



贵州习水杜鹃群落结构和种群动态分析

王道, 李崇清, 穆隽, 罗康, 李云波, 杨瑞

引用本文:

王道, 李崇清, 穆隽, 罗康, 李云波, 杨瑞. 贵州习水杜鹃群落结构和种群动态分析[J]. *热带亚热带植物学报*, 2023, 31(6): 766–778.

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.11926/jtsb.4656>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

草海国家级自然保护区华山松群落特征及物种多样性研究

热带亚热带植物学报. 2020, 28(1): 44–52 <https://doi.org/10.11926/jtsb.4063>

珍稀濒危植物紫纹兜兰的种群结构和数量动态

Population Structure and Quantitative Dynamics of Rare and Endangered Plant *Paphiopedilum purpuratum*

热带亚热带植物学报. 2020, 28(4): 375–384 <https://doi.org/10.11926/jtsb.4180>

安徽宁国珍稀濒危植物华东黄杉的种群动态研究

Studies on Population Dynamics of An Endangered Plant of *Pseudotsuga gaussenii* in Ningguo, Anhui Province

热带亚热带植物学报. 2020, 28(4): 385–393 <https://doi.org/10.11926/jtsb.4177>

杜鹃属植物与杜鹃灌丛群落的研究进展

Advances in the *Rhododendron* and *Rhododendron* Shrub Communities

热带亚热带植物学报. 2020, 28(5): 527–536 <https://doi.org/10.11926/jtsb.4187>

茂兰喀斯特常绿落叶阔叶混交林群落组成和优势种更新类型

Community Composition and Regeneration Types of Dominant Species in Evergreen and Deciduous Broad-leaved Mixed Karst Forest in Maolan National Nature Reserve, Guizhou Province

热带亚热带植物学报. 2018, 26(6): 651–660 <https://doi.org/10.11926/jtsb.3893>

向下翻页, 浏览PDF全文

贵州习水杜鹃群落结构和种群动态分析

王道^{1,2}, 李崇清², 穆璁², 罗康², 李云波², 杨瑞^{1*}

(1. 贵州大学林学院, 贵阳 550025; 2. 贵州习水国家级自然保护区管理局, 贵州 习水 564600)

摘要: 为了探究贵州习水国家级自然保护区特有植物习水杜鹃(*Rhododendron xishuiense*)种群现状, 揭示该种群动态及濒危原因, 加强对该种群的保护, 在该保护区设置了 13 条样线, 调查习水杜鹃在保护区的分布情况。对现存习水杜鹃分布地开展样地调查, 采用 4 个多样性指数和 Raunkiear 生活型系统分析习水杜鹃分布群落的结构, 通过空间代替时间得到种群年龄结构, 据此编制静态生命表, 并绘制存活曲线及 4 个生存函数曲线分析习水杜鹃种群的动态特征。结果表明, 共有维管植物 27 科 42 属 65 种, 其中种子植物 24 科 39 属 62 种, 蕨类植物 3 科 3 属 3 种。以高位芽的物种数最多, 有 56 种, 占物种总数的 86.15%, 其次是地上芽植物、地面芽植物、地下芽植物。群落的多样性指数均表现为乔木层>灌木层>草本层, 乔木层占有绝对的优势地位。种群年龄结构呈“金字塔”型, 种群幼苗个体相对于整个种群数量较多; 种群存活曲线属于 Deevey II 型, 个体数量随着年龄的增加而不断减少; 种群生存率持续下降, 尤以中后期减少速度较快, 种群衰退。习水杜鹃种群分布范围狭窄, 分布群落物种多样性高, 幼苗相对较多表现为增长型, 但种群总量极少, 且遭受较强的竞争, 建议采取适当措施促进幼苗幼树生长, 使中年个体得到有效补充, 以保障种群持续增长。

关键词: 习水杜鹃; 群落结构; 种群动态; 习水自然保护区

doi: 10.11926/jtsb.4656

Studies on Community Structure and Population Dynamics of *Rhododendron xishuiense* in Guizhou

WANG Xiao^{1,2}, LI Chongqing², MU Cong², LUO Kang², LI Yunbo², YANG Rui¹

(1. Forestry College of Guizhou University, Guiyang 550025, China; 2. National Natural Reserve Administration of Xishui, Guizhou Province, Xishui 564600, Guizhou, China)

Abstract: In order to explore the population status of *Rhododendron xishuiense*, an endemic plant in Xishui National Nature Reserve, Guizhou, reveal the dynamics and endangered causes of its population and strengthen its protection, the distribution of *R. xishuiense* was investigated along 13 transects in the reserve. The population structure of *R. xishuiense* distribution community was analyzed by using four diversity indexes and Raunkiear life form, the population age structure was obtained by replacing time with space. Thus, the static life table was compiled, and the survival curve and four survival function curves were drawn to analyze the dynamic characteristics of *R. xishuiense* population. The results showed that there were 65 species of vascular plants in 27 families, 42 genera, in which 62 species of seed plants in 24 families, 39 genera and 3 species of ferns in 3 families and 3 genera. The number of phanerophyte was the largest with 56 species in total, accounting for 86.15% to all species, followed by chamaephyte, hemicryptophyte, and geophyte. All of diversity indexes of the community was in the order of tree layer > shrub layer > herb layer, indicating that tree layer had an absolute dominant position. The age structure of the population was pyramidal, and the number of seedlings in population

收稿日期: 2022-04-21 接受日期: 2022-05-23

基金项目: 贵州省林业局青年人才基金项目([2019]08)资助

This work was supported by the Project for Youth Talent of Guizhou Forestry Bureau (Grant No. [2019]08).

作者简介: 王道(1993年生), 男, 硕士研究生, 主要从事森林生态学和野生动植物保护研究。E-mail: 1121850020@qq.com

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: yr553017@163.com

was large in whole population; the population survival curve was Deevey II type, and the number of individuals decreased along age, the population survival rate continued to decline, especially in the middle and late period of rapid decline, population decline. Therefore, with its narrow distribution range and high diversity, the number of seedlings showed an increasing pattern, but due to the suffering of intense competition, the *R. xishuiense* had a very small population of species. It was suggested to take appropriate measures to promote the growth of seedlings and young trees, so that middle-aged individuals can be effectively supplemented, so as to ensure the sustainable growth of the population.

Key words: *Rhododendron xishuiense*; Community structure; Population dynamic; Xishui Nature Reserve

据最新调查结果, 中国有 37 699 种高等植物, 位列全球第 3, 其中超 1.5×10^4 种种子植物为中国特有, 约占种子植物总数 50%。2021 年, 中国科学家首次完成了 3.5 万余种野生高等植物的濒危状况评估, 发现 40 物种已经灭绝、野外灭绝或者地区灭绝, 受威胁物种达 3 879 种, 占 10.84%, 其中不乏大量的特有植物^[1], 这些特有植物在生物多样性评估中占有重要地位^[2-5]。但多数的特有植物由于数量少、分布狭窄等原因, 往往得不到关注^[2], 我国有杜鹃花属特有植物 450 种^[1], 这些特有杜鹃花除了带来生物多样性贡献外, 还具有极高的观赏价值、文化价值和药用价值。如杜鹃花可作为抗氧化剂、免疫调节剂、抗炎剂和活力恢复剂^[6-9]; 从杜鹃花中提取的天然色素能够代替合成色素, 避免了合成色素的副作用^[10]; 食用杜鹃花有清热功能, 有益身体健康, 且具传统风味^[11]。研究还表明在杜鹃花科植物生长的群落中, 杜鹃花有助于预测其相关生态系统对人为因素影响的抵抗能力和恢复能力, 包括人为导致的气候变化、氮富集和物种入侵等。这种基础物种随着生态系统状态变化出现的动态, 将帮助生态学家把重点放在生态系统过程和基础物种响应, 而不是历史上占优势的物种和生态系统状态变化的恢复策略^[12]。

群落结构的研究有助于掌握自然植被的组成规律, 并应用这些规律来指导林业实践活动^[13]。种群动态研究不仅能揭示种群的生存现状和演替规律、阐明种群经历的干扰情况、对环境条件的适应能力, 还能有效预测种群未来的发展趋势, 为濒危物种的保护和管理指明方向^[14-15]。植物种群动态是研究生存在特定环境空间里的植物种群随时间呈现的个体数量消长和分布变迁规律^[16-17]。

习水杜鹃(*Rhododendron xishuiense*)系杜鹃花科(Ericaceae)杜鹃花属植物, 2010 年开展综合科考时在杨大老林山顶发现的新物种, 目前仅分布于贵

州习水国家级自然保护区, 该种近似于猫儿山杜鹃(*R. maoerense*), 但其花冠呈漏斗形, 子房不被短柄腺体, 叶较小^[18]。习水杜鹃被发现已逾 10 年, 但未见进一步的调查研究, 调查分析该种的分布现状及动态, 能为保护区管理机构科学合理的保护和利用该种群提供决策参考。

