



三峡水库峡谷地貌区消落带主要植物种间关联性研究

简尊吉¹, 李堂中², 郭泉水^{1*}, 秦爱丽¹, 马凡强¹, 裴顺祥³, 肖文发¹

(1 中国林业科学研究院森林生态环境与保护研究所, 国家林业局森林生态环境重点实验室, 北京 100091; 2 重庆市开县林业局, 重庆开县 404500; 3 中国林业科学研究院华北林业实验中心, 北京 102300)

摘要:根据三峡水库峡谷地貌区消落带 560 个植物样方调查数据, 选取频度 $\geq 5\%$ 的 18 种主要植物, 采用方差比率法、 χ^2 检验、Jaccard 指数、Spearman 秩相关系数等数量分析方法, 对经历多次水库水位涨落后消落带植被主要植物的种间关联性进行研究, 以探讨消落带植物的生态适应性、种间的内在联系以及群落演替现状, 为三峡水库峡谷地貌区消落带植被恢复和重建提供理论依据。结果表明: (1) 三峡水库峡谷地貌区消落带 18 种主要植物间总体为显著正关联; 经 χ^2 检验, 在 153 个种对中, 正关联种对 78 个, 负关联种对 75 个; Jaccard 指数小于 0.20 的种对占种对总数的 82%; 经 Spearman 秩相关性检验, 正相关种对 74 个, 负相关种对 79 个。 (2) 植物的生态习性以及植物对生境要求的相似性、生态位重叠等是消落带 18 种主要植物总体表现为显著正关联的主要原因; 种对间 Jaccard 指数较小, 表明消落带大多数种对间的关联不紧密, 植物种间关系容易受到外界因素的干扰而出现波动; χ^2 检验和 Spearman 秩相关性检验结果基本一致。 (3) 种对间负关联种对数所占的比例较大, 表明消落带虽然经历了多次水库水位涨落, 但其生境仍然不稳定, 植物种间还存在较明显的资源性竞争, 消落带植物群落仍处于不稳定阶段。

关键词: 三峡水库; 消落带; 植物群落; 种间关联; Spearman 秩相关

中图分类号: Q948.12⁺2.1

文献标志码: A

Interspecific Association of Main Plants in the Water Level Fluctuation Zone of Canyon Landform Area of the Three Gorges Reservoir

JIAN Zunji¹, LI Tangzhong², GUO Quanshui^{1*}, QIN Aili¹, MA Fanqiang¹,
PEI Shunxiang³, XIAO Wenfa¹

(1 Research Institute of Forest Ecology, Environment and Protection, Chinese Academy of Forestry, Key Laboratory of Forest Ecology and Environment of State Forestry Administration, Beijing 100091, China; 2 Forest Bureau of Kaixian County in Chongqing, Kaixian, Chongqing 404500, China; 3 Experimental Center of Forestry in North China, Chinese Academy of Forestry, Beijing 102300, China)

Abstract: Based on the data of 560 quadrates, we studied the interspecific associations of 18 main plants with its frequency greater than or equal to 5% and experienced many times of water-level fluctuation in the water-level fluctuation zone of canyon landform area of the Three Gorges Reservoir through quantitative analysis method such as variance ratio test, Chi-square test, Jaccard index, Spearman rank correlation coefficient and so on. The ecological adaptability and the intrinsic association of different plants, and the stage

收稿日期: 2016-07-29; 修改稿收到日期: 2016-09-08

基金项目: “十二五”农村领域国家科技计划课题(2015BAD07B040301)

作者简介: 简尊吉(1991—), 男, 在读硕士研究生, 主要从事森林生态学研究, E-mail: jianzunji2014@163.com

* 通信作者: 郭泉水, 研究员, 硕士生导师, 主要从事森林生态学和保护生物学研究, E-mail: guoqs@caf.ac.cn

of community succession were discussed to provide a scientific basis for vegetation restoration and reconstruction. (1) The significant positive association was found among overall main 18 plants because of similarities of ecological habit, ecological requirement and ecological niche overlap. Among 153 species pairs, 78 species pairs showed positive association and 75 species pairs showed negative association in the Chi-square test, while 74 species pairs showed positive correlation and 79 species pairs showed negative correlation in the Spearman rank correlation test. (2) A larger proportion of negative association in the Chi-square test and the Spearman rank correlation test indicated the habitat was not stable and obvious resource competition existed among different plants. (3) The species pair with Jaccard index of less than 0.20 accounted for 82% of the total, which suggested that most species pairs were not closely related and inter-specific association was susceptible to the interference of external factors. In the actual habitat conditions, plant community was still in the stage of instability.

