

甘肃敦煌西湖多枝怪柳群落特征和种群格局

郑姚闽¹ 崔国发¹ 雷 霆¹ 吴三雄² 孙志成² 袁海峰²

(1 北京林业大学自然保护区学院 2 甘肃敦煌西湖国家级自然保护区管理局)

摘要:为阐明多枝怪柳的群落特征和种群格局,选择甘肃敦煌西湖国家级自然保护区作为调查地点,在 2006 年 10 月和 2007 年 6 月分别调查了 35 个 20 m × 20 m 的样方,采集了经纬度、海拔和土壤类型等环境因子数据,运用物种丰富度指数、物种多样性指数和物种均匀度指数等多样性指标及丛生指标、平均拥挤度、聚块性指数、扩散系数和负二项参数等聚集强度指标进行分析。结果表明:多枝怪柳群落中共记录植物 20 种,分属 12 科 19 属,其中,灌木层 8 种,分属 5 科 8 属,草本层 12 种,分属 7 科 11 属;该群落可划分为 4 个群丛组:Ⅰ 多枝怪柳-芦苇群丛组;Ⅱ 多枝怪柳+苏枸杞群丛组;Ⅲ 多枝怪柳+盐节木群丛组;Ⅳ 多枝怪柳沙包群丛组。多枝怪柳群落的物种丰富度指数为 0.375,物种多样性指数为 0.330,物种均匀度指数为 0.487。从群丛组间比较来看,物种丰富度指数和物种多样性指数呈现相同的分布规律,依次为Ⅲ>Ⅱ>Ⅰ>Ⅳ;物种均匀度指数依次为Ⅲ>Ⅳ>Ⅱ>Ⅰ。从指数间的相关性分析来看,物种多样性指数与物种均匀度指数呈极显著正相关,相关系数达 0.920 ($\alpha < 0.01$)。种群格局分析表明,多枝怪柳和共建种芦苇的种群空间分布都呈显著的聚集分布,且芦苇对空间的侵占和填充能力要强于多枝怪柳。

关键词:湿地;群丛组;多样性指数;均匀度指数

中图分类号: S718.5 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-1522(2010)04-0034-11

ZHENG Yao-min¹; CUI Guo-fa¹; LEI Ting¹; WU San-xiong²; SUN Zhi-cheng²; YUAN Hai-feng².

Community characteristics and population patterns of *Tamarix ramosissima* in Dunhuang Xihu of Gansu Province, northwestern China. *Journal of Beijing Forestry University* (2010) 32 (4) 34-44 [Ch, 38 ref.]

1 College of Nature Conservation, Beijing Forestry University, 100083, P. R. China;

2 Administrative Bureau of Gansu Dunhuang Xihu National Nature Reserve, 736200, P. R. China.

In order to illustrate the community characteristics and population patterns of *Tamarix ramosissima* in Dunhuang Xihu National Nature Reserve of Gansu Province, northwestern China, we investigated environmental factors, i. e. latitude, longitude, elevation and soil types in 35 quadrats (20 m × 20 m) from October 2006 to June 2007, by using three diversity indices, i. e. the Margalef's richness index, Simpson's diversity index and Pielou's evenness index, as well as the methods, such as a clump index, mean crowding index, index of patchiness, dispersion coefficient and negative binomial parameter. There were 20 species in the *T. ramosissima* community, belonging to 19 genera and 12 families, of which 8 shrub species belong to 8 genera and 5 families and 12 grass species belong to 11 genera and 7 families. The *T. ramosissima* community was sorted into four association groups: I Ass. Group *T. ramosissima* + *Phragmites communis*, II Ass. Group *T. ramosissima* + *Lycium ruthenicum*, III Ass. Group *T. ramosissima* + *Halocnemum strobilaceum* and IV Ass. Group *T. ramosissima* sand dune. The value of the Margalef's richness index was 0.375, the Simpson diversity index 0.330 and Pielou's evenness index 0.487. The Margalef and Simpson indices showed the same distribution patterns among the four groups,

收稿日期:2009-07-26

基金项目:“十一五”国家科技支撑计划项目(2008DADB001)。

第一作者:郑姚闽,博士生。主要研究方向:湿地保护与利用。电话:010-62337944 Email: ymzheng414@163.com 地址:100083 北京市清华东路 35 号北京林业大学自然保护区学院。

责任作者:崔国发,教授,博士生导师。主要研究方向:自然保护区学。电话:010-62336716 Email: fa6716@263.net 地址:同上。

本刊网址: <http://www.bjfujournal.cn>; <http://journal.bjfu.edu.cn>

both in the following order: III > II > I > IV, while the order of Pielou's evenness index was: III > IV > II > I. Simpson's diversity index showed a significantly positive correlation with Pielou's evenness index, with a correlation coefficient of 0.920 ($\alpha < 0.01$). The populations of *T. ramosissima* and *P. communis* both appeared as clumped distributions, of which the *P. communis* population showed stronger invasive and recruitment capacity compared with *T. ramosissima*.

Key words wetland; association group; diversity index; evenness index

多枝怪柳 (*Tamarix ramosissima*) 是怪柳属分布最广泛的物种, 主要分布于西藏西部、新疆、柴达木盆地、河西走廊、内蒙古西部和宁夏北部等西北干旱地区, 是维持干旱地区生态系统的关键种, 同时也是甘肃敦煌西湖国家级自然保护区 (以下简称敦煌西湖) 重要的植物群落建群种。

植物群落是在一定的气候、土壤及生物等因素的综合作用下形成的植物组合^[1]。其基本特征是植物与植物、植物与环境之间的相互关系; 其可见标志是群落中各种植物在空间上和时间上的配置状况。许多文献报道了植物多样性随海拔、纬度、温度、水分、地形、地貌、土壤养分和群落演替阶段等因素的变化规律, 广泛涉及森林群落^[2]、草原群落^[3-4]、荒漠植被^[5]和湿地植被^[6]等。

种群不仅是联结群落与个体的纽带, 而且是生物群落、生态系统的基本组成成分。种群分布格局是指在特定时间内, 群落中某一种群在空间上的分布状况^[7-8]。研究种群分布格局的目的不仅在于了解群落的空间结构特征和定量描述种群的水平结构, 更重要的是揭示种群的生物学特性、生态学特性^[9]、种群间的相互作用规律^[10]及一定环境因子对种群行为或生存的作用^[11], 预测种群与群落的发生、发展趋势^[12]。目前, 研究种群分布格局的方法很多, 应用效果较好、方法简单而有效的是聚集强度指标, 它既可判断分布格局的类型, 又可为研究种群个体行为、种群扩散型提供一定的信息^[13]。采用聚集强度指标测定种群分布格局的研究报道已很多, 种群涉及兴安落叶松 (*Larix gmelini*)^[14-15]、青海云杉 (*Picea crassifolia*)^[16]、胡杨 (*Populus euphratica*)^[17-19]、水蕨 (*Ceratopteris thalictroides*)^[20]、桫欏 (*Alsophila spinulosa*)^[21] 和黑桫欏 (*Gymnosphaera podophylla*)^[22] 等。

敦煌西湖位于极干旱地区, 西邻库姆塔格大沙漠, 西北部与罗布泊相连通, 这种特殊的气候环境条件孕育了敦煌西湖湿地的独特性。敦煌西湖湿地在我国乃至在世界上都具有重要的特殊性, 是开展荒漠湿地研究的天然实验室。前人在敦煌西湖开展了一些本底清查工作^[23-26], 但尚未见多枝怪柳群落生态学或种群生态学相关的文献报道。本文通过野外调查和数据分析, 阐述了多枝怪柳群落的物种组成、

垂直结构、群落类型等群落特性以及多样性特征和种群分布格局, 旨在为敦煌西湖的植被监测、湿地恢复与植被重建提供理论依据。

1 研究区概况

敦煌西湖位于河西走廊最西端, 地处敦煌市西郊。西接库姆塔格大沙漠, 南与阿克赛哈萨克族自治县相邻, 北与新疆维吾尔自治区接壤。地理坐标 92°45' ~ 93°50' E, 39°45' ~ 40°36' N。河西走廊地处青藏高原和蒙古高原的过渡地带, 自然景观独特, 气候条件复杂, 植物群落类型多样, 地貌气候及植物群落地域分异明显^[27]。在地质构造上, 敦煌西湖属于安西-敦煌盆地, 该盆地宽 100 ~ 120 km, 海拔 900 ~ 2 500 m^[28], 地势自南北两侧向中部和由东向西缓倾。敦煌西湖的位置见图 1。