1 材料和方法

1.1 研究区概况

贵州习水国家级自然保护区, 位于贵州省遵义市, 地跨习水县和赤水市, 地理位置为 $105^{\circ}50' \sim 106^{\circ}29' E$, $28^{\circ}07' \sim 28^{\circ}34' N$, 保护区总面积 $51\,911 \text{ hm}^2$, 其中核心区面积 $21\,231.31 \text{ hm}^2$, 缓冲区面积 $11\,303.8 \text{ hm}^2$, 试验区面积 $19\,375.89 \text{ hm}^2$, 是贵州省面积最大的国家级自然保护区。保护区地形以山地为主, 主要为白垩系发育的丹霞地貌, 年均温在 $10.3^{\circ}C \sim 17.2^{\circ}C$, 年日照数 $1\,091 \sim 1\,246 \text{ h}$, 年降水量 $770 \sim 1\,661 \text{ mm}$ 。保护区内的植物有 331 科 1 001 属 2 539 种, 主要由壳斗科(Fagaceae)、樟科(Lauraceae)、山茶科(Theaceae)、蔷薇科(Rosaceae)、忍冬科(Caprifoliaceae)和桑科(Moraceae)等种类占优势的常绿阔叶混交林组成, 主要森林群落有润楠(*Machilus pingii*)-鹅耳枥(*Carpinus turczaninowii*)林、厚皮栲(*Lansea coromandelica*)-杜英(*Elaeocarpus decipiens*)林、杜英-石栎(*Lithocarpus glaber*)林、丝栗栲(*Castanopsis fargesii*)-山矾(*Symplocos sumuntia*)林等。保护区内还分布有红豆杉(*Taxus chinensis*)、南方红豆杉(*T. wallichiana* var. *mairei*)、福建柏(*Fokienia hodginsii*)、伯乐树(*Bretschneidera sinensis*)、鹅掌楸(*Liriodendron chinense*)、桫欏(*Alsophila spinulosa*)等国家重点保护树种。

1.2 样地(线)设置及调查

2020 年 6 月—2021 年 9 月, 在询问保护区周边群众与实地踏查分析的基础上, 结合保护区实际

确定调查区域, 设置 13 条样线, 沿山脚至山顶设置样线, 每条样线 3~5 km, 宽度 0.1~0.5 km (由视野决定), 2 条样线相邻不得少于 2 km (图 1), 调查习水杜鹃在贵州习水国家级自然保护区的分布情况。选择有习水杜鹃的分布地设置样地开展调查, 但由于习水保护区地形特殊, 且习水杜鹃现分布地在高海拔的山顶, 分布面积狭窄, 无法开展大样地调查。

对发现地(杨大老岭, 图 2)设置 10 m×30 m 的样带开展调查, 将样带分成 3 个 10 m×10 m 的样方进行乔木统计, 12 个 5 m×5 m 的样方进行灌木和草本的统计。调查内容包括: 样地地理坐标、海拔、坡度、坡向、坡位等地理信息; 所有草本植物名称、平均高度、盖度、多度等; 所有胸径(DBH)小于 3 cm 的灌木植物的名称、株数、平均高度、平均地径、盖

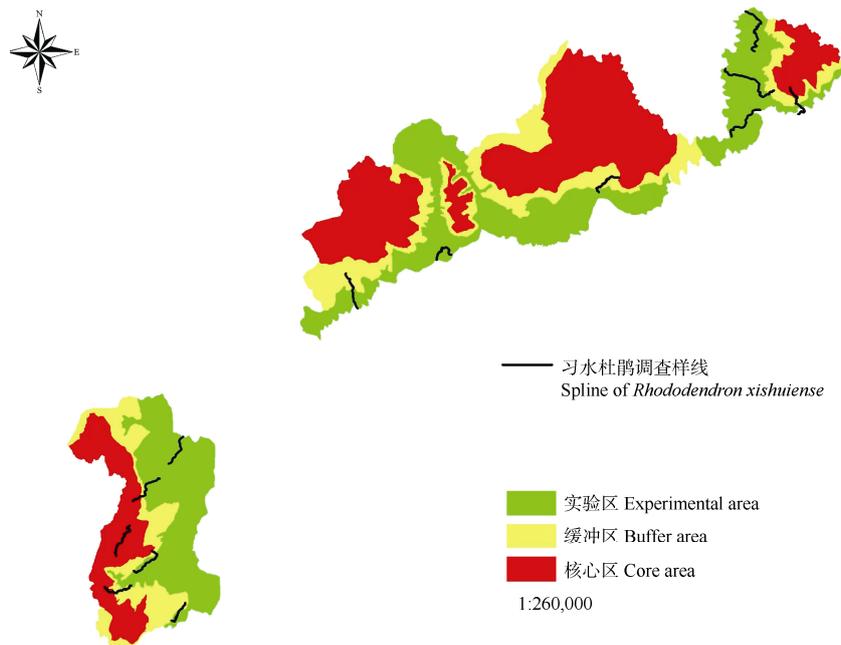


图 1 习水杜鹃样线分布图

Fig. 1 Sample line distribution of *Rhododendron xishuiense* in Xishui Nature Reserve

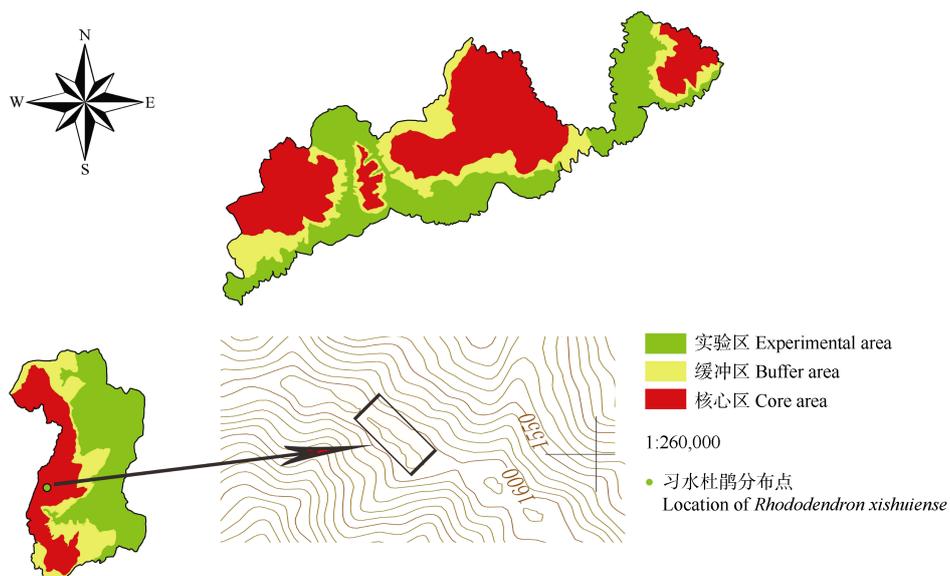


图 2 习水杜鹃分布位置示意图

Fig. 2 Distribution of *Rhododendron xishuiense*

度等; 所有 DBH 大于 3 cm 的乔木植物的名称、胸径、树高、枝下高、冠幅等。同时, 以西南角为坐标原点, 记录样地中所有木本植物的坐标位置。

1.3 群落结构特征分析

1.3.1 植物地理区系、生活型分析

种子植物和孢子植物地理区系分别参照吴征镒^[19]、陈景艳等^[20]的划分标准; 生活型按照 Raunkier 生活型系统统计。

1.3.2 群落物种多样性分析

采用 Gleason 丰富度指数、Simpson 多样性指数、Shannon-wiener 多样性指数、Pielou 均匀度指数对群落的物种多样性分析^[21-24]。乔木层重要值(I)=(相对密度+相对频度+相对盖度)/3, 灌木层重要值(I)=(相对密度+相对频度)/2, 草本层重要值(I)=(相对密度+相对频度)/2, Gleason 丰富度指数: $R=S/\ln A$, Simpson 多样性指数: $D=1-\sum_{i=1}^S P_i^2$, Shannon-Wiener 多样性指数: $H=-\sum_{i=1}^S (P_i \ln P_i)$, Pielou 均匀度指数: $J=H/\ln S$, 式中, P_i 为样方中第 i 个物种的重要值与样地中该层次重要值之和的比值, 即相对重要值, S 为群落中植物物种数, A 为样地面积。

