

DOI: 10.20103/j.stxb.202506121497

贺顺云, 王懿祥, 孟明浩, 史琰. 天目山游步道旅游干扰对草本植物群落生态位及种间联结的影响. 生态学报, 2026, 46(4): 1964-1975.

He S Y, Wang Y X, Meng M H, Shi Y. The impacts of tourism disturbance on the ecological niches and interspecific associations of herbaceous communities along trails in Tianmu Mountain. Acta Ecologica Sinica, 2026, 46(4): 1964-1975.

# 天目山游步道旅游干扰对草本植物群落生态位及种间联结的影响

贺顺云<sup>1</sup>, 王懿祥<sup>2,3</sup>, 孟明浩<sup>1,3,\*</sup>, 史琰<sup>1,3</sup>

1 浙江农林大学风景园林与建筑学院, 杭州 311300

2 浙江农林大学环境与资源学院, 杭州 311300

3 浙江农林大学生态文明研究院, 杭州 311300

**摘要:**为揭示不同旅游干扰对自然保护区游步道草本植物群落生态位及种间联结的影响。以浙江天目山国家级自然保护区为研究对象,依据游客量(100%:高;30%:低)和游步道距离(0—10m;10—20m)划分干扰强度,实地调查 19 个样地 38 个样方(即不同干扰区),分析各干扰区草本植物群落组成及物种多样性特征、草本优势种的生态位和种间联结性特征。结果表明:天目山游步道草本植物群落中共有 89 种草本植物,隶属于 38 科 65 属。游客量对草本植物株高、游步道距离对草本植物盖度产生显著影响( $P < 0.05$ ),各干扰区间的草本植物物种多样性均无显著差异( $P > 0.05$ )。樱叶乌菟莓(*Cayratia albifolia*)和麦冬(*Ophiopogon japonicus*)分别在游客量高和游客量低的样方中具有较大的重要值和生态位宽度。不同干扰区中优势种间的生态位重叠度均值(0.20—0.36)均较小,各干扰区中优势种间的总体关系均表现为负相关( $VR < 1.00$ ), $\chi^2$ 检验和 Spearman 秩相关检验结果一致,多数优势种对的种间关联性较弱,生态位分布较独立。重要值与生态位宽度显著正相关( $P < 0.001$ ),生态位重叠值与 Spearman 秩相关系数显著正相关( $P < 0.001$ )。因此,建议在生态管理时应针对性地保护关键优势种,优先采用非工程性措施(如游客引导、设置缓冲区),维持适度的生境异质性,并重点预防旅游干扰强度加剧对物种个体及群落结构的潜在负面影响。

**关键词:**旅游干扰;游客量;游步道;草本植物;生态位;种间联结;物种多样性

## The impacts of tourism disturbance on the ecological niches and interspecific associations of herbaceous communities along trails in Tianmu Mountain

HE Shunyun<sup>1</sup>, WANG Yixiang<sup>2,3</sup>, MENG Minghao<sup>1,3,\*</sup>, SHI Yan<sup>1,3</sup>

1 College of Landscape Architecture, Zhejiang Agriculture and Forestry University, Hangzhou 311300, China

2 College of Environment and Resources, Zhejiang Agriculture and Forestry University, Hangzhou 311300, China

3 Institute of Ecological Civilization, Zhejiang Agriculture and Forestry University, Hangzhou 311300, China

**Abstract:** This study, with Tianmu Mountain National Nature Reserve in Zhejiang Province selected as the study field, is aimed to reveal the impacts of different tourism disturbances on niche characteristics and interspecific associations of herbaceous plant communities along trails. To be specific, based on visitor volume (100%: high; 30%: low) and distance from the trail (0—10 m; 10—20 m), disturbance intensities were first classified before a total of 38 quadrats (disturbance zones) from 19 sample sites were surveyed. Then an analysis was conducted of the composition and species diversity of herbaceous plant communities, as well as niche characteristics, and interspecific associations of the dominant herb species

**基金项目:**中央林业草原生态保护恢复资金项目(2022);国家社会科学基金项目(23VVS100);杭州西湖风景名胜区管委会科技发展计划项目(2023-012)

**收稿日期:**2025-06-12; **网络出版日期:**2025-11-13

\* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: 20020017@zafu.edu.cn

ranked by importance value in each disturbed area. Results showed that: (a) the herbaceous plant communities along the trails of Tianmu Mountain are comprised of 89 species which belong to 65 genera and 38 families respectively; (b) visitor volume imposed significant impact on plant height ( $P < 0.05$ ), trail proximity significantly affected plant coverage ( $P < 0.05$ ) while species diversity showed no significant differences among disturbance zones ( $P > 0.05$ ); (c) *Cayratia albifolia* exhibited the highest importance value and niche width in quadrats with high visitor volume, whereas *Ophiopogon japonicus* played a dominant role in areas with low visitor volume; (d) the mean niche overlap among dominant species was relatively low across all disturbance zones (0.20—0.36) whereas overall interspecific relationships were predominantly negative (variance ratio,  $VR < 1.00$ ), a finding which remained consistent across both  $\chi^2$  and Spearman's rank correlation tests; (e) most dominant species pairs showed weak interspecific associations and relatively independent niche distributions and (f) importance value was significantly positively correlated with niche width ( $P < 0.001$ ), and niche overlap was significantly positively correlated with the Spearman's rank correlation coefficient ( $P < 0.001$ ). In conclusion, to further promote the efficiency of ecological management, it is suggested by the current study that devoted efforts should be made in the following aspects: (a) priority should be given to the targeted conservation of key dominant species; (b) non-engineering measures such as visitor guidance and the designation of buffer zones should be implemented; (c) moderate habitat heterogeneity should be maintained and (d) special attention should be paid to the mitigation of potential adverse impacts of intensified tourism disturbances on individual species and community structures.

**Key Words:** tourism disturbance; visitor volume; trail; herbaceous plant; ecological niche; interspecific association; species diversity

植物群落中物种间的相互关系主要通过生态位和种间联结性体现<sup>[1]</sup>。其中,生态位宽度和生态位重叠度是衡量生态位的两个核心指标,生态位宽度展示了物种利用资源的广度,而生态位重叠度则揭示了物种之间在资源利用上的相似性或竞争关系<sup>[2]</sup>。种间联结不仅可以衡量物种在空间分布上的相互关联性,而且还是群落结构形成和演替的基础<sup>[3]</sup>。因此,研究植物群落的生态位和种间关系可以量化植物群落特征,了解物种的资源利用能力和种间相互作用关系,评估群落稳定性和演替阶段<sup>[4]</sup>。

近年来,随着旅游业的快速发展,生态环境保护与经济发展之间的矛盾日益显著。植物群落与生态环境存在着协同进化的关系,两者之间持续不断的相互作用、反馈和适应<sup>[5]</sup>。因此,植物群落特征可作为评估旅游干扰对生态环境影响的关键指标。旅游干扰通常是指旅游活动带来的人为负面影响,如水体与空气污染、植被退化、生物多样性减少以及生态系统失衡等自然资源与环境问题,产生的原因包括游客踩踏、道路与设施建设、车辆碾压、植物采集、露营活动、垃圾丢弃等行为<sup>[6]</sup>。干扰强度的划分没有统一的标准,其主要依据于干扰作用下被移除植物群落的生物量大小来确定<sup>[7]</sup>。在以往的研究中,旅游干扰的强度划分标准主要涉及人为踩踏<sup>[8]</sup>、游步道距离<sup>[9]</sup>、游憩方式<sup>[10]</sup>等指标,其中鲜有学者关注到游客量比例所产生的影响。刘炳亮等<sup>[11]</sup>发现在游客量高峰时段,游客活动会影响鸟类的取食行为,进而减少种子扩散的机会,最终导致幼苗更新量减少以及扩散距离缩短。张茜等<sup>[12]</sup>研究表明游客量比例与植物群落干扰指数呈正相关,植物群落距离游径越近,相关关系越显著。因此,游客量不仅是衡量旅游经营成效的重要指标,也可作为旅游干扰对植物群落影响强度的主要因素。

