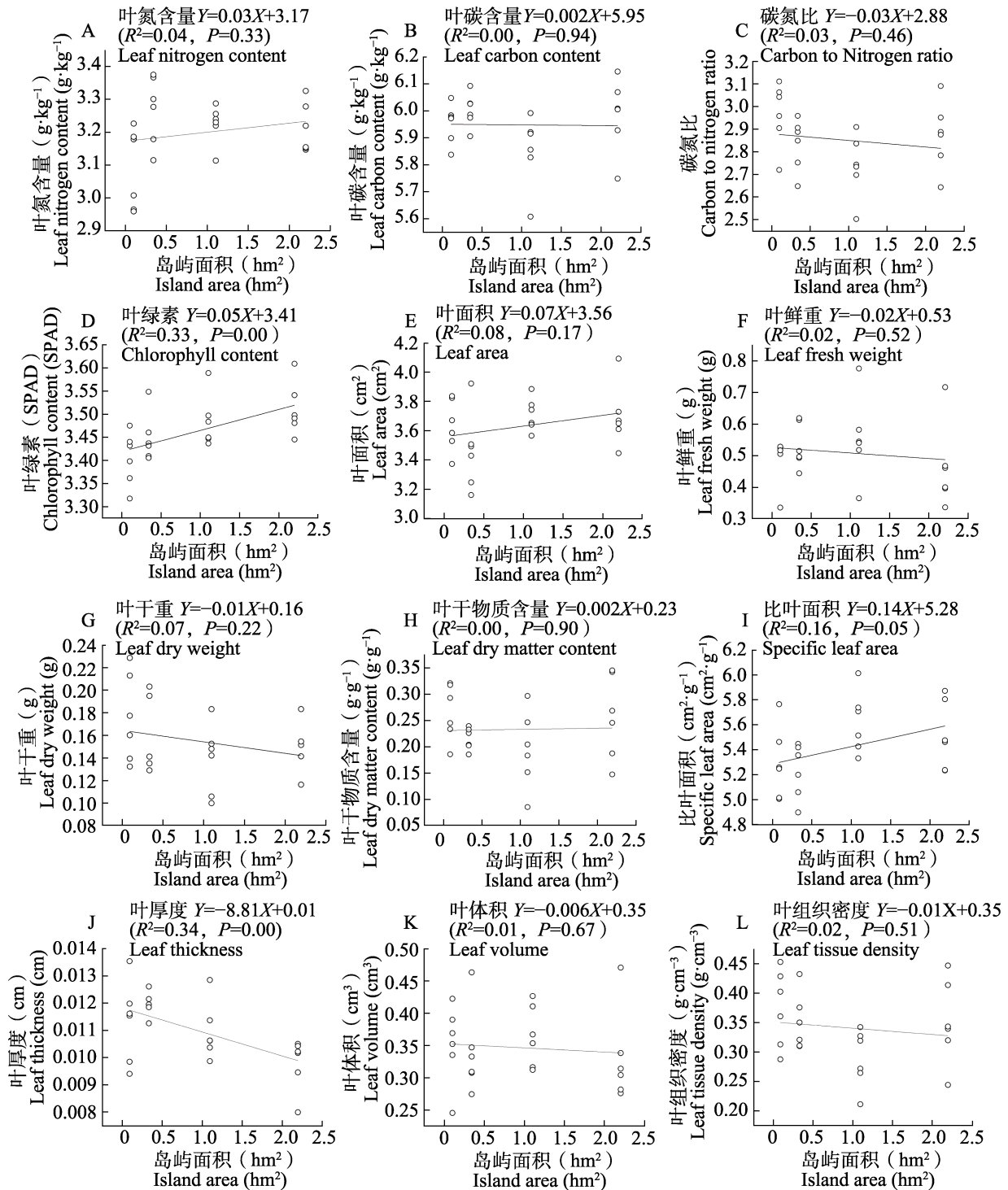


图 4 岛屿面积大小与枹栎叶功能性状的相关性

Fig. 4 The correlation between the size of island area and leaf functional traits of *Quercus serrata*

A-L 分别展示了枹栎树种的 12 项叶片功能性状与岛屿面积之间是否具有显著的相关性。

A-L respectively demonstrate whether there is a significant correlation between 12 leaf functional traits of *Q. serrata* and island area.

结果表明面积越大的岛屿上枹栎叶片有更为丰富的叶绿素含量,同时随着岛屿面积的增大叶片的厚度降低。

### 2.3 白栎和枹栎上瘿蜂的丰富度

从千岛湖白栎和枹栎上收集的虫瘿中饲养出的致瘿昆虫均属于膜翅目瘿蜂科纹瘿蜂属 *Andricus*。其中,白栎上收集到 3 种,为假曲纹瘿蜂 *Andricus pseudocurvator*、纹瘿蜂种类 1 *Andricus* sp.1 和纹瘿蜂种类 2 *Andricus* sp.2; 枹栎上收集到 5 种,为盛冈纹瘿蜂 *Andricus moriokae*、假曲纹瘿蜂 *Andricus pseudocurvator*、短柄枹纹瘿蜂 *Andricus brevipetiolatus*、纹瘿蜂种类 1 *Andricus* sp.1 和纹瘿蜂种类 2 *Andricus* sp.2。

### 2.4 岛屿的面积效应与边缘效应对虫瘿数量的影响

统计瘿蜂春季世代在不同岛屿各个样带寄主植物上所造虫瘿的平均数量。由图 5 可见,白栎和枹栎的虫瘿数量在样岛的内部和边缘处无显著差异(白栎:  $t = 0.495$ ,  $P = 0.638$ ; 枹栎:  $t =$