1.4 种群动态

1.4.1 年龄结构和静态生命表编制

采用径阶(地径)代替年龄的方式对乔木杜鹃径级进行划分^[25-26], 结合调查数据, 按 $0 < I \leq 5 \text{ cm}$, $5 \text{ cm} < II \leq 10 \text{ cm}$, $10 \text{ cm} < III \leq 15 \text{ cm}$, $15 \text{ cm} < IV \leq 20 \text{ cm}$, $V > 20 \text{ cm}$ 进行径阶划分, 将习水杜鹃种群的年龄结构划分为 5 个龄级。统计各个龄级内的习水杜鹃株数, 按照静态生命表的编制方法编制整个样地的习水杜鹃种群的静态生命表, 但静态生命表只是反映了世代重叠的年龄动态历程中的一个特定时间, 而不是对同一种群的全部生活史的追踪^[27], 且考虑到调查中存在误差, 在生命表中会出现死亡率为负的情况, 因此使用匀滑技术对静态生命表进行处理^[28], 对 A_x 进行匀滑修得 a_x , 并据此得到习水杜鹃种群静态生命表。表中参数计算如下: $l_x = a_x/a_0 \times 1000$, $d_x = l_x - l_{x+1}$, $q_x = d_x/l_x$, $L_x = (l_x + l_{x+1})/2$, $T_x = \sum_x L_x$, $e_x = T_x/l_x$, $K_x = \ln l_x - \ln l_{x+1}$, $S_x = l_{x+1}/l_x$, 式中, A_x 为 x 龄级实际存活数量; a_x 为修正后 x 龄级存活数; l_x 为第 x 龄级的标准化存活数; $\ln l_x$ 为标准化存活数的自然对数; d_x 为 x 至 $x+1$ 龄级内的标准化死亡数; q_x 为 x 至 $x+1$ 龄级内的死亡率; L_x 为 x 至 $x+1$ 龄级内的平均存活的个体数; T_x

为 x 龄级到超过 x 龄级存活个体总数; e_x 为进入 x 龄级个体的平均期望寿命; K_x 为消失率; S_x 为存活率。

1.4.2 种群存活曲线、死亡曲线和消失率曲线绘制

以龄级为横坐标, 标准化存活个体数的自然对数值($\ln l_x$)为纵坐标, 绘制习水杜鹃种群存活曲线, 采用指数模型 $N_x = N_0 e^{-bx}$ 、幂函数模型 $N_x = N_0 x^{-b}$ 对存活曲线进行拟合, 若符合指数模型, 则为 Deevey-II 型, 若符合幂函数模型则为 Deevey-III 型^[29]。 N_x 、 N_0 分别表示 x 龄级的存活个体数和种群形成初期的个体数, b 为死亡率。同样地, 以龄级为横坐标, 生存函数 $S_{(t)}$ 、积累死亡率函数 $F_{(t)}$ 、死亡密度函数 $f_{(t)}$ 和危险率函数 $\lambda_{(t)}$ 等 4 个函数值为纵坐标制作习水杜鹃种群的生存率曲线、累计死亡率曲线、死亡密度曲线和危险率曲线。 $S_{(t)} = S_1 S_2 S_3 \cdots S_i$, $F_{(t)} = 1 - S_i$, $f(t) = [S_{i-1} - S_i]/h_i = S_{i-1} q_i/h_i$, $\lambda_{(t)} = 2(1 - S_i)/[h_i(1 + S_i)]$, 式中, S_i 为种群存活率, q_i 为种群死亡率, h_i 为龄级宽度。

1.4.3 种群结构量化动态

采用陈晓德^[30]的方法, 对习水杜鹃种群结构类型进行量化分析。

种群龄级间动态指数(V_n)为: $V_n = (S_n - S_{n-1})/\max(S_n, S_{n-1})$, 式中, S_n 与 S_{n+1} 分别为第 n 和 $n+1$ 年龄级种群个体数。

种群年龄结构的数量变化动态指数(V_{pi})为: $V_{pi} = \sum_{n=1}^{k-1} (S_n V_n) / \sum_{n=1}^{k-1} S_n$, 式中, K 为最大年龄级。

考虑 K 和 S_n 因素的种群结构动态指数(V'_{pi})为: $V'_{pi} = \sum_{n=1}^{k-1} (S_n V_n) / K_{\min}(S_1, S_2, S_3, S_4, \dots, S_k) \sum_{n=1}^{k-1} S_n$, 式中, V_n 为种群从 n 到 $n+1$ 龄级间个体数量的变化动态指数, V_{pi} 为忽略外部干扰时整个种群的数量变化动态指数。 S_n 与 S_{n+1} 分别为第 n 、第 $n+1$ 龄级的个体数量, K 为种群年龄级数量, $\max(\dots)$ 和 $\min(\dots)$ 取括号中数列的极大值和极小值。 $-1 \leq V_n$ (或 V_{pi} 或 V'_{pi}) ≤ 1 , 当 V_n (或 V_{pi} 或 V'_{pi}) 取正、零、负值时, 表示种群内两相邻龄级间个体数量(或整个种群年龄结构)的增长、稳定、衰退的动态关系。

2 结果和分析

2.1 群落结构特征

2.1.1 习水杜鹃种群分布现状及分布群落物种组成

根据对 13 条样线的调查, 仅在杨大老岭(105°52'25.941" E, 28°11'30.756" N, 约 300 m²)发现习水杜鹃。

杨大老岭样地调查有维管植物 27 科 42 属 65 种(表 1), 其中种子植物 24 科 39 属 62 种, 蕨类植物 3 科 3 属 3 种。在习水杜鹃群落中, 乔木层和灌木层中均以樟科、杜鹃花科、山茶科较多, 草本层以禾本科(Poaceae)、百合科(Liliaceae)较多。樟科植物在属的统计上同样在乔木层和灌木层群落中占据优势。从各属物种分析, 以杜鹃花属(*Rhododendron*)、石栎属(*Lithocarpus*)较多。单科单属植物 18 种, 占 27.69%。群落中有木本植物 363 株, 其中乔木层以习水杜鹃、岭南石栎(*Lithocarpus brevicaudatus*)、桂南木莲(*Manglietia chingii*)较多。灌木层中杜鹃(*Rhododendron simsii*)有 179 株, 占 60.3%, 占据绝对数量优势, 草本层植物共 494 株, 箭竹(*Fargesia spathacea*) 320 株, 占 64.8%, 也占据数量上的绝对优势。

2.1.2 习水杜鹃分布群落的植物地理区系

根据吴征镒对种子植物属的地理分布类型的划分标准, 结合陈景艳对贵州蕨类植物地理区系的调查结果, 对习水杜鹃群落植物区系进行统计分析(表 2)。习水杜鹃群落物种区系分布有 14 种分布类型, 以泛热带分布、北温带分布、热带亚洲(印度-马来西亚分布)物种数较多。其中泛热带分布有 9 科 9 属 12 种, 包含菝葜属(*Smilax*)、冬青属(*Ilex*)、厚皮香属(*Ternstroemia*)、里白属(*Hicriopteris*)、琼楠属(*Beilschmiedia*)、求米草属(*Oplismenus*)、榕属(*Ficus*)、山矾属(*Symplocos*)、卫矛属(*Euonymus*); 北

温带分布有 6 科 6 属 11 种, 包含杜鹃花属(*Rhododendron*)、鹅耳枥属(*Carpinus*)、花楸属(*Sorbus*)、荚蒾属(*Viburnum*)、李属(*Prunus*)、槭属(*Acer*); 热带亚洲(印度-马来西亚分布)有 3 科 5 属 11 种, 包含山茶属(*Camellia*)、含笑属(*Michelia*)、木莲属(*Manglietia*)、润楠属(*Machilus*)和山胡椒属(*Lindera*)。群落中分布的中国特有植物 2 科 2 属, 分别是香果树属(*Emmenopterys*)和箭竹属(*Fargesia*)。热带亚洲至热带非洲分布、热带亚洲和东非或马达加斯加间断分布、热带印度至华南分布、中国-喜马拉雅分布属种均 1 种, 是习水杜鹃所在群落中地理区系分布最少的类型。

2.1.3 习水杜鹃分布群落植物生活型

按照 Raunkiaer 生活型分类系统, 对习水杜鹃群落中 65 种植物进行分类, 高位芽的物种数最多, 为 56 种, 占总数的 86.15%。其中, 中型高位芽植物有 28 种, 占高位芽生活型的 50.00%, 主要有峨眉含笑(*Michelia wilsonii*)、厚皮香(*Ternstroemia gymnanthera*)、桂南木莲、石灰花楸(*Sorbus folgneri*)等; 小型高位芽植物有 26 种, 占高位芽生活型的 46.43%, 主要有习水杜鹃、杜鹃、光枝杜鹃(*Rhododendron haofui*)、小果润楠(*Machilus microcarpa*)等; 矮高位芽植物有 2 种, 占高位芽生活型的 3.57%。地上芽植物 5 种, 占总数的 7.69%; 地面芽植物 3 种, 占总数的 4.62%; 地下芽植物 1 种, 占总数的 1.54%。