Key words: the Three Gorges Reservoir; water-level fluctuation zone; plant community; inter-specific association; Spearman rank correlation

种间关联是指不同物种在空间上的相互关联性,是种间关系的重要特征。正关联或正相关、负关联或负相关、不关联或不相关等是种间关联的3种表现形式^[1-3]。生境差异、种间竞争、生态位重叠和分离等一系列生态学过程,以及群落生境影响下种间的生境趋同或趋异是不同种间关联表现形式形成的主要原因^[4-5]。测量和界定植物种间的关联性,对于了解物种的生态适应性、种间协变关系、群落演替和稳定性以及植被恢复和重建等都具有重要的理论价值^[6-9]。

三峡水库消落带是三峡库区生态系统能量流动与物质循环最为活跃的生态脆弱带,消落带植被是其重要组成部分。三峡水库运行后,消落带原生植被遭到严重破坏,恢复和重建消落带植被是三峡水库消落带生态修复的重要内容之一。近十几年来,众多科技工作者围绕消落带生态修复,广泛开展了消落带适生植物筛选、植被动态、生境变化等多方面研究^[10-15],并取得了显著成果。但对经历多次水库水位涨落后,消落带植被的植物种间关系的研究还未见报道^[12,16]。

三峡库区地势东部高,西南部低。峡谷地貌区位于库区东部,巫山和秭归为其腹地。长江三峡著名的西陵峡和巫峡即位于此。典型的地理特征是:水库干流两侧山体的海拔多在1200 m以上;山势陡峭,消落带坡度多在25°以上,为三峡库区滑坡、崩塌等地质灾害多发区。世界高度关注三峡工程的生态环境问题,峡谷地貌区消落带植被的变化是其焦点之一。地形是区域生态环境的一个重要因子。地形不同,气候、土壤、植被结构及其变化过程、人类对资源的利用方式和程度等都会有所不同^[17-19],消

落带植被的植物种间关联特征也将发生一定的变化。

本研究以三峡水库峡谷地貌区经历多次水库水位涨落的消落带植被为研究对象,通过样方调查,应用方差比率法、 χ^2 检验、Jaccard指数、Spearman秩相关系数等数量分析方法,对消落带主要植物种间关联性进行研究,以期了解经历多次水库水位涨落后,消落带植物的生态适应性、种间的内在联系及群落发展动态,为三峡水库峡谷地貌区消落带植被恢复和重建提供理论依据。

1 研究区自然概况

研究区位于三峡水库峡谷地貌区的巫山段巫峡镇和秭归段茅坪镇。两地的气候类型相同,均属于亚热带季风湿润气候。秭归县茅坪镇年均温18℃,年均降雨量1049.3 mm,≥10℃年活动积温5723.6℃,全年无霜期305 d;巫山县巫峡镇年均温18.4℃,年均降雨量1100 mm,≥10℃年活动积温5857.3℃,全年无霜期306 d。地带性植被均为亚热带常绿阔叶林。秭归段茅坪镇消落带土壤类型为花岗岩母质上发育的黄壤土,巫山段巫峡镇消落带为石灰岩母质上发育的黄色石灰土^[14]。

三峡水库最低限制水位为海拔145 m,最高蓄水位为海拔175 m。受水库水位调度控制,2008年前水库最高蓄水位为海拔155 m,2008年~2010年为海拔172 m,2010年冬季为海拔175 m。此后,水库最高蓄水位一直在海拔175 m运行。截止调查之日(2015年8月),消落带海拔155~172 m经历了7次水库水位涨落,海拔172~175 m经历了5次水库水位涨落。

2 研究方法

2.1 样地(方)设置和调查

样地设置和调查在 2015 年三峡水库低水位运行的 8 月份进行。样地设在秭归段和巫山段土地利用历史清楚且在峡谷地貌区具有一定代表性的消落带内。共设置了 8 块样地(表 1)。每块样地的垂直投影面积均为 15 m×20 m。样地底边和顶边分别设在海拔 155 m 和海拔 175 m 处。在样地内采用相邻格子法布设样方,样方面积 1 m×1 m。各样地(方)大小和设置方法相同。共调查样方 560 个。调查内容包括:植物种类,植物生活型,植株数量、高度和盖度,以及海拔、坡度、坡向和土壤类型等。

2.2 数据分析与统计

在 8 块样地中共记录到 76 种植物。由于植物种类较多,为了计算方便,选取频度≥5%的植物种进行分析^[20-25]。经剔除,获得参与分析的植物共 18 种,各植物种及其数量特征见表 2。

将 18 种植物与 560 个样方组成 18×560 的数据矩阵,并按植物种在样方中的存在状况,将其转化为 0(不存在)、1(存在)形式的二元数据矩阵。采用方差比率(VR)法,检验参与分析物种的总体关联性^[26]。以二元数据矩阵为基础,建立 2×2 列联表,采用 χ^2 统计量检验种对间的关联性。由于 χ^2 检验不能区分种间关联强度的大小,所以在 χ^2 检验后再进行关联强度的测定^[3,8]。另外,Spearman 秩相关性检验处理的是定量数据,可以反映种间线性关系,且较其他相关系数检验更为灵敏^[3,27]。所以,本研究

同时采用方差比率法、 χ^2 检验、关联强度、Spearman 秩相关系数等数量分析方法,对消落带植物种间的关联性进行分析。

2.2.1 总体关联性检验 预先假设物种间无显著关联,按照下式计算多物种间总体关联性指数(VR):

$$VR = \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N (T_j - t)^2 / \sum_{i=1}^S \frac{n_i}{N} \left(1 - \frac{n_i}{N}\right)$$

式中: S 为参与分析的物种总数; N 为总样方数; T_j 为样方 j 内出现的参与分析的物种数; t 为 N 个样方中出现的参与分析物种的平均数 $[t = (T_1 + T_2 + \cdots + T_N)/N]$; n_i 为物种 i 出现的样方数。

