

三峡大坝下游残存疏花水柏枝种群结构和动态

鲍大川^{1,2,3}, 卢志军^{1,2}, 江明喜^{1,2*}, 徐绍东⁴, 姚清⁴, 刘全芳⁴, 王琼⁴

(1. 中国科学院水生植物与流域生态重点实验室, 武汉 430074; 2. 中国科学院武汉植物园, 武汉 430074;
3. 中国科学院研究生院, 北京 100049; 4. 湖北宜都市野生动植物保护站, 湖北宜都 443300)

摘要: 在三峡大坝下游的湖北宜都关洲设立 1 个 40m×40m 的固定样地, 利用高度分级, 比较 2008 与 2009 年两年间的疏花水柏枝(*Myricaria laxiflora*)种群数量动态, 并运用点格局的 Ripley's *K* 函数分析了其空间格局变化及种群更新特征。结果表明, 疏花水柏枝幼苗数量较少, 种群更新存在一些障碍。空间分布格局与空间尺度及植株的大小密切相关。种群总体呈集群分布, 各大小级多在 9 m 时出现最大的聚集强度, 随着大小级的增加, 聚集强度有减弱的趋势。幼苗与中株有较强的正关联。由于种群现有生境变化较大, 应考虑迁地保护, 并对原生种群加强长期动态监测; 同时, 开展疏花水柏枝适应机理研究, 实施科学保护。

关键词: 疏花水柏枝; 河岸带; 种群动态; 点格局分析; 空间关联

中图分类号: Q948

文献标识码: A

文章编号: 1000-470X(2010)06-0711-07

Population Structure and Dynamics of Remanent *Myricaria laxiflora* Downstream from the Three Gorges Dam

BAO Da-Chuan^{1, 2, 3}, LU Zhi-Jun^{1, 2}, JIANG Ming-Xi^{1, 2*}, XU Shao-Dong⁴, YAO Qing⁴,
LIU Quan-Fang⁴, WANG Qiong⁴

(1. Laboratory of Aquatic Botany and Watershed Ecology, Chinese Academy of Sciences, Wuhan 430074, China;

2. Wuhan Botanical Garden, Chinese Academy of Sciences, Wuhan 430074, China; 3. Graduate University of Chinese Academy of Science, Beijing 100049, China; 4. Wildlife Protection Station of Yidu, Yidu, Hubei 443300, China)

Abstract: *Myricaria laxiflora* is an endangered shrub distributed around the Three Gorges Reservoir. To understand the impacts of the Three Gorges Dam on population dynamics and spatial pattern of remanent *M. laxiflora*, a permanent 40 m × 40 m plot was established on a sandbar downstream from the dam. We analyzed the spatial pattern and population dynamics of *M. laxiflora* between 2008 and 2009 using univariate and bivariate Ripley's *K* function. Our results demonstrated that *M. laxiflora* population regeneration was impacted, particularly in regards to small number of seedlings. The spatial pattern of *M. laxiflora* was significantly correlated with spatial scales and individual size. *Myricaria laxiflora* was aggregated at most scales from 2 m to 20 m, with highest aggregation intensity at 9 m. With size increase, the aggregation intensity tended to decline. Population recruitment relied on the middle-sized individuals. We proposed that *ex-situ* conservation should be considered for *M. laxiflora*, and its population dynamics in natural habitats should be monitored over the long term.

Key words: *Myricaria laxiflora*; Riparian zone; Population dynamics; Point pattern analysis; Spatial association

收稿日期: 2010-02-01, 修回日期: 2010-04-15。

基金项目: 中国科学院院地合作局资助项目; 中国科学院知识创新工程领域前沿项目(540754501J0447)(Supported by Bureau of Academy-Locality Cooperation Chinese Academy of Sciences and the Knowledge Innovation Program of Chinese Academy of Sciences (Grant No. 540754501J0447))。

作者简介: 鲍大川(1986-), 男, 硕士研究生, 研究方向为植被生态学。

* 通讯作者(Author for correspondence. E-mail: mxjiang@wbpcas.cn)。

河岸带兼具陆地和水生态系统的特征^[1],洪水干扰是河岸带研究的重要内容^[2]。洪水不仅对植株冠层有很大影响,同时伴随着对地形和表层土壤的改变^[3]。因而,受洪水干扰,植物群落结构会发生很大变化^[4],种群年龄结构及空间分布格局等也随之发生改变^[5]。空间分布格局是种群动态的基本数量特征之一,能够反映基本的生态学过程,也是研究群落结构,植物种群与环境关系的重要手段,一直是生态学研究热点之一^[6]。空间格局研究主要包括判定空间分布类型和空间关联性^[6],而幼苗与其他级别个体的空间关联则反映了种群的更新格局,是决定种群分布动态的重要因素。