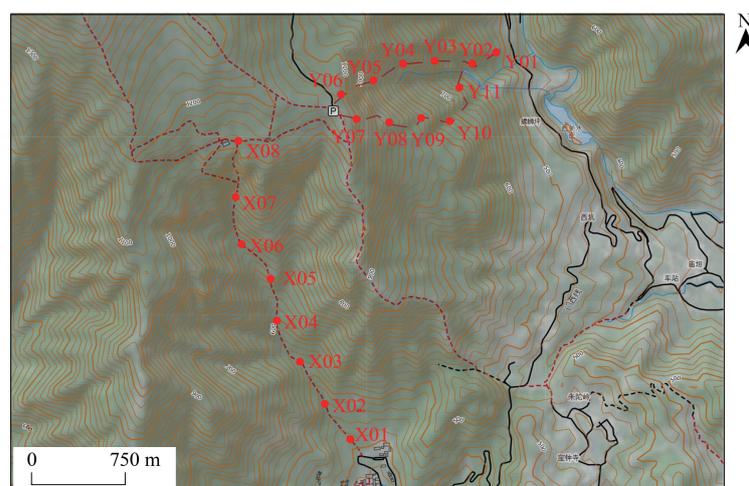
天目山国家级自然保护区地处亚热带季风气候区,拥有丰富的草本植物资源和独特的垂直植被带谱,其草本群落在维持生物多样性和生态系统服务功能中具有不可替代的作用<sup>[13]</sup>。近年来,保护区周边旅游开发、道路扩建及旅游活动加剧,导致草本植物群落面临生境退化和物种替代的双重压力<sup>[14]</sup>。目前,关于旅游干扰对植物群落的影响研究主要集中于物种多样性和植物群落结构特征等方面,其中涉及生态位及种间联结的研究报道较少<sup>[6]</sup>。基于此,本研究以天目山国家级自然保护区游步道旁的草本植物群落为研究对象,将游客量和游步道距离作为干扰强度的划分标准,探究不同旅游干扰对天目山游步道草本植物群落物种多样性、生态位及种间联结的影响,旨在揭示在旅游干扰压力下草本群落的适应策略与稳定性维持机制,为自然保护区生

态修复与可持续管理提供理论支撑。

## 1 研究区域与研究方法

### 1.1 研究区域概况

天目山国家级自然保护区位于浙江省杭州市临安区。该保护区面积 4284hm<sup>2</sup>, 坐落在 E119°24'11"—119°28'21"、N30°18'30"—30°24'55" 范围内, 海拔跨度为 300—1556m (图 1)。该保护区处于中亚热带与北亚热带交界, 是钱塘江流域和太湖流域的分水岭, 也是生态环境极易发生变化的“生态脆弱区”, 具有重要的生态保护价值<sup>[13]</sup>。



X01—X08 游客量低的样地  
Y01—Y11 游客量高的样地

图 1 样线样地分布

Fig.1 Distribution of transects and quadrats

X01—X08 游客量低的样地; Y01—Y11 游客量高的样地

### 1.2 样地样方设置与调查

根据天目山国家自然保护区提供的 2005—2024 年游客购票和免票入园年度数量和实地抽样调查, 大树王景区为游客必到区域, 游客量占 100%, 上山游步道游客量约占 30%。因此, 分别在大树王景区 (Y 样线) 和上山游步道 (X 样线) 区域, 选择坡度、坡向等立地条件基本一致的地段在游步道一侧设置典型样地, 每个样地面积为 5m×20m。采用相对影响法<sup>[15]</sup>, 将每个样地划分为 2 个连续的 5m×10m 样方 (即不同距离的干扰区), 距游步道的垂直距离分别是 0—10m (近距离) 和 10—20m (远距离)<sup>[16]</sup>。总共 19 个样地 38 个样方 (图 1), 所有样地均未发现游客的践踏行为, 干扰主要来自于修建游步道时产生的林缘效应以及游客行为 (如植物采摘)。本研究依据游客量和游步道距离划分干扰强度, 其中游客量分为高 (100%) 和低 (30%) 两个水平, 游步道距离设为近 (0—10m) 和远 (10—20m) 两个水平, 这四种水平随机组合成 4 种干扰类型, 对应不同距离的样方: 游客量高 (100%,  $V_H$ ) + 近游步道距离 (0—10m,  $D_{10}$ ); 游客量高 (100%,  $V_H$ ) + 远游步道距离 (10—20m,  $D_{20}$ ); 游客量低 (30%,  $V_L$ ) + 近游步道距离 (0—10m,  $D_{10}$ ); 游客量低 (30%,  $V_L$ ) + 远游步道距离 (10—20m,  $D_{20}$ )。本研究的调查季节为 2023 年 10 月 (旅游旺季中代表月份), 样地覆盖的海拔范围为 300—1200m, 调查内容主要包括草本植物的种类、数量、高度、盖度, 以及样地所处位置的经纬度、坡位、坡向、坡度、海拔和郁闭度等环境因子数据。

### 1.3 统计与分析

#### 1.3.1 重要值

重要值是物种在群落中地位和作用的综合数量指标, 可作为筛选优势种的指标<sup>[17]</sup>。计算公式如下: 重要

值=(相对盖度+相对多度+相对频度)/3。将不同组合的草本植物重要值进行排序,筛选出重要值 $\geq 5\%$ 且出现的样方 $\geq 2$ 的植物或在样方中单个植物的数量占绝对主导的植物,视为优势草本。

### 1.3.2 生态位

Levins 生态位宽度指数( $B_L$ )和 Pianka 生态位重叠度指数( $O_{ik}$ )是量化生态位的两个关键指标,选取物种重要值作为资源利用的参数,不同样方作为不同的资源位<sup>[18]</sup>。计算公式如下:

$$B_L = 1 / \sum_{j=1}^N (T_{ij})^2$$

$$O_{ik} = \sum_{j=1}^N P_{ij} P_{kj} / \sqrt{(\sum_{j=1}^N P_{ij})^2 (\sum_{j=1}^N P_{kj})^2}$$

式中, $N$ 为总样方数, $T_{ij}$ 为物种  $i$  在样方  $j$  上重要值与物种  $i$  在所有样方上重要值总和之比。 $P_{ij}$ ( $P_{kj}$ )为物种  $i$  ( $k$ ) 在样方  $j$  上的重要值, $O_{ik}$ 为物种  $i$  与  $k$  的生态位重叠值。

### 1.3.3 总体联结性检验

采用 Schluter 提出的方差比率法来检验草本植物群落物种间的总体关联性,并用统计量  $W$  来检验总体联结是否显著<sup>[19]</sup>。公式如下:

$$VR = S_T^2 / \delta_T^2$$

$$S_T^2 = \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N (T_j - t)^2$$

$$\delta_T^2 = \sum_{i=1}^S \frac{n_i}{N} (1 - \frac{n_i}{N})$$

$$W = VR \times N$$

式中, $N$ 为总样方数, $T_j$ 为样方  $j$  内出现的物种数目, $t$ 为样方中物种平均数, $S$ 为所有物种总数, $n_i$ 为物种  $i$  出现的样方数目, $S_T^2$ 为样方中物种数的方差, $\delta_T^2$ 为所有物种出现频度的方差。若  $VR=1$ ,种间整体无关联; $VR>1$ ,种间整体呈正关联;若  $VR<1$ ,种间总体呈负关联。 $W$  是检验  $VR$  显著性的指数,当  $W < \chi_{0.95,N}^2$  或  $W > \chi_{0.05,N}^2$ ,则物种总体关联显著( $P<0.05$ ),反之,则不显著( $P>0.05$ )。