$-0.232$ ,  $P = 0.824$ )。将虫瘿数量进行自然对数转化后比较分析,发现微岛 ( $0.1 \text{ hm}^2$ ) 上白栎虫瘿数量显著低于小岛 ( $0.4 \text{ hm}^2$ )、中岛 ( $2 \text{ hm}^2$ )、大岛 ( $8 \text{ hm}^2$ ) ( $P < 0.05$ ) (图 6: A); 对于枹栎虫瘿来说,微岛 ( $0.1 \text{ hm}^2$ ) 与中岛 ( $2 \text{ hm}^2$ )、大岛 ( $8 \text{ hm}^2$ ) 存在显著差异 ( $P < 0.05$ ) (图 6: B)。白栎和枹栎上的虫瘿数量随着岛屿面积的增大总体呈现增大趋势。

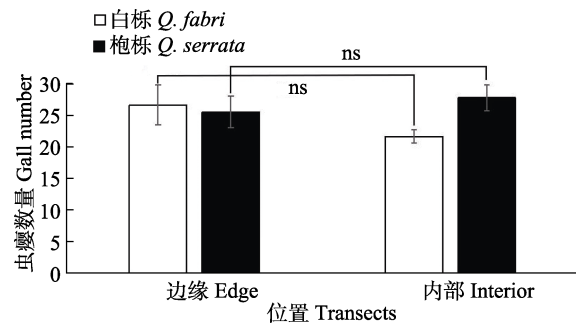


图 5 岛屿边缘与内部样带上虫瘿数量的差异

Fig. 5 Differences in the abundance of galls between transects at the edge and interior of the island

ns 表示无显著差异 ( $P > 0.05$ ,  $t$  检验)。

ns indicates no significant difference ( $P > 0.05$ ,  $t$ -test).

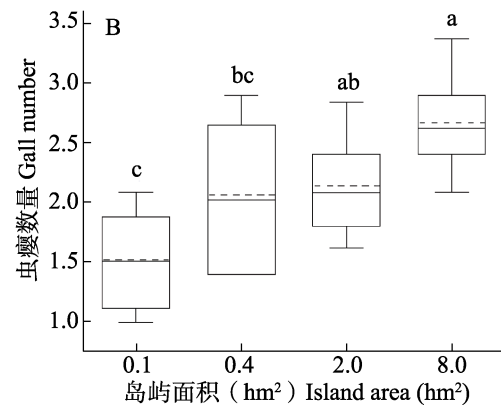
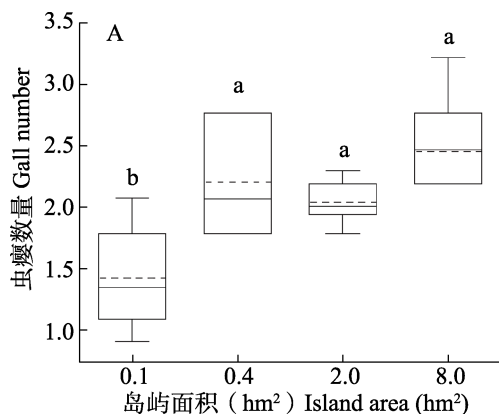


图 6 白栎与枹栎在不同岛屿面积上虫瘿数量的差异

Fig. 6 Differences in the number of galls on *Quercus fabri* and *Quercus serrata* between islands of different sizes

A. 白栎; B. 枹栎。

A. *Q. fabri*; B. *Q. serrata*.

### 2.5 植物功能性状与虫瘿数量之间的相关性分析

对白栎和枹栎虫瘿数量与其对应寄主的叶功能性状进行 Pearson 相关性分析。白栎上的瘿蜂,虫瘿数量与叶的氮含量(图 7: A)、叶面积

(图 7: E) 及比叶面积(图 7: I) 间存在显著的低正相关性 ( $P < 0.05$ ), 与叶组织密度(图 7: L) 呈显著的低负相关性 ( $P < 0.05$ )。枹栎上的瘿蜂,虫瘿数量与叶绿素含量(图 8: D) 和比叶面积(图 8: I) 间存在显著的中等程度正相关

