

# 泥石流频发流域失稳性坡面 主要植物种间关联性\*

罗清虎<sup>1,2</sup> 孙凡<sup>1,2</sup> 崔羽<sup>1,2</sup> 吴建召<sup>1,2</sup> 林勇明<sup>1,2\*\*</sup> 王道杰<sup>3</sup> 吴承祯<sup>1,4</sup>

<sup>1</sup>福建农林大学林学院 福州 350002

<sup>2</sup>福建省高校森林生态系统过程与经营重点实验室 福州 350002

<sup>3</sup>中国科学院水利部成都山地灾害与环境研究所 成都 610041

<sup>4</sup>武夷学院生态与资源工程学院 南平 354300

**摘要** 为揭示生态环境脆弱的泥石流频发流域植被群落结构特征及物种间关系,在样方调查的基础上,基于 $2 \times 2$ 联列表,使用方差分析、 $\chi^2$ 检验、Jaccard指数、Pearson相关系数和 Spearman秩相关系数检验,研究失稳性坡面稳定区、失稳区、堆积区的主要植物种间关联性。方差分析检验显示:稳定区与堆积区各45个种对整体上均表现显著负关联,失稳区45个种对整体表现为不显著负关联,趋于独立分布。不同检验结果显示: $\chi^2$ 检验的稳定区、失稳区、堆积区种对间显著联结的分别有1对、4对、4对,种间正、负关联的种对数量比例分别为0.55、0.67、0.67。Pearson相关分析检验的稳定区、失稳区、堆积区种对间显著联结的分别有8对、5对、5对,种间正、负关联的种对数量比例分别为0.36、0.45、0.45。Spearman秩相关分析检验的稳定区、失稳区、堆积区种对间显著联结的分别有10对、6对、9对,种间正、负关联的种对数量比例分别为0.5、0.55、0.6。各检验结果总体上具有相似性,但相互之间也有差异,在3个分区的各45个种对中,都是负关联种对数大于正关联种对数,大多数物种呈独立性分布且种间关系不显著。上述研究表明失稳性坡面整体上植物群落还不稳定,泥石流频发流域生态脆弱区的物种间关系易受环境的干扰;因此在植被恢复过程中应根据种间联结关系,合理选择配置物种,以促进群落结构发展与生态环境改善。(图4表3参40)

**关键词** 群落;泥石流频发流域;失稳性坡面;种间关联

CLC Q948.12

## Interspecific association among main plant species in the unstable slope with high-frequency debris flow\*

LUO Qinghu<sup>1,2</sup>, SUN Fan<sup>1,2</sup>, CUI Yu<sup>1,2</sup>, WU Jianzhao<sup>1,2</sup>, LIN Yongming<sup>1,2\*\*</sup>, WANG Daojie<sup>3</sup> & WU Chengzhen<sup>1,4</sup>

<sup>1</sup> College of Forestry, Fujian Agriculture and Forestry University, Fuzhou 350002, China

<sup>2</sup> Key Laboratory for Forest Ecosystem Process and Management of Fujian Province, Fuzhou 350002, China

<sup>3</sup> Institute of Mountain Hazards and Environment, Chinese Academy of Sciences and Ministry of Water Conservancy, Chengdu 610041, China

<sup>4</sup> College of Ecology and Resources Engineering, Wuyi University, Nanping 354300, China

**Abstract** To determine the characteristics of vegetation community structure and the relationship between species in the frequent watersheds of debris flow in fragile ecological environments, based on sample survey and  $2 \times 2$  joint table techniques, we used analysis of variance test,  $\chi^2$  test, Jaccard index, Pearson correlation coefficient, and Spearman's rank correlation coefficient test to study the main plant species correlations in the stable zone, instable zone, and deposit zone of the unstable slope. The analysis of variance test showed that all 45 species pairs had a significant negative correlation in the stable zone and instable zone, whereas there was no significant negative correlation in the deposit zone, which showed that the species had an independent distribution trend. The results from the different tests showed that there were 1 pair, 4 pairs, and 4 pairs from the stable zone, instable zone, and deposit zone, respectively, which had significant interspecific association under the  $\chi^2$  test and the ratios of positive correlation pairs to negative correlation pairs were 0.55, 0.67, and 0.67 in the stable zone, instable zone, and deposit zone, respectively. There were 8 pairs, 5 pairs, and 5 pairs from the stable zone, instable zone, and deposit zone, respectively, which had significant interspecific association from the Pearson correlation analysis test, and the ratios of positive

收稿日期 Received: 2017-11-03 接受日期 Accepted: 2017-12-13

\*国家自然科学基金项目(41790434)、福建农林大学杰出青年科研人才计划项目(xjq201716)和福建农林大学科技创新专项基金项目(CXZX2017111, CXZX2017283)资助 Supported by the National Natural Science Foundation of China (41790434), the Outstanding Young Scientific Research Project of Fujian Agriculture and Forestry University (xjq201716) and the Scientific and Technological Innovation Foundation of Fujian Agriculture and Forestry University (CXZX2017111, CXZX2017283)

\*\*通讯作者 Corresponding author (E-mail: monkey1422@163.com)

correlation pairs to negative correlation pairs were 0.36, 0.45, and 0.45 in the stable zone, instable zone, and deposit zone, respectively. There were 10 pairs, 6 pairs, and 9 pairs from the stable zone, instable zone, and deposit zone, respectively, which had significant interspecific association from the Spearman's rank correlation analysis test and the ratios of positive correlation pairs to negative correlation pairs were 0.5, 0.55, and 0.6 in the stable zone, instable zone, and deposit zone, respectively. The three test results showed general similarities but there were some differences. Most species pairs did not reach a significant level in the three zones and the number of negatively related species was more than the number of positively related species. In brief, this loose interspecific relationship indicates that the entire plant community was not stable, and the interspecific relationships among species are susceptible to environmental interference in the ecologically fragile areas of the debris flow basin. Therefore, rational selection and configuration of species should be applied to promote community structure development and ecological environmental improvement in vegetation restoration process areas with high-frequency debris flow.

**Keywords** community; area with high-frequency debris flow; unstable slope; interspecific association

种间关联性可量化植物群落生态过程中物种间相互作用的关系,深入了解群落物种的空间分布关系和功能关系,阐明群落不同种群生态位分化或叠加的种间关系,进而确定群落发展某一时段内物种组成和群落结构的稳定性特征<sup>[1]</sup>。因此,植物群落主要物种的种间关系,不仅维系着群落的时空结构,还决定着群落的动态变化过程<sup>[2]</sup>。种间关联研究是群落演替及群落结构稳定性的重要基础,通过种间联结性的测定,结合物种自身生物学特性,对于合理预测群落的发展动态及探究物种分布的环境因子限制性具有重要作用,进而可为保持群落良性发展、保护物种多样性、物种生境可适性判断等提供理论基础<sup>[3-5]</sup>。相对于条件良好的原生生态系统,脆弱生态区退化生态系统受干扰程度严重,其生态恢复过程中植物群落物种间关系复杂,准确判断种间关系是确定植被恢复措施及预测群落发展的前提和基础<sup>[6]</sup>。因此,掌握退化生态系统物种的种间联结性可促进恢复过程中植物配置合理性的再认识及群落结构改良措施的归纳与总结<sup>[7-8]</sup>,具有重要的科学意义。

