

杜鹃属植物与杜鹃灌丛群落的研究进展

苏楷淇, 陈雅琦, 杨惠敏*

(兰州大学草地农业科技学院, 草地农业生态系统国家重点实验室, 兰州 730000)

摘要: 对杜鹃属(*Rhododendron* L.)植物起源、中国分布、适应性、灌丛群落结构特征和演替特征等问题进行了综述, 并对杜鹃属植物的深入研究和合理利用进行展望。中国西南地区以及喜马拉雅至缅甸北部地区为杜鹃属植物的起源中心, 贵州百里杜鹃林是全球最大野生杜鹃资源库。杜鹃属植物的适应性与所在区系的同质性、海拔相似度、进化程度、关键功能性状等密切相关, 基于进化-形态功能特征的比较为选育适应性优良的杜鹃品种提供了参考。杜鹃灌丛群落具有特殊性, 表现出复杂的多层次垂直结构、镶嵌式水平结构和明显的年龄结构特征。依据群落具备优势种生态位宽度大且种群间的生态位相似性比例较小来判定杜鹃灌丛群落已演替至顶级的观点仍有待考证。

关键词: 杜鹃属; 植物起源; 群落结构; 群落演替

doi: 10.11926/jtsb.4187

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

SU Kai-qi, CHEN Ya-qi, YANG Hui-min*

(State Key Laboratory of Grassland Agro-ecosystems; College of Pastoral Agriculture Science and Technology, Lanzhou University; Lanzhou 730000, China)

Abstract: The origin, distribution, adaption, community structure and succession characteristics of *Rhododendron* were reviewed, and the further research and rational utilization prospected. The origin center of *Rhododendron* was southwest China and the regions from the Himalayas to northern Myanmar, and Guizhou Baili *Rhododendron* Forest is the widest wild *Rhododendron* resource bank all over the world. The adaption of *Rhododendrons* was closely related with homophily, elevation similarity, evolution degree, and key functional traits. The comparison method based on evolution-morphological functional characteristics provides reference for breeding *Rhododendrons* with good adaption. *Rhododendron* shrub community has its own particularity, showing complex multi-level vertical structure, mosaic horizontal structure and obvious age structure. In term of succession characteristics, the view was still to be proved that *Rhododendron* shrub community had succession to the top level according to the large niche width of dominant species in the community and the small niche similarity ratio between populations.

Key words: *Rhododendron*; Origin; Community structure; Community succession

杜鹃属(*Rhododendron* L.)是由 George Forrest 于 1919 年首次提出, 是杜鹃花科(Ericaceae)中种类繁多且富有特性的属, 有 8 亚属, 全球约有 1 200 种, 中国约有 6 亚属 562 种^[1-3], 杜鹃属植物具有极高的观赏价值、经济价值和药用价值, 是重要的种质

资源^[4], 也是最重要的园艺植物之一^[5]。*R. protistum* var. *giganteum* 是世界上最高大、最古老的杜鹃树种, 在中国, 杜鹃属植物被誉为“花中西施”, 清代就有了杜鹃属植物习性、栽培、养护等方面的记载。

杜鹃植株无明显主干, 高度在 5 m 以下, 盖度

收稿日期: 2019-12-20 接受日期: 2020-03-25

基金项目: 国家自然科学基金项目(31572460)资助

This work was supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 31572460).