### 1.3.4 $\chi^2$ 检验

基于物种是否存在样方中建立 0,1 二元矩阵, $\chi^2$  检验可以对种对间的联结性显著度进行定性分析,由于是非连续性取样,因此还需采用 Yates 的连续校正公式计算 $\chi^2$ 值<sup>[20]</sup>:

$$\chi^2 = \frac{N(|ad-bc|-0.5N)^2}{(a+b)(b+d)(a+c)(d+c)}$$

式中, $N$ 为总样方数, $a$ 为 2 个物种共同出现的样方数, $b$ , $c$ 为仅有 1 个物种出现的样方数, $d$ 为 2 个物种均未出现的样方数。当  $ad>bc$  时,种间关联性为正关联;当  $ad<bc$  时为负关联。就种间关联的显著性而言,当  $\chi^2 < 3.841$ ,种间关联性不显著( $P>0.05$ );当  $3.841 < \chi^2 < 6.635$ ,种间关联性显著( $0.01 < P < 0.05$ );当  $\chi^2 > 6.635$  时,种间关联性极显著( $P < 0.01$ )。

### 1.3.5 相关性检验

Spearman 秩相关检验( $r_s$ )属于非参数检验法,对物种的分布形式没有要求,敏感性更高,更符合应用于自然分布状态下的群落<sup>[21]</sup>。本研究中,样本数据经 Shapiro-Wilk 正态性检验后,不符合正态分布。因此,本研究只采用了 Spearman 秩相关检验方法,以物种在不同样方中的数量作为参数,定量反映物种间显著性和关联强度<sup>[22]</sup>。公式如下:

$$r_s = 1 - \frac{6 \sum_{j=1}^N (x_{ij} - \bar{x}_i)^2 (x_{kj} - \bar{x}_k)^2}{N^3 - N}$$

式中, $N$ 为总样方数; $x_{ij}$ 与 $x_{kj}$ 分别为两物种  $i$  和  $k$  在样地  $j$  中定量值; $\bar{x}_i$ 与 $\bar{x}_k$ 分别为物种  $i$  和  $k$  在样地定量值的平均值。

### 1.3.6 物种多样性

物种多样性( $\alpha$ 多样性)是反映群落结构和功能特征的常用指标,常用 Margalef 丰富度指数( $R$ )、Shannon-Wiener 多样性指数( $H$ )、Simpson 优势度指数( $D$ )、Pielou 均匀度指数( $J$ )进行表征<sup>[23]</sup>。

$$R = (S - 1) / \ln N$$

$$H = - \sum_{i=1}^S P_i \ln P_i$$

$$D = 1 - \sum_{i=1}^S P_i^2$$

$$J = H / \ln S$$

式中, $N$ 为总个体数量; $P_i$ 为物种*i*的重要值; $S$ 为样地内出现的物种数。

### 1.3.7 数据处理与作图

重要值、 $\alpha$ 多样性、相对频度、生态位和种间联结分析在 R 4.2.0 软件中实现,其中生态位宽度指数、生态位重叠指数分别由 spaa 包中的“niche.width”“niche.overlap”函数进行运算,总体联结性 $\chi^2$ 检验、Spearman 秩相关系数检验结果分别由 spaa 包中的“sp.assoc”“sp.pair”函数计算,Spearman 秩相关系数的显著性检验采用 corrplot 函数包进行运算和作图。采用 Origin 2024 软件完成线性回归分析图。ArcGIS 10.8.1 软件制作研究区域图。

## 2 结果与分析

### 2.1 群落组成及物种多样性特征

根据 19 个样地调查统计可得,草本植物共有 89 种,隶属于 38 科 65 属。其中,高游客量样地的草本植物群落包含 27 科 37 属 44 种,低游客量样地的草本植物群落包含 26 科 40 属 55 种。如表 1 所示,在  $V_H$  和  $V_L$  中, $D_{10}$  的草本植物的科数、属数及种数均多于  $D_{20}$ ;其次,各干扰区间的草本植物物种多样性均无显著差异( $P>0.05$ )。游客量高低( $V_H$ 和  $V_L$ )对草本植物盖度无显著影响,但  $V_H$ - $D_{20}$ 和  $V_L$ - $D_{20}$ 的草本植物盖度均显著高于  $V_H$ - $D_{10}$ 和  $V_L$ - $D_{10}$ 。 $V_H$ - $D_{10}$ 和  $V_H$ - $D_{20}$ 的草本植物高度均显著大于  $V_L$ - $D_{10}$ 和  $V_L$ - $D_{20}$ ,植株高度与游步道距离( $D_{10}$ 和  $D_{20}$ )无显著关系。

表 1 不同干扰类型对草本植物群落物种组成及物种多样性影响

Table 1 Effects of different interference types on species composition and species diversity of herbaceous plant communities

指标 Index	游客量高 High visitor volume( $V_H$ )		游客量低 Low visitor volume( $V_L$ )	
	近距离 Close distance( $D_{10}$ )	远距离 Long distance( $D_{20}$ )	近距离 Close distance( $D_{10}$ )	远距离 Long distance( $D_{20}$ )
科 Family	24	16	22	19
属 Genus	29	22	32	25
种 Species	32	27	43	31
Shannon	1.46±0.51a	1.44±0.48a	1.54±0.58a	1.14±0.43a
Simpson	0.68±0.15a	0.69±0.17a	0.66±0.26a	0.58±0.20a
Pielou	0.84±0.12a	0.86±0.13a	0.77±0.26a	0.78±0.21a
Margalef	1.60±0.81a	1.34±0.58a	1.77±0.58a	1.19±0.50a
盖度 Coverage	0.34±0.65b	0.82±1.13a	0.37±1.08b	0.62±1.12a
株高 Plant height	17.15±11.60a	14.04±9.77a	9.48±7.60b	10.73±8.81b

同行不同小写字母表示不同干扰类型之间存在显著差异性( $P<0.05$ );盖度以百分比表示,表中数据为小数形式;株高单位为 cm

### 2.2 重要值与生态位宽度

由表 2 和表 3 可知,样地样方中的 20 种优势草本植物包括 14 种阴生植物和 6 种耐阴植物,未发现阳生优势种。麦冬在  $V_H$  和  $V_L$  的样地中均有出现,而且重要值和生态位宽度均能排前 2 名,生态适应性强。在  $V_H$  中,樱叶乌菟莓的重要值和生态位宽度均排第 1,青绿苔草在  $D_{20}$  的重要值排第 2,生态位宽度排第 6。在  $V_L$  中,小鸢尾在  $D_{10}$  的重要值排第 5,生态位宽度排第 7,但在  $D_{20}$  的重要值排第 2,生态位宽度排第 1。在  $V_H$ - $D_{10}$

中,六角莲属于国家二级保护植物,重要值排第 7,生态位宽度排第 5。总体而言,重要值与生态位宽度的排序基本不一致。

表 2 不同干扰类型内优势草本植物的重要值排序

Table 2 The important value ranking of dominant herbaceous plants in different interference types

