

中国短绒野大豆遗传资源的群落特征分析

王浩辰^{1,2}, 王克晶¹, 韩娟², 李向华¹

(¹中国农业科学院作物科学研究所, 北京 100081; ²西北农林科技大学农学院, 陕西杨凌 712100)

摘要: 短绒野大豆(*Glycine tomentella*), 属于大豆属(*Glycine* Willd.) *Glycine* 亚属, 为我国二级保护野生植物, 分布于闽粤沿海地带及附近岛屿, 是大豆育种的重要遗传资源。近年由于分布区域土地开发、除草剂滥用、环境变化等诸多因素导致短绒野大豆种群受到不同程度的影响, 因此亟需明确其群落的植物组成及群落结构特征, 为其原生境保护提供理论依据。本研究在闽粤沿海地带选取 50 个短绒野大豆植物群落, 调查了 255 个样方(1m×1m)的物种组成、密度和高度等生态数据, 分析群落物种多样性、种间关系和生态位特征。结果表明: (1) 闽粤两省短绒野大豆群落的植物构成有明显差异。研究共记载 48 科 138 属 166 种植物, 其中草本植物 123 种(占 74.10%); 福建省独有 23 科 45 属 53 种, 广东省独有 27 科 64 属 70 种。两省共有的优势种仅有 13 个, 主要优势种也有较大差异。(2) 福建省群落物种间关联程度高于广东省, 各物种在样方水平上的分布更均匀。(3) 广东省群落中白茅和狗牙根的生态位宽度远高于福建省; 两省群落与短绒野大豆生态位重叠值较高的物种完全不同。这表明同一物种的生态位特征具有地域适应性。(4) 总体和种间联结性分析、相关分析均表明, 大部分种对呈现不显著负相关, 各物种间相对独立, 两省群落均处于不稳定状态。

关键词: 短绒野大豆; 物种多样性; 种间关系; 生态位特征

Analysis on Community Characteristics of Genetic Resources of *Glycine tomentella* in China

WANG Haochen^{1,2}, WANG Kejing¹, HAN Juan², LI Xianghua¹

(¹ Institute of Crop Sciences, Chinese Academy of Agricultural Sciences, Beijing 100081; ² College of Agriculture, Northwest Agriculture & Forestry University, Yangling 712100, Shaanxi)

Abstract: *Glycine tomentella*, which belongs to *Glycine* subgenus of *Glycine* Willd., is a secondary protected wild plant in China. It is distributed in the coastal areas of Fujian and Guangdong and nearby islands. It is an important genetic resource for soybean breeding. In recent years, due to land development, the abuse of herbicides, environmental changes and many other factors in the distribution area, the population of *G. tomentella* has been affected to varying degrees. Therefore, it is urgent to clarify the plant composition and community structure characteristics of the community, in order to provide theoretical basis for the protection of the original habitat of

收稿日期: 2024-12-02

网络出版日期:

URL:

第一作者研究方向为植物遗传资源学, E-mail: wanghaochen@nwfafu.edu.cn

通信作者: 韩娟, 研究方向为旱区作物水肥高效利用, E-mail: hjepost@nwsuaf.edu.cn

李向华, 研究方向为种质资源的收集与评价, E-mail: lixianghua@caas.cn

基金项目: 科技部国家重点研发计划(2021YFD1200103)

Foundation project: National Key R&D Program of the Ministry of Science and Technology (2021YFD1200103)

the species. In this study, 50 *G. tomentella* plant communities were selected in the coastal zone of Fujian and Guangdong. The ecological data of plant composition, plant density and average plant height of 255 quadrats (1m×1m) were investigated, and the species diversity, interspecific relationship and niche characteristics of the communities were analyzed. The results showed that: (1) There were significant differences in the plant composition of *G. tomentella* community between Fujian and Guangdong provinces. A total of 166 species belonging to 138 genera and 48 families were recorded, including 123 species of herbaceous plants (74.10%); There are 53 species belonging to 45 genera, 23 families unique to Fujian Province and 70 species belonging to 64 genera, 27 families unique to Guangdong Province. There are 13 dominant species shared between the two provinces, and the composition of the primary dominant species also exhibits considerable differences.(2) The interspecific association degree of the community species in Fujian Province was higher than that in Guangdong Province, and the distribution of species was more uniform at the quadrat level. (3) The niche breadth of *Imperata cylindrica* and *Cynodon dactylon* in Guangdong Province was much higher than that in Fujian Province; The species with higher niche overlap between the two communities are completely different. This indicates that the niche characteristics of the same species exhibit geographical adaptability. (4) The results of overall and interspecific association analysis and interspecific correlation analysis showed that most species pairs showed no significant negative correlation, and the species were basically independent, and the communities in the two provinces were in an unstable state.

Key words: *Glycine tomentella*; species diversity; interspecific relationships; niche characteristics

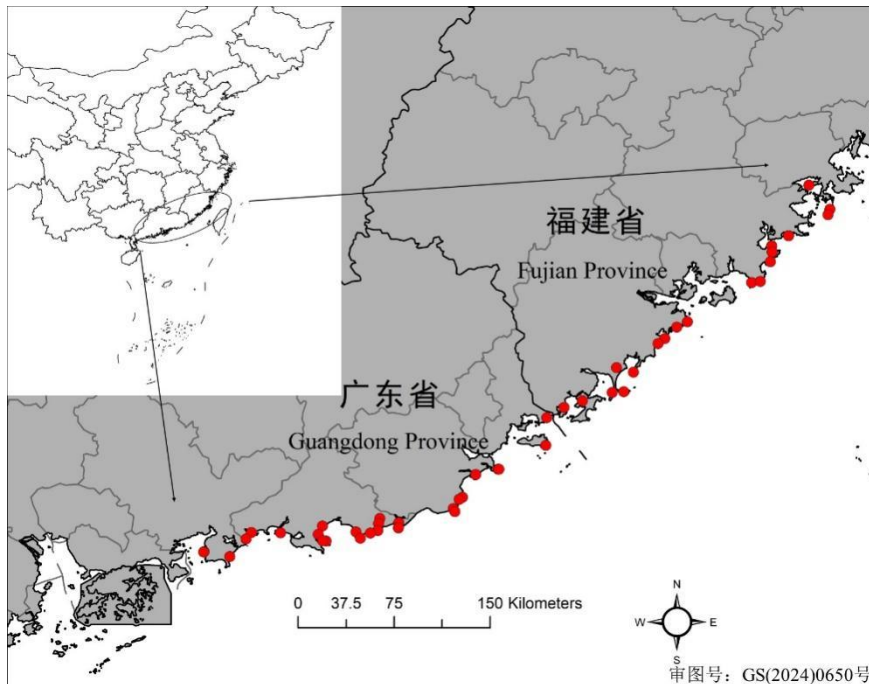
大豆属(*Glycine* Willd.)多年生 *Glycine* 亚属在我国仅有两个种分布^[1-3], 即短绒野大豆(*G. tomentella*)和烟豆(*G. tabacina*), 这两个种是一年生 *Soja* 亚属[栽培大豆(*G. max*)和野生大豆(*G. soja*)]的近缘野生种, 也是我国大豆遗传资源的重要组成部分。短绒野大豆在大豆育种上具有重要利用价值, 多项研究表明, 短绒野大豆对大豆孢囊线虫具有高抗性^[4-5], 还具有较高的耐旱^[6]和耐盐碱性^[7-9]。已经有研究者尝试利用短绒野大豆和栽培大豆进行杂交育种工作^[10-12]。此外, 短绒野大豆还富含大豆异黄酮、大豆苷元、染料木素, 具有抗癌、防治心血管疾病、预防骨质疏松等作用^[13-15], 在医药保健领域也具有较高的利用价值。