疏花水柏枝(*Myricaria laxiflora*)是柽柳科(Tamaricaceae)水柏枝属(*Myricaria*)的一种多年生灌木,主要分布在长江三峡干流河岸带区域。较早的报告认为三峡工程的建设将导致疏花水柏枝的自然生境全部被毁坏^[7],因此疏花水柏枝的保护引起广泛的关注。就该物种的保护开展了一系列工作,包括种子结构^[8]、形态结构^[9]、群落结构^[10,11]、繁殖技术^[12,13]、遗传多样性^[14]、生理生态^[15]以及迁地保护等^[16]。但对该物种的种群结构和分布格局方面的研究尚未见报道。2007年12月在三峡大坝下游3处江心洲上重新发现疏花水柏枝的野生种群,为研究该物种的种群结构动态提供了一个良好的契机。

本文通过对三峡大坝下游宜都关洲岛上的疏花水柏枝种群进行定位研究,旨在了解该区域种群动态与空间分布格局,并试图探讨季节性洪水干扰对该物种的影响,为其自然种群保护提供科学依据。

1 研究地区概况

研究地点位于三峡大坝下游的湖北宜都市与松滋市交界的关洲岛上,地理位置为30°39.270'N、111°18.958'E,属亚热带季风性湿润气候。该地区四季分明,春秋较长,年平均降水量为992.1~1404.1 mm,雨水丰沛,多在夏季,较长的降水过程多发生在6~7月份,雨热同季,全年积温较高,无霜期较长,约300 d。年平均气温为13.1~18°C,极端最高气温41.4°C,极端最低气温-15.6°C。

每年5~9月由于上游三峡大坝排洪,该江心洲大部分面积被淹没,生境主要为砾石沙滩和细沙。由于长期受到长江汛期水淹干扰,植被以灌丛为主,且群落的物种组成也比较简单,主要物种有:秋华柳(*Salix variegata*)、疏花水柏枝、狗牙根(*Cynodon dactylon*)、苔草(*Carex tristachya*)、灰绿藜(*Chenopodium glaucum*)、蒿蓐(*Polygonum aviculare*)、繁缕(*Stellaria media*)等。

2 研究方法

2.1 野外调查

2008年4月上旬在砾石地上选择以疏花水柏枝为建群种的典型样地,建立40 m×40 m的永久固定样地。样地位于江心洲的中上段区域,基质主要是砾石和细沙地,汛期样地会全部被淹没。测定每株疏花水柏枝的冠幅,地上部分高度并记录植株相对于设定原点的平面坐标,2009年4月对样地进行复查。

由于疏花水柏枝是珍稀物种,在野外调查过程中不能通过挖取大量的植株获取其年轮与基径的确切关系。根据野外观察,疏花水柏枝幼龄个体(一、二年生)高度通常不超过0.2 m,再继续生长,普通小株基本上能够达到0.5 m,之后植株便趋于成熟,逐渐达到较高高度。鉴于疏花水柏枝株高和生长年限基本一致,因而将疏花水柏枝的株高作为估计参数。将疏花水柏枝划分为4个大小级别,

级:株高 $h \leq 0.2$ m,相当于幼苗; 级: $0.2 \text{ m} < h \leq 0.5$ m为小株; 级: $0.5 \text{ m} < h \leq 0.8$ m,为中株; 级: $h > 0.8$ m,为大株。两年中植株最高高度分别1.47 m和2.03 m。

2.2 数据分析

数据分析采用的是Ripley^[17]的点格局分析方法,计算整个样地和不同大小级疏花水柏枝的 $\hat{K}(t)$ 值, $\hat{K}(t)$ 值可以反映种群在空间尺度 t 上的分布格局。 $\hat{K}(t)$ 值的计算公式如下:

$$\hat{K}(t) = \frac{A}{n^2} \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n \frac{1}{W_{ij}} I_t(u_{ij}) \cdots (i \neq j)。$$

式中, A 表示样地面积; n 表示样地中疏花水柏枝每个株高等级的个体总数; u_{ij} 表示第 i 株疏花水柏枝个体和第 j 株个体之间的距离; t 为空间尺度。

当 $u_{ij} \leq t$ 时, $I_t(u_{ij})=1$, 反之, $I_t(u_{ij})=0$; W_{ij} 为以 i 为圆心, 以 u_{ij} 为半径的圆落在面积 A 中的弧长与整个圆周的比值, 可以校正边界效应所引起的误差。