敦煌西湖的面积为 66 万 hm², 湿地面积为 11.35 万 hm², 区内海拔 820 ~ 2 359 m, 地势南高北低, 中间为冲积平原。南部海拔在 1 400 m 以上, 南北走向的崔木土沟和多坝沟使得阿尔金山的冰川融水能够通过地下径流到达核心区湾腰墩, 北达火烧湖一带。中部疏勒河冲积平原海拔大都在 900 ~ 1 100 m, 呈东西条状横穿保护区东北部; 在玉门关以东为湖盆洼地、河间垄岗和槽状洼地, 海拔 1 020 ~ 1 060 m; 玉门关至马迷兔之间为碟形洼地和梁状缓岗, 如盐池湾; 马迷兔以西为喇叭形, 由较狭窄向西逐渐宽阔, 由于受戈壁、流沙的影响, 怪柳沙包和流动沙丘广泛分布; 核心区湾腰墩海拔最低, 为 820 ~ 900 m。北山为敦煌西湖的北界, 海拔 1 000 ~ 1 400 m。

敦煌西湖属典型的温带大陆性气候, 气候极端干旱。年降水量 39.9 mm, 年蒸发量 2 486 mm, 年平均温度 9.9℃, 最低气温 -30℃, 最高气温 40℃, 年较差达 70℃; 光照丰富, 年日照为 3 115 ~ 3 247 h, 日照率 70% ~ 73%。

由于地貌、地形及气候的影响, 河西走廊植物区系具有明显的荒漠植物区系特征, 种类贫乏 (种子植物 53 科 156 属 326 种), 生活型以灌木和多年生草本为主, 区系成分较古老^[29], 具有鲜明的温带荒漠性质, 反映出植物的分布与本地区气候相适应的特点^[30]。在 2006 和 2007 年为期两年的科考基础

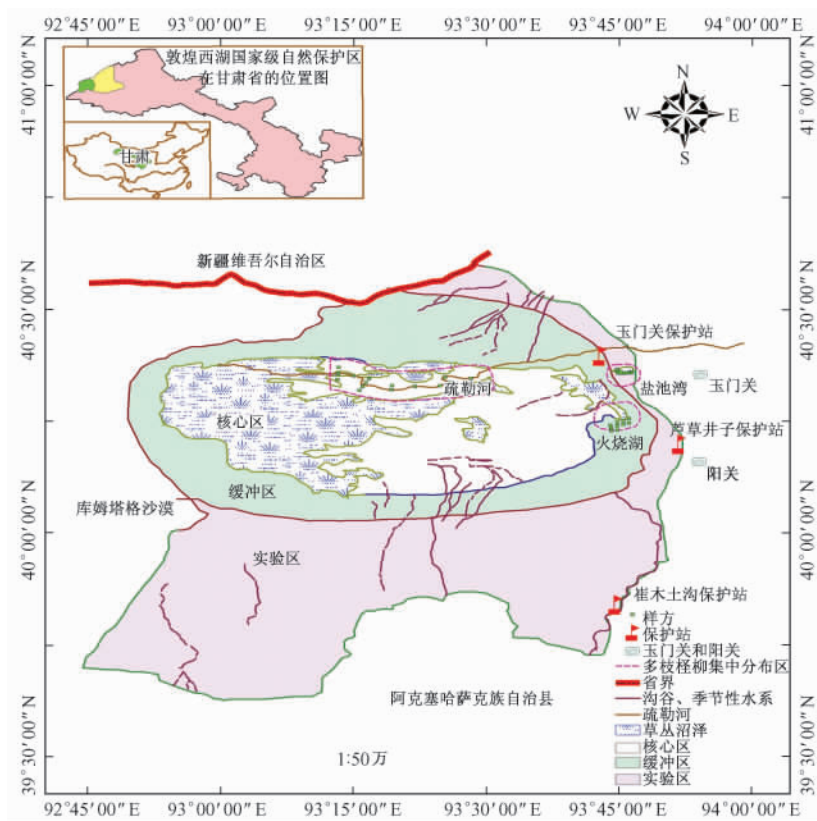


图 1 甘肃敦煌西湖湿地位置图

Fig. 1 Location of Dunhuang Xihu Wetland in Gansu Province

上,敦煌西湖共记录有种子植物 23 科 61 属 80 种(全为野生种,不包括栽培种)。其中多枝怪柳群落主要分布在扇沿泉水溢出带,如疏勒河沿线河漫滩、盐池湾沼泽、后坑沼泽、湾腰墩沼泽等湖盆水草丰盛的地域以及由于地下水位显著下降而导致湿地退化而形成的沙地上,如火烧湖沙地。

2 研究方法

2.1 野外调查方法

2006 年 10 月和 2007 年 6 月,在充分了解总体分布的基础上,在多枝怪柳集中分布的盐池湾沼泽、疏勒河河床和火烧湖沙地 3 个样点共设置 35 个多枝怪柳群落样方(20 m × 20 m)。样方编号为 1 ~ 35,其中,1 ~ 10 位于盐池湾沼泽,11 ~ 25 位于疏勒河河床,26 ~ 35 位于火烧湖沙地。样方内呈梅花状各设置 5 个 5 m × 5 m 的草本小样方,共 175 个草本小样方。在样方内,记录经纬度、海拔、土壤类型、物种名、株数、平均高、盖度、植物沙包高度等信息;在小样方内,记录物种名、株数、平均高和盖度等信息。

2.2 数据处理方法

2.2.1 生物多样性测度

分别统计灌木层和草本层的物种重要值。

重要值 = (相对盖度 + 相对密度 + 相对频度) / 300

(1)

群落特性采用平均高度 (average height, Ah)、平均盖度 (average coverage, Ac) 和平均密度 (average density, Ad) 等指标来反映;物种多样性指数采用 Margalef 物种丰富度指数 (R)、Simpson 物种多样性指数 (D) 和 Pielou 物种均匀度指数 (J_{sw}) 等^[11]。

数据的处理、分析和制图,使用 SPSS15.0 统计软件。

2.2.2 种群分布格局测度

1) 丛生指标 I_t ^[62]

$$I_t = V/m - 1 \quad (2)$$

式中: m 为样本均值, V 为样本方差。当 $I_t > 0$ 时为聚集分布; $I_t = 0$ 时为随机分布; $I_t < 0$ 时为均匀分布。

2) 平均拥挤度 m^* ^[63]

$$m^* = m + (V/m - 1) \quad (3)$$

当 $m^* > 1$ 时为聚集分布; $m^* = 1$ 时为随机分布; $m^* < 1$ 时为均匀分布。

3) 聚块性指数 m^*/m ^[64]

当 $m^*/m > 1$ 时为聚集分布; $m^*/m = 1$ 时为随机分布; $m^*/m < 1$ 时为均匀分布。

4) 扩散系数 C ^[64-65]

$$C = V/m \quad (4)$$

当 $C > 1$ 时为聚集分布; $C = 1$ 时为随机分布;

$C < 1$ 时为均匀分布。

5) 负二项参数 k [8]

$$k = m^2 / (V - m) \quad (5)$$

k 值愈小, 聚集度越大, 如果 k 值趋于无穷大 (一般为 8 以上), 则逼近随机分布。每单位样方面积的生物数为负二项分布时, 可以用分布的参数 k 值作为聚集的度量值。

3 结果与分析

3.1 群落基本特性

3.1.1 物种组成和垂直结构

由于敦煌西湖具有明显的大陆性气候特点, 生境恶劣, 造成植被的共同特点是组成简单、类型单调、分布稀疏。多枝怪柳凭借其顽强的生命力, 特别是具有很强的耐干旱、耐盐碱、耐贫瘠、耐风蚀、抗沙割、抗沙埋和扩繁能力强等特点, 成为敦煌西湖重要的植物群落建群种和表征种, 以及敦煌西湖生态系统结构的主体, 发挥着重要的生态功能。