短绒野大豆在我国的地理分布非常狭窄, 只局限于福建省和广东省东南沿海的海岸地带^[16]。然而由于水产养殖、旅游区、机场和港口建设等土地开发, 以及除草剂的过度使用等原因, 短绒野大豆天然种群受到不同程度的影响, 如何科学、有效地保护短绒野大豆种群资源成为当前的急迫课题。进行原生境保护的前提是要先了解其野外群落结构, 然而国内外有关大豆属野生种的群落研究非常稀少, 国内仅有吴东丽等研究了北京地区一年生野生大豆(*G. soja*)群落种群空间分布特征^[17]、种群和群落的分布格局^[18]、群落主要种群生态位特征^[19]及不同物种的种间生态关系^[20]。国内有若干篇关于短绒野大豆的文献, 但都是聚焦于遗传多样性的研究^[21-22,1-3], 对于其群落或种群相关的研究至今仍是空白。本研究首次开展国内大豆属多年生亚属的群落研究, 旨在通过对分布于闽粤两省的短绒野大豆资源进行植物组成及群落特征等生态信息的调查, 明确闽粤两省短绒野大豆的群落状况, 为我国短绒野大豆原生境保护提供有价值的生态学参考依据。

1 调查区域与调查方法

1.1 调查区域

本研究对短绒野大豆实地调查的范围，北起其分布北界福建省平潭岛(N25°15'~25°45', E119°32'~120°26'), 南到其分布南界广东省惠东县大亚湾(N22°30'~22°50', E114°29'~114°49')(图 1); 海岸线直线距离约 600km, 群落到海岸线的距离最近为 10m, 最远可达 9km; 土壤类型主要是海岸地带的沙质土壤(细沙、中沙、粗沙或砂砾); 植被类型主要是早中生和沙生灌草丛。



红点为群落调查点

The red dots are the community investigation sites

图 1 短绒野大豆群落调查示意图

Fig. 1 A sketch map of *G. tomentella* community survey

1.2 群落调查

福建省生态调查于 2023 年 4 月进行, 广东省于 5 月进行, 两省调查时间相差 15 天左右。4-5 月东南沿海多年生野大豆群落灌草丛内各种植物没有严重的植株缠绕与遮蔽, 方便植物种类组成和密度调查。我们共对 50 个短绒野大豆群落进行了调查, 这些群落基本包括了调查中发现的所有短绒野大豆群落。每个群落调查 5 个样方(在群落的 4 个角附近和中央随机抛掷 1 平方米铁丝环设置样方; 狭长群落以适宜的距离排列设置样方; 其中一个群落有 6 样方, 一个群落有 9 样方), 共计 255 个样方。调查并记载样方总盖度、短绒野大豆盖度、植物种类、株数、平均株高等数据。

1.3 数据分析

数据统计和重要值计算在 Excel 2016 中进行, 使用 ArcGIS 10.8 绘制群落调查分布示意图, 使用软件 R 4.3.1 的 vegan 包^[23]计算群落的 Shannon-Wiener 指数(H)、Simpson 优势度指数(D)、丰富度指数(S)和 Pielou 均匀度指数(J); 使用 spaa 包^[24]计算生态位宽度、生态位重叠值、总体和种对间关联性、Pearson 相关系数和 Spearman 秩相关系数, 并绘制半矩阵图; 使用 psych 包^[25]检验相关系数显著性; 回归分析绘图在 Origin 2023 中完成。

1.3.1 物种多样性 以频度大于 4% 的标准选取两省的优势种。用相对密度、相对高度、相对频度计算优势种的重要值(IV); 使用 Shannon-Wiener 指数(H)、Simpson 优势度指数(D)、丰富度指数(S)和 Pielou 均匀度指数(J)表示全部物种的物种多样性。计算如下:

$$H = \sum_i p_i \log_2 p_i$$

$$D = \sum p_i^2$$

$$J = \frac{H}{\log S}$$

$$\text{相对密度} = \frac{\text{某物种的密度}}{\text{所有物种密度之和}}$$

$$\text{相对高度} = \frac{\text{某物种的高度}}{\text{所有物种高度之和}}$$

$$\text{相对频度} = \frac{\text{某物种的频度}}{\text{所有物种频度之和}}$$

$$\text{重要值(IV)} = \frac{\text{相对密度} + \text{相对高度} + \text{相对频度}}{3}$$

式中: S 表示样方物种数, p_i 表示物种 i 个体数占总个体数的比例。

1.3.2 总体关联性 采用 Schluter 等^[26]的方差比率法(VR)测定物种的总体关联性, 当 $VR > 1$, 表示物种总体呈正关联; 当 $VR < 1$, 表示物种总体呈负关联; 当 $VR = 1$, 表示物种间无关联, 彼此相互独立。引入新的统计量 W 以检验 VR 对于 1 的偏离显著度, W 服从 χ^2 分布, 当 W 落在 $(\chi^2_{0.95}, \chi^2_{0.05})$ 之间时表示总体关联不显著 ($P > 0.05$), 反之则显著 ($P < 0.05$)^[4]。计算公式^[8]如下。

$$VR = \frac{S_T^2}{\delta_T^2}$$

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

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

$$W=VR \times N$$

式中： T_j 为样方 j 内出现的物种数， 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， N 为样方总数， S_j^2 为样方中物种数的方差， δ_j^2 为所有物种出现频度的方差。

1.3.3 种对间关联性 种对间关联性分析包括两个内容：一是检验种间是否存在关联；二是测定关联的程度大小。采用 χ^2 检验定性评价关联性是否显著，使用 Yates 的连续校正公式进行计算^[27]；采用 Jaccard 指数(共同出现百分率， JI)评价关联性程度，无关联时为 0，最大为 1。计算公式^[28]如下。

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

$$JI = \frac{a}{a+b+c}$$

式中， N 为样方总数， a 为 2 个种同时出现的样方数， b 、 c 分别为 2 个种单独出现的样方数， d 为 2 个种都不出现的样方数。 χ^2 检验时，若 $ad > bc$ ，种对间位正相关； $ad < bc$ ，为负相关； $ad = bc$ ，为不相关。当 $\chi^2 < 3.841$ 时，则 $P > 0.05$ ，种对相互独立；当 $3.841 < \chi^2 < 6.635$ 时，则 $0.01 \leq P \leq 0.05$ ，关联性显著；当 $\chi^2 > 6.635$ 时，则 $P < 0.01$ ，关联性极显著^[28]。

1.3.4 种间相关 Pearson 相关系数和 Spearman 秩相关系数可以有效地补充和完善 χ^2 检验结果，定量反映物种关联性的差异^[29]，系数为正值表示正相关，系数为负表示负相关，系数为 0 表示种对间无相关性。计算公式^[30]如下。

$$r_p(i,k) = \frac{\sum_{j=1}^N (x_{ij} - \bar{x}_i)(x_{kj} - \bar{x}_k)}{\sqrt{\sum_{j=1}^N (x_{ij} - \bar{x}_i)^2 \sum_{j=1}^N (x_{kj} - \bar{x}_k)^2}}$$