在实际运用中, 通常将 $\hat{K}(t)$ 值的计算公式变化为:

$$L(t) = \sqrt{\hat{K}(t)/\pi} - t.$$

当 $L(t) > 0$ 时, 相应群体在尺度 t 服从集群分布; 当 $L(t) = 0$ 时, 相应群体在尺度 t 服从随机分布; 当 $L(t) < 0$ 时, 相应群体在尺度 t 服从均匀分布。用 Monte-Carlo 随机模拟法拟合 $L(t)$ 偏离零值的 95% 上下包迹线即置信区间。若实际分布的 $L(t)$ 落在包迹线内, 则符合随机分布; 若落在包迹线以外, 则显著偏离点集为随机分布的零假设: 位于包迹线以上, 则符合聚集分布; 位于包迹线以下, 则符合均匀分布。

计算疏花水柏枝两个大小级之间的 $\hat{V}(t)$ 值, $\hat{V}(t)$ 值可以反映大小级 p 和 q 在空间尺度 t 上的空间关联性。计算公式如下:

$$\hat{V}(t) = \frac{A}{n_p n_q} \sum_{i=1}^{n_p} \sum_{j=1}^{n_q} \frac{1}{W_{ij}} I_t(u_{ij}) \quad (i \neq j).$$

式中, n_p 和 n_q 分别表示大小级 p 和 q 的个体数; i 代表大小级 p 的第 i 株疏花水柏枝; j 代表大小级 q 的第 j 株疏花水柏枝; A 表示样地面积; n 表示样地中疏花水柏枝的总体或者每个株高等级的个体总数; u_{ij} 表示第 i 株疏花水柏枝个体和第 j 株个体之间的距离; t 表示空间尺度。当 $u_{ij} \leq t$ 时, $I_t(u_{ij})=1$, 反之, $I_t(u_{ij})=0$; W_{ij} 为以 i 为圆心, 以 u_{ij} 为半径的圆落在面积 A 中的弧长与整个圆周的比值。

同理, $\hat{V}(t)$ 也可以简化为:

$$M(t) = \sqrt{\hat{V}(t)/\pi} - t.$$

当 $M(t) > 0$ 时, 大小级 p 和 q 在尺度 t 具有正相关联系; 当 $M(t) = 0$ 时, 大小级 p 和 q 在尺度 t 没有关联; 当 $M(t) < 0$ 时, 大小级 p 和 q 在尺度 t 具有负相关联系。

在 $40 \text{ m} \times 40 \text{ m}$ 样方中, 数据分析采用空间尺度 $0 \sim 20 \text{ m}$, 步长为 0.25 m , Monte-Carlo 随机模拟的数目为 200 次。得到 $L(t)$ 和 $M(t)$ 由上下包迹线围成的 95% 的置信区间。

3 研究结果

3.1 种群结构动态

疏花水柏枝总株数由 2008 年的 1284 株减少到 2009 年的 1165 株, 损失率为 9.3%。由图 1 可以看出, 在此样地中, Ⅱ级和 Ⅲ级个体占大多数, 其中 2008 年 Ⅱ级 825 株, 占总数的 64.25%, Ⅲ级个体 330 株, 占 25.7%。到 2009 年, Ⅱ级和 Ⅲ级个体分别成为 28.41%(331 株)和 59.40%(692 株)。随着年龄的增长, Ⅱ级数量有大幅增长, 由 20 株(1.5%)增长为 120 株(10.3%), 而 Ⅳ级幼苗大量减少, 由 109 株减少到 22 株。

为了解种群的动态变化, 我们统计了在一年生长过程中植株个体的大小级变化情况(表 1)。各大小级的生长状态明显不同, 在进阶率和死亡率上, 表现出了 Ⅱ级 > Ⅲ级 > Ⅳ级, 三大大小级之间差异极显著($\chi^2=198.3$, $p=0.000$)。

3.2 点格局分析

2008 年的分析结果(图 2)表明, 整体上, 疏花水柏枝种群各大小级均倾向于集群分布, 并在 $8 \sim 10 \text{ m}$ 处获得最大的聚集强度。随着尺度的变化, 疏花水柏枝种群的空间分布格局各异: 如在 $>18 \text{ m}$ 的尺度上, Ⅱ级个体表现为随机分布。Ⅲ级个体则在 $3 \sim 18 \text{ m}$ 处为显著的集群分布。Ⅳ级个体则呈现完全的集群分布, 只是聚集强度随尺度增大而有所变化。而 Ⅰ级和 Ⅱ级个体则在一些特定尺度范围会呈现随机分布。

在 2009 年, 种群空间分布格局基本保持原有状态。种群的 Ⅱ级个体数量较少, 与 2008 年的 Ⅲ级个体相似, 随着分析尺度增大, 空间分布格局结果也变化较大: 在 $4 \sim 11 \text{ m}$ 及大于 16.5 m 时呈现