表 1 习水杜鹃分布群落的物种组成

Table 1 Species composition of *Rhododendron xishuiense* community

| 层次 Layer | 序号 No. | 科 Family | 属数 Number of genus | 种数 Number of species | 个体数 Number of individuals |
|--------------|-----------|--------------------|-----------------------|-------------------------|------------------------------|
| 乔木层 Arbor | 1 | 樟科 Lauraceae | 5 | 9 | 38 |
| | 2 | 壳斗科 Fagaceae | 4 | 6 | 33 |
| | 3 | 山茶科 Theaceae | 3 | 4 | 20 |
| | 4 | 木兰科 Magnoliaceae | 2 | 4 | 16 |
| | 5 | 杜鹃花科 Ericaceae | 2 | 6 | 46 |
| | 6 | 蔷薇科 Rosaceae | 2 | 2 | 9 |
| | 7 | 山矾科 Symplocaceae | 1 | 2 | 3 |
| | 8 | 漆树科 Anacardiaceae | 1 | 1 | 1 |
| | 9 | 槭树科 Aceraceae | 1 | 1 | 1 |
| | 10 | 虎耳草科 Saxifragaceae | 1 | 1 | 1 |
| | 11 | 茜草科 Rubiaceae | 1 | 1 | 1 |
| | 12 | 忍冬科 Caprifoliaceae | 1 | 2 | 5 |
| | 13 | 桑科 Moraceae | 1 | 1 | 1 |
| | 14 | 冬青科 Aquifoliaceae | 1 | 1 | 2 |
| | 15 | 桦木科 Betulaceae | 1 | 1 | 2 |
| | 16 | 越桔科 Vacciniaceae | 1 | 1 | 5 |
| 灌木层 Shrub | 1 | 樟科 Lauraceae | 4 | 5 | 18 |

续表(Continued)

| 层次 Layer | 序号 No. | 科 Family | 属数 Number of genus | 种数 Number of species | 个体数 Number of individuals |
|-------------|-----------|----------------------|-----------------------|-------------------------|------------------------------|
| 灌木层 Shrub | 2 | 山茶科 Theaceae | 3 | 5 | 9 |
| | 3 | 蔷薇科 Rosaceae | 2 | 2 | 9 |
| | 4 | 壳斗科 Fagaceae | 2 | 2 | 5 |
| | 5 | 杜鹃花科 Ericaceae | 2 | 5 | 125 |
| | 6 | 小檗科 Berberidaceae | 1 | 1 | 1 |
| | 7 | 山矾科 Symplocaceae | 1 | 3 | 3 |
| | 8 | 卫矛科 Celastraceae | 1 | 1 | 1 |
| | 9 | 木兰科 Magnoliaceae | 1 | 1 | 1 |
| | 10 | 越桔科 Vacciniaceae | 1 | 1 | 3 |
| | 11 | 忍冬科 Caprifoliaceae | 1 | 1 | 3 |
| | 12 | 桑科 Moraceae | 1 | 1 | 1 |
| | 草本层 Herb | 1 | 禾本科 Poaceae | 3 | 3 |
| 2 | | 百合科 Liliaceae | 2 | 3 | 9 |
| 3 | | 乌毛蕨科 Blechnaceae | 1 | 1 | 16 |
| 4 | | 里白科 Gleicheniaceae | 1 | 1 | 5 |
| 5 | | 鳞毛蕨科 Dryopteridaceae | 1 | 2 | 79 |
| 6 | | 兰科 Orchidaceae | 1 | 1 | 4 |
| 7 | | 野牡丹科 Melastomataceae | 1 | 1 | 9 |
| 8 | | 莎草科 Cyperaceae | 1 | 1 | 3 |

表 2 习水杜鹃分布群落植物区系分析

Table 2 Areal type of *Rhododendron xishuiense* community

| | 区系类型 Areal type | 科数 Number of family | % | 属数 Number of genus | % | 种数 Number of species | % |
|------|--|------------------------|--------|-----------------------|--------|-------------------------|--------|
| 1 | 世界分布 Cosmopolitan | 4 | 14.81 | 4 | 09.52 | 5 | 7.69 |
| 2 | 泛热带分布 Pantropic | 9 | 33.33 | 9 | 21.43 | 12 | 18.46 |
| 3 | 热带亚洲和热带美洲间断分布 Trop Asia, Africa & C to S Amer disjunct | 2 | 7.41 | 2 | 04.76 | 4 | 6.15 |
| 5 | 热带亚洲至热带大洋洲分布 Trop Asia & Trop Australasia | 2 | 7.41 | 2 | 04.76 | 3 | 4.62 |
| 6 | 热带亚洲至热带非洲分布 Trop Asia to Trop Africa | 1 | 3.70 | 1 | 02.38 | 1 | 1.54 |
| 6-2 | 热带亚洲和东非或马达加斯加间断分布 Trop Asia & E Africa or Madagascar disjunct | 1 | 3.70 | 1 | 02.38 | 1 | 1.54 |
| 7 | 热带亚洲(印度-马来西亚分布) Trop Asia (Indo-Malesia) | 3 | 11.11 | 5 | 11.90 | 11 | 16.92 |
| 7-2 | 热带印度至华南分布 Trop India to S Chian | 1 | 3.70 | 1 | 2.38 | 1 | 1.54 |
| 8 | 北温带分布 North Temperate | 6 | 22.22 | 6 | 14.29 | 11 | 16.92 |
| 8-4 | 北温带和南温带间断分布 N Temp & S Temp disjunct | 1 | 3.70 | 2 | 4.76 | 3 | 4.62 |
| 9 | 东亚至北美洲间断分布 E Asia & N Mer disjunct | 3 | 11.11 | 4 | 9.52 | 8 | 12.31 |
| 14 | 东亚分布 E Asia | 2 | 7.41 | 2 | 4.76 | 2 | 3.08 |
| 14-1 | 中国-喜马拉雅分布 Sino-Himalaya (SH) | 1 | 3.70 | 1 | 2.38 | 1 | 1.54 |
| 15 | 中国特有分布 Endemic to china | 2 | 7.41 | 2 | 4.76 | 2 | 3.08 |
| | 总计 Total | 27 | 100.00 | 42 | 100.00 | 65 | 100.00 |

2.1.4 习水杜鹃分布群落的优势种和物种多样性

从表 3 可见, 习水杜鹃分布群落乔木层的物种有 43 种, 重要值较大的有习水杜鹃、石灰花楸、江南越桔(*Vaccinium mandarinorum*)、厚皮香、岭南石栎、桂南木莲、小果润楠、石栎、硬壳柯(*Lithocarpus hancei*)、长蕊杜鹃(*Rhododendron stamineum*)等, 其中习水杜鹃的重要值最大, 为 0.426, 是该群落乔木层的最优树种。灌木层共有 29 种, 重要值较大的物种有杜鹃、小果润楠、习水杜鹃、

光枝杜鹃、江南越桔等, 其中以杜鹃的重要值最大, 为 0.804, 虽然习水杜鹃排在第 3, 但重要值仅为 0.362, 与杜鹃差距较大, 在灌木层中习水杜鹃的优势不明显。草本层物种有 11 种, 其中以箭竹的重要值(0.824)最大, 广泛密布于林下。总的来说, 在乔灌木层中均是杜鹃花科杜鹃花属植物为优势种, 表明杜鹃花科植物在该群落中有重要的建群功能。

从表 4 可见, Shannon-Wiener 多样性指数(*H*)、

Pielou 均匀度指数(J)、Simpson 多样性指数(D)、Gleason 丰富度指数(R)均表现出乔木层>灌木层>草本层。其中除 Simpson 多样性指数外,其他多样性

指标乔木层均远远大于灌木层和草本层,表明乔木层物种丰富且多样性高,在该群落中具明显优势,主导着群落的发生发展。

表 3 习水杜鹃分布群落物种重要值(前 10 种)

Table 3 Important value of species in distribution community of *Rhododendron xishuiense* (top 10 species)