式中， N 为总样方数， $r_p(i,k)$ 表示物种 i 和物种 k 在样方中的 Pearson 相关系数。 x_{ij} 和 x_{kj} 分别是物种 i 和物种 k 在样方 j 中的多度值； \bar{x}_i 和 \bar{x}_k 分别是 j 个样方中物种 i 和物种 k 的多度平均值。

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

式中， $r_s(i,k)$ 为物种 i 和物种 k 在样方中的 Spearman 秩相关系数。 x_{ij} 和 x_{kj} 分别是物种 i 和物种 k 在样方 j 中多度的秩。

1.3.5 生态位特征 生态位宽度和生态位重叠值表示物种的生态位特征。利用 Levins 指数^[31]计算生态位宽度，Pianka 生态位重叠指数^[32]表示种间重叠程度。计算公式^[30]：

$$O_{ik} = \sum_{j=1}^N x_{ij} x_{kj} \sqrt{\left(\sum_{j=1}^N x_{ij} \right)^2 \left(\sum_{j=1}^N x_{kj} \right)^2}$$

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

式中, B_L 、 O_{ik} 分别为生态位宽度和生态位重叠值。 x_{ij} 和 x_{kj} 分别是物种 i 和物种 k 在样方 j 中的重要值, N_i 为物种 i 在所有样方上的重要值总和。

2 结果与分析

2.1 福建和广东省短绒野大豆群落的植物组成结构及重要值

在所调查的短绒野大豆群落中两省共记录植物 48 科 138 属 166 种(或类), 其中草本植物 123 种, 占比 74.10%; 两省重叠分布 20 科 42 属 43 种植物。福建省独有植物 23 科 45 属 53 种, 其中鼠曲草、鬼针草、狗牙根和牛筋草(重要值分别为 0.092、0.09、0.085、0.079)是福建省主要优势种(表 1); 广东省的主要优势种为鬼针草、白茅、狗牙根和短绒野大豆(重要值分别为 0.181、0.116、0.099、0.097)(表 2)。从表 1 和表 2 可以看出, 福建省和广东省短绒野大豆群落的伴生植物种类构成有很大差异, 这可能与两省群落所处的地理位置、气候和土壤条件上的差异有关, 还可能与群落伴生植物的机能及相互作用有关。此外, 同种植物在两省群落中的重要值表现也有所差异, 如白茅在福建省的重要值为 0.011, 而在广东省为 0.116, 这可能意味着该物种在广东省的群落中拥有更强的生长优势, 与当地的气候条件、土壤类型及群落结构更为契合。

表 1 福建省短绒野大豆群落优势种、重要值、生态位宽度及生态位重叠值

Table 1 Dominant species, important values, niche width, and niche overlap values of *G. tomentella* communities in Fujian province

序号 No.	物种 Species	频度 Frequentness	重要值 Important Value	生态位宽度 Niche Width Levins	与短绒野大豆生态位重叠值 Niche Overlap Pianka
1*	短绒野大豆 <i>Glycine tomentella</i>	0.798	0.070	26.683	
2*	鬼针草 <i>Bidens pilosa</i>	0.560	0.090	10.739	0.128
3*	牛筋草 <i>Eleusine indica</i>	0.459	0.079	7.338	0.073
4	酢浆草 <i>Oxalis corniculata</i>	0.431	0.046	20.376	0.166
5	苦苣菜 <i>Sonchus oleraceus</i>	0.404	0.054	17.330	0.133
6*	狗牙根 <i>Cynodon dactylon</i>	0.303	0.085	6.722	0.077
7	鼠曲草 <i>Pseudognaphalium affine</i>	0.294	0.092	7.490	0.076
8*	小蓬草 <i>Conyza canadensis</i>	0.275	0.030	9.739	0.283
9	烟豆 <i>Glycine tabacina</i>	0.229	0.024	13.378	0.079
10	蓝色琉璃繁缕 <i>Lysimachia foemina</i>	0.193	0.033	5.491	0.090
11*	香附子 <i>Cyperus rotundus</i>	0.156	0.038	5.809	0.067
12*	红茅草 <i>Rhynchelytrum repens</i>	0.138	0.038	5.383	0.023
13*	海边月见草 <i>Oenothera drummondii</i>	0.128	0.022	7.065	0.134
14	天蓝苜蓿 <i>Medicago lupulina</i>	0.128	0.017	7.768	0.043
15	野豌豆 <i>Vicia sativa</i>	0.119	0.018	5.157	0.166
16	豨薟 <i>Sigesbeckia orientalis</i>	0.092	0.010	3.609	0.116
17*	假臭草 <i>Praxelis clematidea</i>	0.083	0.010	4.155	0.455
18*	链荚豆 <i>Alysicarpus vaginalis</i>	0.073	0.006	4.031	0.048
19	龙葵 <i>Solanum nigrum</i>	0.064	0.007	3.501	0.065
20*	白茅 <i>Imperata cylindrica</i>	0.064	0.011	5.509	0.159
21	黄花稔 <i>Sida acuta</i>	0.055	0.008	3.641	0.053
22	黄茅草 <i>Heteropogon contortus</i>	0.055	0.010	4.348	0.129
23	地肤 <i>Kochia scoparia</i>	0.046	0.006	1.415	0.004
24*	墨苜蓿 <i>Richardia scabra</i>	0.046	0.006	2.308	0.023
25*	茅莓 <i>Rubus parvifolius</i>	0.046	0.004	3.769	0.048

*为闽粤短绒野大豆群落共同出现的优势种

* shows the dominant species commonly occurring in the *G. tomentella* communities of Fujian and Guangdong provinces

表 2 广东省短绒野大豆群落优势种、重要值、生态位宽度及生态位重叠值

Table 2 Dominant species, important values, niche width, and niche overlap values of *G. tomentella* communities in Guangdong province

序号 No.	物种 Species	频度 Frequency	重要值 Important Value	生态位宽度 Niche Width Levins	与短绒野大豆生态位重叠值 Niche Overlap Pianka
1*	短绒野大豆 <i>Glycine tomentella</i>	1.000	0.097	48.279	
2*	鬼针草 <i>Bidens pilosa</i>	0.719	0.181	9.340	0.105
3*	狗牙根 <i>Cynodon dactylon</i>	0.527	0.099	29.724	0.301
4*	白茅 <i>Imperata cylindrica</i>	0.404	0.116	24.742	0.157
5*	假臭草 <i>Praxelis clematidea</i>	0.329	0.048	16.519	0.152
6*	牛筋草 <i>Eleusine indica</i>	0.240	0.048	18.069	0.185
7*	香附子 <i>Cyperus rotundus</i>	0.240	0.038	16.917	0.215
8*	链荚豆 <i>Alysicarpus vaginalis</i>	0.192	0.019	13.301	0.535
9	蛇婆子 <i>Waltheria indica</i>	0.185	0.017	14.295	0.145
10*	红茅草 <i>Rhynchelytrum repens</i>	0.103	0.032	7.593	0.079
11	丁葵草 <i>Zornia gibbosa</i>	0.103	0.011	7.215	0.486
12*	海边月见草 <i>Oenothera drummondii</i>	0.082	0.012	5.617	0.086
13*	茅莓 <i>Rubus parvifolius</i>	0.075	0.009	6.660	0.164
14	菟丝子 <i>Cuscuta chinensis</i>	0.069	0.010	7.008	0.070
15	三点金 <i>Grona triflora</i>	0.062	0.009	1.828	0.440
16*	小蓬草 <i>Conyza canadensis</i>	0.062	0.008	4.610	0.117
17	木蓝 <i>Indigofera tinctoria</i> Linn	0.055	0.006	1.591	0.053
18	假地豆 <i>Desmodium heterocarpon</i>	0.055	0.006	3.372	0.067
19	芒 <i>Miscanthus sinensis</i>	0.055	0.021	2.241	0.085
20	鸡矢藤 <i>Paederia scandens</i>	0.055	0.006	5.786	0.090
21*	墨苜蓿 <i>Richardia scabra</i>	0.048	0.008	4.745	0.086
22	硬毛木蓝 <i>Indigofera hirsuta</i>	0.048	0.005	3.873	0.087
23	丰花草 <i>Borreria stricta</i>	0.041	0.007	2.862	0.088
24	阔叶丰花草 <i>Spermacoce alata</i>	0.041	0.005	3.102	0.047
25	金丝草 <i>Pogonatherum crinitum</i>	0.041	0.010	3.636	0.110
26	鼠尾粟 <i>Sporobolus fertilis</i>	0.041	0.009	4.055	0.162