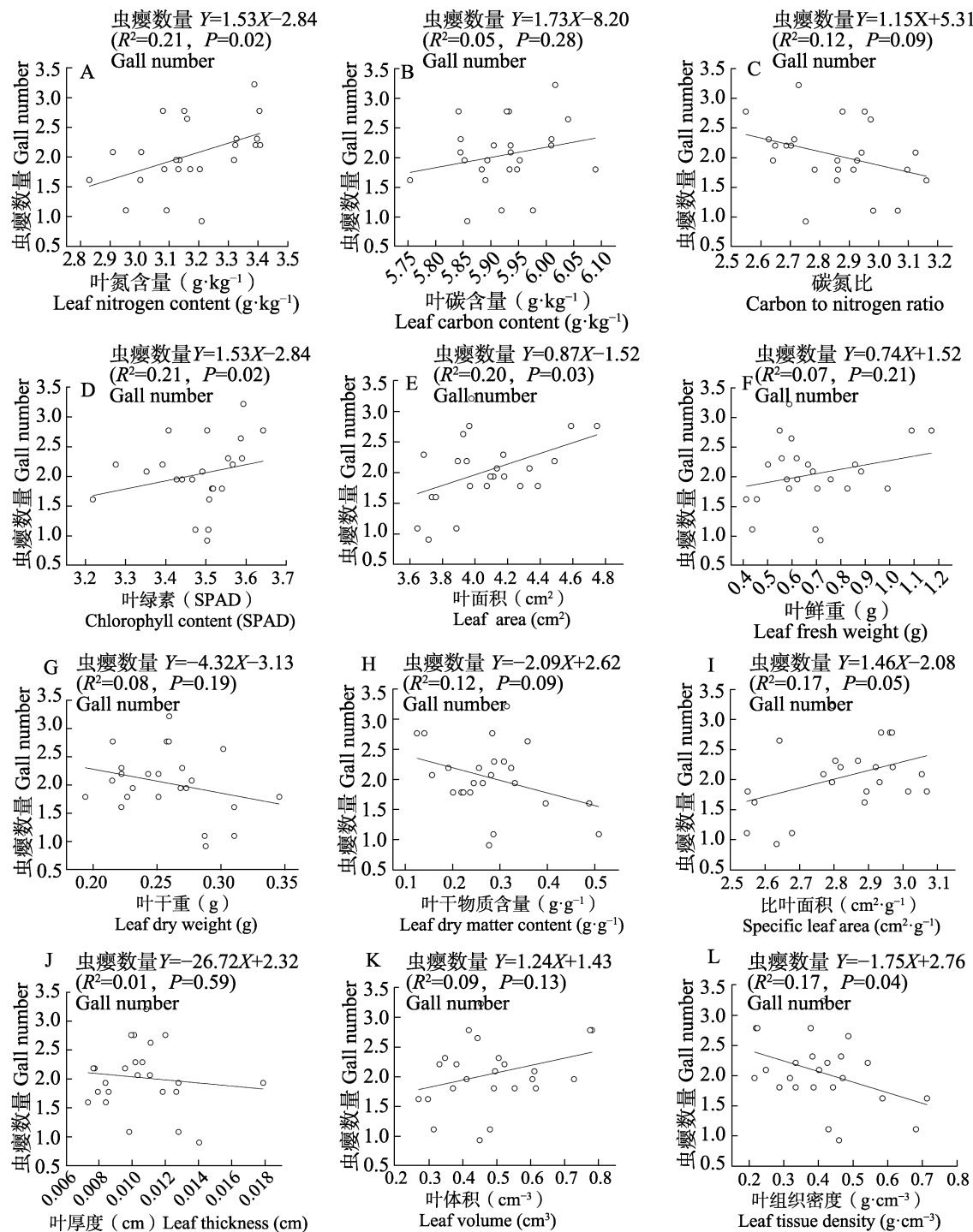


图 7 白栎叶功能性状与虫瘿数量的相关性

Fig. 7 The correlation between leaf functional traits of *Quercus fabri* and the number of galls

A-L 分别展示了白栎树种的虫瘿数量与 12 组叶功能性状之间是否具有显著的相关性。

A-L respectively demonstrate whether there is a significant correlation between the number of galls and 12 leaf functional traits of *Q. fabri*.

性 ( $P < 0.05$ ), 与叶面积 (图 8: E) 有显著的  
低正相关性 ( $P < 0.05$ ), 且与叶组织密度 (图 8:  
L) 表现出显著的低负相关性 ( $P < 0.05$ )。

如图 9 所示, 对白栎 12 组叶功能性状进行  
主成分分析, 结果表明, 第一主成分涵盖了 55.9%  
的性状变异, 第二主成分涵盖了 22.1%, 二者合