云南东川蒋家沟流域是典型的干热河谷区,区域内地表起伏大,泥石流频发,石漠化、水土流失严重。干热气候导致河谷山地植被退化,近年来,为促进干热河谷退化山地的植被恢复重建工作,各学者开展了许多工作,主要涉及植被群落特征<sup>[9]</sup>、土壤理化性质<sup>[10]</sup>、土壤养分<sup>[11]</sup>、土壤抗侵蚀性及综合质量评价<sup>[12]</sup>、植物化学计量特征<sup>[13]</sup>等。然而,金沙江干热河谷区老构造错综复杂,新构造活动强烈,流域内存在着大量因滑坡、崩塌等造成的失稳性坡面,导致植被群落正常演替规律失常,功能结构复杂。目前关于干热河谷区泥石流频发流域植被群落物种间关系的研究较少,难以了解该区坡面稳定性对植被群落结构与演替过程的影响效应,不利于合理植被恢复措施的归纳与总结。前人对岷江上游干旱河谷荒坡植被优势种的种间关系研究得出,在对干旱河谷荒坡植被恢复时,需根据不同的环境特征,选择物种时以相近的适应性与生物学特性为指导原则,进行合理搭配<sup>[14]</sup>。因此,研究物种的种间关系,对全面了解群落结构和群落植物种群动态关系、指导生态修复过程中物种的选择与搭配具有重要意义<sup>[15-16]</sup>。因此,我们以泥石流频发流域失稳性坡面主要植物为研究对象,采用种间联结的测定方法,分析研究区主要植物的种间关系,探讨失稳性坡面物种空间分布的生态关系,以期为蒋家沟泥石流频发流域的植被恢复与重建、物种

选择与配置提供理论依据,进而推动脆弱生态系统的生态恢复工作。

## 1 材料与方法

### 1.1 研究区概况

研究区位于云南省昆明市东川区铜都镇绿茂村境内的蒋家沟,地理坐标为103°06'-103°13'E、26°13'-26°17'N,属金沙江一级支流小江流域。流域内地表径流量大,多为侵蚀中山地貌,海拔介于1 042-3 269 m,其中海拔低于1 600 m的区域为典型的干热河谷地带<sup>[17]</sup>。蒋家沟流域多年平均蒸发量远超过平均降雨量,每年5-10月为雨季,降雨量占全年降雨量的80%多,其他月份比较干旱,干湿季节明显;多年平均气温在20℃以上,气温最高达40.9℃,最低为-6.2℃<sup>[18]</sup>。流域内干热河谷区石漠化严重,土壤多为松散砾石堆积而成的初育土。因流域海拔高差大,植被呈现明显的垂直地带性分布,原生植被从低海拔至高海拔依次为稀疏草丛带、针阔混交林带和高山灌丛草甸带<sup>[19]</sup>。该地区新老构造错综复杂,构造活动强烈,加上人为不合理的土地利用,使得泥石流、滑坡、水土流失等自然灾害频繁发生<sup>[20]</sup>。

### 1.2 研究方法

**1.2.1 样方设置和调查** 位于蒋家沟的东川泥石流定位观测站为典型的干热河谷地带,观测站海拔为1 320 m,附近存在大量的失稳性坡面,基于坡面稳定性,经实地考察,选取了观测站附近查菁沟、大凹子沟左侧、大凹子沟右侧坡面设置样地(表1),于2016年8月进行植被调查。根据坡面地形特征,失稳性坡面可划分为3个不同区,其中上坡部位为暂未受滑坡影响的原生草丛(即稳定区),中坡部位为滑坡整体移动且侵蚀强烈的失稳区,下坡部位为滑坡松散固体物质的堆积区。稳定区植被以扭黄茅(*Heteropogon contortus*)、拟金茅(*Eulaliopsis binata*)、清香木(*Pistacia weinmannifolia*)、芒(*Miscanthus sinensis*)、田菁(*Sesbania cannabina*)等植物为主,植被覆盖度在90%-95%之间,其中扭黄茅与拟金茅是干热河谷区常见的优势群落物种;失稳区植物以扭黄茅、拟金茅、荇草(*Arthraxon hispidus*)、锦鸡儿(*Caragana sinica*)、田菁等植物为主,植被覆盖度在56%-63%之间;堆积区植被则以荇草、鬼针草(*Bidens pilosa*)、扭黄茅、豨莶(*Siegesbeckia orientalis*)等植物为主,该区地表裸露,主要

由失稳区的松散物滑落堆积而成, 植被覆盖度在26%-33%之间. 稳定区处于地势较缓的小台地, 坡度要小于失稳区, 堆积区坡度相对较大, 地势陡峭不平. 在每个分区划分一条长30 m、宽10 m的样带, 在样带内设置3个样点, 然后每个样点内随机设置3个1 m × 1 m的小样方, 3个坡面共设置81个的小样方, 其中稳定区、失稳区、堆积区的样方数各为27个, 调查样方内出现植物的物种名、数量、高度、盖度等指标, 样方内植物以草本为主, 出现的少量低矮灌木与草本一并调查. 记录海拔、坡度、坡向等立地因子, 并利用手持 GPS 记录各样本点的经纬度.

**1.2.2 物种重要值计算与优势种的确定** 通过统计各分区每个样方内物种数、高度、多度、盖度, 计算物种重要值, 以重要值大小排序确定优势种. 相对盖度=某一个种的盖度/所有种的盖度之和×100; 相对高度=某一个种的高度/所有种的高度之和×100; 相对多度=某一个种的多度/所有种的多度之和×100; 重要值(IV)=[(相对盖度+相对高度+相对多度)/3]×100%<sup>[21]</sup>. 稳定区27个样方记录植物物种33种, 失稳区27个样方记录植物物种28种, 堆积区27个样方记录植物物种43种, 分别选取各区重要值前10的优势物种进行种间关联和相关性分析(表2).

**1.2.3 物种间总体关联性检验** 多物种间总体关联性以方差比率进行检验, Schluter认为在独立性假设条件下方差比率的期望值VR=1, 若VR<1表示多物种间整体存在负关联关系, VR>1表示多物种间整体存在正关联关系<sup>[22]</sup>. 此外, 利用统计量W检验多物种间整体上关联度显著与否<sup>[23]</sup>.

**1.2.4 种间联结性分析及检验** 采用 $\chi^2$ 检验进行种间联结测定<sup>[24]</sup>,  $\chi^2$ 检验是基于2×2列联表, 将各分区27个标准样方

中10个主要物种出现与否的次数进行统计, 随后转化为10×27的0、1二元数据矩阵, 矩阵中0和1分别代表样方中未出现和出现该物种<sup>[25]</sup>. 根据0、1二元数据矩阵, 统计出a、b、c、d的值<sup>[26]</sup>, 计算 $\chi^2$ 检验值, 进而判断种间联结程度的显著性. 因取样的非连续性, 所以需用Yates的连续校正公式计算非连续性数据 $\chi^2$ , 计算公式为:

$$\chi^2 = \frac{N \left[ |ad - bc| - \frac{1}{2}N \right]^2}{(a+b)(c+d)(a+c)(b+d)}$$

式中, a为2个物种同时出现的样方数, b、c分别为仅有1个样方出现的样方数, d为2个物种均未出现的样方数, N为总样方数.