在 35 个样方中, 共发现植物 20 种, 分属 12 科 19 属, 其中, 灌木层 8 种, 分属 5 科 8 属, 草本层 12 种, 分属 7 科 11 属。该群落中多枝怪柳和芦苇 (*Phragmites communis*) 常构成当地植被的灌木层和草本层, 并通过种间竞争、演替以及其他植物的入侵替代, 逐步发育成为较为稳定的群落。受气候、地形、水文和土壤等环境因子的制约, 该群落常处于不同的演替阶段, 层片间物种组成和层内个体数量常存在着显著的差异。

在灌木层中, 其垂直结构可以分为两层, 上层一般由多枝怪柳组成, 其平均高度为 2.0 m, 平均盖度为 10%, 平均密度为 0.45 株/ m^2 ; 下层常由苏枸杞 (*Lycium ruthenicum*)、盐节木 (*Halocnemum strobilaceum*)、盐穗木 (*Halostachys caspica*)、盐角草 (*Salicornia europaea*) 等组成。当地下水位显著下降时, 则出现大量的怪柳沙包, 常伴生的沙包有泡泡刺 (*Nitraria sphaerocarpa*)、沙拐枣 (*Calligonum mongolicum*) 和木本猪毛菜 (*Salsola arbuscula*) 等, 并逐步向荒漠植被演化。

在草本层中, 其垂直结构可以分为 3 层。上层一般只由芦苇组成, 平均高度 1.0 m, 平均盖度 21%, 平均株数为 13.6 株/ m^2 。中层由胀果甘草 (*Glycyrrhiza inflata*)、大花罗布麻 (*Poacynum hendersonii*)、花花柴 (*Karelinia caspia*)、羊角子草 (*Cynanchum cathayense*)、甘草 (*G. uralensis*) 和骆驼刺 (*Alhagi sparsifolia*) 中的一种或几种构成。其中, 胀果甘草平均高度 0.7 m, 平均盖度 7%, 平均株数为 0.29 株/ m^2 ; 大花罗布麻平均高度 1.1 m, 平均盖

度 14%, 平均株数为 0.5 株/ m^2 ; 花花柴平均高度 0.5 m, 平均盖度 5%, 平均株数为 0.24 株/ m^2 ; 骆驼刺平均高度 0.6 m, 平均盖度 19%, 平均株数为 0.72 株/ m^2 。绝大多数多枝怪柳群落的下层植被不发达, 甚至无下层植被。虽然地面零星分布有苦苣菜 (*Lxeris denticulata*) 和蒙山莴苣 (*Lactuca tatarica*), 不能构成完整的植被层, 但是低盐条件下的局部地段能形成海韭菜 (*Triglochin maritimum*) 植被层和小獐毛 (*Aeluropus littoralis*) 植被层。

3.1.2 群落类型

参照《中国植被》[6] 和《中国湿地植被》[7] 关于群落的划分原则, 依据群落的外貌结构、物种组成、层片结构以及灌木层的优势层和次优势层优势种的重要值等主要特征, 可将群落划分成以下 4 个群丛组:

I 多枝怪柳—芦苇群丛组 Ass. Group *T. ramosissima* - *P. communis*。由多枝怪柳—芦苇 + 甘草群丛 Ass. *T. ramosissima* - *P. communis* + *G. uralensis*、多枝怪柳—芦苇 + 骆驼刺群丛 Ass. *T. ramosissima* - *P. communis* + *A. sparsifolia*、多枝怪柳—芦苇 + 胀果甘草群丛 Ass. *T. ramosissima* - *P. communis* + *G. inflata* 和多枝怪柳—芦苇群丛 Ass. *T. ramosissima* - *P. communis* 等构成。多枝怪柳—芦苇 + 甘草群丛主要生长在草甸土 (样方 1) 和碱土 (样方 4) 上, 多枝怪柳—芦苇 + 骆驼刺群丛主要生长在盐土 (样方 9)、板结盐土 (样方 8) 和盐碱沙土 (样方 11) 上, 多枝怪柳—芦苇 + 胀果甘草群丛主要生长在盐土 (样方 21) 上, 多枝怪柳—芦苇群丛主要生长在土壤板结的盐碱土 (样方 13) 上。

II 多枝怪柳 + 苏枸杞群丛组 Ass. Group *T. ramosissima* + *L. ruthenicum*。由多枝怪柳 + 苏枸杞—芦苇群丛 Ass. *T. ramosissima* + *L. ruthenicum* - *P. communis*、苏枸杞 + 多枝怪柳—芦苇群丛 Ass. *L. ruthenicum* + *T. ramosissima* - *P. communis* 和多枝怪柳 + 苏枸杞群丛 Ass. *T. ramosissima* + *L. ruthenicum* 组成。多枝怪柳 + 苏枸杞—芦苇群丛的生境幅度很广, 沼泽土 (样方 6 和 15)、盐碱土 (样方 7) 和沙土 (样方 24、25 和 30) 中均能生长。苏枸杞的长势情况是沼泽土优于盐碱土, 盐碱土又优于沙土, 平均高度依次为沼泽土 (1.2 m) > 盐碱土 (0.8 m) > 沙土 (0.6 m)。与多枝怪柳 + 苏枸杞—芦苇群丛相比, 苏枸杞 + 多枝怪柳—芦苇群丛主要生长在水、盐条件稍差一些的环境, 一般呈环带状生长在前者的外围高地, 出现在板结盐土、盐碱土和沙土中, 见于盐池湾 (样方 2、10)、疏勒河 (样方 16、17、22)

和火烧湖(样方 34),但未见沼泽土中有该群丛生长。多枝桤柳+苏枸杞群丛主要生长在地下水位较高的沙土上或土壤严重板结的盐碱土中,林下无草本生长,见于火烧湖(样方 33)和盐池湾(样方 3)。

Ⅲ 多枝桤柳+盐节木群丛组 Ass. Group *T. ramosissima* + *H. strobilaceum*。由多枝桤柳+盐节木-芦苇群丛 Ass. *T. ramosissima* + *H. strobilaceum* - *P. communis* 和盐节木+多枝桤柳-花花柴群丛 Ass. *H. strobilaceum* + *T. ramosissima* - *K. caspia* 组成。前者草本层偶见大花罗布麻、苦蕒菜和羊角子草(样方 5 和 14);后者在盐土中常伴生芦苇和骆驼刺,在沙土中常无草本生长,见于疏勒河(样方 18、19、20 和 23)。

Ⅳ 多枝桤柳沙包群丛组 Ass. Group *T. ramosissima* Sand Dune。由多枝桤柳沙包群丛 Ass. *T. ramosissima* Sand Dune、多枝桤柳+泡泡刺群丛 Ass. *T. ramosissima* + *N. sphaerocarpa* 和多枝桤柳+木本猪毛菜群丛 Ass. Group *T. ramosissima* + *S. arbuscula* 构成。林下除多枝桤柳沙包群丛中能见芦苇、骆驼刺外,未见其他草本生长。多枝桤柳沙包群丛见于疏勒河(样方 12)和火烧湖(样方 28、29、31 和 32);多枝桤柳+泡泡刺群丛见于火烧湖(样方 26 和 27);多枝桤柳+木本猪毛菜群丛见于火烧湖(样方 35)。

3.1.3 群丛组特性

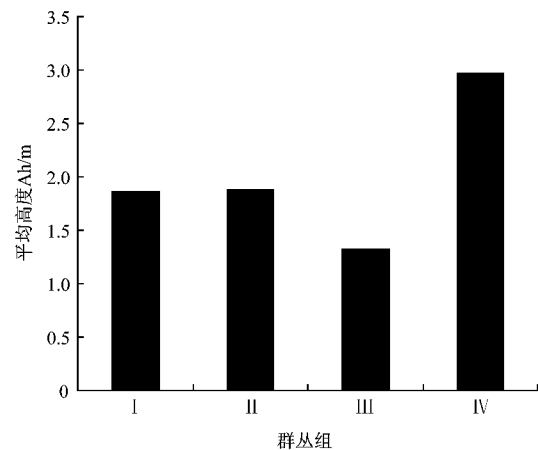
就多枝桤柳的平均高度而言,各群丛组依次为:Ⅳ>Ⅱ>Ⅰ>Ⅲ,多枝桤柳沙包群丛组最高(2.97 m),多枝桤柳+苏枸杞群丛组次之(1.88 m),多枝桤柳+盐节木群丛最低(1.32 m)(图 2)。