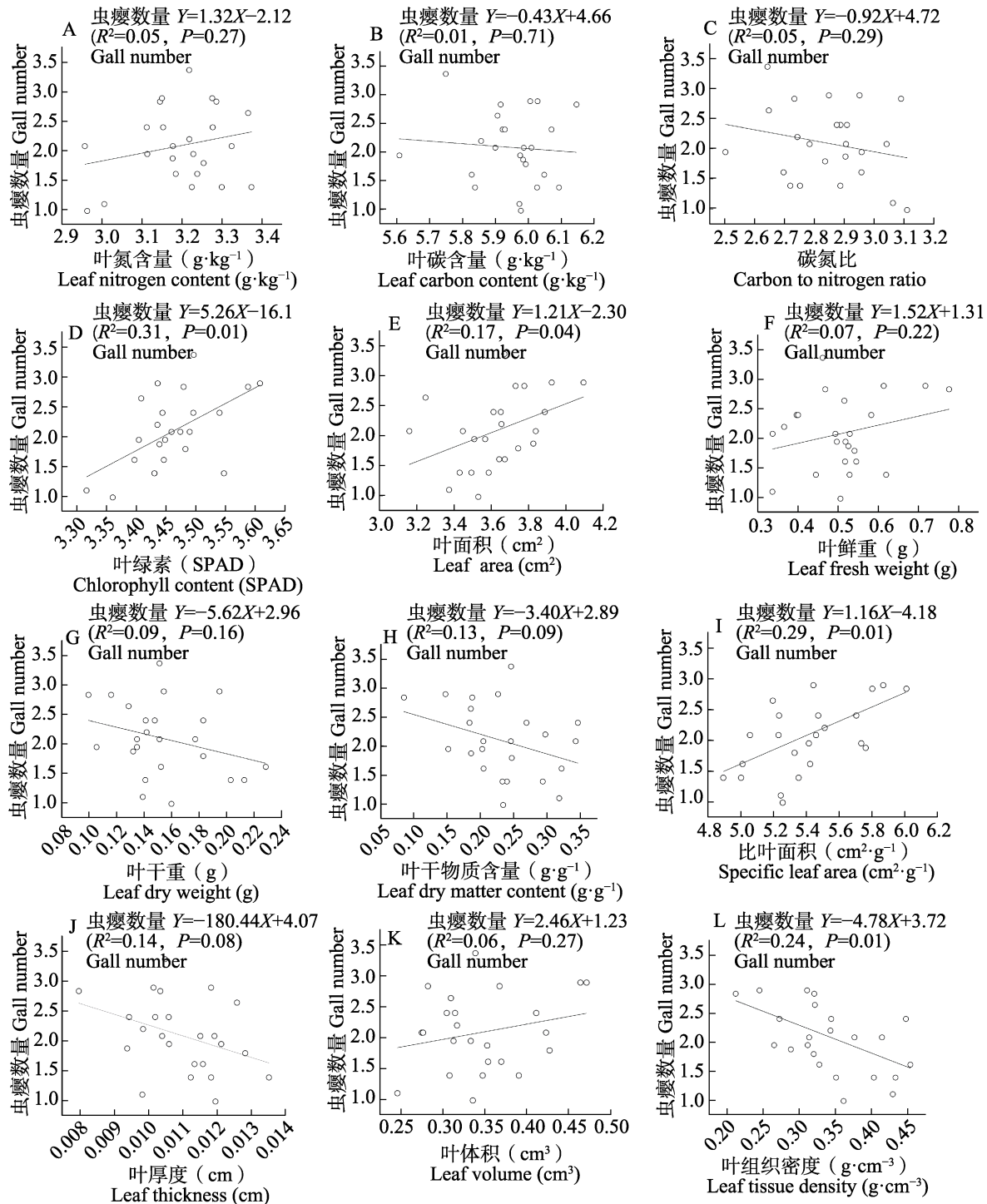


图 8 枹栎叶功能性状与虫瘿数量的相关性

Fig. 8 The correlation between leaf functional traits of *Quercus serrata* and the number of galls

A-L 分别展示了枹栎树种的虫瘿数量与 12 组叶功能性状之间是否具有显著的相关性。

A-L respectively demonstrate whether there is a significant correlation between the number of galls and 12 leaf functional traits of *Q. serrata*.

计方差贡献率高达 78.0%。深入分析各性状的贡献率,发现叶面积、叶鲜重、叶体积以及叶组织

密度对第一主成分的贡献尤为显著,说明该主成分主要描绘了植物与外界的能量交互及其生物

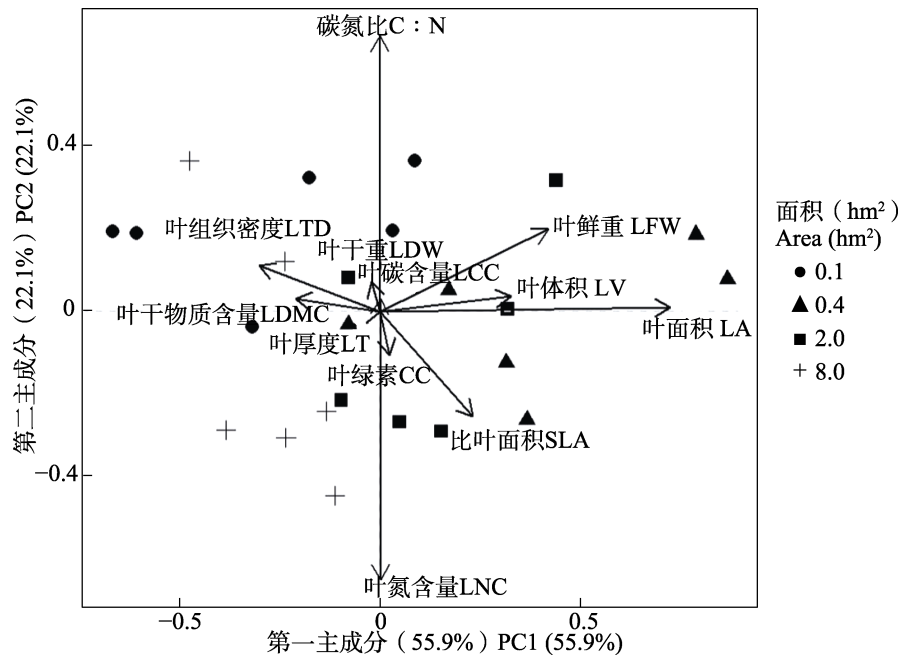


图 9 白栎 12 种叶功能性状主成分分析

Fig. 9 Principal component analysis of 12 leaf functional traits of *Quercus fabri*

LNC: Leaf nitrogen content; LCC: Leaf carbon content; C : N: Carbon to nitrogen ratio; CC: Chlorophyll content; LA: Leaf area; LFW: Leaf fresh weight; LDW: Leaf dry weight; LDMC: Leaf dry matter content; SLA: Specific leaf area; LT: Leaf thickness; LV: Leaf volume; LTD: Leaf tissue density. 图 10 同。The same for Fig. 10.

量的累积情况。相对而言,第二主成分主要受叶氮含量、比叶面积以及碳氮比的影响,这些指标的组合常用于反映植物所在环境的土壤养分状况。

枹栎 12 组叶功能性状的主成分分析结果如图 10 所示,第一主成分揭示了 57.7% 的性状变异,第二主成分揭示了 18.8%,二者合计方差贡献率为 76.5%。其中,叶面积与比叶面积对第一主成分的贡献度较大,说明第一主成分主要反映了植物与外界的能量交换效率及其对光资源利用的能力。叶氮含量、叶碳含量以及碳氮比对第二主成分的贡献较为突出,这表明第二主成分主要反映植物生长过程中从环境摄取所需营养元素的情况。