$\chi^2_{0.55}=3.841$ ,  $\chi^2_{0.51}=6.635$ . 若 $\chi^2 < 3.841$ , 种间无显著关联; 若 $3.841 < \chi^2 < 6.635$ , 种间关联显著; 若 $\chi^2 > 6.635$ , 种间关联极显著. 当 $ad > bc$ 和 $ad < bc$ 时, 分别代表种间存在正关联和负关联, 当 $ad = bc$ 时则代表种间无关联性. 前人研究发现种间中两物种均未出现的样方数较多时, 导致d值偏高, 易引起种间联结程度计算值过高的结果, 因此为避免这种状况, 需采用 Jaccard关联指数( $J_1$ )测定种间联结程度<sup>[27]</sup>, 其计算公式为:

$$J_1 = \frac{a}{a+b+c}$$

**1.2.5 种间相关性测定** 利用3个分区27个样方中出现的10个主要物种重要值组成的数据矩阵, 采用Pearson相关系数检验和Spearman秩相关系数检验<sup>[28]</sup>分别对3个分区内10个物种进行种间关联分析. 其中, Pearson相关系数计算公式为:

表1 样地概况

Table 1 Survey of the sampling plots

失稳性坡面 Unstable slope	坡位 Slope position	经度 Longitude	纬度 Latitude	海拔(h/m) Elevation	坡度( $\alpha^\circ$ ) Slope	盖度(P%) Coverage	坡向 Aspect
查菁沟 Chajing Ditch	稳定区 Stable zone	103°08'01.72" E	26°15'12.57" N	1543	13.4	92.1	S
	失稳区 Instable zone	103°08'02.72" E	26°15'07.16" N	1443	26.9	62.7	S
	堆积区 Deposit zone	103°08'03.45" E	26°15'02.35" N	1383	32.7	32.2	S
大四子沟左坡 The left slope of Daaози Ditch	稳定区 Stable zone	103°08'28.54" E	26°14'19.41" N	1666	18.4	92.2	NE
	失稳区 Instable zone	103°08'24.36" E	26°14'24.04" N	1552	24.7	62.1	NE
	堆积区 Deposit zone	103°08'20.99" E	26°14'27.45" N	1455	32.2	27.6	NE
大四子沟右坡 The right slope of Daaози Ditch	稳定区 Stable zone	103°08'36.23" E	26°14'33.36" N	1525	20.3	94.3	SW
	失稳区 Instable zone	103°08'31.30" E	26°14'31.05" N	1480	25.6	56.4	SW
	堆积区 Deposit zone	103°08'28.02" E	26°14'29.08" N	1461	31.4	28.8	SW

表2 各区重要值前10的优势物种

Table 2 Name and important values of dominant species

序号 Number	稳定区 Stable zone		失稳区 Instable zone		堆积区 Deposit zone	
	种名 Species	重要值 IV	种名 Species	重要值 IV	种名 Species	重要值 IV
1	扭黄茅 <i>Heteropogon contortus</i>	20.99	扭黄茅 <i>Heteropogon contortus</i>	23.38	荩草 <i>Arthraxon hispidus</i>	9.65
2	拟金茅 <i>Eulaliopsis binata</i>	20.46	拟金茅 <i>Eulaliopsis binata</i>	14.59	鬼针草 <i>Bidens pilosa</i>	8.95
3	清香木 <i>Pistacia weinmannifolia</i>	4.56	荩草 <i>Arthraxon hispidus</i>	9.39	扭黄茅 <i>Heteropogon contortus</i>	8.33
4	芒 <i>Miscanthus sinensis</i>	4.33	锦鸡儿 <i>Caragana sinica</i>	5.13	拟金茅 <i>Eulaliopsis binata</i>	4.84
5	田菁 <i>Sesbania cannabina</i>	3.92	田菁 <i>Sesbania cannabina</i>	4.94	豨莶 <i>Siegesbeckia orientalis</i>	4.34
6	黄背草 <i>Themeda japonica</i>	3.65	铁扫帚 <i>Indigofera bungeana</i>	4.52	铁苋菜 <i>Acalypha australis</i>	4.05
7	荩草 <i>Arthraxon hispidus</i>	3.47	胡枝子 <i>Lespedeza bicolor</i>	3.51	爵床 <i>Rostellularia procumbens</i>	4.00
8	波叶山蚂蝗 <i>Desmodium sinuatum</i>	2.88	丛生羊胡子草 <i>Carex rigescens</i>	3.41	牛尾菜 <i>Smilax riparia</i>	3.11
9	铁扫帚 <i>Indigofera bungeana</i>	2.71	堇菜 <i>Viola verecunda</i>	3.21	苎麻 <i>Boehmeria nivea</i>	3.10
10	锦鸡儿 <i>Caragana sinica</i>	2.46	艾 <i>Artemisia argyi</i>	2.85	狼尾草 <i>Pennisetum alopecuroides</i>	2.99

$$r_p(A, B) = \frac{\sum_{j=1}^N (x_{Aj} - \bar{x}_A)(x_{Bj} - \bar{x}_B)}{\sqrt{\sum_{j=1}^N (x_{Aj} - \bar{x}_A)^2 \sum_{j=1}^N (x_{Bj} - \bar{x}_B)^2}}$$

式中,  $r_p(A, B)$ 为Pearson相关系数,  $N$ 为总样方数,  $x_{Aj}$ 与 $x_{Bj}$ 分别为种A和种B在样方 $j$ 中的秩。

在Spearman秩相关系数计算中, 由于本研究中分别将3个区(稳定区、失稳区、堆积区)的重要值前10的植物顺次编秩后, 同一个物种在样方中相同秩次的数量较多, 对计算Spearman秩相关系数会有很大的影响, 因此, 使用校正后的Spearman秩相关系数计算公式<sup>[23, 29]</sup>, 将转换后秩矩阵值代入相关系数公式, 计算出Spearman秩相关系数值。

利用Excel 2013进行数据统计和公式计算。

## 2 结果与分析

### 2.1 各种群在3个分区中的重要值

从物种的重要值看, 在稳定区,  $IV > 20\%$ 的有2个, 扭黄茅处于首位, 重要值为20.99%, 拟金茅次之, 为20.46%, 其余8个物种重要值都在 $2\% < IV < 5\%$ 之间, 且差异较小, 可见, 在稳定区草本群落中扭黄茅与拟金茅占据了绝对优势, 处于较为稳定状态, 其余植物重要值较小, 还未能形成优势种群。在失稳区,  $IV > 20\%$ 和 $10\% < IV < 20\%$ 均仅1个, 其余8个物种重要值介于 $2\% - 10\%$ 之间, 物种仍以扭黄茅占据主要地位, 拟金茅与荩草在受损稳定性差的坡面上也处于较有利地位。在堆积区, 10个主要物种重要值均在 $2\% - 10\%$ 之间, 物种种类丰富, 但均未形成优势种群, 种间竞争与演替的过程中, 物种分布独立。