多枝桤柳的平均盖度和平均密度呈现一致的分布规律,各群丛组依次为:Ⅳ>Ⅱ>Ⅲ>Ⅰ(图 3、4)。

多枝桤柳的物种丰富度指数和物种多样性指数也呈现一致的分布规律,各群丛组依次为:Ⅲ>Ⅱ>Ⅰ>Ⅳ(图 5);物种均匀度指数依次为:Ⅲ>Ⅳ>Ⅱ>Ⅰ(图 5)。

各群丛组之间的差异性还体现在共建种和优势种的生长状况上。就平均高度和平均密度而言,各群丛组间林下芦苇呈现与多枝桤柳相同的分布规律,依次为:Ⅱ>Ⅰ>Ⅲ>Ⅳ;从平均盖度来看,依次为:Ⅰ>Ⅱ>Ⅲ>Ⅳ;重要值依次为:Ⅲ>Ⅰ>Ⅱ>Ⅳ。

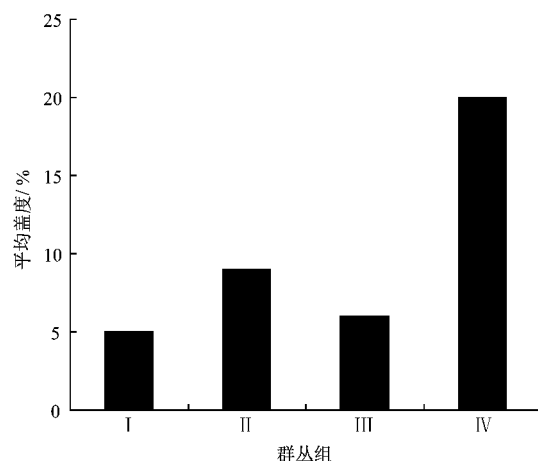
在群丛组Ⅰ中,共建种芦苇的平均高度为 0.82 m,平均盖度为 23%,平均密度为 10.3 株/m²,重要值为 0.462;在群丛组Ⅱ中,优势种芦苇的平均高度为 0.95 m,平均盖度为 21%,平均密度为 15 株/m²,



Ⅰ. 多枝桤柳-芦苇群丛组; Ⅱ. 多枝桤柳+苏枸杞群丛组;
Ⅲ. 多枝桤柳+盐节木群丛组; Ⅳ. 多枝桤柳沙包群丛组

图 2 多枝桤柳的平均高度

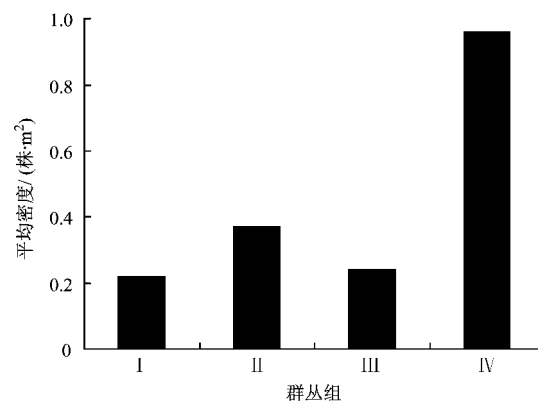
Fig. 2 Average height of *T. ramosissima*



Ⅰ. 多枝桤柳-芦苇群丛组; Ⅱ. 多枝桤柳+苏枸杞群丛组;
Ⅲ. 多枝桤柳+盐节木群丛组; Ⅳ. 多枝桤柳沙包群丛组

图 3 多枝桤柳的平均盖度

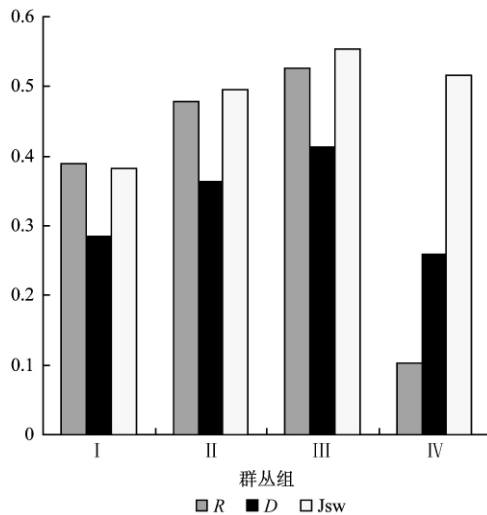
Fig. 3 Average coverage of *T. ramosissima*



Ⅰ. 多枝桤柳-芦苇群丛组; Ⅱ. 多枝桤柳+苏枸杞群丛组;
Ⅲ. 多枝桤柳+盐节木群丛组; Ⅳ. 多枝桤柳沙包群丛组

图 4 多枝桤柳的平均密度

Fig. 4 Average density of *T. ramosissima*



I. 多枝怪柳-芦苇群丛组; II. 多枝怪柳 + 苏枸杞群丛组;
III. 多枝怪柳 + 盐节木群丛组; IV. 多枝怪柳沙包群丛组

图5 多枝怪柳的多样性指数

Fig.5 Diversity indices of *T. ramosissima*

重要值为 0.445;在群丛组 III 中,优势种芦苇的平均高度为 0.65 m,平均盖度为 13%,平均密度为 9.6 株/ m^2 ,重要值为 0.541;在群丛组 IV 中,优势种芦苇的平均高度为 0.31 m,平均盖度为 4%,平均密度为 2.5 株/ m^2 ,重要值为 0.290。

在群丛组 II 中,共建种苏枸杞的平均高度 0.8 m,最高达 1.2 m;平均盖度 6%,最高可达 25%;平均密度为 0.84 株/ m^2 ,最高可达 4 株/ m^2 。

在群丛组 III 中,盐节木平均高度 0.4 m,最高可达 0.6 m;平均盖度 5%,最高可达 8%;平均密度为 0.63 株/ m^2 ,最高可达 1.25 株/ m^2 。

在群丛组 IV 中,泡泡刺平均高度 0.4 m,最高可达 0.5 m;平均盖度 3%,最高可达 5%;平均密度为 0.29 株/ m^2 ,最高可达 0.55 株/ m^2 。木本猪毛菜平均高度 1.1 m,平均盖度 45%,平均密度为 1.6 株/ m^2 。

多枝怪柳的水分生态幅度很广,从地表水充足的低洼之处到地下水位较低的沙地均能生长。随着地下水位进一步下降,骆驼刺枯死,只有多枝怪柳沙包勉强维持生长,但如果地下水位低于阈值时,其沙包会出现枯死现象。在调查中发现,疏勒河尾间和火烧湖沙地出现大量的枯死沙包,有沙漠化的趋势。由于骆驼刺极其耐旱,根系能扎入地下 10 m,是沙地植被的指示物种,由此,可依据骆驼刺在群落中的出现与否和数量多少来推断群落的演替阶段。因此,多枝怪柳群落的演替方向很可能是:由湿生向中旱生方向演替,即由群丛组 I 向群丛组 II (或群丛组 III) 演替,然后再向群丛组 IV 演替。

为进一步确认多枝怪柳群丛组划分的合理性并

阐明其对水分的需求状况,采用组内均联法 (within groups linkage) 及欧式距离法 (euclidean distance),通过 SPSS15.0 软件对 35 个样方的 13 个物种重要值 (剔除 7 个恒有度低于 5% 的偶见种) 进行聚类分析。聚类结果如图 6 所示。