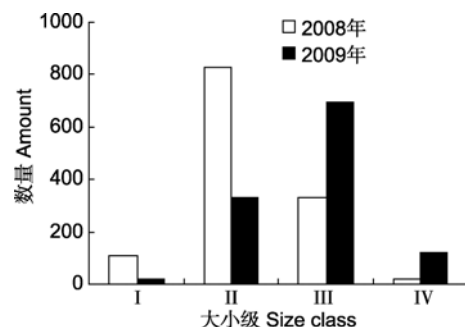


图 1 疏花水柏枝种群两年间各大小级结构
Fig. 1 Size class structure of *Myricaria laxiflora* population in 2008 and 2009

表 1 种群各大小级植株的生长变化状况
Table 1 Growth state of four size classes

大小级 Size class	2008 年 Year 2008	维持 Stasis	进阶 Upgrade	死亡 Death	新增 Recruitment	2009 年 Year 2009
I	109	13	82(67,15)	14	9	22
II	825	264	473(441,32)	88	—	331
III	330	236	68	26	—	692
IV	20	—	—	0	—	120

注: 括号中的数字分别表示该大小级植株进入后两个大小级的数量。

Note: The two numbers in brackets denote number of individuals upgraded to the next two size classes, respectively.

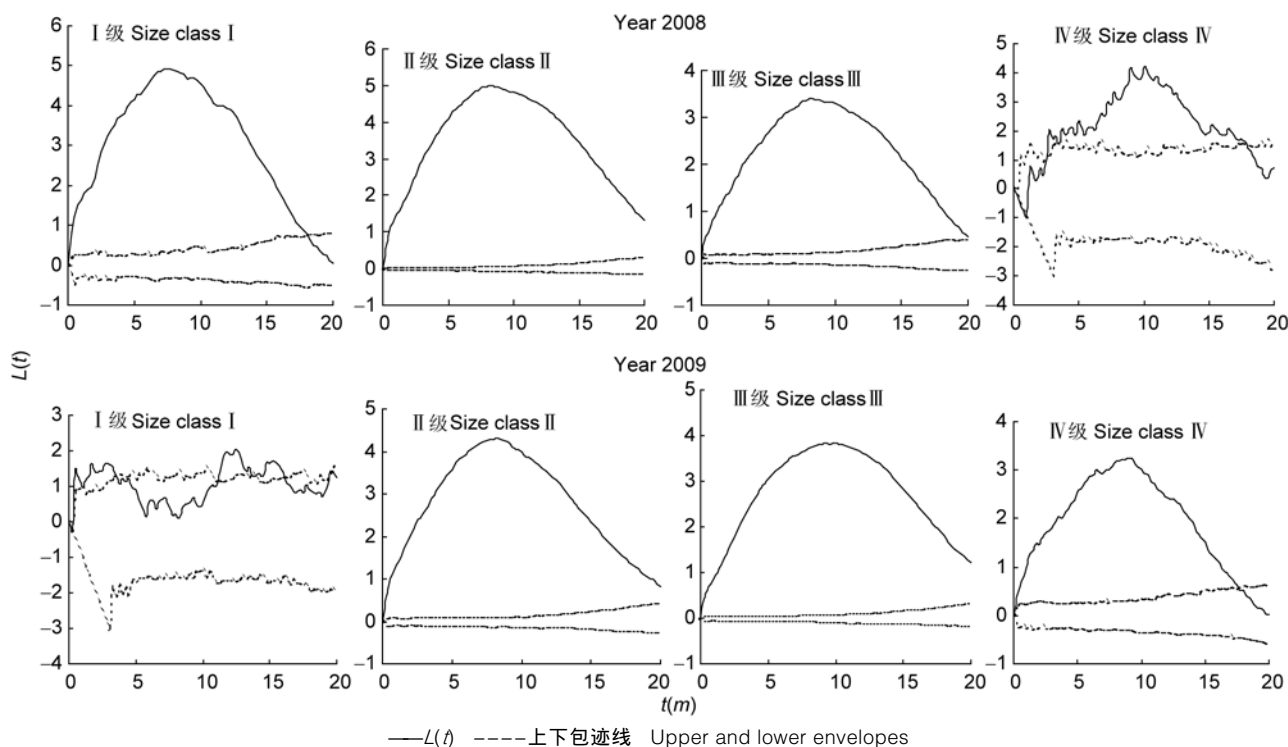


图 2 疏花水柏枝 2008 和 2009 年 4 个大小级的空间分布格局
Fig. 2 Spatial point pattern of *Myricaria laxiflora* population in 2008 and 2009