*为闽粤短绒野大豆群落共同出现的优势种

* shows the dominant species commonly occurring in the *G. tomentella* communities of Fujian and Guangdong provinces

2.2 短绒野大豆群落的物种多样性分析

物种多样性是生物多样性在物种水平上和群落水平上分布均匀程度的表现形式^[33]。图 2 显示，尽管闽粤短绒野大豆群落的物种组成结构存在明显差异，但是物种多样性水平基本一致；福建省群落的 Shannon-Wiener 指数(H)、Simpson 优势度指数(D)、丰富度指数(S)和 Pielou 均匀度指数(J)分别为 1.24、0.61、6.51、0.68，广东省群落的指数值分别为 1.15、0.56、6.08、0.65。比较来看，虽然福建省群落分布的物种种类没有广东省群落多，但是福建省群落在样方水平上的物种分布更均匀，其 Pielou 均匀度(J)处于较高水平，样方水平上的物种间优势差异小，也因此具有高的 Shannon 指数(H)和 Simpson 优势度指数(D)。

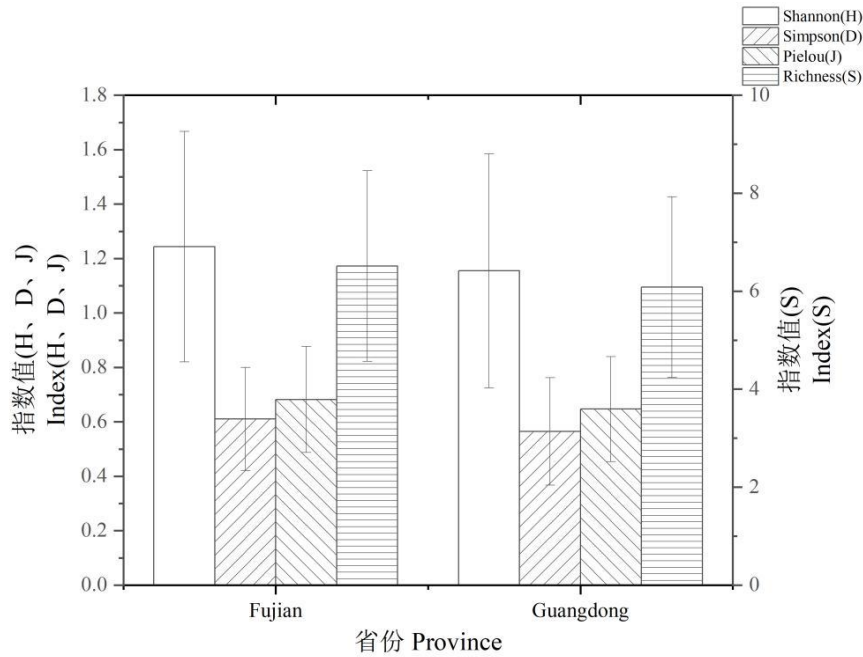


图 2 不同省份短绒野大豆群落的物种多样性指数比较

Fig. 2 Comparison of species diversity index in the *G. tomentella* communities between different provinces

2.3 短绒野大豆群落的生态位特征分析

2.3.1 生态位宽度 福建省短绒野大豆群落 25 个优势种的 Levins 生态位宽度变动从 26.683(短绒野大豆)-1.415(地肤), 平均值为 7.71; 短绒野大豆(26.683)、酢浆草(20.376)、苦苣菜(17.330)、烟豆(13.378)、鬼针草(10.739)拥有较大的生态位宽度(表 1)。广东省短绒野大豆群落 26 个优势种的生态位宽度范围为 48.279(短绒野大豆)-1.591(木蓝), 平均值 10.27; 短绒野大豆(48.279)、狗牙根(29.724)、白茅(24.742)、牛筋草(18.069)、香附子(16.917)拥有较大生态位宽度(表 2)。这些生态位宽度较大的植物在群落中有相对高的生境适应能力和资源利用效率, 闽粤两省群落中短绒野大豆的生态位宽度均为最大, 这表明其在野外具有较高的生态适应性。此外, 两省短绒野大豆群落的生态位宽度水平差距显著, 广东省的平均值比福建省高 33.2%。作为目标物种的短绒野大豆, 在广东省群落中的生态位宽度比福建省大 80.93%; 生态位宽度差异最大的植物为白茅和狗牙根, 它们在广东省群落中生态位宽度水平分别是福建省的 4.49 倍和 4.42 倍, 一定程度上反映出了两省群落生态特性的差异。但也有部分物种, 如鬼针草在福建省(10.739)和广东省(9.34)的生态位宽度相差不大。

2.3.2 生态位重叠值 生态位重叠值表示两个物种在其生态因子上的相似程度, 群落内生态位重叠值大的两个物种, 可能有相近的生态因子或者在生态因子的需求上呈现互补状态^[34], 也意味着对资源的竞争也越强。福建省短绒野大豆与各优势种 Pianka 生态位重叠值的范围为 0.004-0.455, 其中与假臭草的生态位重叠

值最大(0.455)，之后依次为小蓬草(0.283)、酢浆草(0.166)和野豌豆(0.166)；与地肤的生态位重叠值最小(0.004)(表 1)。广东省相应的生态位重叠值范围为 0.047-0.535，与短绒野大豆生态位重叠值较大的物种有链荚豆(0.535)、丁葵草(0.486)、三点金(0.440)和狗牙根(0.301)(表 2)。同福建群落比较，与广东短绒野大豆拥有最大生态位重叠值的物种完全不同，这些结果说明同样的两个物种在不同生态条件下，其生态位重叠值也会发生适应性变化。

2.4 短绒野大豆群落总体关联及种对间关联性分析

2.4.1 群落总体关联 群落总体关联性表示群落内物种间因相互作用而形成的联系，是群落演替阶段和稳定性的体现^[35]。通过对两省短绒野大豆群落优势种的总体关联性分析(表 3)，福建省和广东省的方差比率(*VR*)分别为 0.86 和 0.98，均小于 1，且检验值 *W* 均在 χ^2 临界值之内，因此，闽粤两省短绒野大豆群落总体关联性呈现出不显著负关联。这些结果说明东南沿海短绒野大豆群落总体还没有达到稳定状态，群落内植物尚未有稳定的搭配结构，对资源的需求可能有较大的差异性；同时也说明群落受到外界干扰时极容易出现波动。实地调查的结果也证明，沿海地区的短绒野大豆群落一直受到各种外界干扰，较难达到稳定状态。