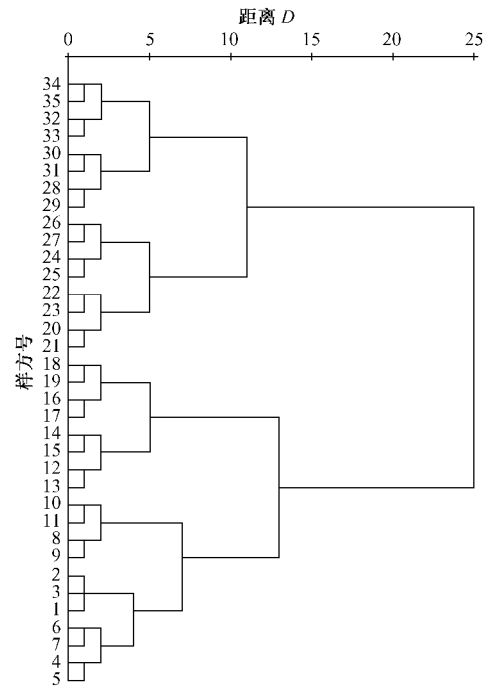


图6 35个样方的重要值聚类图

Fig.6 Cluster map of 35 quadrats based on important values

在距离 $D = 10$ 处,35 个多枝怪柳群落被聚成 4 组。第 1 组等同于群丛组 IV,它们都生长于沙土或盐碱土,在一定程度上都呈现出沙包化现象,如样方 28、29、31、32 和 35 完全等同,但也有少数群丛被错判到该组,如多枝怪柳 + 苏枸杞-芦苇群丛 (样方 30)、多枝怪柳 + 苏枸杞群丛 (样方 33) 和苏枸杞 + 多枝怪柳-芦苇群丛 (样方 34)。第 2 组等同于群丛组 II,如样方 22、24 和 25 完全等同,却有许多群丛被错判到该组,如多枝怪柳-芦苇 + 胀果甘草群丛 (样方 21)、盐节木 + 多枝怪柳-花花柴群丛 (样方 20 和 23) 和多枝怪柳 + 泡泡刺群丛 (样方 26 和 27)。第 3 组等同于群丛组 III,如样方 14、18 和 19 完全等同,但也有很多群丛被错判到该组,如多枝怪柳-芦苇群丛 (样方 13)、多枝怪柳 + 苏枸杞-芦苇群丛 (样方 15)、苏枸杞 + 多枝怪柳-芦苇群丛 (样方 16 和 17) 和多枝怪柳沙包群丛 (样方 12)。第 4 组等同于群丛组 I,如样方 1、4、8、9 和 11 完全等同,但也有部分群丛被错判到该组,如苏枸杞 + 多枝怪柳-芦苇群丛 (样方 2 和 10)、多枝怪柳 + 苏枸杞群丛 (样方 3)、多枝怪柳 + 苏枸杞-芦苇群丛 (样方 6 和 7) 和多枝怪柳 + 盐节木-芦苇群丛 (样方 5)。

在距离 $D = 25$ 处, 35 个多枝桤柳群落被聚为 2 组, 其生态学意义可解释为是 2 个生态型: 湿生型和中旱生型。其中, 湿生型群落包含了盐池湾沼泽全部样方 (1 ~ 10) 和疏勒河河床大部分样方 (11 ~ 19), 它们的水盐条件很相似, 地表水分相对充足, 多枝桤柳生长茂盛, 林下物种数多达 3 ~ 6 种; 中旱生型群落集中分布在疏勒河尾间和火烧湖沙地, 常与泡泡刺、沙拐枣等共同形成沙包群, 灌木层优势度很高, 多样性很低, 林下草本极其单一, 常只有骆驼刺或无任何草本。据对地下水位的观测得知, 盐池湾沼泽的地下水位在 0 ~ 2 m 之间, 疏勒河河床在 0 ~ 10 m 之间, 火烧湖沙地在 5 ~ 10 m 之间, 这与群落分布随水分条件改变而发生规律性变化的情况是吻合的。

由此看出, 基于物种重要值的群丛组聚类分析结果与参照《中国植被》和《中国湿地植被》群丛组划分的结果存在一定的差异。其原因可能是由于多枝桤柳群落中灌木层物种过少 (只有 1 ~ 3 种), 导致群丛组之间物种重要值的差异不明显, 使得建群种不同但重要值相近的群丛很容易被错判。因此, 参照《中国植被》和《中国湿地植被》群丛组划分的结果相对可靠, 但聚类分析结果可以较好地应用于生态型的判定。

3.2 群落物种多样性特征

3.2.1 多样性指数的差异性分析

本文采用了 Margalef 物种丰富度指数 (R)、Simpson 物种多样性指数 (D) 和 Pielou 物种均匀度指数 (J_{sw}) 来描述 35 个多枝桤柳群落的物种多样性特征 (见图 7 ~ 10)。

多枝桤柳群落的物种丰富度指数均较小, 均值为 0.375。物种丰富度是多样性测度中较为简单且生物学意义明显的指数, 常利用物种数与个体数量的关系来测度群落的物种丰富度。由图 7 可见, 样方 7、10、14、16、17、18、20、21 和 23 的物种丰富度较高 (0.6 ~ 0.9), 群落中物种较多, 可达 5 ~ 8 种, 这是由于这些样方的地下水位高, 水分条件好; 样方 3、12、13、19、26、28、29、31、32、33 和 35 的物种丰富度较低 (0 ~ 0.2), 主要由两个原因造成: 其一是盐渍土含盐量过高, 出现严重板结现象, 其二是由于沙土水分条件太差, 地下水位很低; 其他 15 个样方基本持平 (0.2 ~ 0.6)。

多枝桤柳群落的物种多样性指数都较低, 均值为 0.330。物种多样性的大小与物种丰富度和物种均匀度有关, 主要体现在群落的结构类型、组织水平、发展阶段、稳定程度和生境差异上。由图 8 可知, 只有样方 18 和 30 的物种多样性指数达到 0.6

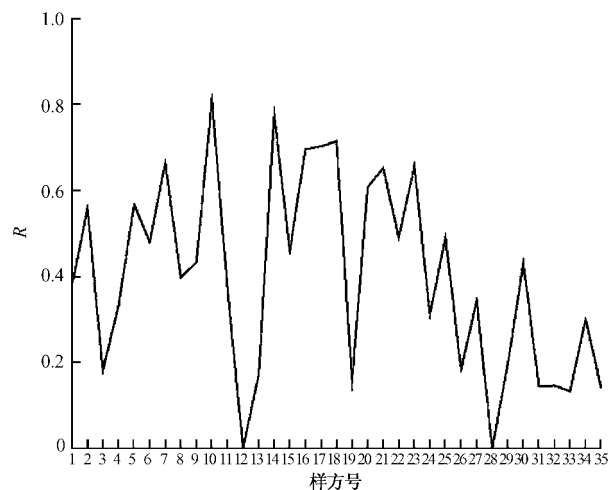


图7 多枝桤柳的物种丰富度指数

Fig. 7 Margalef's richness index of *T. ramosissima* species

水平; 样方 1、6、8、12、13、14、15、22、26、28 和 33 的物种多样性指数都低于 0.2 水平; 其他 22 个样方基本持平 (0.2 ~ 0.6)。在中小尺度上看, 物种多样性指数低主要是由于土壤板结、坡度大和地下水位低等原因造成的; 另外, 物种多样性也与物种均匀度有关。

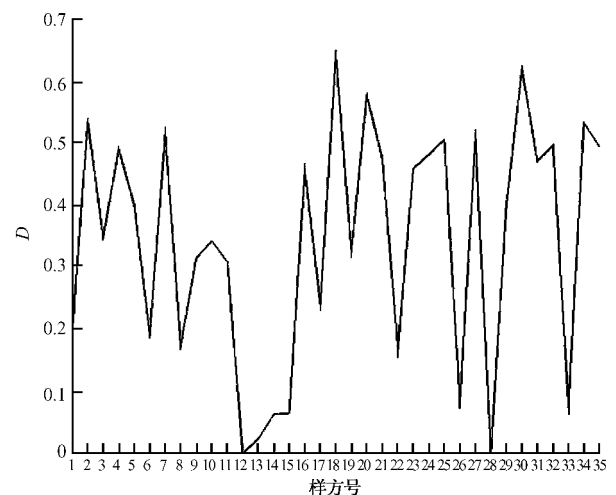


图8 多枝桤柳物种多样性指数

Fig. 8 Simpson's diversity index of *T. ramosissima* species

多枝桤柳群落的物种均匀度指数相对较高, 均值为 0.487。物种均匀度是指群落或生境中全部物种个体数目的分配状况, 它反映的是各物种个体数目分配的均匀程度。由图 9 可知, 物种均匀度高于 0.6 水平的有 16 个样方, 低于 0.2 水平的只有 8 个样方, 其他 11 个样方基本持平 (0.2 ~ 0.6)。