集群分布, 在其他尺度上则呈现随机分布。级个体由于总数减少, 聚集强度也有减弱, 而级个体正好与之相反。由于基本上植株 2 年中的 $L(t)$ 值都是在 $t(m)$ 为 9m 时达到最大, 说明种群在空间尺度为 9m 时聚集强度最大。另外, 就每一年的格局分析来看, 随着大小级的增加, 聚集强度都有减弱的趋势。

3.3 不同大小级与幼苗的空间关联

为了解幼苗的生长情况, 探讨种群的更新特征, 我们将幼苗分别与其他大小级进行空间关联分析。由图 3 可以看出, 2008 年的级和级在 0~9 m 范围时, $L(d)$ 值在上包线以上, 表明两个级别呈显著正关联, 在 9~13m 范围无关联, 在 13m 以

上范围内呈现显著的负关联。而级与级在 0~19 m 内正关联, 级与级在 0~15 m 内正关联。2009 年由于级幼苗总数的减少, 导致三个级别与幼苗的空间关联发生了较大的变化。级与级的正相关性比 2008 年有增强, 而级与级的正相关性稍减弱, 级与级则更多呈现无关联或者负关联。分析总体表明, 级与级有较显著的正相关关系, 与级, 级的空间关系则随尺度变化而有所不同。