| 层次 Layer | 树种 Species | 相对密度 Relative density | 相对频度 Relative frequency | 相对盖度 Relative coverage | 重要值 Importance value |
|--------------|---|--------------------------|----------------------------|---------------------------|-------------------------|
| 乔木层 Arbor | 习水杜鹃 <i>Rhododendron xishuiense</i> | 0.136 | 1.000 | 0.141 | 0.426 |
| | 石灰花楸 <i>Sorbus folgneri</i> | 0.044 | 1.000 | 0.122 | 0.389 |
| | 江南越橘 <i>Vaccinium mandarinorum</i> | 0.027 | 1.000 | 0.011 | 0.346 |
| | 厚皮香 <i>Ternstroemia gymnanthera</i> | 0.065 | 0.667 | 0.160 | 0.297 |
| | 岭南石栎 <i>Lithocarpus brevicaudatus</i> | 0.087 | 0.667 | 0.054 | 0.269 |
| | 桂南木莲 <i>Manglietia chingii</i> | 0.065 | 0.667 | 0.057 | 0.263 |
| | 小果润楠 <i>Machilus microcarpa</i> | 0.054 | 0.667 | 0.020 | 0.247 |
| | 石栎 <i>L. glaber</i> | 0.016 | 0.667 | 0.057 | 0.247 |
| | 硬壳柯 <i>L. hancei</i> | 0.038 | 0.667 | 0.027 | 0.244 |
| | 长蕊杜鹃 <i>R. stamineum</i> | 0.027 | 0.667 | 0.024 | 0.239 |
| 灌木层 Shrub | 杜鹃 <i>R. simsii</i> | 0.608 | 1.000 | - | 0.804 |
| | 小果润楠 <i>Machilus microcarpa</i> | 0.034 | 1.000 | - | 0.517 |
| | 习水杜鹃 <i>R. xishuiense</i> | 0.057 | 0.667 | - | 0.362 |
| | 光枝杜鹃 <i>R. haofui</i> | 0.017 | 0.667 | - | 0.342 |
| | 江南越橘 <i>Vaccinium mandarinorum</i> | 0.017 | 0.667 | - | 0.342 |
| | 南方荚蒾 <i>Viburnum fordiae</i> | 0.017 | 0.667 | - | 0.342 |
| | 硬壳柯 <i>Lithocarpus hancei</i> | 0.017 | 0.667 | - | 0.342 |
| | 格药柃 <i>Eurya muricata</i> | 0.011 | 0.667 | - | 0.339 |
| | 贵州琼楠 <i>Beilschmiedia kweichowensis</i> | 0.011 | 0.667 | - | 0.339 |
| | 石栎 <i>Lithocarpus glaber</i> | 0.011 | 0.667 | - | 0.339 |
| 草本层 Herb | 箭竹 <i>Fargesia spathacea</i> | 0.648 | 1.000 | - | 0.824 |
| | 稀羽鳞毛蕨 <i>Dryopteris sparsa</i> | 0.160 | 1.000 | - | 0.580 |
| | 狗脊蕨 <i>Woodwardia japonica</i> | 0.032 | 0.667 | - | 0.350 |
| | 蕙兰 <i>Cymbidium faberi</i> | 0.008 | 0.667 | - | 0.337 |
| | 矛叶荩草 <i>Arthraxon lanceolatus</i> | 0.085 | 0.333 | - | 0.209 |
| | 肉穗草 <i>Sarcopyramis bodinieri</i> | 0.018 | 0.333 | - | 0.176 |
| | 吉祥草 <i>Reineckia carnea</i> | 0.014 | 0.333 | - | 0.174 |
| | 竹叶草 <i>Oplismenus compositus</i> | 0.014 | 0.333 | - | 0.174 |
| | 里白 <i>Diplazium glaucum</i> | 0.008 | 0.333 | - | 0.171 |
| | 莎草 <i>Cyperus rotundus</i> | 0.006 | 0.333 | - | 0.170 |

表 4 习水杜鹃分布群落物种多样性指数

Table 4 Species diversity index at all levels of *Rhododendron xishuiense* community

| 层次 Layer | 物种数 of species (S) | Shannon-Wiener 多样性指数 (H) Shannon Wiener diversity index | Pielou 均匀度指数 (J) Pielou evenness index | Simpson 多样性指数 (D) Simpson diversity index | Gleason 丰富度指数 (R) Gleason richness index |
|--------------|---------------------------|--|---|--|---|
| 乔木层 Arbor | 43 | 28.09 | 7.47 | 0.97 | 32.26 |
| 灌木层 Shrub | 29 | 3.35 | 1.02 | 0.95 | 6.30 |
| 草本层 Herb | 11 | 2.10 | 0.87 | 0.89 | 2.38 |

2.2 习水杜鹃种群动态

2.2.1 种群结构

由于本次样线调查未能发现其他的习水杜鹃分布地,故只能选择在发现地杨大老岭设置 $10\text{m} \times 30\text{m}$ 的样带开展调查。在样地中共调查到习水杜鹃

34 株,年龄结构呈“金字塔”型(图 3),其中第 I 龄级数量最多,有 13 株(占 38.24%),第 II 龄级次之(11 株,占 32.35%),习水杜鹃种群中,幼苗、幼树相对整个种群数量来说较多,大树、老树较少,总体上,习水杜鹃种群个体数量随着年龄的增长而逐渐减少,

在前 3 个龄级时种群降低速度较均匀,但在第IV龄级时突然出现较强波动,甚至在该龄级出现了个体缺失的现象。

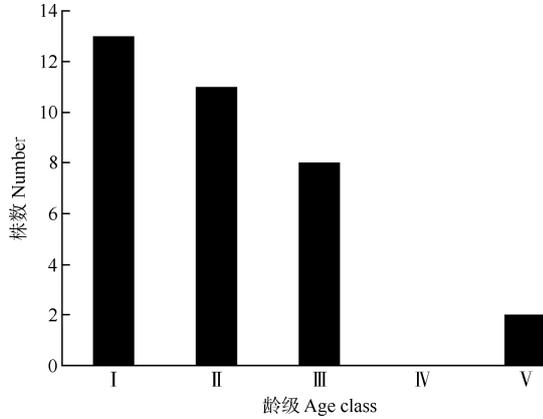


图 3 习水杜鹃径阶结构

Fig. 3 Diameter structure of *Rhododendron xishuiense*

2.2.2 种群的静态生命表

习水杜鹃的前 3 龄级符合种群生命表的一般假设规律,第IV龄级存活个体急剧减少为 0,出现了死亡率为负的情况,因此对III、IV、V龄级进行匀滑处理,得到 a_x 。编制种群静态生命表(表 5)可以看出,种群个体随龄级增加不断减少,死亡率 q_x 和消失率 K_x 均也随着龄级增长逐渐上升,在第IV龄级时达到最大值,整个种群个体到达第V龄级时只有不到第I龄级 10%的个体存活下来。生命期望值 e_x 在第I龄级时最高,在第III龄级时最低,第IV龄级存活率 S_x 最低,消失率 K_x 最大,该龄级种群开始

衰退。

2.2.3 种群存活曲线、死亡曲线以及消失率曲线

习水杜鹃种群存活曲线可能是 Deevey-II型或 Deevey-III型(图 4)。应用 Hett 等提出的数学模型对习水杜鹃标准化存活个体数的自然对数值($\ln l_x$)拟合,结果表明,指数模型拟合函数为 $N_x=8.01563e^{-0.10485x}$,幂函数模型拟合函数为 $N_x=7.28124x^{-0.07726}$,且 2 个模型的 $P<0.001$ 值也都达到极显著水平。相较 2 个函数的拟合结果,指数函数模型的调整 R^2 和 F 值均大于幂函数模型,指数函数模型的拟合效果更好,说明习水杜鹃种群存活个体数与龄级之间符合指数函数模型,种群存活曲线近似于一条直线,属于 Deevey-II型。拟合结果同样表明习水杜鹃种群随着年龄的增长,存活个体数量逐渐减少,与该种群的年龄结构和生命表的分析结果基本一致。

从习水杜鹃种群的死亡率 q_x 和消失率 K_x 曲线(图 5)可以看出,随着龄级增长均呈现逐渐上升,在死亡高峰期时消失率也出现极大值,在死亡低峰期时消失率也出现极小值,该种群的死亡率和消失率曲线变化趋势基本保持一致,但死亡率曲线的变化幅度相对较小。习水杜鹃种群的死亡率和消失率到第IV龄级的时候达到最大值($q_x=0.667, K_x=1.099$),说明该龄级已接近种群生理寿命。

2.2.4 种群的生存分析

习水杜鹃种群的生存率、累计死亡率、死亡密度、危险率函数值显示(图 6),该种群的生存率持续下降,累计死亡率、危险率持续上升,死亡密度在第II龄级出现波动,开始由上升转至持续下降,到

表 5 习水杜鹃种群静态生命表

Table 5 Static life table of *Rhododendron xishuiense* population

| 龄级 Age class | 径级 (cm) Diameter class | A_x | a_x | l_x | $\ln l_x$ | d_x | q_x | L_x | T_x | e_x | K_x | S_x |
|-----------------|---------------------------|-------|-------|-------|-----------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| I | 0~5 | 13 | 13 | 1 000 | 6.908 | 154 | 0.154 | 923 | 1 942 | 1.942 | 0.167 | 0.846 |
| II | 5~10 | 11 | 11 | 846 | 6.741 | 384 | 0.454 | 546 | 1 019 | 1.204 | 0.605 | 0.546 |
| III | 10~15 | 8 | 6 | 462 | 6.136 | 231 | 0.500 | 319 | 473 | 1.024 | 0.693 | 0.500 |
| IV | 15~20 | 0 | 3 | 231 | 5.442 | 154 | 0.667 | 154 | 250 | 1.082 | 1.099 | 0.333 |
| V | ≥ 20 | 2 | 1 | 77 | 4.344 | | | | | | | |

A_x : x 龄级实际存活数量; a_x : 修正后 x 龄级存活数; l_x : 第 x 龄级的标准化存活数; $\ln l_x$: 标准化存活数的自然对数; d_x : x 至 $x+1$ 龄级内的标准化死亡数; q_x : x 至 $x+1$ 龄级内的死亡率; L_x : x 至 $x+1$ 龄级内的平均存活的个体数; T_x : x 龄级到超过 x 龄级存活个体总数; e_x : 进入 x 龄级个体的平均期望寿命; K_x : 消失率; S_x : 存活率。

A_x : Actual survival number of x age class; a_x : Survival number of age class x after correction; l_x : Standardized survival number of x age class; $\ln l_x$: Natural logarithm of normalized survival number; d_x : Standardized number of deaths from x to $x+1$; q_x : Mortality rate from x to $x+1$; L_x : Average number of surviving individuals from x to $x+1$; T_x : Total number of surviving individuals at more than x age; e_x : Average life expectancy of individuals entering the x age class; K_x : Disappearance rate; S_x : Survival rate.