以上分析表明, 由于环境的异质性, 面积相同的各样方之间物种数目和物种丰富度不一定相同、物种多样性和物种均匀度的数值不一致。

从图 10 得知, 各样点之间的多样性特征均有差

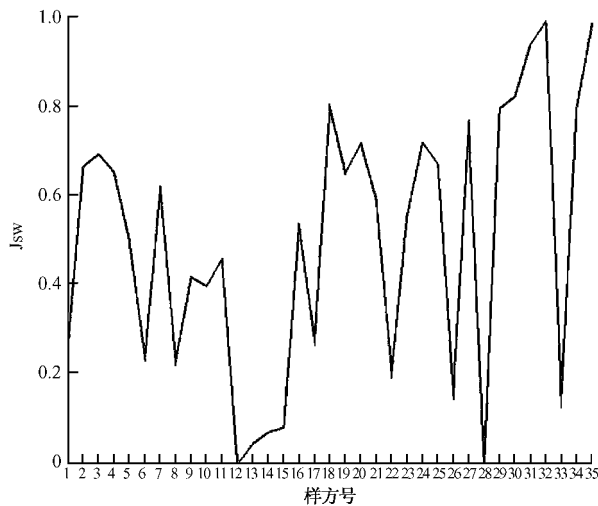


图9 多枝桤柳物种均匀度指数

Fig. 9 Pielou's evenness index of *T. ramosissima* species

异,火烧湖沙地的多枝桤柳群落的物种多样性和物种均匀度最大,物种丰富度却最小;盐池湾沼泽的物种多样性和物种均匀度略高于疏勒河河床,但两者的物种丰富度基本持平。

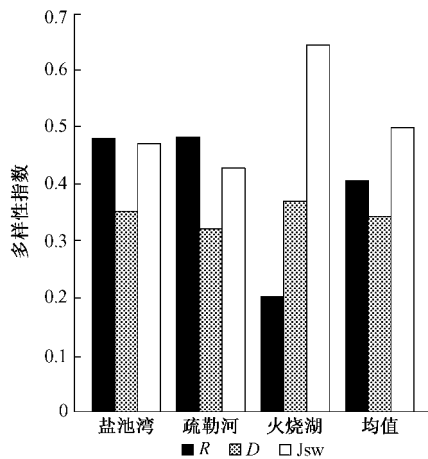


图10 不同样点的多枝桤柳物种多样性指数

Fig. 10 Diversity indices of different sites of *T. ramosissima* species

3.2.2 多个指数之间的相关性分析

Ah、Ac 和 Ad 描述的是群落的基本特征, R 、 D 和 Jsw 反映的是群落的物种多样性水平。目前多枝桤柳群落生态学方面的研究很少, 因此通过 SPSS15.0 的相关性分析功能, 加强对多个指数之间的相关性进行分析, 有助于进一步摸清其群落特性 (表 1)。

由表 1 可知, 平均高度与平均盖度呈显著正相关, 与物种丰富度指数呈显著负相关, 与其他指标相关性不显著; 平均密度与平均盖度呈极显著正相关, 与物种丰富度指数呈极显著负相关, 与其他指标相关性不显著; 物种多样性指数与物种均匀度指数呈

极显著正相关。

表 1 多个指数之间的相关性
Tab. 1 Correlation coefficients of diversity indices of *T. ramosissima* community

	Ah	Ac	Ad	R	D	Jsw
Ah	1					
Ac	0.346 [*]	1				
Ad	0.142	0.576 ^{**}	1			
R	-0.337 [*]	-0.319	-0.432 ^{**}	1		
D	-0.241	-0.227	0.001	0.315	1	
Jsw	-0.130	-0.108	0.239	0.010	0.920 ^{**}	1

注: * 为相关性显著 (0.05), ** 为相关性极显著 (0.01)。表 2 同此。

物种多样性指数与物种均匀度指数的相关性显著, 是因为物种多样性指数是把物种丰富度和物种均匀度结合起来的一个统计量, 是以不同的方式表达物种丰富度和物种均匀度的结合, 故两者之间的关系很密切 [8]。

3.2.3 多样性指数与海拔、土壤的关系

为更好地探索 35 个多枝桤柳群落的物种丰富度指数 (R)、物种多样性指数 (D) 和物种均匀度指数 (Jsw) 与海拔高度 (x_1) 和土壤类型 (x_2) 的关系, 将土壤类型数据转换成顺序数据, 大致按照土壤含水量由高到低进行排列, 定义如下: 沙土, $x_2 = 1$; 板结盐土, $x_2 = 2$; 盐碱沙土, $x_2 = 3$; 盐碱土, $x_2 = 4$; 盐泥土, $x_2 = 5$; 草甸土, $x_2 = 6$; 沼泽土, $x_2 = 7$ 。然后, 运用多重线性回归分析方法 (SPSS15.0) 分别得到 3 个回归方程, 结果如下:

1) 物种丰富度指数与海拔和土壤的关系

$$R = 1.823 - 0.002x_1 + 0.044x_2 \quad (6)$$

从方程 (6) 得知: 物种丰富度指数与海拔高度成反比, 可能与土壤水分条件成正比, 这与实地调查情况极其吻合。在海拔越低、土壤水分条件越好的地方, 多枝桤柳群落下的物种数越高, 而在海拔越高、土壤水分条件越差的地方, 其物种数越低, 这从侧面体现了多枝桤柳群落喜湿、耐湿的特性。

2) 物种多样性指数与海拔和土壤的关系

$$D = 0.493 - 0.016x_2 \quad (7)$$

从方程 (7) 得知: 物种多样性指数可能与土壤水分条件成反比, 而与海拔高度关系不大, 这与实地调查情况也非常吻合。物种多样性指数并没有随海拔变化呈现显著不同, 但土壤水分条件变差后, 特别是向沙包化的转变后 (在一定的阈值内), 物种多样性指数反而上升, 这从侧面体现了多枝桤柳群落耐干旱、耐风沙侵蚀的特性。

3) 物种均匀度指数与海拔和土壤的关系

$$Jsw = 0.056 + 0.001x_1 - 0.047x_2 \quad (8)$$

从方程 (8) 得知: 物种均匀度指数与海拔高度成正比, 可能与土壤水分条件成反比。在海拔越高、土

壤水分条件越差的地方,其群落物种越趋于单一化,分布越均匀,因此物种均匀度指数越高;在海拔越低、土壤水分条件越好的地方,其群落物种相对越丰富,分布相对越不均匀,因此物种均匀度指数越低。

3.3 种群空间分布格局

种群分布格局是物种与环境长期相互适应、相

互作用的结果,它不仅与物种的生物学特性和种群间的竞争有关,而且与物种的生境有密切联系。本文利用聚块性指数(m^*/m)、平均拥挤度(m^*)、丛生指标(I_L)、扩散系数(C)和负二项参数(k)等指标来判定敦煌西湖多枝怪柳和林下芦苇的种群分布格局类型和聚集强度(表2)。

表2 多枝怪柳和林下芦苇种群分布格局的聚集强度指数

Tab. 2 Aggregation indices of distribution patterns of *T. ramosissima* and *P. communis* populations

	Ad/(株·m ⁻²)	I_L	m^*	m^*/m	k	C	t 检验	分布类型
盐池湾多枝怪柳种群	114.4	76.5	190.9	1.67	1.50	77.5	198.8**	集群分布
盐池湾芦苇种群	320.0	191.6	511.6	1.60	1.70	192.6	497.7**	集群分布
疏勒河多枝怪柳种群	124.3	65.8	190.1	1.53	1.89	66.8	174.1**	集群分布
疏勒河芦苇种群	353.2	779.2	1 132.3	3.21	0.45	780.2	2 061.1**	集群分布
火烧湖多枝怪柳种群	254.2	169.2	423.4	1.67	1.50	170.2	439.6**	集群分布
火烧湖芦苇种群	81.6	139.6	221.2	2.71	0.58	140.6	362.7**	集群分布
多枝怪柳种群平均值	158.6	131.4	290.0	1.83	1.21	132.4	541.7**	集群分布
芦苇种群平均值	266.1	551.5	817.6	3.07	0.48	552.5	2 273.3**	集群分布