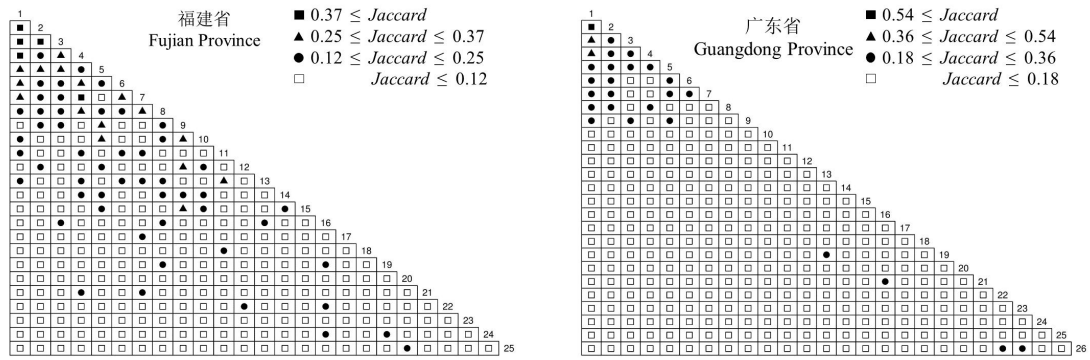
表 3 两省短绒野大豆群落优势种的总体关联性

Table 3 Overall association of dominant species in *G. tomentella* communities in the two provinces

省份 Province	方差比率 Variance ratio (<i>VR</i>)	检验统计量 <i>W</i> Test statistics <i>W</i>	χ^2 临界值 χ^2 threshold	检验结果 Test result
福建 Fujian	0.86	93.98	(85.90,134.37)	不显著负联结
广东 Guangdong	0.98	143.23	(119.07,175.20)	不显著负联结

2.4.2 短绒野大豆群落优势种种对间关联性 福建省短绒野大豆群落的优势种存在 300 个种对，广东省存在 325 个种对。优势种 χ^2 检验结果表明福建省短绒野大豆与烟豆、酢浆草表现为显著负关联($P<0.05$)(表 4)，与其余物种的关联性均表现出不显著，说明目前的福建短绒野大豆群落中大多数植物物种为独立分布，对环境要求也不相同，这与总体联结性结果一致。由于所调查的广东省群落每个样方中均有短绒野大豆，因此无法计算短绒野大豆与其他优势种的 χ^2 检验结果，这与张忠华^[36]等人对青刚栎群落的研究结果相似。

种间联结系数高表示种对间相伴随出现的几率较大，联结程度较高，共同出现百分率(*Jaccard* 指数, *JI*) 可用来表示种间联结程度的高低。福建省群落优势种种对中有 5 个种对的 *JI* 值大于 0.37 位列第一梯队，分别为：短绒野大豆-鬼针草、短绒野大豆-牛筋草、短绒野大豆-酢浆草、鬼针草-牛筋草、酢浆草-鼠曲草，其中短绒野大豆-鬼针草的 *JI* 值最大(0.495)(图 3)。广东省群落中，只有短绒野大豆和鬼针草、狗牙根、白茅等 3 个种对的 *Jaccard* 指数较大($JI>0.37$)，其中短绒野大豆-鬼针草的 *JI* 值在两省所有优势种种对中为最大(0.719)。此外，福建省群落 $JI=0$ 的种对数为 79 对(占 26.33%)，广东省达到了 108 对(占 33.23%)，由此可见，广东省群落优势种种间联结差异更大，群落结构的松散程度更高，而福建省大部分优势种均存在一定的种间联结性，其物种间联系更紧密。



图中数字为物种编号，见表 1、表 2

The numbers in the figure are species numbers. See Table 1 and table 2 for details

图 3 两省短绒野大豆群落优势种 Jaccard 指数(JI)半矩阵图

Fig. 3 Semi-matrix diagram of Jaccard index(JI) of dominant species in *G. tomentella* communities in Fujian and Guangdong provinces

2. 4. 3 群落优势种种间相关性 由 Pearson 相关检验结果可知(表 4)，福建省群落中只有假臭草与短绒野大豆表现出极显著正相关($P < 0.001$)；而广东省群落存在 3 个物种(链荚豆、丁葵草和三点金)与短绒野大豆极显著正相关($P < 0.001$)。福建、广东优势种种对的正负相关比为 0.382、0.310(表 5)，大部分种对均为不显著负相关，与 χ^2 检验结果、总体关联性结果基本一致。Spearman 秩相关检验考虑到了物种数量的秩，福建省群落中 Spearman 秩相关结果表明短绒野大豆与烟豆、红茅草表现为极显著负相关($P < 0.01$) (表 4)，与天蓝苜蓿表现为显著负相关($P < 0.05$)；广东省群落短绒野大豆与鬼针草、三点金表现为显著正相关($P < 0.05$)，与鼠尾粟表现为极显著正相关($P < 0.01$)。两省优势种种对的正负相关比为 0.695、0.720(表 5)，大部分种对均表现为不显著负相关，显著正相关的种对数远多于显著负相关种对数。这与总体关联性结果和 Pearson 相关检验结果基本一致，表明此群落松散，大部分种对间关系相对独立，各物种间尚未出现激烈竞争，两省短绒野大豆群落均处于不稳定的演替初级阶段^[37]。

表 4 两省短绒野大豆群落优势种 χ^2 检验结果及相关系数

Table 4 χ^2 Test results and correlation coefficients of dominant species in Fujian and Guangdong provinces

物种(福建) Species(Fujian)	χ^2 检验 χ^2 Test	Pearson	Spearman	物种(广东) Species(Guangdong)	Pearson	Spearman
鬼针草 <i>Bidens pilosa</i>	+	- 0.033	- 0.046	鬼针草 <i>Bidens pilosa</i>	- 0.052	0.188*
牛筋草 <i>Eleusine indica</i>	+	- 0.066	- 0.044	狗牙根 <i>Cynodon dactylon</i>	0.057	0.071
酢浆草 <i>Oxalis corniculata</i>	-*	- 0.061	- 0.042	白茅 <i>Imperata cylindrica</i>	- 0.107	- 0.060
苦苣菜 <i>Sonchus oleraceus</i>	-	- 0.081	- 0.121	假臭草 <i>Praxelis clematidea</i>	- 0.053	- 0.006
狗牙根 <i>Cynodon dactylon</i>	+	- 0.054	0.096	牛筋草 <i>Eleusine indica</i>	- 0.023	0.069
鼠曲草 <i>Pseudognaphalium affine</i>	+	- 0.064	- 0.016	香附子 <i>Cyperus rotundus</i>	0.025	0.066
小蓬草 <i>Conyza canadensis</i>	-	0.163	- 0.141	链荚豆 <i>Alysicarpus vaginalis</i>	0.464***	0.102
烟豆 <i>Glycine tabacina</i>	-*	- 0.117	- 0.445***	蛇婆子 <i>Waltheria indica</i>	- 0.045	0.032
蓝色琉璃繁缕 <i>Lysimachia foemina</i>	-	- 0.025	0.025	红茅草 <i>Rhynchelytrum repens</i>	- 0.066	- 0.055
香附子 <i>Cyperus rotundus</i>	+	- 0.056	0.064	丁葵草 <i>Zornia gibbosa</i>	0.449***	0.054
红茅草 <i>Rhynchelytrum repens</i>	-	- 0.103	- 0.267**	海边月见草 <i>Oenothera drummondii</i>	- 0.033	- 0.141
海边月见草 <i>Oenothera drummondii</i>	-	0.010	0.162	茅莓 <i>Rubus parvifolius</i>	0.052	0.099
天蓝苜蓿 <i>Medicago lupulina</i>	-	- 0.106	- 0.217*	菟丝子 <i>Cuscuta chinensis</i>	- 0.071	- 0.097
野豌豆 <i>Vicia sativa</i>	-	0.068	0.080	三点金 <i>Grona triflora</i>	0.461***	0.199*