### 2.2 总体关联性

对表2中各分区10个主要物种间的总体联结性进行计算, 稳定区的 $VR = 0.454$ , 表明稳定区10个物种总体上表现净的负联结。显著性统计量 $W = N \times (VR) = 12.258$ , 查表<sup>[30]</sup>得相应的 $\chi^2$ 值,  $\chi^2_{0.95(27)} = 16.15$ ,  $\chi^2_{0.05(27)} = 40.11$ ,  $W$ 落在 $\chi^2_{0.95(54)}$ 与 $\chi^2_{0.05(54)}$ 之外, 表明稳定区10个物种间总体关联性呈显著负相关, 即10个物种间总体存在不同的及相互排斥的关系<sup>[31]</sup>。失稳区的 $VR = 0.818$ , 表明失稳区10个物种总体上表现净的负联结,  $W = 22.09$ ,  $W$ 落在区间内, 表明失稳区的10个主要物种

间整体关联性不显著, 物种大多数趋于独立分布。堆积区的 $VR = 0.438$ ,  $W = 11.837$ ,  $W$ 落在区间之外, 表现出与稳定区相似的联结特征。

### 2.3 物种种间联结关系

$\chi^2$ 检验值半矩阵图结果显示, 稳定区45个种对中(图1a)有16个种对存在正联结关系, 占总对数的35.56%, 29个种对存在负联结关系, 占总对数的64.44%, 联结正负比为0.552。显著与极显著联结的仅有1对, 为扭黄茅与清香木呈现极显著负联结, 占总对数的2.2%, 其余种对联结均不显著。失稳区45个种对中(图1b)有18个种对存在正联结关系, 占总对数的40%, 27个种对存在负联结关系, 占总对数的60%, 联结正负比为0.667。联结性显著的总共有4对, 占总对数的8.9%, 包括1对呈显著负联结, 1对呈极显著负联结, 2对呈显著正联结。堆积区45个种对中(图1c)正、负联结种对数与失稳区一致, 联结正负比为0.667。联结性显著的也仅有4对, 占总对数的8.9%, 包括1对呈显著负联结关系, 1对呈极显著负联结关系, 2对呈极显著正联结关系。

$\chi^2$ 值可检验种间联结的显著性, 但无法全面反映物种种间的联结关系, 有研究者发现种间联结不显著的种对不足以表明种间就无联结关系<sup>[4]</sup>, 且 $\chi^2$ 检验对于表达种间联结的程度有限, 因此, 需要在 $\chi^2$ 检验的基础上, 结合Jaccard关联度指数分析, 才能较好地表现种间关系<sup>[32]</sup>。Jaccard指数计算结果显示, 在稳定区45个种对中(图2a),  $J_1 = 0$ 的17对, 占总对数的37.78%, 这些种对全部为负关联种对, 这可能是物种对微环境及资源的要求差异造成的;  $0 < J_1 \leq 0.3$ 的20对, 占总对数44.44%,  $0.3 < J_1 \leq 0.6$ 的8对, 占总对数17.78%; 失稳区45个种对中(图2b),  $J_1 = 0$ 的17对, 占总对数的37.78%,  $0 < J_1 \leq 0.3$ 的23对, 占总对数的51.11%,  $0.3 < J_1 \leq 0.6$ 的有5对, 占总对数11.11%; 堆积区45个种对中(图2c),  $J_1 = 0$ 的有18对, 占总对数的40%,  $0 < J_1 \leq 0.3$ 的有24对, 占总对数53.33%,  $0.3 < J_1 \leq 0.6$ 的3对, 占总对数6.67%。总体来看, 各分区物种联结度不高, 种间关联性较弱, 大部分物种间联结松散, 显著与极显著联结的种对, 其Jaccard值也相对较高, 这与 $\chi^2$ 检验结果相似。

### 2.4 物种种间相关关系

$\chi^2$ 检验和种间联结程度分析定性表达了物种种间联结关系, 而对于从物种重要值等角度定量描述物种种间关系不足<sup>[23]</sup>。因此, 为了可以更准确、全面地反映出研究区内主要

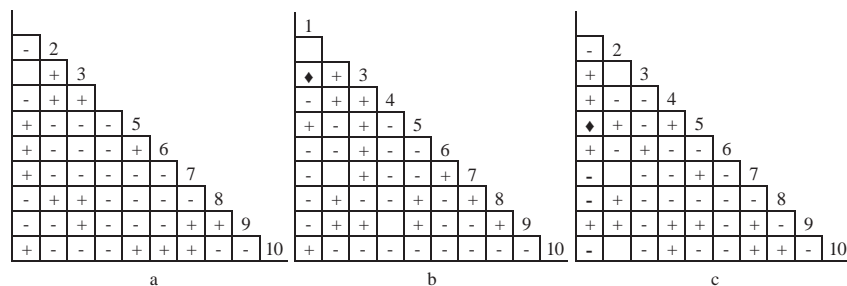


图1 稳定区(a)、失稳区(b)、堆积区(c)种间关联的 $\chi^2$ 半矩阵图。种序号定义见表2。◆: 极显著正相关; •: 显著正相关; +: 不显著正相关; ♥: 极显著负相关; ◆: 显著负相关; -: 不显著负相关。

Fig. 1 Semi-matrices in  $\chi^2$  test of interspecific association correction in the stable zone (a), instable zone (b) and deposit zone (c). Species numbers are defined in Table 2. ◆: Significant positive relation at 0.01 level; •: Significant positive relation at 0.05 level; +: Not significant positive relation; ♥: Significant negative relation at 0.01 level; ◆: Significant negative relation at 0.05 level; -: Not significant negative relation.

植物种间的相互关联性,本研究在运用 $\chi^2$ 检验和Jaccard种间关联度指数的同时,还使用样地不同分区10种主要植物的重要值对应的27个样方分布与转移后的数据矩阵,分别计算Pearson相关系数和Spearman秩相关系数,进而配合 $\chi^2$ 检验和Jaccard种间关联度指数检验物种间关系。

Pearson相关系数分析结果表明,稳定区10个主要物种45个种对中(图3a),种间存在显著相关关系的有8对,占总种对数的17.78%,包括种间显著正相关和显著负相关各4对,结果远高于 $\chi^2$ 检验,与Jaccard指数检测结果一致。其余37对种间关系松散,种间相关系数为正值有12对,占26.67%,负值的有33对,占73.33%,正负比为0.363。失稳区的45个种对中(图3b),种间存在显著相关关系的有5对,占总种对数的11.11%,包括种间显著正相关2对,显著负相关3对。种间相关系数为正值有14对,占31.11%,负值的有31对,占68.89%,正

负比为0.452。堆积区10个主要物种45个种对中(图3c),种间存在显著相关关系的也是5对,显著率与失稳区相同,包括种间显著正相关3对,显著负相关2对。种间相关系数正负比与失稳区一致。

Spearman秩相关分析结果表明,稳定区有10对种间显著相关(图4a),占总种对数的22.22%,其中包括4对种间显著正相关,6对种间显著负相关。种间相关系数为正值有15对,占33.33%,负值的有30对,占66.67%。失稳区有6对种间显著相关(图4b),占总种对数的13.33%,其中包括2对种间显著正相关,4对种间显著负相关。种间相关系数为正值有16对,占35.55%,负值的有29对,占64.45%。堆积区有9对种间显著相关(图4c),占总种对数的20%,其中包括3对种间显著正相关,6对种间显著负相关;正相关和负相关的种对分别为17对和28对,占比分别为37.78%和62.22%。

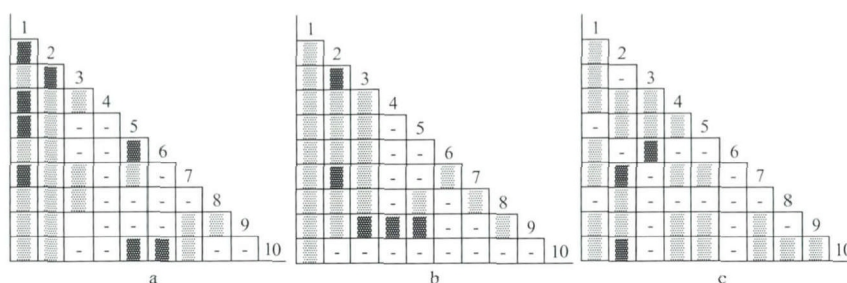


图2 稳定区(a)、失稳区(b)、堆积区(c)主要种对Jaccard指数半矩阵图。种序号定义见表2。

Fig. 2 Semi-matrices of interspecific Jaccard index in the stable zone (a), instable zone (b) and deposit zone (c). Species numbers are defined in Table 2.