在预先假设条件(种间无显著关联)下,VR 期望值为 1。当 $VR = 1$ 时,符合所有种间无关联的假设;当 $VR > 1$ 时,表示种间为净的正关联;当 $VR < 1$ 时,表示种间为净的负关联。对于 VR 值偏离 1 的显著程度,采用统计量 $W(W = N \times VR)$ 来检验。若 $\chi^2_{(0.95,N)} \leq W \leq \chi^2_{(0.05,N)}$,则物种间总体关联不显著($P > 0.05$);反之,则物种间总体关联显著($P < 0.05$)^[26]。

2.2.2 种对间关联性检验 (1) χ^2 检验 采用 Yates 连续校正公式^[3]。计算公式如下:

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

式中, N 为样方总数, a 为含有物种 A 和物种 B 的样方数, b 为只含有物种 A 的样方数, c 为只含有物种 B 的样方数, d 为物种 A 和物种 B 都不存在的样方数。当 $ad - bc = 0$ 时,两个物种相互独立;当 ad

表 1 样地自然概况
Table 1 Natural condition of the plots

样地 Plot	坐标 Coordinate	坡向 Aspect	坡度 Gradient	土层厚度 Soil thickness/cm	土壤类型 Soil type	经历水库水位涨落前土地利用类型 Land use type before water level fluctuation
1	30°52′56.3″N, 110°54′21.9″E	西偏南 30° WS30°	28°	35	黄壤土 Yellow loan	果园 Orchard
2	30°52′36.8″N, 110°55′01.0″E	西偏北 20° WN20°	36°	40	黄壤土 Yellow loan	有林地 Forest land
3	30°52′09.8″N, 110°54′56.5″E	东偏南 15° ES15°	30°	55	黄壤土 Yellow loan	旱地 Non-irrigated farmland
4	30°52′42.8″N, 110°54′09.9″E	东偏南 30° ES30°	34°	35	黄壤土 Yellow loan	有林地 Forest land
5	31°04′48.0″N, 109°53′57.0″E	北偏西 10° NW10°	45°	40	黄色石灰土 Yellow line soil	灌木林地 Shrub land
6	31°03′32.8″N, 109°54′48.8″E	北偏东 5° NE5°	27°	40	黄色石灰土 Yellow line soil	灌木林地 Shrub land
7	31°04′57.1″N, 109°54′06.9″E	西偏南 15° WS15°	32°	40	黄色石灰土 Yellow line soil	灌木林地 Shrub land
8	31°03′34.4″N, 109°54′38.6″E	西偏北 35° WN35°	41°	35	黄色石灰土 Yellow line soil	灌木林地 Shrub land

表 2 消落带主要植物及其重要值

Table 2 Main plants and their important values in the water-level fluctuation zone

编号 Number	物种 Species	相对盖度 Relative coverage	相对频度 Relative frequency	重要值 Important value
1	狗牙根 <i>Cynodon dactylon</i>	24.44	9.15	16.79
2	狗尾草 <i>Setaria viridis</i>	17.15	14.27	15.71
3	毛马唐 <i>Digitaria chrysoblephara</i>	15.71	11.71	13.71
4	金色狗尾草 <i>Setaria glauca</i>	10.56	9.02	9.79
5	苍耳 <i>Xanthium sibiricum</i>	8.65	5.53	7.09
6	鬼针草 <i>Bidens pilosa</i>	5.71	8.13	6.92
7	稗 <i>Echinochloa crusgalli</i>	5.98	6.75	6.37
8	鳢肠 <i>Eclipta prostrata</i>	1.06	5.33	3.19
9	水蓼 <i>Polygonum hydropiper</i>	1.20	2.93	2.06
10	香附子 <i>Cyperus rotundus</i>	1.49	2.48	1.99
11	蜜甘草 <i>Phyllanthus ussuriensis</i>	0.44	2.56	1.50
12	碎米莎草 <i>Cyperus iria</i>	1.21	1.59	1.40
13	荔枝草 <i>Salvia plebeia</i>	1.01	1.71	1.36
14	马唐 <i>Digitaria sanguinalis</i>	0.98	1.34	1.16
15	铁苋菜 <i>Acalypha australis</i>	0.50	1.59	1.04
16	飞蓬 <i>Erigeron acer</i>	0.36	1.71	1.03
17	龙葵 <i>Solanum nigrum</i>	0.44	1.34	0.89
18	雾水葛 <i>Pouzolzia zeylanica</i>	0.17	1.50	0.84

注:重要值=(相关盖度+相对频度)/2^[25]。
Note: Important value = (Relative coverage + Relative frequency)/2

−bc>0时,两个种间呈正关联;当ad−bc<0时,两个种间呈负关联。若χ²<3.841(P>0.05),表示种对间关联性不显著;若χ²>3.841(0.01<P<0.05)和χ²>6.635(P<0.01),则分别表示种对间关联性显著和极显著。

(2)种间关联强度 采用 Jaccard 指数(JI)^[3]表示种对间关联强度。计算公式如下:

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

式中,a、b、c 含义同χ²检验公式。JI 值域为[−1,1],其值越趋近于1,种间的正关联性越强;越趋近于0,种间的负关联性越强。

2.2.3 种对间 Spearman 秩相关性检验 以物种的盖度^[8,20,28]为量化指标,计算种对间 Spearman 秩相关系数。计算公式如下:

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

式中:r_{S(i,k)}为种i和种k之间的秩相关系数;x_{ij}和x_{kj}分别为种i和种k在样方j中的秩;N为样方总

数;值域为[−1,1],正值表示正相关,负值表示负相关。

以上数据整理和计算均在 Excel 2003 软件和 SPSS 19.0 软件支持下完成。

3 结果与分析

3.1 消落带主要植物种间的总体关联性

根据消落带 18×560 的二元数据矩阵,采用方差比率(VR)法检验参与分析的所有物种的总体关联性。结果显示:VR = 1.484,W = 831.137。经 CHIINV 函数计算得到χ²_(0.95,560) = 506.113,χ²_(0.05,560) = 616.161。显然,VR 值大于1,统计量W也未落入[506.113,616.161]数据范围。对照多物种间关联性判别标准^[26]可知,消落带18种主要植物种间的总体关联性为显著正关联。

3.2 消落带主要植物种对间的关联性

从 Yates 校正公式的χ²检验半矩阵图(图1)可以看出,在18种主要植物组成的153个种对中,正关联种对78个,负关联种对75个,正负关联种对基

本上各占一半。表明,在消落带现实生境中,还有近半数左右的植物种群具有较强的独立性或存在一定的竞争关系。

在正关联的 78 个种对中,有 41 个种对为极显著关联 ($P<0.01$),包括:狗牙根(*Cynodon dactylon*)与苍耳(*Xanthium sibiricum*)、香附子(*Cyperus rotundus*),狗尾草(*Setaria viridis*)与荔枝草(*Salvia plebeia*),毛马唐(*Digitaria chrysoblephara*)与金色狗尾草(*Setaria glauca*)、苍耳、鬼针草(*Bidens pilosa*)、稗(*Echinochloa crusgal-li*)、水蓼(*Polygonum hydropiper*)、蜜甘草(*Phyllanthus ussuriensis*)、碎米莎草(*Cyperus iria*)、荔枝草、雾水葛(*Pouzolzia zeylanica*),金色狗尾草与鬼针草、稗、水蓼、香附子、蜜甘草、碎米莎草、雾水葛,苍耳与鬼针草、鳢肠(*Eclipta prostrata*)、水蓼、铁苋菜(*Acalypha australis*),鬼针草与稗、鳢肠、水蓼、碎米莎草、雾水葛,稗与鳢肠、水蓼、蜜甘草、碎米莎草、雾水葛,鳢肠与碎米莎草、荔枝草、铁苋菜,水蓼与碎米莎草、蜜甘草与飞蓬(*Erigeron acer*)、雾水葛,荔枝草与铁苋菜,飞蓬与雾水葛。有 4 个种对为显著关联 ($P<0.05$),包括:毛马唐与鳢肠,苍耳与碎米莎草、马唐(*Digitaria sanguinalis*),马唐与铁苋菜。

在负关联的 75 个种对中,有 18 个种对为极显著关联 ($P<0.01$),包括:狗牙根与狗尾草、毛马唐、蜜甘草、飞蓬,狗尾草与金色狗尾草、苍耳、鬼针草、

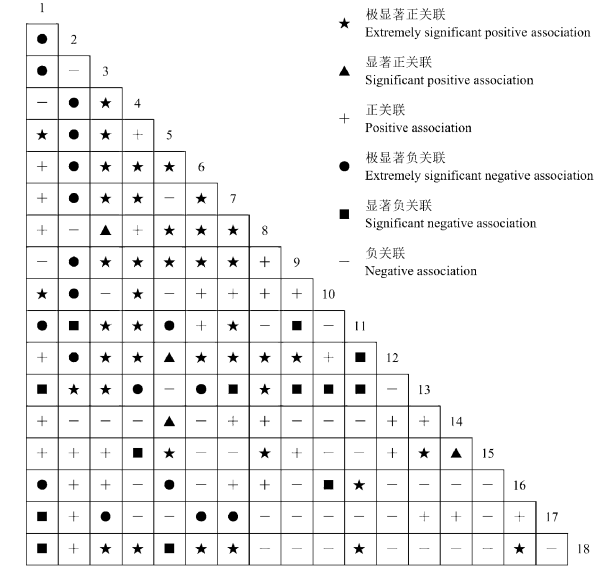


图 1 消落带 18 种主要植物 Yates 校正后的 χ^2 检验半矩阵图

Fig. 1 The semi-matrix of Yates emendation's Chi-square test of 18 main plants in the water-level fluctuation zone

稗、水蓼、香附子、碎米莎草,毛马唐与龙葵(*Solanum nigrum*),金色狗尾草与荔枝草,苍耳与蜜甘草、飞蓬,鬼针草与荔枝草、龙葵,稗与龙葵。有 13 个种对为显著关联 ($P<0.05$),包括:狗牙根与荔枝草、龙葵、雾水葛,狗尾草与蜜甘草,金色狗尾草与雾水葛,苍耳与雾水葛,稗与荔枝草,水蓼与蜜甘草、荔枝草,香附子与荔枝草、飞蓬,蜜甘草与碎米莎草、荔枝草。