豨薟 <i>Sigesbeckia orientalis</i>	+	0.031	0.131	小蓬草 <i>Conyza canadensis</i>	0.018	0.100
假臭草 <i>Praxelis clematidea</i>	+	0.421***	0.081	木蓝 <i>Indigofera tinctoria</i> Linn	- 0.009	- 0.067
链荚豆 <i>Alysicarpus vaginalis</i>	-	- 0.055	- 0.056	假地豆 <i>Desmodium heterocarpon</i>	- 0.025	- 0.019
龙葵 <i>Solanum nigrum</i>	-	- 0.028	- 0.144	芒 <i>Miscanthus sinensis</i>	0.017	- 0.027
白茅 <i>Imperata cylindrica</i>	+	0.057	0.044	鸡矢藤 <i>Paederia scandens</i>	- 0.030	0.015
黄花稔 <i>Sida acuta</i>	+	- 0.044	- 0.045	墨苜蓿 <i>Richardia scabra</i>	- 0.022	0.070
黄茅草 <i>Heteropogon contortus</i>	+	0.035	0.031	硬毛木蓝 <i>Indigofera hirsuta</i>	- 0.008	0.028
地肤 <i>Kochia scoparia</i>	-	- 0.061	- 0.146	丰花草 <i>Borreria stricta</i>	0.009	0.071
墨苜蓿 <i>Richardia scabra</i>	+	- 0.056	- 0.106	阔叶丰花草 <i>Spermacoce alata</i>	- 0.046	- 0.025
茅莓 <i>Rubus parvifolius</i>	+	- 0.052	0.015	金丝草 <i>Pogonatherum crinitum</i>	0.024	0.076
				鼠尾粟 <i>Sporobolus fertilis</i>	0.082	0.224**

+: 正联结; -: 负联结; *: $P<0.05$; **: $P<0.01$; ***: $P<0.001$

+: Positive association; -: Negative association; *: $P<0.05$; **: $P<0.01$; ***: $P<0.001$

表 5 闽粤两省短绒野大豆群落优势种相关系数比较

Table 5 Comparison of correlation coefficients between dominant species in *G. tomentella* communities in Fujian and Guangdong provinces

地区 Area	相关类型 Type of correla-tion	正相关 Positive correlation		负相关 Negative correlation		正负相关比 Positive negative correlation ratio
		极显著+显著 Extremely significant+significant	不显著 Not significant	极显著+显著 Extremely significant+significant	不显著 Not significant	
福建	Pearson	14+5 (6.33)	64 (21.33)	0+0	217 (72.33)	0.382
Fujian	Spearman	21+11 (10.67)	91 (30.33)	4+13 (5.67)	160 (53.55)	0.695
广东	Pearson	12+5 (5.23)	60 (18.46)	0+0	248 (76.31)	0.310
Guangdong	Spearman	10+12 (6.77)	114 (35.08)	3+5 (2.46)	181 (55.69)	0.720

括号内数据为占比百分率

The data in parentheses represents percentage

3 讨论

3.1 闽粤短绒野大豆群落不稳定状态的可能原因

本研究的结果显示福建省和广东省短绒野大豆群落中的多数种对均为负相关, 说明物种间的生态需求不一致, 群落均处于不稳定状态。在这些处于不稳定状态的群落中, 对短绒野大豆生存产生危害的除了物种间(如灌木、木质化程度高或植株较高的草本植物、藤本植物)竞争与排斥的内部因素外, 还有外部因素影响。刘菊红等的研究表明, 过度放牧不仅会导致物种间联结性和群落稳定性下降^[38], 还会降低群落内物种多样性^[39]。本研究通过实地考察看到, 东南沿海短绒野大豆分布区域未有过度放牧现象, 但也不能否认放牧对该种群造成的影响; 此外, 危害短绒野大豆种群的外部因素还包括除草剂的滥施、海岸开发(如旅游区、工厂、港口、道路等)建设等人为干扰, 不仅直接或间接危害短绒野大豆的物种生存, 还使得群落中其他大部分物种的生存受到影响。

3.2 两种多年生 *Glycine* 亚属物种呈负相关

本文研究的短绒野大豆和福建省的烟豆是 *Glycine* 亚属中唯一分布在中国的两个物种, 研究它们的种间关系有助于制定 *Glycine* 亚属相应的野外保护对策。野外实地调查发现, 短绒野大豆和烟豆在福建海岸分布的生态环境十分相似, 具有基本一致的生态要求与适应性(耐盐耐碱耐瘠薄), 但烟豆在粗质土壤上更常见,

而短绒野大豆在粗质砂壤和细质砂壤上均有较多分布。多数学者认为，群落中两个物种的生态位重叠值越大，它们的资源竞争也越强^[40]。物种种间的正相关关系说明它们具有相同的环境及资源需求，种间负相关关系说明它们具有不同的环境及资源需求^[17]，这种负相关关系，体现了物种间的排斥性，它们的生态位重叠值也较小，对资源的竞争也较弱^[41]。本研究中，短绒野大豆和烟豆的 χ^2 检验和 Spearman 秩相关分析结果均为显著负相关(表 4)，且生态位重叠值较小(仅有 0.079，表 1)，因此，影响它们种间关联的因素并非是“对不同环境及资源的需求”，可能是因为其他机制，具体原因待深入研究。

3.3 未来短绒野大豆种群保护对策

短绒野大豆与多数优势种的生态位重叠值较高(表 1、表 2)，这些优势种对短绒野大豆有潜在的竞争威胁。同时，实地调查发现某些优势种对短绒野大豆的威胁较小，如福建省的酢浆草，虽然其与短绒野大豆的重叠值较高(0.166)，但其株高较矮、生物量较小，对短绒野大豆和群落其他物种的竞争相对较弱。

短绒野大豆是喜阳不耐阴的多年生物种，拥有粗而深的主根系，地上部枝条具有较弱的缠绕性，大多都匍匐于地面生长。野外调查中发现，在冠层超过 1 米的茂密灌草丛群落中很难找到短绒野大豆，此外，由于当地群众清理墓地祭祖习惯的间接保护，分布于两省墓地周边的短绒野大豆群体相对稳定且生长繁茂；海岸村庄搬迁后的空地上出现了大量的短绒野大豆新生群落；每年春天短绒野大豆在野外多数群落繁茂生长。这些现象结合本研究的结果，即短绒野大豆群落的不稳定状态和种群结构的松散性，我们推测，短绒野大豆在株高较小且遮蔽较弱的群落中生长得更好。

因此，可以通过人为干预保护野外群落中的短绒野大豆，控制群落中其它伴生植物种群过度生长。如人工割除短绒野大豆群落内高于地面约 10cm 以上的杂草，不使用化学药剂，保留短绒野大豆的根系，这样可以相对持久地维持短绒野大豆的种群数量和遗传多样性水平。