:-  $J_1=0$ ; ▨  $0 < J_1 \leq 0.3$ ; ▩  $0.3 < J_1 \leq 0.6$ .

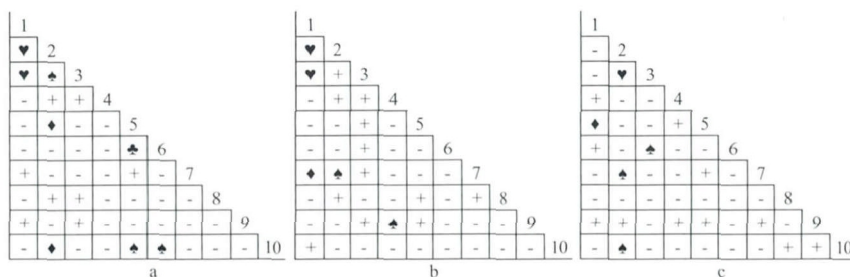


图3 稳定区(a)、失稳区(b)、堆积区(c)主要种对Pearson相关系数半矩阵图。种序号定义见表2。♠: 极显著正相关; ♣: 显著正相关; +: 不显著正相关; ♥: 极显著负相关; ♦: 显著负相关; -: 不显著负相关。

Fig. 3 Semi-matrices of interspecific Pearson correlation coefficients in the stable zone (a), instable zone (b) and deposit zone (c). Species numbers are defined in Table 2. ♠: Significant positive relation at 0.01 level; ♣: Significant positive relation at 0.05 level; +: Not significant positive relation; ♥: Significant negative relation at 0.01 level; ♦: Significant negative relation at 0.05 level; -: Not significant negative relation.

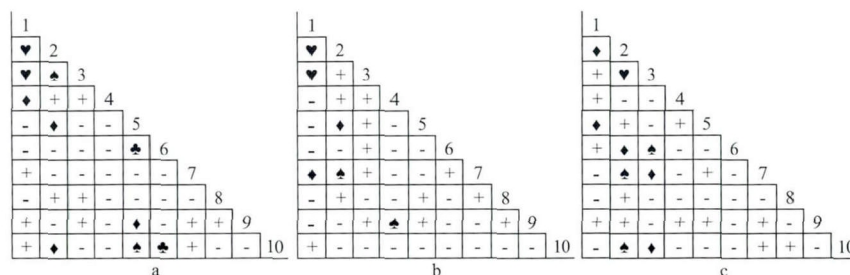


图4 稳定区(a)、失稳区(b)、堆积区(c)主要种对Spearman秩相关系数半矩阵图。种序号定义见表2。♠: 极显著正相关; ♣: 显著正相关; +: 不显著正相关; ♥: 极显著负相关; ♦: 显著负相关; -: 不显著负相关。

Fig. 4 Semi-matrices of interspecific Spearman rank correlation coefficients in the stable zone (a), instable zone (b) and deposit zone (c). Species numbers are defined in Table 2. ♠: Significant positive relation at 0.01 level; ♣: Significant positive relation at 0.05 level; +: Not significant positive relation; ♥: Significant negative relation at 0.01 level; ♦: Significant negative relation at 0.05 level; -: Not significant negative relation.

通过Pearson和Spearman半矩阵图,发现在稳定区、失稳区、堆积区,均表现为负关联种对数明显多于正关联的种对数,说明各区10个主要物种的种间关联性以负相关为主,反映出物种对环境因子的需求存在差异性,这与 $\chi^2$ 检验大多数呈负关联的结果一致,这可能是由于群落发展过程中尚不成熟、不稳定,物种之间为了争夺生态位而相互排斥、相互竞争<sup>[33]</sup>。

### 3 讨论与结论

#### 3.1 不同检验方法比较

本研究采用4种检验方法( $\chi^2$ 检验、Jaccard指数检验、Pearson相关系数检验、Spearman秩相关系数检验)所得结果表现出一致性,但各检验之间仍存在着一定的差异(表3)。除Jaccard指数检验外的其余3种检验都能够检验种对关联显著性,在稳定区,其余3种检验方法检测出的显著种对分别为 $\chi^2$ 检验1对(占总种对的2.2%),Pearson相关系数检验8对(占总种对的17.78%),Spearman秩相关系数检验10对(占总种对的22.22%);在失稳区, $\chi^2$ 检验4对(占总种对的8.9%),Pearson相关系数检验5对(占总种对的11.11%),Spearman秩相关系数检验6对(占总种对的13.33%);在堆积区, $\chi^2$ 检验显著种对4对(占总种对的8.9%),Pearson相关系数检验5对(占总种对的11.11%),Spearman秩相关系数检验9对(占总种对的20%)。由此得出,显著种对数在不同检验中均表现为Spearman秩相关系数最高。究其原因,主要是因为 $\chi^2$ 检验是由种对的二元数据得来,在一定程度上弱化了物种间的关联性,只能定性判断种间关联的显著性程度;Pearson相关分析和Spearman秩相关分析可量化种间关联的显著性,但Pearson相关分析要求样本需服从正态分布,Spearman则对样本分布没有要求,灵活性更好。因此,Spearman秩相关系数检验可以有效地补充和完善其余方法的不足之处,检验结果更为合理,这与其他研究报道<sup>[34-35]</sup>一致。泥石流频发流域失稳性坡面3个分区的种间联结性研究表明,经Spearman秩相关系数检验,群落主要物种关联大多数呈负相关,稳定区、失稳区、堆积区主要种群间呈显著或极显著联结的种对数较少,分别占总对数的22.22%、13.33%、20%,表明失稳性坡面植物整体种间关系较松散。究其原因,一方面可能是因为当前群落正处于快速发展阶段,物种之间为了争夺利用资源相互独立分布;另一方面,可能与物种自身的生物学特性