物种 Species	类型 Type	重要值排序 Importance value ranking			
		游客量高 High visitor volume( $V_H$ )		游客量低 Low visitor volume( $V_L$ )	
		近距离 Close distance( $D_{10}$ )	远距离 Long distance( $D_{20}$ )	近距离 Close distance( $D_{10}$ )	远距离 Long distance( $D_{20}$ )
灯台莲 <i>Arisaema bockii</i>	阴生植物		0.165(3)		
牛膝 <i>Achyranthes bidentata</i>	耐阴植物		0.125(4)		
樱叶乌莓 <i>Cayratia albifolia</i>	阴生植物	0.310(1)	0.385(1)		
青绿苔草 <i>Carex breviculmis</i>	阴生植物		0.306(2)		
签草 <i>Carex doniana</i>	阴生植物			0.128(3)	
刻叶紫堇 <i>Corydalis incisa</i>	阴生植物	0.106(3)			
六角莲 <i>Dysosma pleiantha</i>	阴生植物	0.067(7)			
四叶葎 <i>Galium bungei</i>	阴生植物			0.126(4)	
六叶葎 <i>Galium hoffmeisteri</i>	阴生植物				0.119(4)
活血丹 <i>Glechoma longituba</i>	阴生植物	0.082(4)			
绞股蓝 <i>Gynostemma pentaphyllum</i>	阴生植物	0.075(6)			
小鸢尾 <i>Iris proantha</i>	耐阴植物			0.098(5)	0.476(2)
山麦冬 <i>Liriope spicata</i>	耐阴植物			0.247(2)	0.121(3)
麦冬 <i>Ophiopogon japonicus</i>	耐阴植物	0.207(2)		0.892(1)	0.594(1)
金线草 <i>Persicaria filiformis</i>	耐阴植物		0.099(6)		
假黑鳞耳蕨 <i>Polystichum pseudomakinoi</i>	阴生植物	0.078(5)	0.092(7)		
三叶委陵菜 <i>Potentilla freyniana</i>	耐阴植物			0.095(6)	
普通假毛蕨 <i>Pseudocyclosorus subochthodes</i>	阴生植物				0.090(6)
吉祥草 <i>Reineckea carnea</i>	阴生植物		0.103(5)		
翠云草 <i>Selaginella uncinata</i>	阴生植物				0.105(5)
堇菜 <i>Viola verecunda</i>	阴生植物			0.059(7)	0.069(7)

表 3 不同干扰类型内优势草本植物的生态位宽度排序

Table 3 Niche breadth ranking of dominant herbaceous plants in different interference types

干扰类型 Interference type	距离类型 Distance type	物种 Species	代码 Code	生态位宽度值 Niche breadth value
游客量高 High visitor volume( $V_H$ )	近距离 Close distance( $D_{10}$ )	樱叶乌莓 <i>Cayratia albifolia</i>	Ca	2.945(1)
		麦冬 <i>Ophiopogon japonicus</i>	Oj	2.153(2)
		假黑鳞耳蕨 <i>Polystichum pseudomakinoi</i>	Pp	2.000(3)
		活血丹 <i>Glechoma longituba</i>	Gl	1.960(4)
		六角莲 <i>Dysosma pleiantha</i>	Dp	1.800(5)
		绞股蓝 <i>Gynostemma pentaphyllum</i>	Gp	1.600(6)
		刻叶紫堇 <i>Corydalis incisa</i>	Ci	1.180(7)
	远距离 Long distance( $D_{20}$ )	樱叶乌莓 <i>Cayratia albifolia</i>	Ca	3.259(1)
		金线草 <i>Persicaria filiformis</i>	Pf	2.000(2)
		灯台莲 <i>Arisaema bockii</i>	Ab	1.800(3)
		假黑鳞耳蕨 <i>Polystichum pseudomakinoi</i>	Pp	1.600(4)
		牛膝 <i>Achyranthes bidentata</i>	Ai	1.424(5)
		青绿苔草 <i>Carex breviculmis</i>	Cb	1.142(6)
		吉祥草 <i>Reineckea carnea</i>	Rc	1.000(7)
游客量低 Low visitor volume( $V_L$ )	近距离 Close distance( $D_{10}$ )	麦冬 <i>Ophiopogon japonicus</i>	Oj	4.056(1)
	山麦冬 <i>Liriope spicata</i>	Ls	3.090(2)	
	三叶委陵菜 <i>Potentilla freyniana</i>	Pr	2.462(3)	

续表

干扰类型 Interference type	距离类型 Distance type	物种 Species	代码 Code	生态位宽度值 Niche breadth value
远距 Long distance(D <sub>20</sub> )		四叶葎 <i>Galium bungei</i>	Gb	1.882(4)
		堇菜 <i>Viola verecunda</i>	Vv	1.600(5)
		签草 <i>Carex doniana</i>	Cd	1.000(6)
		小鸢尾 <i>Iris proantha</i>	Ip	1.000(7)
		小鸢尾 <i>Iris proantha</i>	Ip	2.193(1)
		麦冬 <i>Ophiopogon japonicus</i>	Oj	1.927(2)
		山麦冬 <i>Liriope spicata</i>	Ls	1.754(3)
		堇菜 <i>Viola verecunda</i>	Vv	1.324(4)
		翠云草 <i>Selaginella uncinata</i>	Su	1.000(5)
		普通假毛蕨 <i>Pseudocyclosorus subochthodes</i>	Ps	1.000(6)
		六叶葎 <i>Galium hoffmeisteri</i>	Gh	1.000(7)

### 2.3 生态位重叠度

如图 2 所示,各干扰类型均由 7 种优势种相互组成 21 个种对,4 个组合内优势种对的生态位重叠度均值分别为 0.26、0.36、0.22、0.20。V<sub>H</sub>-D<sub>10</sub> 包含 4 组生态位高重叠种对 ( $O_{ik} \geq 0.50$ ): 麦冬-绞股蓝(0.642), 刻叶紫堇-活血丹(0.67), 假黑鳞耳蕨-绞股蓝(0.67), 假黑鳞耳蕨-六角莲(0.95)。在 V<sub>H</sub>-D<sub>20</sub> 中,生态位高重叠值的种对有樱叶乌菟莓-青绿苔草(0.62), 樱叶乌菟莓-吉祥草(0.57), 樱叶乌菟莓-金线草(0.69), 樱叶乌菟莓-假黑鳞耳蕨(0.51), 青绿苔草-吉祥草(0.64), 青绿苔草-假黑鳞耳蕨(0.73), 吉祥草-金线草(0.50), 金线草-假黑鳞耳蕨(0.66)。V<sub>L</sub>-D<sub>10</sub> 检测到 4 组高重叠种对: 麦冬-山麦冬(0.76), 麦冬-三叶委陵菜(0.74), 山麦冬-四叶葎

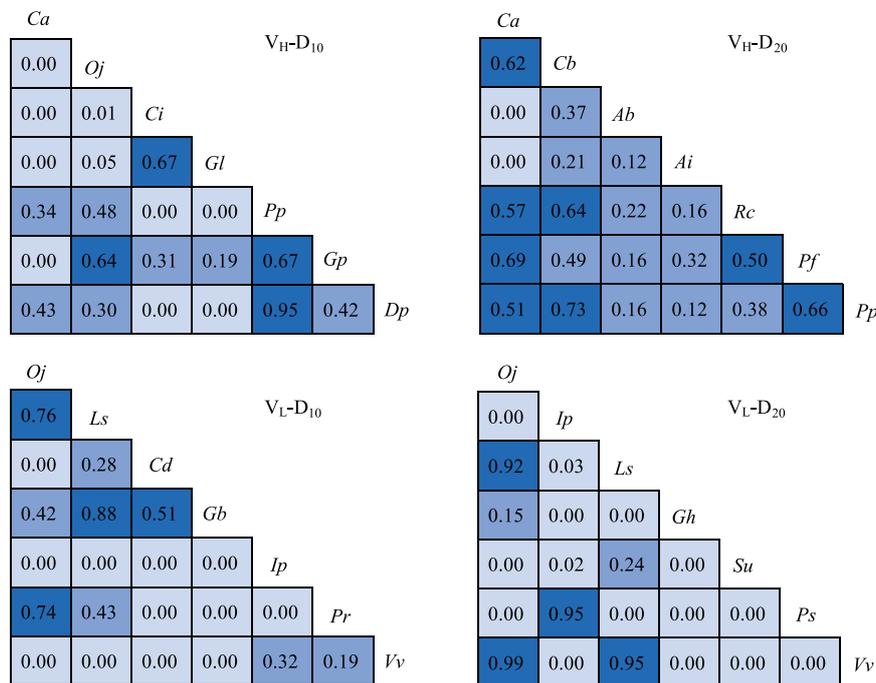


图 2 不同干扰类型中草本植物优势种的生态位重叠度

Fig.2 Niche overlap of dominant species of herbaceous plants in different interference types