4 讨论

4.1 种群动态与更新

从种群的统计结果来看, 2008 年和级所

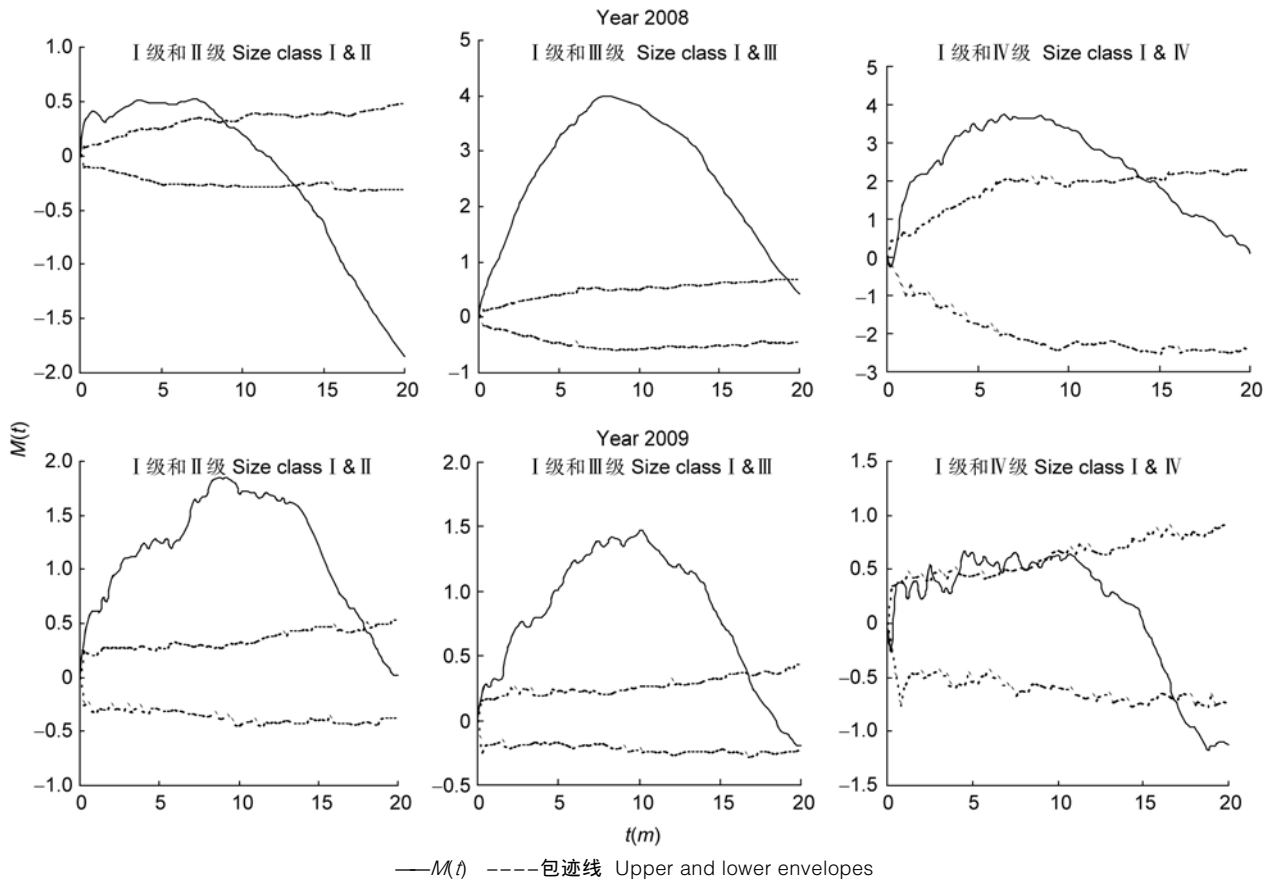


图 3 2008 和 2009 年疏花水柏枝三个级别与幼苗的空间关联

Fig. 3 Spatial association between three size classes and seedling of *Myricaria laxiflora* in 2008 and 2009

代表的中老年个体占多数, 而幼龄个体数量较少, 种群结构呈衰退型。通常在大坝下游, 泥沙沉积的减少以及水流的变化能够改变河流地形^[18], 由此所造成的种群衰退也一直被人关注^[19,20]。而 2009 年的复查发现, 随着个体的增长, Ⅰ级和Ⅱ级个体数增加, 但代表Ⅲ级的幼龄个体数量大幅减少, 幼苗更新受到了阻碍。

由于三峡大坝的泄洪, 每年 5~9 月, 处于大坝下游样地中的疏花水柏枝长时间被完全淹没。通常在水淹环境中, 植物通过调节可溶性糖、脯氨酸^[21]和次生代谢产物合成^[22]以适应水淹胁迫。然而陈芳清等^[23]研究表明, 疏花水柏枝虽对夏季水淹也有生理生化反应, 但并未受到水淹的影响, 而是受本身生长节律控制, 进入夏季无论是否被水淹都会进入休眠, 之后继续恢复生长。而一次大的洪水往往可以将现存植物大量清除^[24], 夏季水淹将不耐水淹和耐水淹力弱的植物淹死或抑制其生长, 客观上为疏花水柏枝在洪水期的生存和在枯

水期的生长创造了有利条件。

由于夏季水淹对疏花水柏枝个体的生长和恢复并无明显影响^[25], 那么幼苗缺乏原因可能有两个方面: 第一, 疏花水柏枝种子的寿命较短, 仅 7~10 d^[11]。大量种子散落后, 遇到合适条件在 1~2 d 内迅速萌发。但如果在 7~10 d 内如果没有适合条件萌发, 则种子失去活力, 不再萌发; 第二, 是洪水对植株的冲击作用。如果幼苗不能较深的扎根, 则可能被洪水冲走, 导致幼苗存活率较低。因此, 随着成年个体的不断老化死亡, 幼苗更新所存在的障碍可能会导致种群存在衰亡的风险。

4.2 空间格局的成因

在自然条件下, 一般植物多呈现集群分布, 珍稀濒危植物尤其如此^[26], 疏花水柏枝种群的分布情况也基本符合。在江心洲样地中由于人为干扰较少, 种群空间格局主要是受到洪水影响以及生物之间的相互作用而发生改变。长期的洪水淹没可能会直接改变种群数量和密度, 因而是影响种

群空间格局的一个重要过程。尽管疏花水柏枝可以通过调节自身生理来适应水淹状况,但无法抵挡洪水冲击的物理作用,调查中也发现部分个体由于遭受洪水冲刷从基部折断导致植株死亡。同时,洪水的冲刷也使得部分幼苗由于扎根不深而被江水直接冲走;Rood 等^[27]在研究大坝的建设对下游植被影响时认为大坝会拦截大量泥沙,导致下游水质变清,三峡大坝可能同样出现这种情况,不仅没有泥沙沉积还会冲刷带走岛上的泥沙,影响植株的生长,更加剧了植株的损失。

在生物之间关系方面,由于疏花水柏枝是该样地的单优建群种,因此我们可以认为空间格局的形成主要是由种内关系引起的。通常物种的聚集分布被认为是局部扩散,有利的微生境和缺乏种间竞争的结果^[28],在这里则主要是缺乏种间竞争。有研究指出疏花水柏枝生长是受到密度制约的^[29]。但在本样地,种群平均密度不到 1 株/m²,基本不存在密度制约,同时个体之间可能为共同抵御洪水冲刷而形成集群分布以增强抵抗力。

本研究时间跨度较短,种群的集群分布状态在两年间无较大变化。由于缺乏历史资料,深入了解洪水对种群动态和空间格局的影响应考虑通过长期监测,同时分析群落的演替过程,也许可以为种群空间分布格局动态研究提供一个更好视角^[30]。