有关,在该干热河谷区植被自然演替中,旱生型禾本科物种(如扭黄茅、拟金茅)凭借其良好的适应性,快速占据植被群落主要地位,形成物种种类较单纯的群落分布格局。

#### 3.2 植物种间关联

物种间的关联关系与群落的生境特征、物种自身生物学特性等诸多因素密切相关。一般而言,正关联出现的原因主要是物种生物学特性相似,对生境的需求相同,有着相近的生态适应性,负关联则反之<sup>[36-37]</sup>。在本研究中,稳定区10个主要物种大多数种对联结关系薄弱,种间关联达显著水平的种对少,物种分布相对独立,负关联的种对数多于正关联,在总体上表现为负关联,这可能是由于在干热河谷地区坡面的稳定区,光热充足,土壤为贫瘠的燥红土,形成了以抗旱耐贫瘠土壤的扭黄茅为主的单优群落。呈显著或极显著负相关的种对大都来自扭黄茅与其他物种组合的种对,稳定区广泛分布的扭黄茅对干热河谷区恶劣环境长期适应,生存能力强,有利于其在群落占据优势地位。在显著正相关的种对中,可能是由于物种对水分、热量、土壤条件等具有相似的适应范围,物种之间生态位互补,生态习性相似<sup>[38]</sup>。如拟金茅与田菁,它们都是耐旱、喜光、向阳对土壤要求较低的物种,而拟金茅直立生长、田菁以匍匐生长,生态位互补,因此两个种群和谐相处,形成极显著正相关种对。失稳区的10个主要物种间,种间关联达到显著水平的种对较少,大部分种间关联松散,物种独立分布现象明显。失稳区坡面稳定性差,土层结构不稳定,地表在降水的冲刷下容易发生滑坡,坡面上的植物易受干扰,生长困难。该区域总体上虽然表现负的关联性,但因植物生长分布过程中遭受严重干扰,群落始终处于群落结构的形成期,未达到稳定状态,除了扭黄茅、拟金茅占据明显优势外,其他物种多为随机侵入,相互间关系尚在建立中从而表现出随机的组合,因此总体的种间关联性并不显著,这与林勇明等得出的结论<sup>[39]</sup>一致。堆积区的10个主要物种间,种间关联达到显著水平的种对并未与稳定区、堆积区存在较大的差异,即各种种间关联松散,物种分布独立,总体上呈现显著的负关联特征。这可能是由于堆积区土层变化大,上部的稳定区与失稳区表层土壤和基岩碎屑物不断冲刷堆积,造成植物以随机侵入为主。因此,堆积区物种种类在3个区中最多,但未形成优势种群。相对而言,堆积区的土壤扰动较大,但稳定区和失稳区的土壤流失过程中在堆积区存在积累作用,土壤肥力较好,先锋性物种互相竞争

表3 稳定区、失稳区、堆积区3种检验方法的结果比较

Table 3 Comparison in the results of three test methods in the stable zone, instable zone and deposit zone

研究区 Research zone	检验方法 Test method	正关联 Positive association				负关联 Negative association			
		**	*	Ns	总计 Sum	**	*	Ns	总计 Sum
稳定区 Stable zone	$\chi^2$ 检验 $\chi^2$ -test	0	0	16	16	1	0	28	29
	Pearson相关系数 Pearson correlation coefficient	3	1	8	12	2	2	29	33
	Spearman秩相关系数 Spearman rank correlation coefficient	2	2	11	15	2	4	24	30
失稳区 Instable zone	$\chi^2$ 检验 $\chi^2$ -test	0	2	16	18	1	1	25	27
	Pearson相关系数 Pearson correlation coefficient	2	0	12	14	2	1	28	31
	Spearman秩相关系数 Spearman rank correlation coefficient	2	0	14	16	2	2	25	29
堆积区 Deposit zone	$\chi^2$ 检验 $\chi^2$ -test	2	0	16	18	1	1	25	27
	Pearson相关系数 Pearson correlation coefficient	3	0	11	14	1	1	29	31
	Spearman秩相关系数 Spearman rank correlation coefficient	3	0	14	17	1	5	22	28

\*\*：极显著差异 ( $P < 0.01$ )；\*：显著差异 ( $P < 0.05$ )；Ns：无显著差异 ( $P > 0.05$ )。

\*\*：Significant difference at 0.01 level；\*：Significant difference at 0.05 level；Ns：Significant difference.

有利的资源使总体上表现出显著负关联。如鬼针草与扭黄茅表现出极显著负相关,这主要因为鬼针草喜温暖湿润地区,扭黄茅适宜干旱贫瘠地区;鬼针草与爵床表现出极显著正相关,两者都为喜温暖湿润的先锋性物种,两者共享资源形成显著正相关,类似的种对还有鬼针草与狼尾草。

种间关联性的强度随着群落演替进程而不断增加,群落越成熟,物种间正关联性会越高,多物种可稳定共存,群落结构越趋于稳定<sup>[40]</sup>。然而,在本研究失稳性坡面各分区显著负联结的种对数均多于显著正联结的种对数,说明本研究区物种间群落演替的竞争大于互补,群落发展还未达到成熟,且未形成相对稳定的结构,这与段后浪等对鄱阳湖区典型草洲植物种间关联性的结果<sup>[24]</sup>一致。在泥石流频发流域失稳性坡面的稳定区、失稳区、堆积区分区45个种对种间在整体上均表现出负相关关系,主要植物群落种间存在显著相关关系的种对数占比低,物种间关系薄弱,相互之间的关系还未完全确立,种间联结松散且不稳定,研究区内植物群落演替过程易受地质灾害、干热河谷焚风效应、干旱季节长等因素影响,进而发展为偏途顶极群落。因此,在泥石流频发流域退化山地生态系统植被恢复过程中,应考虑物种对于旱气候、贫瘠土壤、石块冲击等的适应性,优先选择根系发达、需水量较少、萌芽分蘖能力强的乡土物种,以草本植物为主、灌木植物为辅,以干热河谷区常见的灌草丛为人工植被营建方式,进而促进泥石流频发流域失稳性坡面的植被恢复进程。

本研究仅分析描述了种间关联的外在特征,得出失稳性坡面各区域群落结构不稳定的结果,还需进行定位观测,基于长时间序列数据明确种间关联变化的生态过程。由于失稳性坡面群落尚处于不稳定的阶段,后期恢复过程中还需充分考虑物种的生物学特性,结合引种适应观测,选择适应性好、促进土壤养分循环利用的物种,推动群落的正向演替。