Ab: 灯台莲 *Arisaema bockii*; Ai: 牛膝 *Achyranthes bidentata*; Ca: 樱叶乌菟莓 *Cayratia albifolia*; Cb: 青绿苔草 *Carex breviculmis*; Cd: 签草 *Carex doniana*; Ci: 刻叶紫堇 *Corydalis incisa*; Dp: 六角莲 *Dysosma pleiantha*; Gb: 四叶葎 *Galium bungei*; Gh: 六叶葎 *Galium hoffmeisteri*; Gl: 活血丹 *Glechoma longituba*; Gp: 绞股蓝 *Gynostemma pentaphyllum*; Ip: 小鸢尾 *Iris proantha*; Ls: 山麦冬 *Liriope spicata*; Oj: 麦冬 *Ophiopogon japonicus*; Pf: 金线草 *Persicaria filiformis*; Pp: 假黑鳞耳蕨 *Polystichum pseudomakinoides*; Pr: 三叶委陵菜 *Potentilla freyniana*; Ps: 普通假毛蕨 *Pseudocyclosorus subochthodes*; Rc: 吉祥草 *Reineckea carnea*; Su: 翠云草 *Selaginella uncinata*; Vv: 堇菜 *Viola verecunda*

(0.88), 签草-四叶葎(0.51)。V<sub>L</sub>-D<sub>20</sub>则记录到麦冬-山麦冬(0.92), 麦冬-堇菜(0.99), 小鸢尾-普通假毛蕨(0.95), 山麦冬-堇菜(0.95), 这些种对重叠值接近 1.00, 可能会构成强烈的竞争关系。

#### 2.4 群落物种总体联结性

通过分析草本群落优势种之间的总体联结性(表 4)可知, 各干扰类型的方差比率(VR)均小于 1.00, 优势物种之间的总体关系呈现出负相关性。V<sub>H</sub>和 V<sub>L</sub>的样地数(N)分别为 8 和 11, 利用检验统计量 W 检测 VR 值偏离的显著性, V<sub>H</sub>-D<sub>10</sub>和 V<sub>H</sub>-D<sub>20</sub>的统计量 W 分别为 6.24 和 2.54, 分别落在 $\chi^2(0.95, 8)$ 与 $\chi^2(0.05, 8)$ 之间范围的内和外, V<sub>L</sub>-D<sub>10</sub>和 V<sub>L</sub>-D<sub>20</sub>的统计量 W 分别为 4.19 和 3.38, 均落在 $\chi^2(0.95, 11)$ 与 $\chi^2(0.05, 11)$ 之间的范围外, 说明 V<sub>H</sub>-D<sub>20</sub>、V<sub>L</sub>-D<sub>10</sub>和 V<sub>L</sub>-D<sub>20</sub>内草本群落的优势种间的总体关系为显著负相关, 而 V<sub>H</sub>-D<sub>10</sub>的则为不显著负相关。

表 4 不同干扰类型内优势种间总体联结性

Table 4 The overall association between dominant species in different interference types

干扰类型 Interference type	方差比率 Variance ratio (VR)	检验统计量 Statistic (W)	卡方临界值 $\chi^2$ threshold (0.95)	卡方临界值 $\chi^2$ threshold (0.05)	检验结果 Results
V <sub>H</sub> -D <sub>10</sub>	0.89	6.24	2.73 (N=8)	15.51 (N=8)	不显著负相关
V <sub>H</sub> -D <sub>20</sub>	0.36	2.54			显著负相关
V <sub>L</sub> -D <sub>10</sub>	0.52	4.19	4.57 (N=11)	19.68 (N=11)	显著负相关
V <sub>L</sub> -D <sub>20</sub>	0.38	3.38			显著负相关

V<sub>H</sub>-D<sub>10</sub>: 游客量高(100%, V<sub>H</sub>) + 近游步道距离(0—10m, D<sub>10</sub>) High visitor volume + close distance; V<sub>H</sub>-D<sub>20</sub>: 游客量高(100%, V<sub>H</sub>) + 远游步道距离(10—20m, D<sub>20</sub>) High visitor volume + long distance; V<sub>L</sub>-D<sub>10</sub>: 游客量低(30%, V<sub>L</sub>) + 近游步道距离(0—10m, D<sub>10</sub>) Low visitor volume + close distance; V<sub>L</sub>-D<sub>20</sub>: 游客量低(30%, V<sub>L</sub>) + 远游步道距离(10—20m, D<sub>20</sub>) Low visitor volume + long distance

#### 2.5 种间联结和相关性分析

由草本植物群落优势种间联结关系的定性分析( $\chi^2$ )和定量分析(Spearman)的结果可得(表 5)。在 $\chi^2$ 和 Spearman 秩相关检验结果中, V<sub>H</sub>-D<sub>10</sub>的正联结种对数与负联结种对数的比值均为 1.63, 其余干扰类型的正负比值均小于 1.00,  $\chi^2$ 检验结果中各组合的显著率明显高于 Spearman 秩相关检验结果。由此可见,  $\chi^2$ 和 Spearman 秩相关检验结果与方差比率(VR)及统计量(W)的检验结果有一定差异。结合图 3 和图 4 可知, 在 V<sub>H</sub>-D<sub>10</sub>中, 麦冬+刻叶紫堇+活血丹, 假黑鳞耳蕨+六角莲+绞股蓝, 这两个优势种组合中优势植物间均为正向联结。其他组合中也有类似植物种组, 樱叶乌菟莓+吉祥草+青绿苔草+假黑鳞耳蕨(V<sub>H</sub>-D<sub>20</sub>), 麦冬+三叶委陵菜+山麦冬(V<sub>L</sub>-D<sub>10</sub>), 麦冬+六叶葎+堇菜(V<sub>L</sub>-D<sub>20</sub>)。

表 5 不同干扰类型内优势种的 $\chi^2$ 和 Spearman 秩相关检验结果

Table 5 The  $\chi^2$  and spearman rank correlation test results of dominant species in different interference types

方法 Method	干扰类型 Interference type	正联结 Positive association (Pa)				负联结 Negative association (Na)				正负比值 Pa/Na	显著率/% Significant rate
		P≤0.01	P≤0.05	P>0.05	合计 Total	P≤0.01	P≤0.05	P>0.05	合计 Total		
$\chi^2$	V <sub>H</sub> -D <sub>10</sub>	2	0	4	13	4	4	0	8	1.63	47.62
	V <sub>H</sub> -D <sub>20</sub>	1	5	1	7	6	6	2	14	0.50	85.71
	V <sub>L</sub> -D <sub>10</sub>	3	4	2	9	2	3	7	12	0.75	57.14
	V <sub>L</sub> -D <sub>20</sub>	0	5	2	7	1	1	12	14	0.50	33.33
Spearman	V <sub>H</sub> -D <sub>10</sub>	2	0	11	13	0	0	8	8	1.63	9.52
	V <sub>H</sub> -D <sub>20</sub>	0	0	9	9	0	2	10	12	0.75	9.52
	V <sub>L</sub> -D <sub>10</sub>	0	2	6	8	1	2	10	13	0.62	23.81
	V <sub>L</sub> -D <sub>20</sub>	1	1	6	8	1	1	11	13	0.62	19.05

Pa/Na: 正联结种对总数与负联结种对总数的比值 The ratio of the total number of positive association species to the total number of negative association species