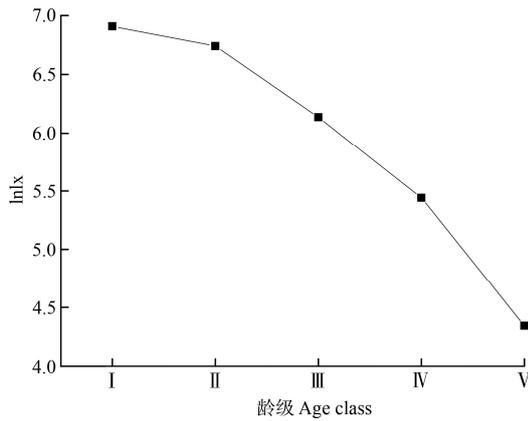


图 4 习水杜鹃存活曲线图

Fig. 4 Survival curve of *Rhododendron xishuiense* population

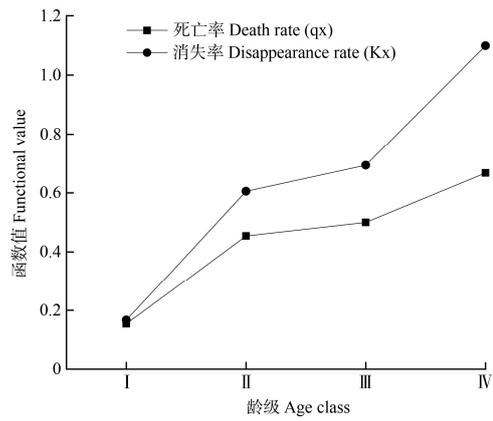


图 5 习水杜鹃种群的死亡率、消失率曲线

Fig. 5 Mortality rate and vanishing rate curves of of *Rhododendron xishuiense* population

第V龄级时，种群的生存率接近 0，而累计死亡率接近 1，种群危险率也达到最大值，习水杜鹃种群开始进入生理衰退期。结合生存率、累计死亡率、死亡密度、危险率函数的结果，习水杜鹃种群生存状况展现出全期减少的特点，其中前期减少速度快、中期减少速度较慢、后期缓慢衰退。

2.2.5 种群动态的量化分析

对习水杜鹃种群结构动态量化分析结果表明，各龄级的数量变化动态指数中，前 3 个龄级均大于 0 (其中 $V_1=0.15$, $V_2=0.27$, $V_3=1$)，第IV龄级 $V_4=-1$ ，忽略外部干扰时习水杜鹃种群的数量变化动态指数 $V_{pi}=34.37\%>0$ ，考虑外部干扰影响时 $V'_{pi}=3.4\%>0$ 。综合习水杜鹃种群的量化分析结果，表明该种群属于增长型种群。虽然个体数量较少，但整个种群在现存的生境中形成了相应的生存策略，一定时间

内，在无突发扰动的情況下，能较好的适应当地的环境并保持相对稳定。

3 结论和讨论

本次样线调查未能在贵州习水国家级自然保护区发现其他的习水杜鹃分布地。与五莲杨(*Populus wulianensis*)、华东黄杉(*Pseudotsuga gaussenii*)等濒危物种相似，稀有物种在广泛的栖息地内有一个自然限制的范围，受特定空间环境的影响，成为了分布狭窄的栖息地的行家，但有限的空间和资源会限制种群发展^[17,31]。中国西南部杜鹃分布的多样性受到地形复杂性和温度季节性共同影响^[32]，与此相同，习水杜鹃分布地海拔高(超 1 500 m 山脊)、低温、潮

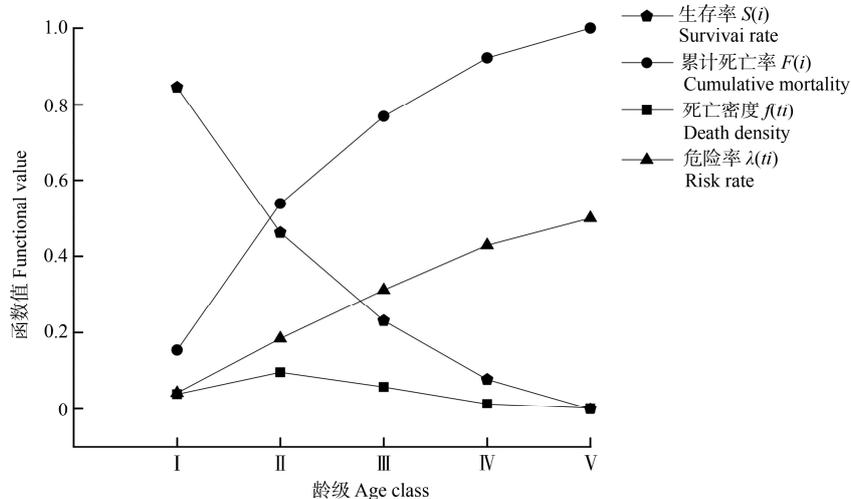


图 6 水杜鹃种群的生存率、累计死亡率、死亡密度、危险率函数

Fig. 6 Curves of survival rate, cumulative mortality rate, mortality density and risk function of *Rhododendron xishuiense* population

湿等特定的外界环境,较高的异质性限制了习水杜鹃的传播,影响着习水杜鹃的分布,这也可能是在保护区其他区域暂未发现习水杜鹃分布的原因。受习水杜鹃分布范围的限制,本研究的样地较小,但不能因为“人口贫乏”和分布狭窄而忽略对特有植物的保护^[3]。且习水杜鹃分布在较为狭窄的山脊上,周围地势陡峭,与山脊外的物种联系较小,较为符合群落的一般特征。群落结构分析中植物地理区系的划分对植物濒危等级、保护珍稀濒危物种与植物多样性具有重要意义^[33],习水杜鹃分布群落的地理区系类型有14个,地理成分多样,其中以热带植物较多,但伴有温带和中国特有植物,这与贵州习水国家级自然保护区属种亚热带的地理位置基本相符。温带植物分布占比较大的原因可能保护区是以丹霞地貌为主,热带植物更多分布在切割较深的沟谷,而本研究样地设置在海拔超1500m的山脊,综合来看,习水杜鹃所在群落是以热带性质为主,伴有温带性质山地森林植物区系。从系统发育方面看,本区有不少如樟科、木兰科、壳斗科、山茶科等原始或古老的植物。生活型是植物生态习性的体现,高位芽植物在习水杜鹃分布群落中占优势,是典型的亚热带常绿阔叶林的外貌组成特征,与保护区温暖湿润的气候相适宜^[34],充分体现了该群落中植物对外界气候环境的适应性。植物优势种对群落内物种组成和结构、生物多样性、生产力、生态过程和功能均有重要影响,根据对习水杜鹃分布群落的重要值比较,杜鹃花科植物在乔灌层占较大优势,发挥着重要的建群功能,其中习水杜鹃对整个群落的建群作用较大,乔木层石灰花楸、江南槭栎,灌木层杜鹃、小果润楠,草本层箭竹等是群落中的优势物种,对群落发生发展也具有重要的影响。本次调查面积不到保护区面积百万分之一,统计到27科42属65种,分别占保护区植物科属种8.7%、4.5%、2.8%,物种多样性较高,其中乔木层远远大于灌木层和草本层,主导着群落演变发展。

受外部环境和植物自身内部因素长期综合性的影响,植物更新个体随着时间推移在发生改变。种群结构的分析有助于推测种群过去和当下的生存状况、预测种群的更新动态^[35]。本研究表明习水杜鹃个体极少,种群年龄结构呈“金字塔”型,幼苗幼树数量储备较多,种群属于增长型,但种群随着龄级增长逐渐减少,甚至在第IV龄级出现了缺少习水杜鹃存活个体的现象,这与苏佳佳等^[36]对贵州习