4.3 影响分布格局的因素

疏花水柏枝的空间格局和空间尺度有密切关系,主要表现为:在较小的空间尺度内疏花水柏枝种群各大小级都表现为集群分布,与幼苗之间也表现为较强的空间正关联;当在较大的空间尺度上,聚集强度减弱,或者呈均匀分布,与幼苗的空间关联性也趋于减弱。由此可推断疏花水柏枝种群在较小的空间尺度上倾向于集群分布,具有明显的空间关联,在大于某临界尺度时则倾向于随机分布,同时空间关联变得微弱,这也与杨洪晓等^[31]对沙地油蒿的空间尺度与空间格局研究的结论相一致。

虽然总体种群呈集群分布,但各大小级的空间分布仍略有差异。就每一年格局分析情况来看,疏花水柏枝的个体大小也与空间格局有密切关系,与沙地差不嘎蒿种群的研究情况类似^[32]。随着形体增大,疏花水柏枝植株的聚集强度减弱,其空间分布有一个从聚集趋向于随机的自疏过程,但这

种过程的原因可能取决于初始的扩散,竞争强度,以及环境异质性等^[33,34],有待进一步的研究。

大小级与空间格局的关系还表现在不同大小级与幼苗的空间关联上。空间关联分析表明,幼苗与中株存在较大的正关联,中株的空间分布对后代的空间分布影响较大。这说明中株可能是种群中具备繁殖能力的成熟个体,而且塑造了适合种子萌发和幼苗生长的微环境^[35]。2008 年的小株与幼苗还呈现出显著的负相关,原因可能在于幼苗更多地集中在中株的附近,小株还不足以产生足够的种子形成幼苗。

5 结论与建议

残存的疏花水柏枝种群基本呈现集群分布,两年间种群的空间格局基本保持一致,只在细节方面有所差异。另外,随着个体的增大,空间格局有从聚集趋向于随机的变化过程,因此,需要人为加强就地保护,并对种群的长期动态监测,掌握其空间分布格局的变化规律。

尽管疏花水柏枝已对水淹形成适应,但江水的冲刷对疏花水柏枝直接的影响以及通过影响生境造成的间接影响都是不可避免的,种群更新仍存在一定的障碍。因此,仍应考虑加强迁地保护,同时,建议进一步开展疏花水柏枝生态适应机理的研究,探讨疏花水柏枝的生物学特性及其可能的起源、进化和传播途径等,科学地加以保护。

参考文献:

- [1] Naiman R J, Decamps H. The ecology of interfaces: Riparian zones[J]. *Annu Rev Ecol Syst*, 1997, 28: 621–658.
- [2] Resh V H, Brown A V, Covich A P, Gurtz M E, Li H W, Minshall G W, Reice S R, Sheldon A L, Wallace J B, Wissmar R C. The role of disturbance in stream ecology [J]. *J N A M Benthol Soc*, 1988, 7: 433–455.
- [3] Nakamura F. Forest and stream interactions in riparian zone [J]. *Jpn J Ecol*, 1995, 45: 295–300.
- [4] Sparks R E. Need for ecosystem management of large rivers and their floodplains [J]. *Bioscience*, 1995, 45: 168–182.
- [5] Friedman J M, Lee V J. Extreme floods, channel change, and riparian forests along ephemeral streams [J]. *Ecol Monogr*, 2002, 72: 409–425.