提取拥有更高解释量的白栎与枹栎第一主成分得分作为因变量,与白栎虫瘿和枹栎虫瘿数量进行 Pearson 相关性分析。从图 11 (A) 中可知,白栎上的虫瘿数量与第一主成分显著正相关 ( $P < 0.05$ ),该主成分代表植物与外界能量的交互能力,说明随着白栎能量交互能力增强,生物

量的积累也随之增加,虫瘿数量相应增加。从图 11 (B) 可以看出,枹栎上的虫瘿数量同样与第一主成分显著正相关 ( $P < 0.05$ ),枹栎的第一主成分代表植物对外界光资源的利用能力。这一结果表明,随着枹栎植物对外界光资源利用能力的提高,虫瘿数量也随之增加。

### 3 讨论

本研究发现,瘿蜂虫瘿数量主要受岛屿面积效应的影响,随岛屿面积的增加而增加。与虫瘿数量相关的能代表寄主植物活性的叶功能性状也在增长。在叶功能性状无显著差异的岛屿内外之间(岛屿边缘效应),虫瘿数量没有显著差异。表明生境破碎化主要通过面积效应影响寄主植物,进而影响瘿蜂群落,这与 Miller III 和 Raman (2019)、Pérez-Solache 等 (2023) 关于植食性昆虫群落对于栎属植物选择的研究结果一致。

深入研究发现,不同寄主植物的叶功能性状对岛屿面积的响应有所区别,但均与植物的光合能力和抗逆性有关。其中,岛屿面积减少导致白



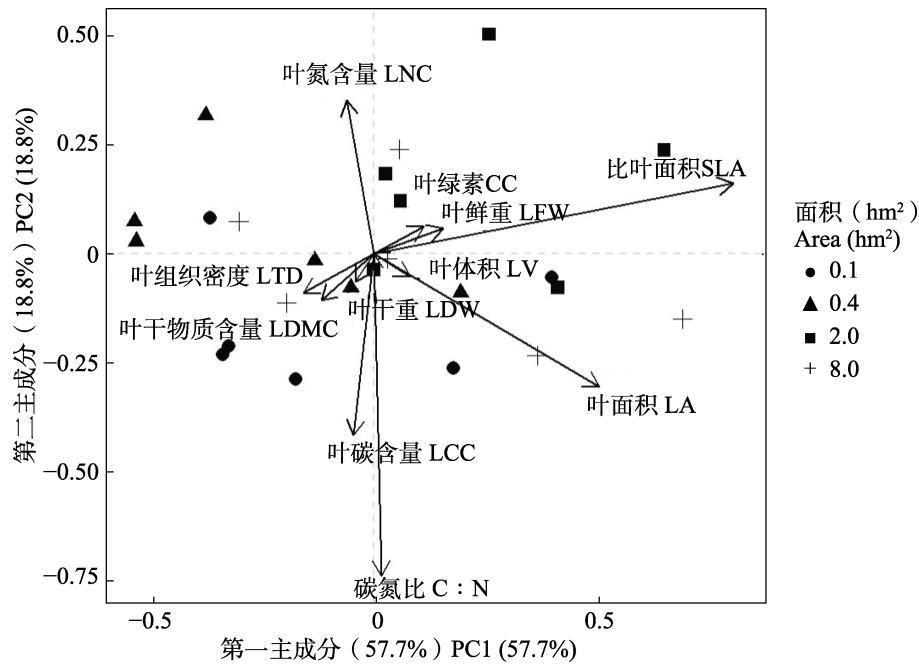


图 10 枹栎 12 种叶功能性状主成分分析

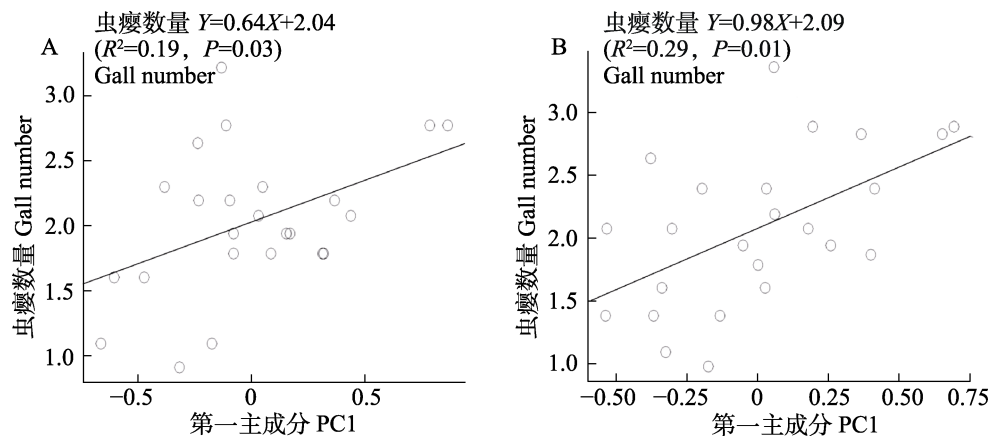
Fig. 10 Principal component analysis of 12 leaf functional traits of *Quercus serrata*

图 11 虫瘿数量与白栎和枹栎第一主成分的相关性

Fig. 11 The correlation between the number of galls and PC1 of *Quercus fabri* and *Quercus serrata*

A. 白栎; B. 枹栎。

A. *Q. fabri*; B. *Q. serrata*.

栎的叶氮含量降低,干重增加。叶氮含量反映了植物的光合速率,并与植物储存营养有关,主要存在于叶绿体中,通过影响酶的合成进而影响光合速率(罗恬等,2022)。叶干重与植物的生物量相关,可以反映植物的光合能力以及对不同环境的适应性(唐玉瑞等,2021)。通常,较高的叶干重能更好地适应不良环境条件(冯秋红等,2009;党晶晶等,2014)。与白栎不同,枹栎在生境破碎