3.3 消落带主要植物种对间的关联强度

对消落带 18 种主要植物组成的 153 个种对的 Jaccard 指数进行计算的结果(图 2)表明, $JI=0.40$ 的有 2 个种对,分别是鬼针草与毛马唐、鬼针草与金色狗尾草; $0.30=JI<0.40$ 的有 4 个种对,分别为毛马唐与狗尾草、金色狗尾草、稗,蜜甘草与雾水葛; $0.20=JI<0.30$ 的有 21 个种对,占种对总数的 14%; $0.10=JI<0.20$ 的有 32 个种对,占种对总数的 21%; $0=JI<0.10$ 的有 94 个种对,占种对总数的 61%。

与 χ^2 检验结果(图 1)对照,总体呈现 χ^2 检验中显著性越强的种对 Jaccard 指数越高。如鬼针草与毛马唐,鬼针草与金色狗尾草。在 χ^2 检验中这 2 个种对均为极显著正关联,而在 Jaccard 指数中,其值也是最高($JI=0.40$)。表明, χ^2 检验结果与 Jaccard 指数测定结果较为一致。从 $JI=0.40$ 的种对极少,而 $JI<0.10$ 的种对较多(占 61%)这一结果反映出,目前消落带大多数植物种间的关联强度较低。

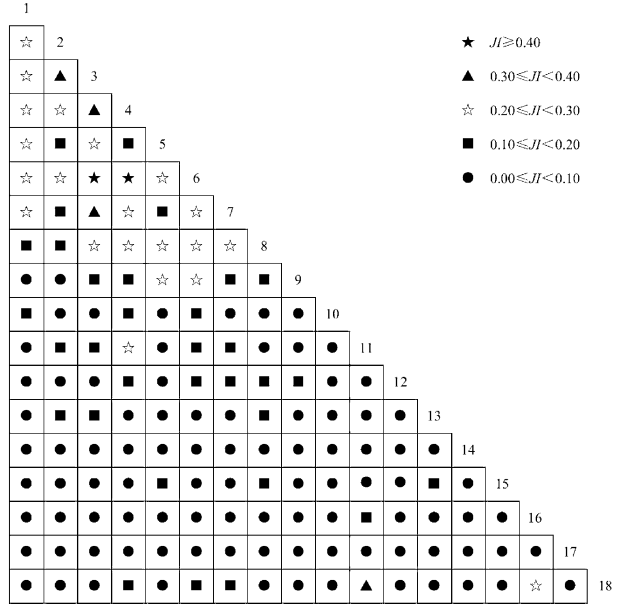


图 2 消落带 18 种主要植物的 Jaccard 指数半矩阵图

Fig. 2 The semi-matrix of Jaccard indexes of 18 main plants in the water-level fluctuation zone

3.4 消落带主要植物种对间的 Spearman 秩相关性检验

χ^2 检验依据 2×2 列联表,是用 0 和 1 表示植物种在样方中存在与否,因此,在将其转换为二元数据的过程中会损失一定的信息量^[22]。Spearman 秩相关系数依据的是盖度数据,反映的是种间线性关系的密切程度,不存在信息量损失问题^[20]。

从 Spearman 秩相关计算结果可知,在参与分析的 153 个种对中,存在正相关关系的种对有 74 个,存在负相关关系的种对有 79 个,正负相关种对分别占种对总数的 48%和 52%(图 3)。呈负相关的种对数比 χ^2 检验的有所增加。呈极显著正相关($P < 0.01$)的种对有 40 个,占种对总数的 26%,比 χ^2 检验中极显著正关联的种对数略有减少。呈显著正相关($P < 0.05$)的种对有 7 个,比 χ^2 检验中呈显著正关联的种对数略有增加。呈极显著负相关($P < 0.01$)的种对有 24 个,呈显著负相关($P < 0.05$)的种对有 15 个,比 χ^2 检验中极显著和显著负关联的种对总数增加了 30%。Spearman 秩相关的定量分析结果,再次论证了在消落带现实生境中,近半数以上的植物种群具有较强的独立性或存在一定的竞争关系。

Spearman 秩相关性检验与 χ^2 检验不一致的种对有 27 个,占种对总数的 18%(图 1 和图 3)。其中,毛马唐与飞蓬在 χ^2 检验中显示为正关联,而在

Spearman 秩相关性检验中为极显著正相关($P < 0.01$);狗尾草与蜜甘草在 χ^2 检验中为显著负关联,狗尾草与飞蓬、金色狗尾草与鳢肠、鬼针草与香附子为正关联,而在 Spearman 秩相关性检验中则为显著正相关($P < 0.05$);毛马唐与苍耳、毛马唐与碎米莎草在 χ^2 检验中为极显著正关联,毛马唐与鳢肠为显著正关联,而在 Spearman 秩相关性检验中为正相关($P > 0.05$);狗牙根与龙葵、狗牙根与雾水葛、金色狗尾草与铁苋菜、稗与荔枝草在 χ^2 检验中为显著负关联,毛马唐与香附子为负关联,而在 Spearman 秩相关性检验中为极显著负相关($P < 0.01$);狗牙根与金色狗尾草、狗牙根与水蓼、苍耳与稗、水蓼与龙葵、香附子与马唐、香附子与雾水葛、蜜甘草与马唐、蜜甘草与龙葵在 χ^2 检验中为负关联,而在 Spearman 秩相关性检验中为显著负相关($P < 0.05$);狗牙根与鳢肠、狗牙根与碎米莎草、狗尾草与铁苋菜、毛马唐与铁苋菜在 χ^2 检验中为正关联,而在 Spearman 秩相关性检验中为负相关($P > 0.05$)。表明,Spearman 秩相关检验与 χ^2 检验的结果总体上具有一致性,大多数在 χ^2 检验中呈正或负关联的种对,在 Spearman 秩相关检验也存在正或负的相关关系,在 χ^2 检验中呈正或负关联,而在 Spearman 秩相关检验中反而呈负或正相关的种对极少。