## 参考文献 [References]

- 郭道宇,张金屯,高洪文. 白羊草群落优势种间联结性的分析[J]. 草业学报, 2003, 12 (2): 14-19 [Guo XY, Zhang JT, Gao HW. A study on interspecific association of dominant species in *Bothriochloa ischaemum* community in Shanxi [J]. *Pratac Sci*, 2003, 12 (2): 14-19]
- 王伯荪,李鸣光,彭少麟. 植物种群学[M]. 广州: 广东高等教育出版社, 1995 [Wang BS, Li MG, Peng SL. *Plant Population* [M]. Guangzhou: Guangdong Higher Education Press, 1995]
- 朱桂林,杨洪琴,卫智军,韩国栋. 短花针茅草原群落种间联结研究[J]. 草业学报, 2004, 13 (5): 33-38 [Zhu GL, Yang HQ, Wei ZJ, Han GD. Interspecific associations in *Stipa breviflora* desert steppe community [J]. *Pratac Sci*, 2004, 13 (5): 33-38]
- 郭志华,卓正大,陈洁,吴梅凤. 庐山常绿阔叶、落叶阔叶混交林乔木种群间联结性研究[J]. 植物生态学报, 1997, 21 (5): 424-432 [Guo ZH, Zuo ZD, Chen J, Wu MF. Interspecific association of trees in mixed evergreen and deciduous broadleaved forest in Lushan mountain [J]. *Chin J Plant Ecol*, 1997, 21 (5): 424-432]
- Su SJ, Liu JF, He ZS, Zheng SQ, Hong W, Xu DW. Ecological species groups and interspecific association of dominant tree species in Daiyun Mountain Nature Reserve [J]. *J Mount Sci*, 2015, 12 (3): 637-646
- 周纪纶,郑师章,杨持. 植物种群生态学[M]. 北京: 高等教育出版社, 1992: 1-22 [Zhou JL, Zheng SZ, Yang C. *Plant Population Ecology* [M]. Beijing: Higher Education Press, 1992: 1-22]
- 韩煜,赵廷宁,陈琳,柳立兵. 坡面植被恢复试验示范区植被群落特征初步研究[J]. 水土保持研究, 2010, 17 (4): 188-194 [Han Y, Zhao TN, Chen L, Liu LB. Study on the structure of vegetation community on slope revegetation experimental fields [J]. *Res Soil Water Conserv*, 2010, 17 (4): 188-194]
- 彭东海,侯晓龙,何宗明,刘露奇,蔡丽平,林静雯,江瑞荣,黄福才,钟均华. 金尾矿废弃地不同植被恢复模式群落特征[J]. 水土保持研究, 2016, 23 (1): 50-55 [Peng DH, Hou XL, He ZM, Liu LQ, Cai LP, Lin JW, Jiang RL, Huang FC, Zhong JH. Community characteristics of different vegetation restoration models in gold tailing wasteland [J]. *Res Soil Water Conserv*, 2016, 23 (1): 50-55]
- 林勇明,崔鹏,王道杰,葛永刚,柯春燕. 泥石流频发区人工新银合欢林群落特征[J]. 中国水土保持科学, 2009, 7 (6): 63-67 [Lin YM, Cui P, Wang DJ, Ge YG, Ke CY. Community characteristic of plantation of *Leucaena leucocephala* in the area with high-frequency debris flow [J]. *Sci Soil Water Conserv China*, 2009, 7 (6): 63-67]
- 赵丽丽,钟哲科,史作民,杨慧敏,邵琼. 汶川地震对四川理县典型受灾区岷江柏人工林土壤理化性质的影响[J]. 林业科学, 2016, 52 (3): 1-9 [Zhao LL, Zhong ZK, Shi ZM, Yang HM, Shao Q. Effect of Wenchuan Earthquake on physical and chemical properties of forest soils in Li County of Sichuan Province [J]. *Sci Silv Sin*, 2016, 52 (3): 1-9]
- 严思维,杜锬,陈爱民,林勇明,邓浩俊,张广帅,吴承祯,洪伟. 蒋家沟泥石流频发区不同植被类型与土壤养分及酶的关系[J]. 应用与环境生物学报, 2016, 22 (1): 49-57 [Yan SW, Du K, Chen AM, LinYM, Deng HJ, Zhang GS, Wu CZ, Hong W. The effects of vegetation type on soil nutrients and enzymes in Jiangjia Gully with frequent debris flow [J]. *Chin J Appl Environ Biol*, 2016, 22 (1): 49-57]
- 陈爱民,邓浩俊,严思维,林勇明,张广帅,杜锬,吴承祯,洪伟. 泥石流频发流域物源区坡面不同植被类型土壤质量综合评价[J]. 应用与环境生物学报, 2016, 22 (2): 249-256 [Chen AM, Deng HJ, Yan SW, Lin YM, Zhang GS, Du K, Wu CZ, Hong W. Comprehensive assessment of soil quality under different vegetation types in the provenance slope of the area of high-frequency debris flow [J]. *Chin J Appl Environ Biol*, 2016, 22 (2): 249-256]
- 邓浩俊,陈爱民,严思维,林勇明,张广帅,杜锬,吴承祯,洪伟. 不同龄龄新银合欢重吸收率及其C:N:P化学计量特征[J]. 应用与环境生物学报, 2015, 21 (3): 522-527 [Deng HJ, Chen AM, Yan SW, Lin YM, Zhang GS, Du K, Wu CZ, Hong W. Nutrient resorption efficiency and C:N:P stoichiometry in different ages of *Leucaena leucocephala* [J]. *Chin J Appl Environ Biol*, 2015, 21 (3): 522-527]
- 杨子松. 岷江上游干旱河谷荒漠主要植物种群种间关联性分析[J]. 林业资源管理, 2012 (4): 55-61 [Yang ZS. The interspecific association of the main plant population of the barren hillsides in the arid valley of the upper reaches of the Minjiang river [J]. *For Resour Manage*, 2012 (4): 55-61]
- 杨海裕,张宋智,刘小林,裴会明,蔺岩雄. 秦岭西段天然落叶阔叶林乔木种间关联性[J]. 生态学杂志, 2012, 31 (10): 2513-2520 [Yang HY, Zhang SZ, Liu XL, Pei HM, Lin YX. Interspecific associations among tree species in natural deciduous broadleaved forests in western Qinling, Northwest China [J]. *Chin J Ecol*, 2012, 31 (10): 2513-2520]
- 郭明利,张钦第,毕润成. 山西黄刺玫群落灌木层优势种种间关联性研究[J]. 山西师范大学学报(自然科学版), 2012, 26 (1): 64-70 [Guo ML, Zhang QD, Bi RC. Interspecific association of shrub dominant species of *Rosa Xanthina* community in Shanxi [J]. *J Shanxi Norm Univ (NatSci Ed)*, 2012, 26 (1): 64-70]