从表2的多枝怪柳种群分布格局强度参数来看, m^*/m 为1.83、 m^* 为290.0、 I_L 为131.4、平均密度为158.6株/m²、 k 为1.21、 C 为132.4,根据各参数的生物学意义和 t 检验(541.7**)结果可知,多枝怪柳的种群分布格局为强集群分布;从林下芦苇的种群分布格局强度指数来看, m^*/m 为3.07、 m^* 为817.6、 I_L 为551.5、平均密度为266.1株/m²、 k 为0.48、 C 为552.5,根据各参数的生物学意义和 t 检验(2 273.3**)结果可知,林下芦苇的种群分布格局也为强集群分布。

从平均密度、丛生指标、平均拥挤度和扩散系数等指标来看,盐池湾和疏勒河都是芦苇种群高于多枝怪柳种群。另外从平均值来看,也是芦苇种群高于多枝怪柳种群。这充分表明:芦苇的聚集强度高于多枝怪柳的聚集强度,芦苇对生态空间的侵占强度较高,利用生态空间的能力强,对生态空间的填充能力强,在水分条件较好的条件下,表现得尤为明显。

火烧湖沙地多枝怪柳沙包的种群聚集强度要明显高于林下芦苇种群的聚集强度,多枝怪柳沙包对生态空间的侵占强度非常高,利用空间的能力很强,而芦苇对生态空间的填充能力则很弱,这一点从芦苇的长势很弱上也能够得到体现。其原因如下:火烧湖曾经为党河、疏勒河地下径流以及阿尔金山雪水地表径流等来水汇集处,地势低洼,水源充裕,多枝怪柳曾经在此处生长茂盛。根据调查,多枝怪柳沙包大都在0~10 m之间,最高可达20 m,年龄在千年以上;但是由于近年来地下径流补给变少,加上风沙侵蚀,湿地不断退化,多枝怪柳沙包出现大面积枯死现象。中旱生状态下的芦苇仅靠降雨和季节性洪水滋润,其侵占空间的能力明显下降,并逐步被骆

驼刺所代替。

盐池湾的水盐梯度变化决定着种群的空间分布格局,多枝怪柳的微耐盐习性使其沿芦苇沼泽外围的低盐地段呈环、带状分布。由于此处泉眼广布、水分充裕,多枝怪柳群落长势良好,平均高度达2.1 m,最大高度可达3.0 m。

疏勒河河床和盐池湾沼泽的多枝怪柳种群规模相近,但都不及火烧湖多枝怪柳种群规模的一半;疏勒河河床和盐池湾沼泽的多枝怪柳林下的芦苇种群规模也相近,而且种群规模大约是多枝怪柳沙包下芦苇种群规模的4倍。在洪水的定期冲刷和风的传播下,多枝怪柳的种子能够沿着疏勒河河漫滩传播,多枝怪柳的数量较高,然而由于来水不足,多枝怪柳长势下降导致芦苇大肆侵占空间,这可从数据上证明:疏勒河处多枝怪柳平均高为1.4 m,最大高度仅为2.3 m,芦苇平均密度却高达353.2株/m²。其原因是疏勒河河床虽已无地表径流,然而仍有地下径流和洪水补给,土壤含盐量低,多枝怪柳群落下的芦苇长势良好,导致其侵占空间的能力很强。河流末端由于地下水位很低,河床已无积水,湿地退化成荒漠,出现沙包大量堆积的现象,常见的沙包有怪柳沙包、沙拐枣沙包和泡泡刺沙包,这一现象则揭示了多枝怪柳群落的演化原因。

综上所述,敦煌西湖湿地多枝怪柳的种群聚集强度依次为:火烧湖沙地>盐池湾沼泽>疏勒河河床;其林下芦苇的平均密度、密集程度和聚集程度大部分都高于多枝怪柳,进一步表明芦苇种群对生态空间的填充能力强过多枝怪柳。

4 讨论与结论

多枝怪柳群落是敦煌西湖植物群落的重要组成

部分,其群落特征和种群格局很大程度上影响着敦煌西湖湿地的健康和稳定。加强对多枝怪柳的群落生态学和种群生态学研究,无论是对敦煌西湖湿地的植被恢复与重建,还是对敦煌莫高窟的保护都具有重要的意义。西汉时,为了抗击匈奴的侵犯骚扰,汉武帝下令修筑今甘肃永登以西的“塞”,即汉长城,它在西边与敦煌西湖湿地的河流和沼泽相间或相连接,共同构成人马不可逾越的屏障,向西延伸至核心区湾腰墩,而汉长城正是以多枝怪柳、芦苇等植物和沙土砾石为材料修筑而成的。由此推断,多枝怪柳当时生长极为茂盛,后来由于风沙侵蚀和人类干扰,导致湿地退化,植被逐步被风沙所掩埋。由于多枝怪柳具有耐干旱、耐盐碱、耐贫瘠、耐风蚀、抗沙割和抗沙埋等特点,其群落得以完好保留。它根系发达,主根往往伸至地下水层,最深可达10 m以上,当枝条被流沙埋没后,能够产生不定根,枝条迅速向上生长,钻出地面;强烈风蚀而裸露地面的根系,能够萌生出很多新的枝条。由于萌生种群成活率高、生长快等特性,使多枝怪柳种群总是能够顺利地不同群落中得以发展,从而解决了更新苗匮乏的现象,使多枝怪柳群落在上千年的演变过程中能够保持较高的稳定性。

一般来说,多枝怪柳下部枝叶较少,通透性较高,向上枝叶密度迅速增加,当年生的枝干随后木质化,具有较大刚性不易随风摆动。在风沙作用的影响下,多枝怪柳沙包的发育经历增长、稳定和衰退3个阶段。其中,增长阶段以多枝怪柳垂向生长、风沙迅速堆积的圆锥形沙包为特征;稳定阶段以多枝怪柳对风力阻滞作用强劲的半球形沙包为代表;衰退阶段以多枝怪柳枯萎、沙包迎风侧开始出现弧形沙丘或背风侧发育风影沙丘为标志。

2007年9月6日,对一个多枝怪柳沙包($93^{\circ}41'04''\text{E}$ 、 $40^{\circ}20'13''\text{N}$)做剖面调查后发现:该沙包地上部分高2.5 m,直径9.7 m,沙包分层现象极其明显,每层均由砾沙层和多枝怪柳枯枝落叶层构成。自包顶至包底,按照沙砾的均匀度和粗细度可分为3个梯度。第1梯度(0~92 cm),共70层,砾沙层厚度在1~3 cm,质地较粗;枯枝落叶层平均厚度只有0.1 cm,最厚达1 cm。第2梯度(93~136 cm),共15层,细沙层较厚,平均厚度达2.5 cm,最厚达5 cm;枯枝落叶层平均厚度只有0.2 cm。第3梯度(137~250 cm),共50层,砾沙层厚度变化很大(0.2~7 cm),平均为3 cm;枯枝落叶层平均厚度达0.2~0.5 cm,最厚达4 cm。从沙包所蕴涵的年龄信息来看,其年龄在135年之上,多枝怪柳的年龄要比沙包更大,因为地下根系的信息并没有被包含。

要想进一步摸清多枝怪柳群落的演替格局,有必要对沙包的年龄信息进行深入研究,如进行 ^{14}C 测定。

多枝怪柳实生苗是从河漫滩、沼泽边缘开始群落演替的,植被恢复和群落建立的过程就是植物种群陆续侵入、定居、繁殖和增长的过程。沼泽边缘和河漫滩内的多枝怪柳呈小规模聚集,是由于受种群的发育年龄和种子的散布方式影响而造成的。多枝怪柳种子小,数量多,千粒质量约15 mg,以风力传播为主,成熟的种子都散布在距离种源不远的沼泽边缘、河漫滩上。只有在湿润、低盐的土壤环境,才能够使多枝怪柳种子萌发生长。结合野外调查的实际情况来看,出现集群分布状态不但与多枝怪柳本身的生物学特性有关,还与群落内的地形、土壤和水文等小环境有关,特别是水盐环境,例如在发芽期和幼苗期常要求湿润的土壤环境,而且一般要求土壤含盐量低于0.15%。