化的影响下,其叶绿素含量随着岛屿面积的增大而上升,叶片厚度则随之减小。叶绿素含量作为植物光合能力的指标,含量的高低与植物的生长和发育密切相关(Schrader *et al.*, 2021)。此外,植物叶片厚度与其储存营养物质有关,相较于较薄的叶片,较厚的叶片在强光或者干旱环境中具有更强的抵抗能力(李芳兰和包维楷,2005;李耀琪和王志恒,2021)。

瘿蜂受不同寄主植物的影响不完全相同。虫瘿数量与白栎的叶氮含量、叶面积以及比叶面积呈正相关,与枹栎叶绿素、叶面积和比叶面积也呈正相关。虫瘿数量与两者的负相关叶功能性状相同,均为叶组织密度。这些叶功能性状与植物活性密切相关,而叶组织密度与植物的物理防御能力有关。虽然并不是所有指标均呈现岛屿面积越大性状指标越高的强相关性,但有着类似的趋势。这种现象也恰恰说明,生境破碎化对植物活性的影响是多方面因素综合作用的结果(余林兰等, 2023)。通过主成分分析及后续相关性分析发现,白栎与枹栎的虫瘿数量均与第一主成分显著正相关。尽管白栎与枹栎的第一主成分侧重点不同,但两者均与植物对光资源的利用和生物量积累相关。综合上述结果,瘿蜂偏向于选择光资源利用能力较强、生物量积累较大且便于产卵(植物组织密度较低)的寄主进行产卵造瘿,这与植物吸引瘿蜂昆虫的营养假说相符(Yang *et al.*, 2020)。此外,分析结果显示,虫瘿数量相关的叶功能性状均与植物的光合作用密切相关。前人发现,瘿蜂造瘿会大幅度降低植物的叶绿素含量(Kot *et al.*, 2018),这可能是瘿蜂选择光利用能力更强寄主的原因。

## 4 结论

本研究以千岛湖的瘿蜂为研究对象,探究了生境破碎化对瘿蜂群落分布的影响,揭示了生境破碎化所造成的岛屿边缘效应对瘿蜂的群落结构与分布没有显著影响,而岛屿面积效应通过影响寄主植物的方式(自下而上)对瘿蜂产生影响。此外,瘿蜂产卵造瘿的偏好与寄主植物对光资源利用能力的强弱存在一定关联。该研究为保护生境破碎化区域内的生物群落分布提供了理论基础。

## 参考文献 (References)

- Askew RR, Melika G, Pujade-Villar J, Schoenrogge K, Stone GN, Nieves-Aldrey JL, 2013. Catalogue of parasitoids and inquilines in cynipid oak galls in the West Palaearctic. *Zootaxa*, 3643(1): 1–133.
- Bagchi R, Brown LM, Elphick CS, Wagner DL, Singer MS, 2018. Anthropogenic fragmentation of landscapes: Mechanisms for eroding the specificity of plant-herbivore interactions. *Oecologia*, 187: 521–533.
- Beecher WJ, 1942. Nesting birds and the vegetation substrate. *The American Midland Naturalist*, 28(1): 269.
- Chen NN, Lü HJ, Zhang YR, Li GH, Mi N, Zhang SJ, Li SY, Zhang YS, 2023. Effects of drought degree and nitrogen application level on leaf C and N contents and C/N ratio of spring maize. *Journal of Meteorology and Environment*, 39(3): 106–116. [陈妮娜, 吕慧捷, 张益瑞, 李国会, 米娜, 张淑杰, 李思语, 张玉书, 2023. 干旱程度和施氮水平对春玉米叶片碳氮含量及碳氮比的影响. 气象与环境学报, 39(3): 106–116.]
- Dang JJ, Zhao CZ, Li Y, Hou ZJ, Dong XG, 2014. Variations with slope in stem and leaf traits of *Melica przewalskyi* in alpine grassland. *Chinese Journal of Plant Ecology*, 38(12): 1307–1314. [党晶晶, 赵成章, 李钰, 侯兆疆, 董小刚, 2014. 高寒草地甘肃臭草茎-叶性状的坡度差异性. 植物生态学报, 38(12): 1307–1314.]
- Eliason EA, Potter DA, 2000. Budburst phenology, plant vigor, and host genotype effects on the leaf-galling generation of *Callirhytis cornigera* (Hymenoptera: Cynipidae) on pin oak. *Environmental Entomology*, 29(6): 1199–1207.
- Fahrig L, 2013. Rethinking patch size and isolation effects: The habitat amount hypothesis. *Journal of Biogeography*, 40(9): 1649–1663.
- Feng QH, Shi ZM, Dong LL, Liu SR, 2009. Functional traits of deciduous trees and their relationships with meteorological factors in NSTEC. *Chinese Journal of Agrometeorology*, 30(1): 79–83. [冯秋红, 史作民, 董莉莉, 刘世荣, 2009. 南北样带落叶乔木功能性状及其与气象因子的关系. 中国农业气象, 30(1): 79–83.]
- García-Jain SE, Maldonado-López Y, Oyama K, Fagundes M, De Faria ML, Espírito-Santo MM, Cuevas-Reyes P, 2021. Effects of forest fragmentation on plant quality, leaf morphology and herbivory of *Quercus deserticola*: Is fluctuating asymmetry a good indicator of environmental stress? *Trees*, 36(2): 553–567.
- Griffin SR, Haddad NM, 2021. Connectivity and edge effects increase bee colonization in an experimentally fragmented landscape. *Ecography*, 44(6): 919–927.
- Guo R, 2012. A study on taxonomy of family Cynipidae (Hymenoptera) in China. Master dissertation. Hangzhou: Zhejiang A&F University. [郭瑞, 2012. 中国瘿蜂科昆虫系统分类研究. 硕士学位论文. 杭州: 浙江农林大学.]
- Ju XX, 2021. Study on the diversity of gall wasps and their parasitic