- 17 张有富. 云南蒋家沟泥石流区干热退化山地引种拟金茅的技术与效果[J]. 山地学报, 2000, **18** (6): 563-576 [Zhang YF. Technique and results of common eulaliopsis' application on xerothermic degraded mountain in Jiang Jia Gou debris flow gully [J]. *J Mount Sci*, 2000, **18** (6): 563-576]
- 18 崔鹏, 王道杰, 韦方强. 干热河谷生态修复模式及其效应——以中国科学院东川泥石流观测研究站为例[J]. 中国水土保持科学, 2005, **3** (3): 60-64 [Cui P, Wang DJ, Wei FQ. Model and effect of ecological restoration of dry-hot valley: a case study of the CAS Dongchuan Debris Flow Observation Station [J]. *Sci Soil Water Conserv China*, 2005, **3** (3): 60-64]
- 19 吴积善. 云南蒋家沟泥石流观测研究[M]. 北京: 科学出版社, 1990 [Wu JS. Observation on Debris Flow in Jiangjiagou, Yunnan [M]. Beijing: Science Press, 1990]
- 20 陈爱民, 严思维, 林勇明, 邓浩俊, 杜锬, 孙凡, 王道杰, 吴承祯, 洪伟. 泥石流频发区不同林龄新银合欢土壤抗蚀性评价[J]. 北京林业大学学报, 2016, **38** (9): 62-70 [Chen AM, Yan SW, Lin YM, Deng HJ, Du K, Sun F, Wang DJ, Wu CZ, Hong W. Evaluation of soil anti-erodibility at different ages of *Leucaena leucocephala* forests in the area with high-frequency debris flow [J]. *J Beijing For Univ*, 2016, **38** (9): 62-70]
- 21 Zhang XP, Wang MB, She B, Xiao Y. Numerical classification and ordination of forest communities in Pangquangou National Nature Reserve[J]. *Acta Ecol Sin*, 2006, **26** (3): 754-761
- 22 Schluter D. A variance test for detecting species associations, with some example applications [J]. *Ecology*, 1984, **65** (3): 998-1005
- 23 段后浪, 赵安, 姚忠. 鄱阳湖区典型草洲植物种间关联性研究[J]. 湿地科学, 2017, **15** (1): 107-113 [Duan HL, Zhao A, Yao Z. Species relationship between the plant species in typical marshland in Poyang Lake Region [J]. *Wetland Sci*, 2017, **15** (1): 107-113]
- 24 Dice LR. Measures of the amount of ecologic association between species [J]. *Ecology*, 1945, **26** (3): 297-302
- 25 白玉宏, 毕润成, 张钦弟. 山西五鹿山自然保护区辽东栎群落木本植物种间数量关系[J]. 生态学杂志, 2012, **31** (8): 1942-1948 [Bai YH, Bi RC, Zhang QD. Interspecific relationship of woody plants in *Quercus wutaishanica* community in Wulu Mountain Nature Reserve, Shanxi Province of China: a quantitative analysis [J]. *J Biol*, 2012, **31** (8): 1942-1948]
- 26 王伯荪, 彭少麟. 南亚热带常绿阔叶林种间联结测定技术研究——I. 种间联结测式的探讨与修正[J]. 植物生态学报, 1985, **9** (4): 32-43 [Wang BS, Peng SL. Studies on the measuring techniques of interspecific association of lower-subtropical evergreen-broadleaved forests I. The exploration and the revision on the measuring formulas of interspecific association [J]. *Chin J Plant Ecol*, 1985, **9** (4): 32-43]
- 27 宋春武, 蒋进, 范敬龙, 陈钧杰, 全永威, 王峰. 从植物种间联结性探讨白梭梭种群生态种组分类——以古尔班通古特沙漠为例[J]. 中国沙漠, 2012, **32** (1): 77-85 [Song CW, Jiang J, Fan JL, Chen JJ, Quan YW, Wang F. Ecological species groups division based on interspecific association: a case study in the Gurbantungut Desert, Xinjiang, China. [J]. *J Desert Res*, 2012, **32** (1): 77-85]
- 28 Legendre L, Legendre P. Numerical Ecology [M]. Amsterdam: Elsevier Scientific Publishing Company, 1983: 205-207
- 29 何艳频, 孙爱峰. Spearman等级相关系数计算公式及其相互关系的探讨[J]. 中国现代药物应用, 2007, **1** (7): 72-73 [He YP, Sun AF. Discussion on calculation formula of Spearman grade correlation coefficient and its interrelationship [J]. *Chin J Mod Drug Appl*, 2007, **1** (7): 72-73]
- 30 杜荣赛. 生物统计学[M]. 北京: 高等教育出版社, 1999 [Du LS. Biostatistics [M]. Beijing: Higher Education Press, 1999]
- 31 简敏菲, 刘琪璟, 朱笃, 游海. 九连山常绿阔叶林乔木优势种群的种间关联性分析[J]. 植物生态学报, 2009, **33** (4): 672-680 [Jian MF, Liu QJ, Zhu D, You H. Inter-specific correlations among dominant populations of tree layer species in evergreen broad-leaved forest in Jiulianshan mountain of subtropical china [J]. *Chin J Plant Ecol*, 2009, **33** (4): 672-680]
- 32 牛莉芹, 上官铁梁, 程占红. 中条山中段植物群落优势种群的种间关系研究[J]. 西北植物学报, 2005, **25** (12): 2465-2471 [Niu LQ, Shangguan TL, Cheng ZH. Interspecific relations of the dominant plant populations in the middle part of Zhongtiaoshan Mountain [J]. *Acta Bot Bor-Occid Sin*, 2005, **25** (12): 2465-2471]
- 33 Jiang GS, Liu J, Xu L, Yan C, He HL, Zhang ZB. Intra and interspecific interactions and environmental factors determine spatial temporal species assemblages of rodents in arid grasslands [J]. *Landscape Ecol*, 2015, **30** (9): 1643-1655
- 34 赵永全, 何彤慧, 程志, 张娟红, 杨明秀, 张玉峰. 银川平原湿地常见植物种间关系研究[J]. 干旱区研究, 2013, **30** (5): 838-844 [Zhao YQ, He TH, Cheng Z, Zhang JH, Yang XM, Zhang YF. Interspecific Relationships among Common Plant Species in Wetlands in the Yinchuan Plain [J]. *Arid Zone Res*, 2013, **30** (5): 838-844]
- 35 罗梅, 郑小贤. 福建将乐林场常绿阔叶次生林主要种群种间联结性研究[J]. 西北农林科技大学学报(自然科学版), 2016, **44** (8): 135-142 [Luo M, Zheng XX. Inter-specific correlation of main populations in evergreen broad-leaved secondary forest in Jiangle forest farm [J]. *J Northwest A&F Univ (Nat Sci Ed)*, 2016, **44** (8): 135-142]
- 36 高凤如, 巨天珍, 杨斌, 任艺彬, 王振乾, 刘洋洋. 路域和保护区油松林种间关联比较研究[J]. 应用与环境生物学报, 2016, **22** (6): 1031-1039 [Gao FR, Ju TZ, Yang B, Ren YB, Wang ZQ, Liu YY. Comparative study of interspecific association within the *Pinus tabulaeformis* forest in the road area and the nature reserve [J]. *Chin J Appl Environ Biol*, 2016, **22** (6): 1031-1039]
- 37 白玉芳, 毕润成, 白玉宏, 王晓霞, 张钦弟. 山西太岳山稀有濒危植物脱皮榆群落种间关联[J]. 广西植物, 2014 (1): 56-61 [Bai YF, Bi RC, Bai YH, Wang XX, Zhang QD. Interspecific relationship of rare and endangered *Ulmus lamellosa* community in Taiyue Mountain of Shanxi [J]. *Guihaia*, 2014 (1): 56-61]
- 38 高永恒, 曾晓阳, 周国英, 王根绪. 长江源区高寒湿地植物群落主要种群种间关系分析[J]. 湿地科学, 2011, **9** (1): 1-7 [Gao YH, Zeng XY, Zhou GY, Wang GX. Interspecific relationships of dominant populations in the alpine wetlands in the source region of Yangtze River [J]. *Wetland Sci*, 2011, **9** (1): 1-7]
- 39 林勇明, 洪滔, 吴承祯, 洪伟, 胡喜生, 范海兰, 宋萍. 桂花次生林群落主要树种种间关联及其对混交度的响应[J]. 应用与环境生物学报, 2007, **13** (3): 327-332 [Lin YM, Hong T, Wu CZ, Hong W, Hu XS, Fan HL, Song P. Interspecific association of major plants in *Osmanthus fragrans* secondary community and its response to mixing [J]. *Chin J Appl Environ Biol*, 2007, **13** (3): 327-332]
- 40 周先叶, 王伯荪, 李鸣光, 管启杰. 广东黑石顶自然保护区森林次生演替过程中群落的种间联结性分析[J]. 植物生态学报, 2000, **24** (3): 332-339 [Zhou XY, Wang BS, Li MG, Zan QJ. An analysis of interspecific association in secondary succession forest communities in Heishiding natural reserve, Guangdong Province [J]. *Chin J Plant Ecol*, 2000, **24** (3): 332-339]