#### 2.6 生态位与重要值及种间联结线性回归分析

如图 5 所示, 重要值与生态位宽度呈现显著正相关关系( $P < 0.001$ ), 但拟合关联度较低( $R^2 < 0.30$ )。生态

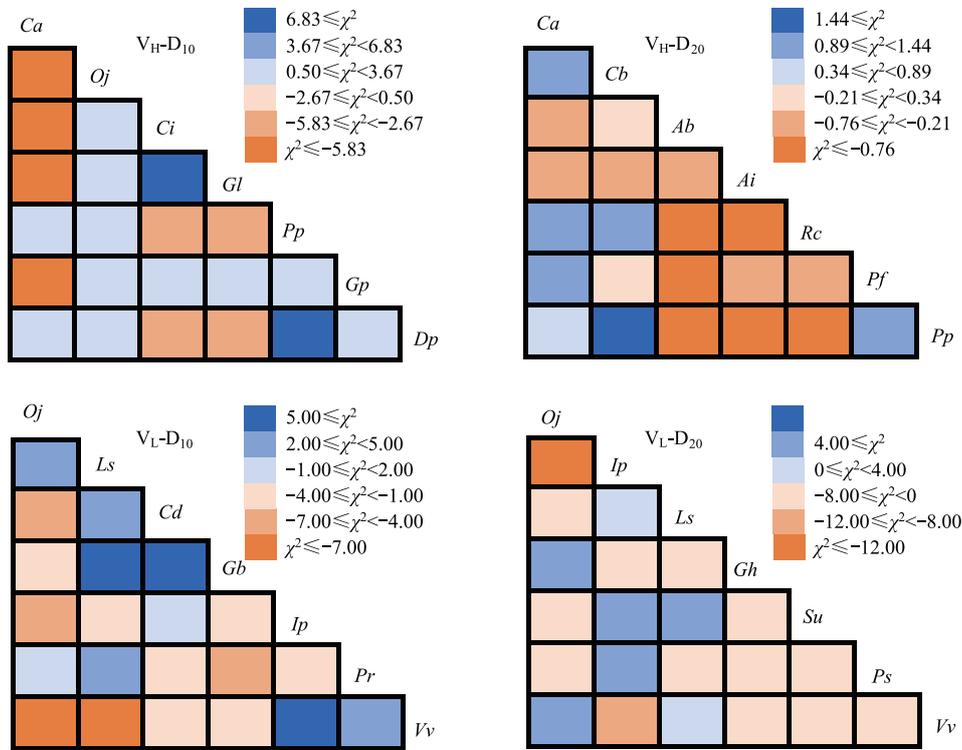


图3 不同干扰类型内草本优势种的 $\chi^2$ 检验结果

Fig.3 The  $\chi^2$  test results of dominant herbaceous species in different interference types

图中颜色分为蓝色(正联结)和橙色(负联结),这两种颜色各分为三种级别(不显著、显著、极显著),颜色越深越显著

位重叠值与 Spearman 秩相关系数显著正相关( $P < 0.001$ ),但拟合关联度均较高( $R^2 > 0.50$ )。

### 3 讨论

#### 3.1 草本群落特征对旅游干扰的响应

一般来说,远离游步道的区域因旅游干扰减少、生境稳定性高、本地种竞争占优等因素,草本物种丰富度更高<sup>[24]</sup>。本研究中,近游步道区域草本植物物种丰富度较高,但盖度显著低于远游步道区域;高游客量样地中草本植物株高显著高于低游客量样地,这与 Seht 等<sup>[25]</sup>和 Kostrakiewicz-Gieralt 等<sup>[26]</sup>的研究结果一致。这说明旅游干扰改变了植物的形态和覆盖度,直接影响草本植物群落的结构和功能。本研究中,优势草本植物均为阴生植物或耐阴植物,未见阳生优势种,这表明在当前的旅游干扰环境下,阳生草本植物难以形成优势。除了旅游干扰,动物活动(尤其是采食行为)也是直接影响植物群落种群动态和物种多样性变化的关键因子<sup>[27]</sup>。本研究中,基于实地勘察与保护区管理人员访谈,游步道邻近区域未发现动物活动痕迹,表明动物活动发生概率极低,其影响可基本排除。此外,相关研究发现,草本植物群落与主干道的距离越近,其 Margalef 指数、Shannon-Wiener 指数、Simpson 指数越大<sup>[15]</sup>。但本研究中,不同干扰间的物种多样性指数均无显著性差异,说明现有管理或干扰强度尚未造成灾难性后果。

#### 3.2 生态位对旅游干扰的响应

重要值和生态位宽度是种群在群落中生存地位及资源利用能力的重要数据指标<sup>[28]</sup>。物种通过资源利用策略影响群落组成,具有较高重要值的物种能更高效利用资源,从而主导群落结构,生态位宽度较大的物种通过功能多样性增强群落抗干扰能力,在异质环境中能维持群落稳定性<sup>[29]</sup>。本研究中,距游步道垂直距离 20 m 内,樱叶乌莓和麦冬分别在游客量高和游客量低的样方中的重要值和生态位宽度均是最大的,说明这 2

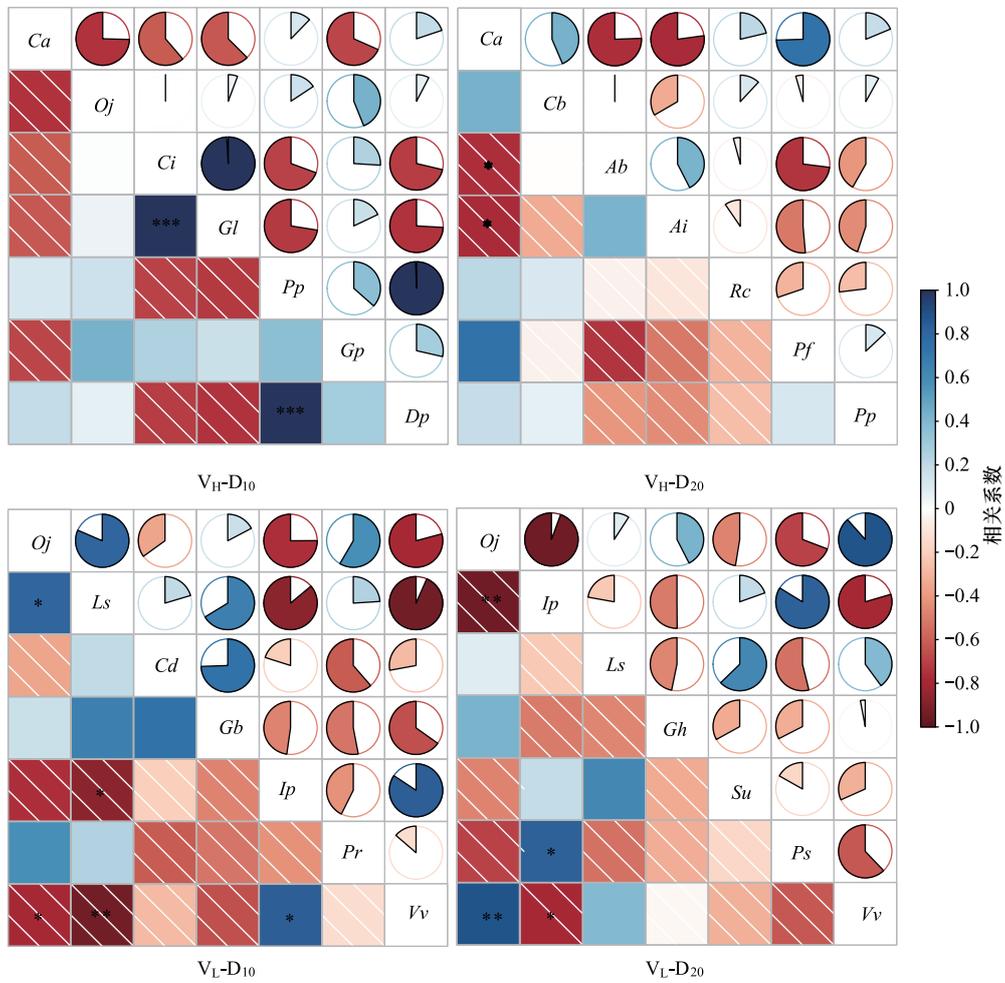


图 4 不同干扰类型中草本优势种的 Spearman 秩相关检验结果

Fig.4 Spearman rank correlation test results of dominant species of herbs in different interference types