- wasps that gall on four oak trees. Master dissertation. Hangzhou: Zhejiang A&F University. [鞠晓雪, 2021. 作瘿于四种栎树的瘿蜂及其寄生蜂多样性研究. 硕士学位论文. 杭州: 浙江农林大学.]
- Kittelton PM, Wagenius S, Nielsen R, Qazi S, Howe M, Kiefer G, Shaw RG, 2015. How functional traits, herbivory, and genetic diversity interact in Echinacea: Implications for fragmented populations. *Ecology*, 96(7): 1877–1886.
- Kot I, Rubinowska K, Michalek W, 2018. Changes in chlorophyll a fluorescence and pigments composition in oak leaves with galls of two cynipid species (Hymenoptera, Cynipidae). *Acta Scientiarum Polonorum Hortorum Cultus*, 17(6): 147–157.
- Laurance WF, 2008. Theory meets reality: How habitat fragmentation research has transcended island biogeographic theory. *Biological Conservation*, 141(7): 1731–1744.
- Li FL, Bao WK, 2005. Responses of the morphological and anatomical structure of the plant leaf to environmental change. *Chinese Bulletin of Botany*, 22(S1): 118–127. [李芳兰, 包维楷, 2005. 植物叶片形态解剖结构对环境变化的响应与适应. 植物学通报, 22(S1): 118–127.]
- Li YH, Lu Q, Wu B, Zhu YJ, Liu DJ, Zhang JX, Jin ZH, 2012. A review of leaf morphology plasticity linked to plant response and adaptation characteristics in arid ecosystem. *Chinese Journal of Plant Ecology*, 36(1): 88–98. [李永华, 卢琦, 吴波, 朱雅娟, 刘殿君, 张金鑫, 靳占虎, 2012. 干旱区叶片形态特征与植物响应和适应的关系. 植物生态学报, 36(1): 88–98.]
- Li YQ, Wang ZH, 2021. Leaf morphological traits: Ecological function, geographic distribution and drivers. *Chinese Journal of Plant Ecology*, 45(10): 1154–1172. [李耀琪, 王志恒, 2021. 植物叶片形态的生态功能、地理分布与成因. 植物生态学报, 45(10): 1154–1172.]
- Luo GL, 2021. Determination of leaf area index of three typical forest types in Guizhou Province. Master dissertation. Guiyang: Guizhou University. [罗光浪, 2021. 贵州省三种典型森林类型叶面积指数的测定研究. 硕士学位论文. 贵阳: 贵州大学.]
- Luo T, Yu FY, Lian JY, Wang JJ, Shen J, Wu ZF, Ye WH, 2022. Impact of canopy vertical height on leaf functional traits in a lower subtropical evergreen broad-leaved forest of Dinghushan. *Biodiversity Science*, 30(5): 4–17. [罗恬, 俞方圆, 练琚愉, 王俊杰, 申健, 吴志峰, 叶万辉, 2022. 冠层垂直高度对植物叶片功能性状的影响: 以鼎湖山亚热带常绿阔叶林为例. 生物多样性, 30(5): 4–17.]
- Macarthur RH, Wilson EO, 1963. An equilibrium theory of insular zoogeography. *Evolution*, 17(4): 373–387.
- Maldonado-López Y, Cuevas-Reyes P, Oyama K, 2016. Diversity of gall wasps (Hymenoptera: Cynipidae) associated with oak trees (Fagaceae: *Quercus*) in a fragmented landscape in Mexico. *Arthropod Plant Interactions*, 10(1): 29–39.
- Maldonado-López Y, Cuevas-Reyes P, Stone GN, Nieves-Aldrey JL, Oyama K, 2015. Gall wasp community response to fragmentation of oak tree species: Importance of fragment size and isolated trees. *Ecosphere*, 6(3): 1–15.
- Miller III DG, Raman A, 2019. Host-plant relations of gall-inducing insects. *Annals of the Entomological Society of America*, 112(1): 1–19.
- Pan KY, Wu JJ, Long CP, Qu AJ, Wang YP, 2023. The gall wasps on common faganceae and three new record species from China. *Forest Research*, 36(1): 138–145. [潘柯宇, 巫建军, 龙承鹏, 曲爱军, 王义平, 2023. 中国常见壳斗科植物瘿蜂昆虫及 3 新记录种. 林业科学研究, 36(1): 138–145.]
- Pérez-Solache A, Vaca-Sánchez MS, Maldonado-López Y, DE FARIA ML, Borges MAZ, Fagundes M, Oyama K, Méndez-Solórzano MI, Aguilar-peralta JS, Hernández-Guzmán R, 2023. Changes in land use of temperate forests associated to avocado production in Mexico: impacts on soil properties, plant traits and insect-plant interactions. *Agricultural Systems*, 204: 1–15.
- Ramos LF, Solar RRC, Santos HT, Fagundes M, 2019. Variation in community structure of gall-inducing insects associated with a tropical plant supports the hypothesis of competition in stressful habitats. *Ecology and Evolution*, 9(24): 13919–13930.
- Ren P, 2022. Impacts of habitat fragmentation on plant-pollinator communities and network architecture. Doctor dissertation. Hangzhou: Zhejiang University. [任鹏, 2022. 生境片段化对植物-传粉者群落及其网络结构的影响. 博士学位论文. 杭州: 浙江大学.]
- Rossetti MR, Tschamtk T, Aguilar R, Batáry P, 2017. Responses of insect herbivores and herbivory to habitat fragmentation: A hierarchical meta-analysis. *Ecology Letters*, 20(2): 264–272.
- Schoereder JH, Galbiati C, Ribas CR, Sobrinho TG, Sperber CF, Desouza O, Lopes-Andrade C, 2004. Should we use proportional sampling for species-area studies? *Journal of Biogeography*, 31(8): 1219–1226.
- Schrader J, Westoby M, Wright IJ, Kreft H, 2021. Disentangling direct and indirect effects of island area on plant functional trait distributions. *Journal of Biogeography*, 48(8): 2098–2110.
- Song Q, 2020. Study on the suitability evaluation of six plants under photovoltaic greenhouse conditions. Master dissertation. Guangzhou: South China Agricultural University. [宋琪, 2020. 六种植物在光伏大棚条件下的适生性评价研究. 硕士学位论文. 广州: 华南农业大学.]
- Stone GN, Schönrögge K, Atkinson RJ, Bellido D, Pujade-Villar J, 2002. The population biology of oak gall wasps (Hymenoptera:



- Cynipidae). *Annual Review of Entomology*, 47: 633–668.
- Sun Q, Lu JB, Wu JG, Zhang F, 2008. Effect of island area on plant species distribution and conservation implications in the Thousand Island Lake region. *Biodiversity Science*, 16(1): 1–7. [孙雀, 卢剑波, 邬建国, 张凤, 2008. 千岛湖库区岛屿面积对植物分布的影响及植物物种多样性保护研究. 生物多样性, 16(1): 1–7.]
- Tang YR, Zhao CZ, Zhao H, Hou G, Ma M, Zhao TT, Wang LF, Zeng HX, 2021. The relationship between leaf dry mass and leaf area, leaf thickness of *Hippophae rhamnoides* under different light conditions in Tao River riparian forest. *Chinese Journal of Ecology*, 40(9): 2745–2753. [唐玉瑞, 赵成章, 赵辉, 候刚, 马敏, 赵婷婷, 王毓芳, 曾红霞, 2021. 不同光环境下洮河护岸林沙棘叶干重与叶面积、叶厚度间的关系. 生态学杂志, 40(9): 2745–2753.]
- Torgerson HS, Abrahamson WG, Craig TP, 1993. Role of host plant phenology in host use by *Eurosta solidaginis* (Diptera: Tephritidae) on *Solidago* (Compositae). *Environmental Entomology*, 22(2): 388–396.
- Wang LZ, Lang QL, Xia XH, Li XS, Sun J, Gao W, Li LF, Fei T, 2017. Leaf nutrient content measurement and nutritive quality evaluation of 10 tall labor trees from *Qercus* Linn. *Science of Sericultur*, 43(4): 559–567. [王连珍, 郎庆龙, 夏兴宏, 李喜升, 孙娟, 高伟, 李立峰, 费滕, 2017. 10 种栎属植物高干乔木植株叶片的营养成分测定及营养品质评价. 蚕业科学, 43(4): 559–567.]
- Wang XY, 2020. Effects of slope aspects and slope gradients on apricot leaf functional traits: A case study in Huining county. Master dissertation. Lanzhou: Northwest Normal University. [王雪艳, 2020. 坡向及坡度对山杏叶片功能性状的影响: 以甘肃会宁南部为例. 硕士学位论文. 兰州: 西北师范大学.]
- Williams C B, 1964. Patterns in the balance of nature and related problems of quantitative ecology. *The Journal of Ecology*, 54(2): 549.
- Wilson PJ, Thompson K, Hodgson JG, 1999. Specific leaf area and leaf dry matter content as alternative predictors of plant strategies. *The New Phytologist*, 143(1): 155–162.
- Yang XH, Li XM, Zhu DH, 2020. Alteration of free amino acid concentrations in insect galls induced by *Andricus mukaigawae* (Hymenoptera; Cynipidae). *Ecological Entomology*, 45(5): 945–954.
- Yang ZY, 2021. Study on leaf function characteristics of common tree species in Jiulian Mountain evergreen broad-leaved forest. Master dissertation. Beijing: Beijing Forestry University. [杨致远, 2021. 九连山亚热带常绿阔叶林常见树种的叶片功能性状研究. 硕士学位论文. 北京: 北京林业大学.]
- Yu LL, Luo YX, Xue YG, An XF, Huang G, Liu XY, Chen M, 2023. Differences and correlations in leaf functional traits woody plants in different microhabitats of Shenmu Tiankeng. *Guihaia*, 43(3): 494–503. [余林兰, 罗奕杏, 薛跃规, 安小菲, 黄贵, 刘昕宇, 陈铭, 2023. 神木天坑不同小生境木本植物叶功能性状的差异与关联. 广西植物, 43(3): 494–503.]
- Zhang SS, 2022. Study on the characteristics of leaf economic spectrum of Lingering Garden and its landscape optimization strategy. Master dissertation. Suzhou: Suzhou University of Science and Technology. [张姗姗, 2022. 留园植物叶经济谱性状特征及其景观优化策略研究. 硕士学位论文. 苏州: 苏州科技大学.]
- Zhang X, Xu G, Shen D, Gu Y, Gao H, Luo X, Chen X, 2007. Maintenance and natural regeneration of *Castanopsis sclerophylla* populations on islands of Qiandao Lake Region, China. *Acta Ecologica Sinica*, 27(2): 424–430.