4 结论

本研究获得如下结论：(1)福建省主要优势种为鼠曲草、鬼针草、狗牙根和牛筋草，广东省为鬼针草、白茅、狗牙根和短绒野大豆，两省短绒野大豆群落植物种类构成有极大差异，两省群落存在较大的生态异质性，相较于广东省，福建省的群落结构更为紧密，物种种间关联程度更高。(2)两省短绒野大豆群落尚未有稳定的搭配结构，群落中绝大多数物种种对呈不显著负相关，物种相对独立性较强，物种间仍处于相互竞争与排斥状态，群落内植物对资源需求有较大的差异性，易出现波动。(3)闽粤两省短绒野大豆群落具有最大生态位重叠值的物种完全不同，同一物种在不同的生态环境下其生态位宽度、与另一物种的生态位重叠值均会发生适应性变化。

参考文献

- [1] Wang X D, Li X H, Zhang Z W, Wang K J. Genetic diversity and genetic structure of natural populations in an extremely narrowly distributed perennial species *Glycine tabacina* (Labill.) Benth. on the southeast islands in China. *Genetic Resources and Crop Evolution*, 2019a, 66:989-1008.
- [2] Wang X D, Li X H, Zhang Z W, Wang K J. Characterization of genetic diversity and structures in natural *Glycine tomentella* populations on the southeast islands of China. *Genetic resources and crop evolution*, 2019b, 66: 47-59.
- [3] Zhang Z W, Li X H, Wang X D, Wang K J. Discovering adventitious roots in *Glycine tomentella* Hayata: lack of adventitious roots as a morphological and taxonomic species indicator is worth considering. *Genetic Resources and Crop Evolution*, 2020, 67: 1345-1350.
- [4] Wen L, Yuan C, Herman T K, Hartman G L. Accessions of perennial *Glycine* species with resistance to multiple types of soybean cyst nematode (*Heterodera glycines*). *Plant disease*, 2017, 101(7): 1201-1206.
- [5] Herman T K, Han J, Singh R J, Domier L L, Hartman G L. Evaluation of wild perennial *Glycine* species for resistance to soybean cyst nematode and soybean rust. *Plant breeding*, 2020, 139(5): 923-931.
- [6] Kao W Y, Tsai T T. Tropic leaf movements, photosynthetic gas exchange, leaf $\delta^{13}C$ and chlorophyll a fluorescence of three soybean species in response to water availability. *Plant, Cell & Environment*, 1998, 21(10):1055-1062.
- [7] Pantalone V R, Kenworthy W J, Slaughter L H, James B R. Chloride tolerance in soybean and perennial *Glycine* accessions. *Euphytica*, 1997, 97: 235-239.
- [8] Kao W Y, Tsai T T, Tsai H C, Shih C N. Response of three *Glycine* species to salt stress. *Environmental and Experimental Botany*, 2006, 56(1): 120-125.
- [9] Lenis J M, Ellersieck M, Blevins D G, Slepner D A, Nguyen H T, Dunn D, Lee J D, Shannon J G. Differences in ion accumulation and salt tolerance among *Glycine* accessions. *Journal of Agronomy and Crop Science*, 2011, 197(4): 302-310.
- [10] Singh R J, Kollipara K P, Hymowitz T. Monosomic alien addition lines derived from *Glycine max* (L.) Merr. and *G. tomentella* Hayata: production, characterization, and breeding behavior. *Crop science*, 1998, 38(6):1483-1489.
- [11] Singh R J, Nelson R L. Intersubgeneric hybridization between *Glycine max* and *G. tomentella*: production of F₁, amphidiploid, BC₁, BC₂, BC₃, and fertile soybean plants. *Theoretical and applied genetics*, 2015, 128:1117-1136.
- [12] Shamim M J, Tanaka Y, Sakoda K, Shiraiwa T, Nelson R L. Physiological analysis of leaf photosynthesis of backcross-derived progenies from soybean (*Glycine max* (L.) Merrill) and *G. tomentella* Hayata. *Plant Production Science*, 2021, 24(1): 109-117.
- [13] 刘志胜, 李里特, 辰巴英三. 大豆异黄酮及其生理功能研究进展. *食品工业科技*, 2000, (01): 78-80.
- Liu Z S, Li L T, Tatsumi Eizo.. Research progress of soybean isoflavones and their physiological functions. *Science and Technology of Food Industry*, 2000, (1), 78-80.
- [14] 曲嘉, 刘章雄, 李开盛, 邱丽娟, 汤楠, 常汝镇, 曹越平. 多年生野生大豆的生物学性状及叶片中大豆苷元和染料木素含量分析. *大豆科学*, 2008, 27(6), 949-954.

- Qu J, Liu Z X, Li K S, Qiu L J, Tang N, Chang R Z, Cao Y P. The biological characteristics of perennial wild soybean and the contents of daidzein and genistein in leaves were analyzed. *Soybean science*, 2008, 27(6), 949-954.
- [15] Lin S J, Lay H L, Wu S T, Thseng F S. Contents of certain isoflavones in *Glycine dolichocarpa*, *G. tabacina* and *G. tomentella* collected in Taiwan. *Journal of Food and Drug Analysis*, 2005, 13(3): 4.
- [16] 王克晶, 张正伟, 李向华. 我国大豆属多年生种遗传资源研究. *中国种业*, 2023, (12): 67-75.
Wang K J, Zhang Z W, Li X H. Studies on Perennial Species Genetic Resources of Chinese Genus Soybean (*Glycine* Willd.). *China Seed Industry*, 2023, (12): 67-75.
- [17] 吴东丽, 张金屯, 王春乙, 薛红喜. 野生大豆群落种群空间分布特性. *生态学杂志*, 2008, 27(08):1290-1295.
Wu D L, Zhang J T, Wang C Y, Xue H X. Spatial distribution characteristics of species populations in *Glycine soja* community. *Chinese Journal of Ecology*, 2008, 27(8), 1290-1295.
- [18] 吴东丽, 张金屯, 王春乙, 薛红喜. 北京地区野生大豆种群及群落的分布格局. *草业科学*, 2009a, 26(03): 16-21.
Wu D L, Zhang J T, Wang C Y, Xue H X. Study on the distribution pattern of population and community of national protected *Glycine soja* in Beijing region. *Pratacultural Science*, 2009a, 26(03): 16-21.
- [19] 吴东丽, 张金屯, 王春乙, 薛红喜. 野生大豆群落主要种群生态位特征研究. *草地学报*, 2009b, 17(02):166-173.
Wu D L, Zhang J T, Wang C Y, Xue H X. Niche Characteristic of Dominant Species in the National Protected Plant, *Glycine soja* Sieb. et Zucc. Community. *Acta Agrestia Sinica*, 2009b, 17(02):166-173.
- [20] 吴东丽, 张金屯, 王春乙, 薛红喜. 保护植物野生大豆群落不同物种间的生态关系分析. *应用与环境生物学报*, 2009c, 15(05): 638-644.
Wu D L, Zhang J T, Wang C Y, Xue H X. Ecological Relationships Among Species in Communities of A Protected Plant *Glycine soja* in Beijing, China. *Chinese Journal of Applied and Environmental Biology*, 2009c, 15(05): 638-644.
- [21] 钱吉, 王玉虹, 郑师章, 毛裕民. 烟豆小种群的 RAPD 研究. *遗传*, 2003, 25(3): 314-316.
Qian J, Ma Y H, Zheng S Z, Mao Y M. RAPD Study of Populations of *Glycine tabacina*. *Hereditas(Beijing)*, 2003, 25(3): 314-316.
- [22] 陈丽丽. 东南沿海部分地区烟豆和短绒野大豆遗传多样性分析. 吉林:延边大学, 2013.
Chen L L. Genetic Diversity of *G. tabacina* and *G. tomentella* from Part of Southeast Coastal Areas in China. Jilin: Yanbian University, 2013.
- [23] Oksanen J, Simpson G, Blanchet F, Kindt R, Legendre P, Minchin P, O'Hara R, Solymos P, Stevens M, Szoecs E, Wagner H, Barbour M, Bedward M, Bolker B, Borcard D, Carvalho G, Chirico M, De Caceres M, Durand S, Evangelista H, FitzJohn R, Friendly M, Furneaux B, Hannigan G, Hill M, Lahti L, McGlenn D, Ouellette M, Ribeiro Cunha E, Smith T, Stier A, Ter Braak C, Weedon J. *_vegan: Community Ecology Package_*. R package version 2.6-4. (2024-8-28)[2024-11-27]. <https://CRAN.R-project.org/package=vegan>.
- [24] Zhang J L. *_spaa: SPecies Association Analysis_*. R package version 0.2.2. 2016. (2016-06-09)[2024-11-27]. <https://CRAN.R-project.org/package=spaa>.
- [25] William R. *_psych: Procedures for Psychological, Psychometric, and Personality Research_*. Northwestern University, Evanston, Illinois. R package version 2.3.6. 2023. (2024-06-27)[2024-11-27]. <https://CRAN.R-project.org/package=psych>.