水国家级自然保护区内福建柏(*Fokienia hodginsii*)种群的研究结果相似,由于云贵高原干旱气候的干扰,使得种群个体在特定时间大量死亡或无法繁殖新的个体。但除了环境因素外,习水杜鹃种子萌发障碍机理尚不明确,还有历史上的、病虫害砍伐和极端天气等因素的影响,都有可能是造成第IV龄级出现个体缺失的原因。但种群现在低龄级储备的个体优势,说明了习水杜鹃在种群发展过程中,逐渐适应了环境的变化,甚至形成了一定的生存策略,以保障种群持续增长。种群静态生命表和存活曲线进一步量化了习水杜鹃种群的生存现状,揭示了习水杜鹃的生存能力和生存策略,对保护濒危植物具有重要意义^[37-38]。从习水杜鹃的种群静态生命表得出,习水杜鹃种群的死亡率和消失率逐渐增大,且在第V龄级均出现了最大值,这可能是随着年龄增长,资源需求增加,竞争加剧,特别是进入主林层的大树个体,随着冠幅增大,对养分、光照、水分等资源的竞争再次加剧,到老树阶段是生理衰老,老龄个体竞争力减弱,导致第V龄级大量个体死亡。同时,生命期望值和存活率在第V龄级也最低,反映出习水杜鹃大树个体在乔木层遭受的竞争尤为激烈。调查中也发现,习水杜鹃所在群落为人迹罕至的原始林区,林分郁闭度已接近上限,种群对资源的争夺必定激烈。存活曲线的拟合结果表明习水杜鹃种群属于Deevey II型,为稳定型种群,但由于整个种群个体数量较少,特别是大树数量稀少,若不能提高低龄级个体存活率,随时间推移,无法使中龄级个体数得到补充,则种群将有可能朝着衰退的趋势发展,存在灭绝的风险。生存率、累计死亡率、死亡密度、危险率函数的结果进一步补充证实了上述结论的合理性。种群结构动态量化分析可以直观的反映种群发展趋势,习水杜鹃种群结构的量化分析结果表明,种群属于增长型,相较整个种群而言,低龄级个体数量较多,在现存环境未遭到破坏或不遭受巨大扰动的前提下,习水杜鹃能够维持后续龄级的更新,从而保持种群的相对稳定,但习水杜鹃种群个体总量较少,幼苗幼树的更新补充和茁壮成长是保障种群发展的关键因子,当前群落中物种丰富度较高,在垂直结构上,各层次物种之间的互补性也会越高,整个群落有效地利用林下部分的资源^[39-40],使得整个群落可被利用的空间和资源极少,竞争激烈的环境中习水杜鹃种群新的个体繁殖生长困难。调查中还发现习水杜鹃的花果易受虫

害,结实率不高,习水杜鹃的种群发展趋势不容乐观。就目前调查到的习水杜鹃分布数量,按照目前国际上应用最广泛的 IUCN 濒危物种等级标准,习水杜鹃属于濒危(CR)等级植物,亟需开展相应的保护工作。

综上,习水杜鹃种群分布范围狭窄,种群总量极少,且遭受较强的竞争,遭遇环境变化或巨大扰动(病虫害等)时,随时有灭绝的风险。建议将习水杜鹃列为保护区的最高关注级别,采取适当措施促进幼苗幼树生长,使中年个体得到有效补充,以保障种群持续增长。另外,本次调查的结果形成了一个“生态档案”,保护区的工作者可以据此对习水杜鹃进行监测,并根据监测结果实时制定科学的保护方案。

参考文献

- [1] LIN C T, XIAO C, LI S Y, et al. China is a big country with species diversity [J]. *For Humankind*, 2021(9): 22–45. [林聪田, 肖翠, 李善元, 等. 中国物种多样性的大国 [J]. *森林与人类*, 2021(9): 22–45.]
- [2] FU B J, YU D D, LÜ N. An indicator system for biodiversity and ecosystem services evaluation in China [J]. *Acta Ecol Sin*, 2017, 37(2): 341–348. [傅伯杰, 于丹丹, 吕楠. 中国生物多样性与生态系统服务评估指标体系 [J]. *生态学报*, 2017, 37(2): 341–348. doi: 10.5846/stxb201611092273.]
- [3] ZANG R G. Research progress in wild plant with extremely small populations in China [J]. *Biodiv Sci*, 2020, 28(3): 263–268. [臧润国. 中国极小种群野生植物保护研究进展 [J]. *生物多样性*, 2020, 28(3): 263–268. doi: 10.17520/biods.2020119.]
- [4] QIU Z M, LI H P, CHEN N N, et al. Research progress on *Viburnum japonicum* listed in plant species with extremely small populations in Zhejiang Province [J]. *Chin Wild Plant Resour*, 2021, 40(9): 41–45. [邱智敏, 李贺鹏, 陈楠楠, 等. 浙江省极小种群植物日本荚蒾研究进展 [J]. *中国野生植物资源*, 2021, 40(9): 41–45. doi: 10.3969/j.issn.1006-9690.2021.09.008.]
- [5] IBRAHIM M A, NA M, OH J, et al. Significance of endangered and threatened plant natural products in the control of human disease [J]. *Proc Natl Acad Sci USA*, 2013, 110(42): 16832–16837. doi: 10.1073/pnas.1311528110.
- [6] DEEPAK H V, SWAMY M M M, MURAI Y, et al. Daurichromenic acid from the Chinese traditional medicinal plant *Rhododendron dauricum* inhibits sphingomyelin synthase and A β aggregation [J]. *Molecules*, 2020, 25(18): 4077. doi: 10.3390/molecules25184077.
- [7] RAZGONOVA M, ZAKHARENKO A, ERCISLI S, et al. Comparative analysis of far east sikhotinsky *Rhododendron* (*Rh. sikhotense*) and east Siberian *Rhododendron* (*Rh. adamsii*) using supercritical CO₂-extraction and HPLC-ESI-MS/MS spectrometry [J]. *Molecules*, 2020, 25(17): 3774. doi: 10.3390/molecules25173774.
- [8] ZONG L Y, ZHANG J, DAI L F, et al. The anti-inflammatory properties of *Rhododendron molle* leaf extract in LPS-induced RAW264.7 [J]. *Chem Biodiv*, 2020, 17(10): e2000477. doi: 10.1002/cbdv.20200477.
- [9] ZHAO G. Research and application of anthocyanidin extraction from flower of *Rhododendron ripense* M. [D]. Suzhou: Soochow University, 2012. [赵歌. 杜鹃(*Rhododendron ripense* M.)花色素的研究与应用 [D]. 苏州: 苏州大学, 2012.]
- [10] WANG R. The chemical constituents from the leaves of *Rhododendron amesiae* and their anti-inflammatory activities [D]. Taiyuan: Shanxi Medical University, 2020. [王蓉. 紫花杜鹃叶化学成分的分离及其抗炎活性研究 [D]. 太原: 山西医科大学, 2020.]
- [11] SHI Y X, ZHOU M, ZHANG Y, et al. Poisonous delicacy: Market-oriented surveys of the consumption of *Rhododendron* flowers in Yunnan, China [J]. *J Ethnopharmacol*, 2021, 265: 113320. doi: 10.1016/j.jep.2020.113320.
- [12] DUDLEY M P, FREEMAN M, WENGER S, et al. Rethinking foundation species in a changing world: The case for *Rhododendron maximum* as an emerging foundation species in shifting ecosystems of the southern Appalachians [J]. *Forest Ecol Manag*, 2020, 472: 118240. doi: 10.1016/j.foreco.2020.118240.
- [13] ZHANG X K. Community analysis of vegetation restoration status in Gandeer Mountain Wuhai [D]. Hohhot: Inner Mongolia Agricultural University, 2020. [张晓克. 乌海市甘德尔山植被恢复现状群落学分析 [D]. 呼和浩特: 内蒙古农业大学, 2020.]
- [14] YANG H Q, LIU Y H, LIU F L, et al. Population structure and dynamic characteristics of an endangered and endemic species *Rhododendron rex* subsp. *rex* in southwest, China [J]. *Acta Bot Boreal-Occid Sin*, 2020, 40(12): 2148–2156. [杨慧琴, 刘圆媛, 刘芳黎, 等. 西南特有濒危植物大王杜鹃种群结构及动态特征 [J]. *西北植物学报*, 2020, 40(12): 2148–2156. doi: 10.7606/j.issn.1000-4025.2020.12.2148.]
- [15] LI L L, XU Y Z, ZHOU T Y, et al. Population structure and community characteristics of *Pseudotsuga sinensis* Dode in Badagongshan, Hunan Province, China [J]. *Plant Sci J*, 2021, 39(2): 111–120. [李玲丽, 徐耀粘, 周天阳, 等. 湖南八大公山黄杉种群结构和群落特征研究 [J]. *植物科学学报*, 2021, 39(2): 111–120. doi: 10.11913/PSJ.2095-0837.2021.201111.]
- [16] ZHANG X P, YU L Z, YANG X Y, et al. Population structure and dynamics of *Pinus koraiensis* seedlings regenerated from seeds in a