图中颜色分为蓝色(正联结)和橙色(负联结),颜色越深越相关性越强,\*、\*\*、\*\*\*分别表示  $P < 0.05$ 、 $P < 0.01$ 、 $P < 0.001$

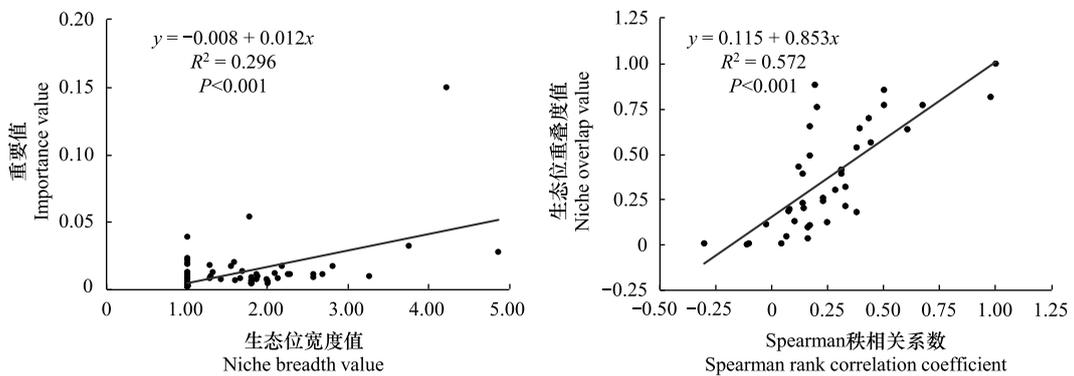


图 5 重要值与生态位宽度、生态位重叠度值与 Spearman 秩相关系数的线性回归分析

Fig.5 Linear regression analysis of importance value with niche width and niche overlap value with spearman rank correlation coefficient

种优势植物具有独特的生态适应性,对群落构建及稳定性起到重要作用。一般认为,重要值与生态位宽度之间呈正相关,表明重要值越大(小),生态位宽度就越大(小)<sup>[30]</sup>。本研究中,重要值与生态位宽度的线性回归

分析结果为显著正相关,说明重要值大的物种往往具有较为广泛的资源利用范围。但也有反例,如青绿苔草在  $V_H-D_{20}$  中的重要值排第 2,但生态位宽度排第 6,其他优势种的重要值与生态位宽度的排序也有不一致的情况,说明重要值与生态位宽度并不存在绝对相关性,这与宋杉杉等<sup>[31]</sup>的研究结果一致。

生态位重叠度可以体现两个物种在共享资源时的竞争关系及资源利用的相似程度<sup>[32]</sup>。在有限的资源环境下,生态位重叠是物种间产生竞争的必要基础,而物种的生态位重叠度均值可作为衡量种间竞争性重叠整体水平的重要指标<sup>[31]</sup>。本研究中,不同组合中优势种间的生态位重叠度均值都较小(0.20—0.36),生态位重叠度高( $O_{ik} \geq 0.50$ )的种对共有 20 组,说明各组合中大部分优势种之间的竞争关系弱,生态位分布较独立。研究表明,一个物种能利用的资源范围越广,它和其他物种在资源使用上的重叠部分就越多<sup>[33]</sup>。但本研究则认为生态位宽度与生态位重叠度无明显相关性,如  $V_H-D_{10}$  中麦冬、樱叶乌菟莓和假黑鳞耳蕨,这三种优势植物的生态位宽度排前三,但生态位重叠值均小于 0.50。这与苏金娟等<sup>[34]</sup>的研究结果一致。

### 3.3 种间联结对旅游干扰的响应

相关研究发现,在群落演替的初始阶段,种间关系主要表现为负向联结(负相关),物种间存在激烈的竞争,群落处于不稳定的状态,随着时间推移,不同物种间会通过竞争排斥与功能互补的协同演化,种间关系则趋于正向联结(正相关),最终会形成稳定的顶极群落<sup>[35]</sup>。总体联结性可体现群落演替的阶段及其稳定性<sup>[19]</sup>。本研究中, $V_H-D_{20}$ 、 $V_L-D_{10}$  和  $V_L-D_{20}$  的草本植物群落优势种间整体呈显著负相关,该结果与  $\chi^2$  检验和 Spearman 秩相关检验的结果基本一致,但  $V_H-D_{10}$  则表现为不显著负相关,与其他的检验结果不一致。其次,总体联结性检验、定性检验( $\chi^2$ )和定量检验(Spearman)在物种间的显著性检验方面也存在一定差异,这与刘鲁光等<sup>[36]</sup>的研究结果一致。综上所述,各干扰区的草本植物群落均处于正向演替过程中,生态位分布较独立,稳定性较差。生态位与种间联结是生态学中的核心概念,二者在群落构建、物种共存和生态系统功能中密切相关。研究表明,生态位重叠值与 Spearman 秩相关系数呈现显著正相关<sup>[37]</sup>。本研究也证实了这一规律,生态位重叠值与 Spearman 秩相关系数显著正相关( $P < 0.001$ ),而且拟合关联度均较高( $R^2 > 0.5$ ),如在极显著正相关的种对中, $V_H-D_{10}$  中绞股蓝与假黑鳞耳蕨产生了较高重叠值(0.95), $V_L-D_{20}$  中麦冬与堇菜也具有最高重叠值(0.99),说明两个物种生境需求相似,便易相互吸引、聚集形成正联结(正相关);若需求差异大,则会相互排斥,呈现负联结(负相关)<sup>[38]</sup>。

## 4 结论

天目山国家森林公园游步道附近区域的草本植物共有 89 种,隶属于 38 科 65 属。游客量和游径距离分别对草本植物的株高和盖度产生显著性影响,各干扰区中草本植物的物种多样性均呈现无显著性差异。根据游客量高低,樱叶乌菟莓和麦冬可作为构建游步道旁草本植物群落的先锋种。不同干扰区中草本植物的种间关系以负联结(负相关)为主,各干扰类型的草本植物群落均处于正向演替过程中,生态位分布较独立,稳定性较差。因此,建议根据游客量差异和游径距离远近实施分区管理,优先采用非工程性措施(如游客引导、设置物理缓冲带),着重保护关键优势种和珍稀濒危植物,旨在预防未来潜在风险(如干扰加剧导致多样性下降、关键种消失)。

### 参考文献(References):

- [1] 叶家桐,邓涛,岑华飞,段云博,朱晓珍,胡兴华. 广西银竹老山资源冷杉群落乔木优势树种生态位与种间联结. 生态学报, 2025, 45(8): 3921-3932.
- [2] 李锦婷,穆君,申开平,郭云,白小节,臧丽鹏,李青,韩勛,赵颖,何跃军. 小黄花茶群落优势木本植物生态位及种间联结性. 生态学报, 2024, 44(1): 283-294.
- [3] 孙成,秦富仓,李龙,杨振奇,董晓宇,李艳. 砒砂岩区不同立地类型人工油松林下草本种群生态位特征及其环境解释. 生态学报, 2022, 42(9): 3613-3623.
- [4] 商乃滨,李东海,杨小波,黄耀,刘人通,苏欣,杜春雁,和绍翠,祁天运. 濒危植物蝴蝶树所在群落不同林层优势树种生态位与种间联结. 生态学报, 2025, 45(7): 3389-3400.
- [5] 胡甜,彭文英,任艳姣,张鹏岩. 人类活动-气候变化影响下植被生态系统稳态转换研究进展. 生态学报, 2025, 45(9): 4120-4130.