4 讨 论

一般认为,在群落发展演替后期,多种植物的总体关联性会表现出显著的正关联^[7],种间关系也将同步趋于正联结,以求得物种间的稳定共存^[8,29]。本研究中,采用方差比率法检验参与分析的 18 种主要植物间总体呈显著正关联,而采用 χ^2 检验和 Spearman 秩相关检验对由 18 种主要植物组成的 153 个种对的关联性和相关性,以及 Jaccard 指数测度结果显示,有一半左右的植物种对呈负关联,且 Jaccard 指数较小,种群间的关联强度较低。表明,现实生境中,消落带植物群落尚不具备植物种间稳定共存的基本特征,多物种间总体呈显著正关联,主要反映了这些植物间的生态习性和生境要求具有一定的相似性。

在生态学研究种中,种间关联的原因常常被归结为以下几个方面^[30]:(1)环境需求相似导致正关联,环境需求存在差异则导致负关联;(2)一个种为另一种创造了定居条件或一个种对另一个种施加压力而造成正关联;(3)物种在竞争中互相排斥造成负关联;(4)物种在根系中通过理化因素相互影响,可能

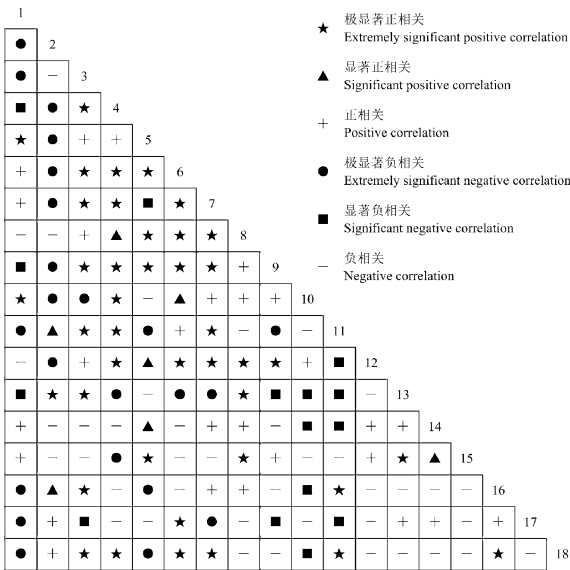


图 3 消落带 18 种主要植物的 Spearman 秩相关系数半矩阵图

Fig. 3 The semi-matrix of Spearman rank correlation coefficient of 18 main plants in the water-level fluctuation zone

导致正关联或负关联。本研究中,许多种对的正负关联机制与上述相吻合。例如,狗牙根与苍耳,无论 χ^2 检验,还是 Spearman 秩相关检验,都显示为极显著正关联。在实地调查中发现,这两种植物在消落带植物群落中多是相伴而生;有些分布在稀疏的苍耳植株下;有些为团状混交。环境需求和对资源利用的能力极为相似,是该种对极显著正关联的主要原因。狗牙根与狗尾草,狗牙根与毛马唐为极显著负关联。这与资源匮乏下物种的竞争排斥有关。一般认为,当资源不足时,处于最适宜生态位的植物具有竞争上的优势^[1-2]。狗牙根属于多年生偏湿生草本,匍匐茎,可节节生根并不断克隆出新的植株,在消落带低海拔区域分布最为密集,生长最为旺盛;狗尾草为一年生中生性草本,毛马唐为一年生偏旱生草本,这些植物都属于典型的 r 对策种,对于旱裸地环境具有极强适应能力^[14]。在消落带植物群落中,这些植物以单优群团状分布最为普遍。可见,不同的生境偏好和在资源匮乏条件下为生存而发生的资源竞争,是这 3 种植物间呈现极显著负关联的主要原因。

值得指出的是,种间关联是用数理统计方法对种间关系的外在现象的测度和描述,揭示的是种间

竞争的结果或群落的现状^[29]。种间关联通常是由群落生境的差异引起的,如水分、温度、光照、养分等因素都会对种间关系产生一定的影响^[30-31],对于大多数种间关联格局形成的原因和过程,还需借助实验生态学方法进行深入探讨。

5 结 论

(1)经历多次水库水位涨落后,三峡水库峡谷地貌区消落带主要植物种间的总体关联性为显著正关联。说明,在消落带现实生境中,消落带主要植物的生态习性和对生境的要求具有一致性。

(2)采用多种数量分析法对消落带主要植物种对间关联性检验的结果相似。大多数种对间的关联不紧密,有近半数以上的种群具有较强的独立性或存在一定的资源竞争关系。消落带植物群落中植物的种间关系还很容易受到外界因素的干扰而出现波动。

(3)消落带植物群落尚不具备植物种间稳定共存的基本特征,且大多数植物为一年生草本等群落次生演替早期的先锋植物。目前,消落带植物群落仍处于不稳定阶段。

参考文献:

[1] 常杰,葛滢. 生态学[M]. 杭州:浙江大学出版社, 2001.