- montane region of eastern Liaoning Province, China [J]. *Chin J Appl Ecol*, 2022, 33(2): 289–296. [张晓鹏, 于立忠, 杨晓燕, 等. 辽东山区天然更新红松幼苗种群结构与动态 [J]. *应用生态学报*, 2022, 33(2): 289–296. doi: 10.13287/j.1001-9332.202202.001.]
- [17] WU Q C, ZANG F Q, LI C C, et al. Population structure and dynamics of endangered *Populus wulianensis* [J]. *Acta Ecol Sin*, 2021, 41(12): 5016–5025. [吴其超, 臧凤岐, 李呈呈, 等. 濒危树种五莲杨种群结构与动态特征 [J]. *生态学报*, 2021, 41(12): 5016–5025. doi: 10.5846/stxb202005291400.]
- [18] TONG Y H, YANG C H, XIA N H. Validation of the name *Rhododendron xishuiense* (Ericaceae) [J]. *Phytotaxa*, 2020, 429(3): 248–250. doi: 10.11646/phytotaxa.429.3.7.
- [19] WU Z Y. Distribution types of Chinese seed plant genera [J]. *Acta Bot Yunnan*, 1991(S1): 1–139. [吴征镒. 中国种子植物属的分布类型 [J]. *云南植物研究*, 1991(增刊): 1–139.]
- [20] CHEN J Y, DENG L X, ZOU S B. Study on the flora characteristics of fern plants in Guizhou Province [J]. *Guizhou For Sci Technol*, 2013, 41(4): 19–23. [陈景艳, 邓伦秀, 邹胜北. 贵州蕨类植物属的分布区类型及区系特征 [J]. *贵州林业科技*, 2013, 41(4): 19–23.]
- [21] WU Y N, ZHENG Y M, WANG Y, et al. Relationship between the number of *Cunninghamia lanceolata* and community species diversity in abandoned Chinese fir forests [J]. *Acta Ecol Sin*, 2022, 42(3): 884–894. [吴雁南, 郑英茂, 王莹, 等. 弃管杉木林杉木数量与群落物种多样性间的关系 [J]. *生态学报*, 2022, 42(3): 884–894. doi: 10.5846/stxb202101200211.]
- [22] HU Y C, ZHANG X L, HAN X Y, et al. Responses of stand growth, regeneration, and understory species diversity in *Quercus mongolica* secondary forest to stand density [J]. *Chin J Appl Ecol*, 2022, 33(3): 727–732. [胡延辰, 张晓林, 韩晓义, 等. 蒙古栎次生林的生长更新与林下植被多样性对林分密度的响应 [J]. *应用生态学报*, 2022, 33(3): 727–732. doi: 10.13287/j.1001-9332.202203.003.]
- [23] NABILAH R, SITANGGANG F I, RAHAYU Y. Mangrove species diversity, stand structure, and zonation: A case study at Pahawang Kecil Island [C]// IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. IOP Publishing, 2021, 830(1): 012004. doi: 10.1088/1755-1315/830/1/012004.
- [24] TUO F, LIU X D, HUANG D L, et al. Quantitative dynamics of *Picea crassifolia* population in Dayekou basin of Qilian Mountains [J]. *Acta Ecol Sin*, 2021, 41(17): 6871–6882. [拓锋, 刘贤德, 黄冬柳, 等. 祁连山大野口流域青海云杉种群数量动态 [J]. *生态学报*, 2021, 41(17): 6871–6882. doi: 10.5846/stxb202004010770.]
- [25] YANG Y, MA L H, WANG H Y. Population structure and companion community characteristics of the endangered species, *Rhododendron changii* [J]. *Chin J Ecol*, 2019, 38(5): 1352–1362. [杨阳, 马立辉, 王海洋. 濒危植物树枫杜鹃(*Rhododendron changii*)种群结构及伴生群落特征 [J]. *生态学杂志*, 2019, 38(5): 1352–1362. doi: 10.13292/j.1000-4890.201905.013.]
- [26] FU J, ZHAN X Y, QI J, et al. Study on the population ecology of *Rhododendron fortunei* in Dabie Mountains National Nature Preserve, Hubei Province [J]. *Hubei For Sci Technol*, 2020, 49(4): 19–21. [付剑, 詹先银, 漆俊, 等. 湖北大别山国家级自然保护区云锦杜鹃种群生态学特性研究 [J]. *湖北林业科技*, 2020, 49(4): 19–21. doi: 10.3969/j.issn.1004-3020.2020.04.005.]
- [27] LIU J F, HONG W. A study on forecast of population dynamics of *Castanopsis kawakamii* [J]. *Chin J Appl Environ Biol*, 1999, 5(3): 247–253. [刘金福, 洪伟. 格氏栲种群增长动态预测研究 [J]. *应用与环境生物学报*, 1999, 5(3): 247–253. doi: 10.3321/j.issn:1006-687X.1999.03.003.]
- [28] JIANG H. *Picea asperata* Population Ecology [M]. Beijing: China Forestry Publishing House, 1992: 7–13. [江洪. 云杉种群生态学 [M]. 北京: 中国林业出版社, 1992: 7–13.]
- [29] HETT J M, LOUCKS O L. Age structure models of balsam fir and eastern hemlock [J]. *J Ecol*, 1976, 64(3): 1029–1044. doi: 10.2307/2258822.
- [30] CHEN X D. A study on the method of quantitative analysis for plant population and community structural dynamics [J]. *Acta Ecol Sin*, 1998, 18(2): 214–217. [陈晓德. 植物种群与群落结构动态量化分析方法研究 [J]. *生态学报*, 1998, 18(2): 214–217. doi: 10.3321/j.issn:1000-0933.1998.02.017.]
- [31] DAMPC A, LUCZKIEWICZ M. *Rhododendron tomentosum* (*Ledum palustre*): A review of traditional use based on current research [J]. *Fitoterapia*, 2013, 85: 130–143. doi: 10.1016/j.fitote.2013.01.013.
- [32] TIAN S N, CHEN X, LI R Y, et al. Studies on population dynamics of an endangered plant of *Pseudotsuga gaussenii* in Ningguo, Anhui Province [J]. *J Trop Subtrop Bot*, 2020, 28(4): 385–393. [田胜尼, 陈鑫, 李仁远, 等. 安徽宁国珍稀濒危植物华东黄杉的种群动态研究 [J]. *热带亚热带植物学报*, 2020, 28(4): 385–393. doi: 10.11926/jtsb.4177.]
- [33] SHRESTHA N, SU X Y, XU X T, et al. The drivers of high *Rhododendron diversity* in south-west China: Does seasonality matter? [J]. *J Biog*, 2018, 45(2): 438–447. doi: 10.1111/jbi.13136.
- [34] LIU J Q, ZHOU Y X, ZHOU D L, et al. Flora analysis of the vascular plant families in Gansu Annanba wild camel National Nature Reserve [J]. *J Arid Land Resour Environ*, 2020, 34(4): 162–167. [刘建泉, 周永祥, 周多良, 等. 甘肃安南坝野骆驼国家级自然保护区维管植物科的区系分析 [J]. *干旱区资源与环境*, 2020, 34(4): 162–167. doi: 10.

- 13448/j.cnki.jalre.2020.111.]
- [35] LEI N F, SU Z X, SONG H X, et al. A comparative study on life-form spectra of evergreen broad-leaved forest in different successions in Jinyun Mountain [J]. *Chin J Appl Ecol*, 2002, 13(3): 267–270. [雷泞菲, 苏智先, 宋会兴, 等. 缙云山常绿阔叶林不同演替阶段植物生活型谱比较研究 [J]. *应用生态学报*, 2002, 13(3): 267–270.]
- [36] SU J J. Forests response to drought over the Yunnan-Guizhou Plateau [D]. Lanzhou: Lanzhou University, 2021. [苏佳佳. 云贵高原森林对干旱的响应研究 [D]. 兰州: 兰州大学, 2021. doi: 10.27204/d.cnki.glzhu.2021.002092.]
- [37] BU W S, SCHMID B, LIU X J, et al. Interspecific and intraspecific variation in specific root length drives aboveground biodiversity effects in young experimental forest stands [J]. *J Plant Ecol*, 2017, 10(1): 158–169. doi: 10.1093/jpe/rtw096.
- [38] WU L D. Research on population characteristics of rare and endangered plant *Syrax zhejiangensis* [D]. Hangzhou: Zhejiang A&F University, 2019. [吴霖东. 珍稀濒危植物浙江安息香种群特征研究 [D]. 杭州: 浙江农林大学, 2019. doi: 10.27756/d.cnki.gzjlx.2019.000211.]
- [39] PENG S Y, SCHMID B, HAASE J, et al. Leaf area increases with species richness in young experimental stands of subtropical trees [J]. *J Plant Ecol*, 2017, 10(1): 128–135. doi: 10.1093/jpe/rtw016.
- [40] LI X L, SUN Z Y, LI J Y, et al. Population structure and spatial distribution pattern of *Camellia azalea* in E'huangzhang nature reserve of Guangdong, China [J]. *Chin J Appl Ecol*, 2013, 24(8): 2115–2121. [李辛雷, 孙振元, 李纪元, 等. 广东鹅凰嶂自然保护区杜鹃红山茶种群结构与空间分布格局 [J]. *应用生态学报*, 2013, 24(8): 2115–2121. doi: 10.13287/j.1001-9332.2013.0368.]