- [26] Schluter, Dolph. A variance test for detecting species associations, with some example applications. *Ecology*, 1984, 65(3): 998-1005.
- [27] 张金屯. 数量生态学, 1 版. 北京: 科学出版社, 2004.
- Zhang J T. *Quantitative Ecology*, 1st edn. Beijing: Science Press, 2004.
- [28] 卢炜丽. 重庆四面山植物群落结构及物种多样性研究. 北京:北京林业大学, 2009.
- Lu W L. *Studies on Forest Plant Community Structure and Biodiversity in Chongqing Simian Mountain*. Beijing: Beijing Forestry University, 2004.
- [29] 刘润红, 姜勇, 常斌, 李娇凤, 荣春艳, 梁士楚, 杨瑞岸, 刘星童, 曾惠帆, 苏秀丽, 袁海莹, 傅桂焕, 吴燕慧. 漓江河岸带枫杨群落主要木本植物种间联结与相关分析. *生态学报*, 2018, 38(19): 6881-6893.
- Liu R H, Jiang Y, Chang B, Li J F, Rong C Y, Liang S C, Yang R A, Liu X T, Zeng H F, Su X L, Yuan H Y, Fu G H, Wu Y H. Interspecific associations and correlations among the main woody plants in a *Pterocarya stenoptera* community in a riparian zone of Lijiang River, Guilin, Southwest China. *Acta Ecologica Sinica*, 2018, 38(19): 6881-6893.
- [30] 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.
- Liu R H, Chen L, Tu H R, Liang S C, Jiang Y, Li Y J, Huang D L, Nong L J. Niche and interspecific association of main species in shrub layer of *Cyclobalanopsis glauca* community in karst hills of Guilin, southwest China. *Acta Ecologica Sinica*, 2020, 40(6):2057-2071.
- [31] Levins R. *Evolution in changing environments: some theoretical explorations*:2nd edn[M]. Princeton: Princeton University Press, 1968.
- [32] Pianka E R. The structure of lizard communities. *Annual review of ecology and systematics*, 1973, 4(1): 53-74.
- [33] 汪殿蓓, 暨淑仪, 陈飞鹏. 植物群落物种多样性研究综述. *生态学杂志*, 2001, 20(4), 55-60.
- Wang D B, Ji S Y, Chen F P. A Review on the Species Diversity of Plant Community. *Chinese Journal of Ecology*, 2001, 20(4), 55-60.
- [34] 王刚, 赵松岭, 张鹏云, 陈庆诚.关于生态位定义的探讨及生态位重叠计测公式改进的研究. *生态学报*, 1984, (02): 119-127.
- Wang G, Zhao S L, Zhang P Y, Chen Q C. Discussion on the definition of niche and the improvement of niche overlap measurement formula. *Acta Ecologica Sinica*, 1984, (02):119-127.
- [35] 谢飞, 郭星, 闫倩倩, 杨帆, 何丽娟. 白龙江濒危树种大果青杆优势种群种间关系. *中南林业科技大学学报*, 2023, (06):105-115.
- Xie F, Guo X, Yan Q Q, Yang F, He L J. Interspecific correlations among dominant populations of the natural forest of *Picea neveitchii* in the Bailongjiang River. *Journal of Central South University of Forestry & Technology*, 2023, (06):105-115.
- [36] 张忠华, 胡刚. 喀斯特山地青冈栎群落优势种的种间关系分析. *生态环境学报*, 2011, 20(9):1209-1213.
- Zhang Z H, Hu G. Interspecific relationships of dominant species in *Cyclobalanopsis glauca* community in karst mountain area. *Ecology and Environmental Sciences*, 2011, 20(9): 1209-1213.
- [37] 于飞, 王洋, 张岗岗, 马剑敏. 游荡型黄河滩涂植物群落多样性及种间联结性. *生态学报*, 2023, (06): 2429-2439.
- Yu F, Wang Y, Zhang G G, Ma J M. Plant diversity and interspecific associations of different floodplains in the wandering Yellow River. *Acta Ecologica Sinica*, 2023, (06):2429-2439.

- [38] 刘菊红, 王忠武, 韩国栋. 重度放牧对荒漠草原主要植物种间关系及群落稳定性的影响. 生态学杂志, 2019, 38(09): 2595-2602.
- Liu J H, Wang Z W, Han G D. Effects of heavy grazing on the interspecific relationship of main plant species and community stability in a desert steppe. Chinese Journal of Ecology, 2019, 38(09): 2595-2602.
- [39] 刘菊红, 王忠武, 郝敦元, 李江文, 韩国栋. 重牧对荒漠草原主要植物种和功能群组织力的影响. 中国草地学报, 2018, 40(05): 85-92.
- Liu J H, Wang Z W, Hao C Y, Li J W, Han G D. Effect of Heavy Grazing on the Organization Ability of Main Plant Species and Functional Groups in a Desert Steppe. Chinese Journal of Grassland, 2018, 40(05): 85-92.
- [40] Pastore A I, Barabás G, Bimler M D, Mayfield M M, Miller T E. The evolution of niche overlap and competitive differences. Nature Ecology & Evolution, 2021, 5(3):330-337.
- [41] 吴凯婷, 张勇, 马燕丹, 郑秋竹, 岳海涛, 王晓蓉, 梁克敏, 曾昊. 若尔盖不同生境植物多样性与植物竞争强度和生态位重叠度的关系. 生态学报, 2023, 43(24):10334-10344.
- Wu K T, Zhang Y, Ma Y D, Zheng Q Z, Yue H T, Wang X R, Liang K M, Zeng H. Relationship between Plant Diversity and Plant Competition Intensity and Niche Overlap across a Habitat Gradient in Zoige. Acta Ecologica Sinica, 2023, 43(24):10334-10344.