- [ 6 ] 李梦蝶,王立龙,秀龙. 旅游干扰对植物多样性的影响研究进展. 生态科学, 2022, 41(6): 230-236.
- [ 7 ] 毛志宏,朱教君. 干扰对植物群落物种组成及多样性的影响. 生态学报, 2006, 26(8): 2695-2701.
- [ 8 ] 刘倩倩,李文穗,刘翔,董丽娜,赵晨,冷慧梅,刘鑫,张金池. 踩踏对城市森林林下草本层植被物种组成和多样性及土壤理化性质的影响. 东北林业大学学报, 2024, 52(11): 117-124.
- [ 9 ] 张丽娜,管婧婧. 旅游干扰对九龙山国家森林公园植被及土壤微生态环境的影响. 西南大学学报(自然科学版), 2024, 46(12): 117-126.
- [ 10 ] Ballantyne M, Pickering C M. The impacts of trail infrastructure on vegetation and soils: Current literature and future directions. Journal of Environmental Management, 2015, 164: 53-64.
- [ 11 ] 刘炳亮,苏金豹,马建章. 旅游区游憩活动对鸟类扩散种子的影响. 生态学报, 2017, 37(14): 4786-4794.
- [ 12 ] 张茜,杨东旭,钟永德,周国英,李文明. 黄石寨景区旅游活动对典型植物群落的影响. 浙江农业学报, 2017, 29(7): 1158-1165.
- [ 13 ] 《浙江通志》编纂委员会. 浙江通志·第一百零一卷: 天目山专志. 杭州: 浙江人民出版社, 2017: 343-344.
- [ 14 ] 贾真真,李苇洁,田奥,王加国. 贵州百里杜鹃风景区旅游干扰对杜鹃群落特征的影响. 生态学报, 2021, 41(11): 4641-4649.
- [ 15 ] 黄睿雪,欧静,王洪飞,周玉梅. 百里杜鹃国家森林公园植物群落物种多样性及优势种生态位宽度对人为干扰的响应. 生态学杂志, 2024, 43(5): 1217-1226.
- [ 16 ] 郭子良,刘欣艳,张曼胤,周文昌,庞宏东,马国飞,龙水枝,梅玉娇. 大九湖湿地游步道两侧草本植物群落对旅游干扰的响应. 生态科学, 2022, 41(6): 82-91.
- [ 17 ] Jiang H X, Zhou Y, Li W, Lu Q, Xu D M, Ma H B, Ma X Z, Tian X W. Reseeding native species promotes community stability by improving species diversity, niche, and interspecific relationships in the desert steppe of northwest China. Ecology and Evolution, 2025, 15(2): e70929.
- [ 18 ] 冯斌,杨晓霞,刘玉祺,刘文亭,吕卫东,张艳芬,董全民. 不同放牧方式对高寒草地物种多样性、生态位与种间联结性的影响. 草业学报, 2025, 34(8): 1-14.
- [ 19 ] Huang R Z, Wang Q, Sun J Y, Zhao Y P, Yang S W, Xiao W F, Liu J F. Niche and interspecific association of dominant arbor species in *Quercus* communities in the Qinling Mountains, China. Global Ecology and Conservation, 2025, 57: e03404.
- [ 20 ] Zhang Y Y, Zhou W M, Yuan Q, Deng J J, Zhou L, Yu D P. Niches, interspecific associations, and community stability of main understory regeneration species after understory removal in temperate forests. Frontiers in Plant Science, 2024, 15: 1371898.
- [ 21 ] 彭梦,黄城晨,李立杰,余佳妮,杨帆,谭凤霞,柴毅. 长湖浮游植物优势种生态位特征及种间联结性分析. 生态学报, 2024, 44(4): 1549-1563.
- [ 22 ] Xiang X M, De K J, Lin W S, Feng T X, Li F, Wei X J. The ecological niche characteristics and interspecific associations of plant species in the alpine meadow of the Tibetan Plateau affected plant species diversity under nitrogen addition. PeerJ, 2024, 12: e18526.
- [ 23 ] 林阳,李时轩,周伟龙,龙丹,杨中杰,毛志斌,熊艳云,刘胜龙,潘心禾,刘金亮,沈国春,丁炳扬,于明坚. 百山祖国家公园植物群落  $\alpha$  和  $\beta$  多样性对海拔梯度的响应. 生态学报, 2024, 44(17): 7700-7712.
- [ 24 ] Barros A, Monz C, Pickering C. Is tourism damaging ecosystems in the Andes? Current knowledge and an agenda for future research. Ambio, 2015, 44(2): 82-98.
- [ 25 ] Sehrt M, Bossdorf O, Freitag M, Bucharova A. Less is more! Rapid increase in plant species richness after reduced mowing in urban grasslands. Basic and Applied Ecology, 2020, 42: 47-53.
- [ 26 ] Kostrakiewicz-Gierałt K, Pliszko A, Gmyrek K. The effect of informal tourist trails on the abiotic conditions and floristic composition of deciduous forest undergrowth in an urban area. Forests, 2021, 12(4): 423.
- [ 27 ] 郑会森,董贵信,戚赞宜,吴忠春,叶晓欣,吴永彬. 广州长隆野生动物世界植物群落结构特征研究. 热带农业科学, 2024, 44(6): 69-76.
- [ 28 ] Hu J T, Zheng Z L, Wen X Y, Hu X S, Lin Y M, Li J, Ni J, Wu C Z. Variation in niche and interspecific associations across elevations in subtropical forest communities of the Wuyi Mountains, southeastern China. Forests, 2024, 15(7): 1256.
- [ 29 ] Kraft N J B, Godoy O, Levine J M. Plant functional traits and the multidimensional nature of species coexistence. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, 2015, 112(3): 797-802.
- [ 30 ] Ma Y M, Li Q H, Pan S P, Liu C, Han M S, Brancelj A. Niche and interspecific associations of *Pseudoanabaena limnetica*-Exploring the influencing factors of its succession stage. Ecological Indicators, 2022, 138: 108806.
- [ 31 ] 宋杉杉,许文婕,刘倩,杨威,丁彦芬. 长江下游(南京段)滨岸带优势草本植物生态位及种间关系. 长江流域资源与环境, 2024, 33(9): 1929-1941.
- [ 32 ] Hu Y, Wang H C, Jia H P, Pen M, Liu N, Wei J J, Zhou B Y. Ecological niche and interspecific association of plant communities in alpine desertification grasslands: a case study of Qinghai Lake Basin. Plants, 2022, 11(20): 2724.
- [ 33 ] 陈月红,汤晓辛,石慰,乙引,晏苹. 喀斯特针阔混交林优势物种生态位与种间联结——以贵阳市为例. 干旱区资源与环境, 2024, 38(11): 159-167.
- [ 34 ] 苏金娟,刘永萍,刘丽燕,吴天忠,荣文文,楚光明,王梅. 阿勒泰荒漠区草本植物生态位与种间关联. 草业科学, 2024, 41(10): 2217-2228.
- [ 35 ] 杜忠毓,邢文黎,党宁,赵维彬,谭许脉,肖江,盖旭,陈光才. 甘肃西和锑矿生态破坏区优势物种生态位及种间联结性. 生态环境学报, 2024, 33(7): 1036-1047.
- [ 36 ] 刘鲁光,朱兆棋,陈曦,刘守江. 喜德县中坝村火烧迹地植被恢复初期优势物种生态位与种间联结. 西部林业科学, 2022, 51(1): 110-117.
- [ 37 ] 刘润红,陈乐,涂洪润,梁士楚,姜勇,李月娟,黄冬柳,农娟丽. 桂林岩溶石山青冈群落灌木层主要物种生态位与种间联结. 生态学报, 2020, 40(6): 2057-2071.
- [ 38 ] 刘益鹏,叶兴状,叶利奇,陈绪辉,郑世群,陈世品,张国防,刘宝. 观光木群落优势树种生态位和种间联结. 应用生态学报, 2022, 33(10): 2670-2678.