- [6] 张金屯. 植被数量生态学[M]. 北京: 科学出版社, 2004.
- [7] 陈伟烈, 梁松筠, 谢宗强. 三峡工程对库区陆生植物和植被的影响[C]//植被生态学研究. 北京: 科学出版社, 1994.
- [8] 陶勇, 陈防, 万开元, 李建强, 孟爱平, 陈树森. 疏花水柏枝种子结构特征的研究[J]. 云南植物研究, 2008, 30(2): 190–194.
- [9] 陶勇, 李建强, 江明喜, 金霞. 疏花水柏枝结构性状多样性研究[J]. 武汉植物学研究, 2004, 22(4): 315–322.
- [10] 吴金清, 赵子恩. 三峡库区特有植物疏花水柏枝的调查研究[J]. 武汉植物学研究, 1998, 16(2): 111–116.
- [11] 王勇, 吴金清, 陶勇, 李作洲, 黄宏文. 三峡库区消涨带特有植物疏花水柏枝(*Myricaria laxiflora*)的自然分布及迁地保护研究[J]. 武汉植物学研究, 2003, 21(5): 415–420.
- [12] 徐惠珠, 金义兴, 赵子恩, 江明喜, 吴金清. 三峡库区特有植物疏花水柏枝繁殖的初步研究[J]. 长江流域资源与环境, 1999, 8(2): 158–161.
- [13] 熊高明, 陈岩. 三峡特有植物疏花水柏枝的扦插繁殖初报[J]. 生物多样性, 1996, 4(1): 25.
- [14] 李作洲, 王传华, 许天全, 吴金清, 黄宏文. 三峡库区特有种疏花水柏枝的保护遗传学研究[J]. 生物多样性, 2003, 11(2): 109–117.
- [15] 陈芳清, 谢宗强. 三峡库区濒危植物疏花水柏枝的生理生化特性研究[J]. 广西植物, 2008, 28(3): 367–372.
- [16] 陈芳清, 谢宗强, 熊高明, 刘彦明, 杨会英. 三峡濒危植物疏花水柏枝的回归引种和种群重建[J]. 生态学报, 2005, 25(7): 1811–1817.
- [17] Ripley B D. Modeling spatial patterns [J]. *J Roy Stat Soc B*, 1977, 39: 172–212.
- [18] Merritt D M, Cooper D J. Riparian vegetation and channel change in response to river regulation: a comparative study of regulated and unregulated streams in the Green River Basin, USA [J]. *Regul River*, 2000, 16: 543–564.
- [19] Snyder WD, Miller G C. Changes in plains cottonwoods along the Arkansas and south Platte Rivers: eastern Colorado [J]. *Prairie Nat*, 1991, 23: 165–176.
- [20] Howe W H, Knopf F L. On the imminent decline of Rio Grande cottonwoods in Central New Mexico [J]. *Southwest Nat*, 1991, 36: 218–224.
- [21] 肖强, 郑海雷, 叶文景, 陈瑶, 朱珠. 水淹对互花米草生长及生理的影响[J]. 生态学杂志, 2005, 24(9): 1025–1028.
- [22] 李昌晓, 钟章成. 三峡库区消落带土壤水分变化对落羽杉(*Taxodium distichum*)幼苗根部次生代谢物质含量及根生物量的影响[J]. 生态学报, 2007, 27(11): 4394–4402.
- [23] 陈芳清, 谢宗强. 濒危植物疏花水柏枝对模拟夏季水淹的生理生化响应[J]. 热带亚热带植物学报, 2009, 17(3): 249–253.
- [24] Henry C P, Amoros C, Bornette G. Species traits and recolonization processes after flood disturbances in riverine macrophytes [J]. *Vegetatio*, 1996, 122: 13–27.
- [25] Chen F Q, Xie Z Q. Survival and growth responses of *Myricaria laxiflora* seedlings to summer flooding [J]. *Aquat Bot*, 2009, 90: 333–338.
- [26] 张文辉, 祖元刚, 刘国彬. 十种濒危植物的种群生态学特征及致危因素分析[J]. 生态学报, 2002, 22(9): 1512–1520.
- [27] Rood S B, Mahoney J M. Collapse of riparian poplar forests downstream from dams in western prairies: probable causes and prospects for mitigation [J]. *Environ Manage*, 1990, 14: 451–464.
- [28] Barot S, Gifnoux J, Menaut J C. Demography of a savanna palm tree: Predictions from comprehensive spatial pattern analyses [J]. *Ecology*, 1999, 80: 1987–2005.
- [29] 陈芳清, 熊高明, 谢宗强. 密度对濒危物种疏花水柏枝幼苗存活与生长的影响[J]. 生物多样性, 2005, 13(4): 332–338.
- [30] Malkinson D, Kadmon R, Cohen D. Pattern analysis in successional communities: An approach for studying shifts in ecological interactions [J]. *J Veg Sci*, 2003, 14: 213–222.
- [31] 杨洪晓, 张金屯, 吴波, 李晓松, 张友炎. 毛乌素沙地油蒿种群点格局分析[J]. 植物生态学报, 2006, 30(4): 563–570.
- [32] 曹宴宁, 史利莎, 韩烁, 侯安燕, 涂凡, 张金屯. 科尔沁沙地植被恢复中差不嘎蒿种群不同龄级个体的点格局分析[J]. 植物学通报, 2008, 25(4): 437–442.
- [33] McAuliffe J R. Monrovia dynamics of simple and complex desert plant communities [J]. *Am Nat*, 1988, 131: 459–490.
- [34] Tielborger K, Kadmon R. Temporal environmental variation tips the balance between facilitation and interference in desert plants [J]. *Ecology*, 2000, 81: 1544–1553.
- [35] 刘彤, 赵新俊, 贾亚敏, 崔运河, 骆郴, 魏鹏, 张元杭, 林海荣. 古尔班通古特沙漠南缘心叶驼绒藜种群更新的空间格局[J]. 中国沙漠, 2008, 28(2): 258–264.

(责任编辑: 张平)