[2] 李俊清,牛树奎,刘艳红. 森林生态学[M]. 北京:高等教育出版社, 2010.

[3] 张金屯. 数量生态学(第2版)[M]. 北京:科学出版社, 2011.

[4] CHU C J, MAESTRE F T, XIAO S, *et al.* Balance between facilitation and resource competition determines biomass-density relationships in plant populations[J]. *Ecology Letters*, 2008,**11**(11): 1 189-1 197.

[5] LIN Y, BERGER U, GRIMM V, *et al.* Differences between symmetric and asymmetric facilitation matter: exploring the interplay between modes of positive and negative plant interactions[J]. *Journal of Ecology*, 2012,**100** (6): 1 482-1 491.

[6] 郭泉水,王祥福,巴哈尔古丽,等. 崖柏群落优势乔木树种间关系[J]. 生态学报, 2007,**26** (12): 1 911-1 917.

[6] GUO Q S, WANG X F, BAHAR G L, *et al.* Interspecific relationships of dominant tree species in *Thuja sutchuenensis* community[J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2007,**26** (12): 1 911-1 917.

[7] 王文进,张明,刘福德,等. 海南岛吊罗山热带山地雨林两个演替阶段的种间联结性[J]. 生物多样性, 2007,**15** (3): 257-263.

[7] WANG W J, ZHANG M, LIU F D, *et al.* Species association in tropical montane rain forest at two successional stages in Diaoluo Mountain of Hainan Island[J]. *Biodiversity Science*, 2007,**15**(3): 257-263.

[8] 刘成立,胡东,栾姗姗,等. 奶河下游消落带植物群落优势种间关系研究[J]. 首都师范大学学报(自然科学版), 2011,**32** (3): 34-40.

[8] LIU C L, HU D, LUAN S S, *et al.* Study on inter-specific relationships of the dominant plant populations in downstream water-level-fluctuating zone of Gui River[J]. *Journal of Capital Normal University* (Nat. Sci. Ed.), 2011,**32**(3): 34-40.

[9] 王加国,李晓芳,安明志,等. 雷公山濒危植物台湾杉群落主要乔木树种间联结性研究[J]. 西北林学院学报, 2015,**30** (4): 78-83.

[9] WANG J G, LI X F, AN M T, *et al.* Inter-specific association among main tree species in *Taiwania cryptomerioides* community in Leigong Mountain[J]. *Journal of Northwest Forestry University*, 2015,**30** (4): 78-83.

[10] 郭泉水,洪明,康义,等. 消落带适生植物研究进展[J]. 世界林业研究, 2010,**23** (4): 14-20.

[10] GUO Q S, HONG M, KANG Y, *et al.* Research development on hydro-fluctuation belt plants[J]. *World Forestry Research*, 2010,**23** (4): 14-30.

[11] WANG Q, YUAN X Z, WILLISON J H M, *et al.* Diversity and above-ground biomass patterns of vascular flora induced by flooding in the drawdown area of China's Three Gorges Reservoir[J]. *PLOS ONE*, 2014,**9** (6): 1-12.