除此之外,多枝怪柳种群的空间分布格局也受到群落学特征的影响,主要体现在群落种类组成和结构上。种群个体数、生境异质性以及种内、种间关系的变化等因素均可引起种群分布格局产生相应的变化。

在本研究范围内,多枝怪柳种群的空间分布格局在不同群落类型中都呈现集群分布状态,火烧湖沙地和疏勒河河床尾间的大多数样方以及盐池湾沼泽的部分样方都出现多枝怪柳沙包,这也从侧面体现了多枝怪柳在敦煌西湖以萌条更新为主的事实。

种群空间分布格局具有尺度依赖性,不同的样方大小可能得到不同的格局结果,对于不同发育阶段的种群,影响其分布格局的因子也有所不同。在后续研究中,可考虑设置不同的取样尺度,即集群程度,采用对不同发育种群进行反复取样来判断。为了进一步阐明多枝怪柳的群落特征和种群分布格局的形成历史、形成机制和群落的演化趋势以及植被恢复与重建过程中的主要问题,今后还有必要深入调查环境因子,特别是土壤和水文因子以及沙包年代信息等。

致谢 李飞、邱观华、王德国参与了外业调查,郭宁和李玉强参与了部分工作,在此深表感谢。

参 考 文 献

- [1] 钱迎倩,甄仁得. 生物多样性研究进展 [M]. 北京: 科学技术出版社, 1995: 318-334.
- [2] 马克平,刘灿然,于顺利,等. 北京东灵山地区植物群落多样性的研究Ⅲ: 几种类型森林群落的种-多度关系研究 [J]. 生态学报, 1997, 17(6): 573-582.
- [3] TILMAN D, WEDIN D. Plant traits and resource reduction for five grasses growing on a nitrogen gradient [J]. *Ecology*, 1991, 72: 685-700.

- [4] 刘振国, 李镇清. 退化草原冷蒿群落 13 年不同放牧强度后的植物多样性 [J]. 生态学报, 2006, 26(2): 475-482.
- [5] 张锦春, 王继和, 赵明, 等. 库姆塔格沙漠南缘荒漠植物群落多样性分析 [J]. 植物生态学报, 2006, 30(3): 375-382.
- [6] SMITH M J, OUGH K M, SCROGGIE M P, *et al.* Assessing changes in macrophyte assemblages with salinity in non-riverine wetlands: A Bayesian approach [J]. *Aquatic Botany*, 2009, 90: 137-142.
- [7] 戴小华, 余世孝. GIS 支持下种群分布格局分析 [J]. 中山大学学报(自然科学版), 2003, 42(1): 75-78.
- [8] 张金屯. 植物种群空间分布的点格局分析 [J]. 植物生态学报, 1998, 22(4): 344-349.
- [9] 张文辉, 卢志军, 李景侠, 等. 陕西不同林区栓皮栎种群空间分布格局及动态的比较研究 [J]. 西北植物学报, 2002, 22(3): 476-483.
- [10] 李霞, 侯平, 董新光, 等. 塔里木河下游断流区胡杨密度调查与分析 [J]. 新疆农业大学学报, 2003, 26(4): 41-44.
- [11] 刘加珍, 陈亚宁. 新疆塔里木河下游植物群落逆向演替分析 [J]. 干旱区地理, 2002, 25(3): 231-235.
- [12] 郭英杰, 许英勤, 马彦华. 新疆塔里木河下游应急输水的生态效益 [J]. 干旱区地理, 2002, 25(3): 237-240.
- [13] 张丽华, 陈亚宁, 李卫红. 塔里木河下游生态输水对植物群落数量特征的影响 [J]. 干旱区研究, 2006, 23(1): 32-38.
- [14] 马克明, 祖元刚. 兴安落叶松种群格局的分形特征信息维数 [J]. 生态学报, 2000, 20(2): 187-192.
- [15] 马克明, 祖元刚. 兴安落叶松种群格局的分形特征: 计盒维数 [J]. 植物研究, 2000, 20(1): 104-111.
- [16] 张立杰, 赵文智, 何志斌. 青海云杉 (*Picea crassifolia*) 种群格局的分形特征及其影响因素 [J]. 生态学报, 2008, 28(4): 1383-1389.
- [17] 张绘芳, 李霞. 塔里木河下游胡杨种群空间分布格局分析 [J]. 西北植物学报, 2006, 26(10): 2125-2130.
- [18] 赵峰侠, 尹林克. 荒漠内陆河岸胡杨和多枝柽柳幼苗种群空间分布格局及种间关联性 [J]. 生态学杂志, 2007, 26(7): 972-977.
- [19] 李军, 张秋良, 高润宏, 等. 额济纳绿洲胡杨种群结构与分布格局研究 [J]. 干旱区资源与环境, 2008, 22(2): 187-190.
- [20] 吴翠, 董元火, 王青锋, 等. 水蕨 (*Ceratopteris thalictroides*) 种群的分布格局 [J]. 武汉大学学报(理学版), 2004, 50(4): 515-519.
- [21] 宋萍, 洪伟, 吴承祯, 等. 珍稀濒危植物桫欏种群结构与动态研究 [J]. 应用生态学报, 2005, 16(3): 413-418.
- [22] 龙文兴, 杨小波, 吴庆书, 等. 五指山热带雨林黑桫欏种群及其所在群落特征 [J]. 生物多样性, 2008, 16(1): 83-90.
- [23] 刘适发. 甘肃敦煌自然保护区科学考察 [M]. 北京: 中国林业出版社, 2001.
- [24] 赵洪民, 陈翔舜, 郭鹏. 甘肃敦煌西湖国家级自然保护区湿地现状及其保护对策研究 [J]. 甘肃科技, 2007, 23(8): 4-5, 26.
- [25] 刘昊霞, 袁海峰. 敦煌西湖自然保护区湿地生物多样性及保护对策研究 [J]. 干旱区资源与环境, 2007, 21(11): 75-79.
- [26] 刘昊霞, 姚晓军. 基于生物多样性保护条件下的湿地生态旅游开发研究——以甘肃敦煌西湖自然保护区为例 [J]. 干旱区资源与环境, 2008, 22(11): 132-137.
- [27] 王国宏, 任继周, 张自和. 河西山地绿洲荒漠植物群落种群多样性研究(1): 生态地理及植物群落的基本特征 [J]. 草业学报, 2001, 10(1): 1-12.
- [28] 潘晓玲, 党荣理, 伍光. 西北干旱荒漠区植物区系地理与资源利用 [M]. 北京: 科学出版社, 2001.
- [29] 陈鹏, 潘晓玲. 河西走廊地区植物的区系特征 [J]. 植物研究, 2001, 21(1): 24-30.
- [30] 党荣理, 潘晓玲. 西北干旱荒漠区种子植物科的区系分析 [J]. 西北植物学报, 2002, 22(1): 24-32.
- [31] 张金屯. 数量生态学 [M]. 北京: 科学出版社, 2004.
- [32] DAVID F N, MOOR P G. Notes on contagious distribution in plant population [J]. *Annals of Botany*, 1954, 18: 47-53.
- [33] LLOYD M. Mean crowding [J]. *Journal of Animal Ecology*, 1967, 36: 1-30.
- [34] GREIG-SMITH P. Pattern in vegetation [J]. *Journal of Ecology*, 1979, 67: 755-779.
- [35] CLARK P J, EVANS F C. Distance to nearest neighbor as a measure of spatial relationships in populations [J]. *Ecology*, 1967, 35: 445-453.
- [36] 吴钰镒. 中国植被 [M]. 北京: 科学出版社, 1980.
- [37] 中国湿地植被编辑委员会. 中国湿地植被 [M]. 北京: 科学出版社, 1999.
- [38] MAGURRAN A E. *Ecological diversity and its measurement* [M]. New Jersey: Princeton University Press, 1988.

(责任编辑 冯秀兰)