[12] 樊大勇,熊高明,张爱英,等. 三峡库区水位调度对消落带生

- 态修复中物种筛选实践的影响[J]. 植物生态学报, 2015, **39** (4): 416-432.
- FAN D Y, XIONG G M, ZHANG A Y, *et al.* Effect of water-level regulation on species selection for ecological restoration practice in the water-level fluctuation zone of Three Gorges Reservoir[J]. *Chinese Journal of Plant Ecology*, 2015, **39** (4): 416-432.
- [13] 吕明权,吴胜军,陈春娣,等. 三峡消落带生态系统研究文献计量分析[J]. 生态学报, 2015, **35** (11): 3 504-3 518.
- LÜ M Q, WU S J, CHEN C D, *et al.* A review of studies on water level fluctuating zone (WLFZ) of the Three Gorges Reservoir (TGR) based on bibliometric perspective[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2015, **35** (11): 3 504-3 518.
- [14] 朱妮妮,郭泉水,秦爱丽,等. 三峡水库奉节以东秭归和巫山段消落带植物群落动态特征[J]. 生态学报, 2015, **35** (33): 7 852-7 867.
- ZHU N N, GUO Q S, QIN A L, *et al.* Plant community dynamics in the hydro-fluctuation belt of the Three Gorges Reservoir at the Zigui and Wushan section, East of Fengjie County, China[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2015, **35** (33): 7 852-7 867.
- [15] 付 娟,李晓玲,戴泽龙,等. 三峡库区香溪河消落带植物群落构成及物种多样性[J]. 武汉大学学报(理学版), 2015, **61** (3): 285-290.
- FU J, LI X L, DAI Z L, *et al.* Floristic composition and plant community diversity of water-level fluctuation zone along Xiangxi River, Three Gorges Reservoir Area[J]. *Journal of Wuhan University* (Nat. Sci. Ed.), 2015, **61** (3): 285-290.
- [16] LEIRA M, CANTONATI M. Effects of water-level fluctuations on lakes: an annotated bibliography[J]. *Hydrobiologia*, 2008, **613** (1): 171-184.
- [17] WHITTAKER R J, WILLIS K J, FIELD R. Scale and species richness: towards a general, hierarchical theory of species diversity[J]. *Journal of Biogeography*, 2001, **28** (4): 453-470.
- [18] 黄忠良,彭少麟,易 俗. 影响季风常绿阔叶林幼苗定居的主要因素[J]. 热带亚热带植物学报, 2001, **9** (2): 123-128.
- HUANG Z L, PENG S L, YI S. Factors affecting seedling establishment in monsoon evergreen broadleaved forest[J]. *Journal of Tropical and Subtropical Botany*, 2001, **9** (2): 123-128.
- [19] 肖文发,周志翔,黄志霖,等. 长江三峡库区森林景观格局与景观恢复研究[M]. 北京:科学出版社, 2012.
- [20] 吴东丽,上官铁梁,薛红喜,等. 滹沱河湿地植物群落的种间关系研究[J]. 山西大学学报(自然科学版), 2003, **26** (1): 71-75.
- WU D L, SHANGGUAN T L, XUE H X, *et al.* Study on interspecific relationships of the plant communities of wetland in Hutuo River Valley, Shanxi[J]. *Journal of Shanxi University* (Nat. Sci. Ed.), 2003, **26** (1): 71-75.
- [21] 刘丽艳,张 峰. 山西桑干河流域湿地植被优势种群种间关系研究[J]. 生态环境, 2006, **15** (6): 1278-1283.
- LIU L Y, ZHANG F. Interspecific relationship of dominant populations in the wetland vegetation of Sanggan River Watershed, Shanxi[J]. *Ecology and Environment*, 2006, **15** (6): 1 278-1 283.
- [22] 袁 月,傅德平,吕光辉. 新疆艾比湖湿地植被优势种群种间关系研究[J]. 湿地科学, 2008, **6** (4): 486-491.
- YUAN Y, FU D P, LÜ G H. Inter-specific relations of the dominant plants of the wetland vegetation in the Erbin Lake Wetland in Xinjiang Uygur Autonomous Region[J]. *Wetland Science*, 2008, **6** (4): 486-491.
- [23] 钟彦龙,王银山,徐 敏,等. 艾比湖湿地植物种间关系研究[J]. 干旱区资源与环境, 2010, **24** (5): 153-157.
- ZHONG Y L, WANG Y S, XU M, *et al.* Interspecific relationship among the plants in Ebinur Lake Wetland[J]. *Journal of Arid Land Resources and Environment*, 2010, **24** (5): 153-157.
- [24] 焦 磊,张 峰. 汾河连伯滩湿地植被生态种组[J]. 林业科学, 2011, **47** (4): 7-12.
- JIAO L, ZHANG F. Ecological species groups of wetland vegetation on Lianbotan in Fen River, Shanxi[J]. *Scientia Silvae Sinicae*, 2011, **47** (4): 7-12.
- [25] WILCOX D A, NICHOLS S J. The effects of water-level fluctuations on vegetation in a Lake Huron Wetland[J]. *Wetlands*, 2008, **28** (2): 487-501.
- [26] SCHLUTER D. A variance test for detecting species associations, with some example applications[J]. *Ecology*, 1984, **65** (3): 998-1 005.
- [27] 周刘丽,张晴晴,赵延涛,等. 浙江天童枫香树群落不同垂直层次物种间的联结性与相关性[J]. 植物生态学报, 2015, **39** (12): 1 136-1 145.
- ZHOU L L, ZHANG Q Q, ZHAO Y T, *et al.* Species association and correlation between vertical layers in the *Liquidambar formosana* community in Tiantong Region, Zhejiang Province[J]. *Chinese Journal of Plant Ecology*, 2015, **39** (12): 1 136-1 145.
- [28] 张佳蕊,陈 燕,雷 霆,等. 北京汉石桥湿地植物群落优势种的种间关系研究[J]. 湿地科学, 2007, **5** (2): 146-152.
- ZHANG J R, CHEN Y, LEI T, *et al.* Inter-specific relations of the dominant plant populations in the Hanshiqiao wetland in Beijing [J]. *Wetland Science*, 2007, **5** (2): 146-152.
- [29] 杜道林,刘玉成,李 睿. 缙云山亚热带栲树林优势种群间联结性研究[J]. 植物生态学报, 1995, **19** (2): 149-157.
- DU D L, LIU Y C, LI R. Study on the interspecific association of dominant species in a subtropical *Catanopsis fargesii* forest of Jinyun Mountain, China[J]. *Acta Phytocologica Sinica*, 1995, **19** (2): 149-157.
- [30] 钟 宇,张 健,杨万勤,等. 巨桉人工林草本层优势种的种间关系及生态种组的划分[J]. 草业学报, 2010, **19** (3): 56-62.
- ZHONG Y, ZHANG J, YANG W Q, *et al.* Interspecific relationships and ecological species groups of dominant herbage species in *Eucalyptus grandis* plantation[J]. *Acta Prataculturae Sinica*, 2010, **19** (3): 56-62.
- [31] 靳瑰丽,董莉莉,安沙舟,等. 天山北坡醉马草种间关联分析[J]. 草地学报, 2014, **22** (6): 1 180-1 185.
- JIN G L, DONG L L, AN S Z, *et al.* Interspecific relationships of *Achnatherum inebrians* communities in the north slope of Tianshan Mountains [J]. *Acta Agrestia Sinica*, 2014, **22** (6): 1 180-1 185.

(编辑:潘新社)