作者简介: 苏楷淇(1997~), 男, 在读硕士生, 研究方向为作物栽培。E-mail: sukq19@lzu.edu.cn

* 通信作者 Corresponding author. E-mail: huimyang@lzu.edu.cn

大于 30%~40%，具有比较郁闭的植被层，多为中旱生植物，在干燥和寒冷气候条件下，一般乔木树种难以生存的地方仍能生长^[6]。以杜鹃属灌木作为主体、成为优势种或建群种形成的杜鹃灌丛是亚热带地区的典型灌丛群落，对分布区气候变化、碳循环等有重大影响^[7]。杜鹃灌丛常生长在湿润的高寒地带，是中国西南与西北部内外陆流域的水源涵养林之一，其稳定存在对于青藏高原和相邻干旱地区的水热平衡具有重要的生态学意义^[8-9]，杜鹃灌丛也是很多珍稀野生动物的栖息地与藏系家畜的夏季放牧地^[10-11]。目前，学界较为关注杜鹃属植物起源、全球分布及分类，以及杜鹃属植物作为优势种、建群种形成群落的演替、干扰因素等问题。杜鹃属植物的起源最早由 Hutchinson^[12]在 1947 年提出。20 世纪 60 年代 Leach 等^[13]开展了相关研究，认为杜鹃属植物起源于喜马拉雅至缅甸和我国云南、四川。国内学者闵天禄等^[14]的研究也支持该观点。21 世纪以来，由于杜鹃属植物在陆地生态系统中的重要地位，亚热带灌丛受到学界的广泛关注。以张旭^[15]为代表的中国学者围绕杜鹃灌丛群落结构等方面开展了大量研究，在不同尺度上划分为垂直、水平等群落结构，并对亚热带杜鹃灌丛的群落外貌、物种组成、生物量变化等开展了定性描述和研究，对保护生物多样性、解决植被恢复、群落退化等生态问题具有重要的参考价值。在自然条件下，杜鹃灌丛通常遵循旱生植物群落的一般演替规律，人类活动则会干扰杜鹃灌丛群落的自然演替。近年来，国内学者开始关注人为干扰对杜鹃灌丛群落演替的影响，以此为灌丛生态环境的保护提供科学依据。2012 年谢元贵等^[16]报道了采煤塌陷及封禁对杜鹃群落演替的影响。此外，环境适应性与杜鹃属植物起源和分布密切相关，也影响其群落特征和演替，但相关研究却鲜有报道^[17]。因此，现有研究还缺乏系统性，不利于对杜鹃属植物的深入研究和对其美学、经济价值的进一步开发利用。本文主要综述了杜鹃属植物起源、中国分布、适应性及其群落结构和演替特征，为深入研究、更好地保护和可持续利用杜鹃资源提供理论基础。

1 起源

杜鹃属植物起源自晚白垩纪至早第三纪间，经过约 6 700~13 700 年的发展、演变，形成了丰富的

生态类群。近代化石资料证明，早在第三纪杜鹃属植物就已遍布北半球，可知其起源必然可以追溯至白垩纪。因杜鹃属植物具热带起源性质，现代分布也表现出北半球温带分布属性，故划归北温带分布型^[13]。近代板块学说与近年中国青藏高原及珠穆朗玛峰的科考表明，杜鹃不可能同时起源于两块远离的古陆上(白垩纪时印度板块刚与非洲分离，至第三纪初才与欧亚板块接近)，因此，位于冈瓦纳古陆的印度板块(包含喜马拉雅地区)不可能是其诞生地，而自中生代以来，古老且自然环境优渥的康滇古陆(今中国川西至滇中一带)与缅甸北部可能为杜鹃起源中心或诞生地^[14]。目前，学界较一致的观点是，杜鹃属植物可能起源于中国云南、四川以及喜马拉雅至缅甸北部地区^[12-13,18]。

2 在中国的分布特征

20 世纪 90 年代，学者将中国境内的杜鹃属植物按亚属级划分为 3 个分布型：只含 1 个亚属的东亚-北美间断分布型、含 2 个亚属的东亚分布型和含 3 个亚属的北温带分布型。实际上，有很多特有亚组及部分组级单位，以上 3 个分布型不能与之一一对应；再则，中国的喜马拉雅山南坡和海南岛的杜鹃属植物虽同属马来西亚植物区系，但事实上两地杜鹃属植物的数量与类型构成却非常不同，不宜视作相同分布型(北温带分布型)^[19]。

21 世纪初，以植物分类学和地理学研究成果、中国东部至西端喜马拉雅杜鹃类群分布及环境变化规律、2007 年版《中华人民共和国植被图》三者为划分依据，在 3 个亚属级分布型的基础上设定了 11 个组与亚组级分类单位细分的地理分布型：北温带分布型(含 1 组 2 亚组)、东亚分布型(含 4 组 5 亚组)、中国东部分布型(含 1 亚组)、川西山地区分布型(含 1 亚组)、广义横断山分布型(含 2 亚组)、狭义横断山分布型(含 2 亚组)、喜马拉雅分布型(含 6 亚组)、中国东部-广义横断山分布型(含 1 组 1 亚组)、中国东部-广义横断山-喜马拉雅分布型(含 6 亚组)、广义横断山-喜马拉雅分布型(含 1 组 11 亚组)、狭义横断山-喜马拉雅分布型(含 12 亚组)。11 个分布型区域还可归为中国东部到西端的 4 个基本地理单元：中国东部、川西山地区、狭义横断山、喜马拉雅区。在共同的生物地质历史背景下，中国杜鹃地理区系自东向西呈趋异化现象，东西低阶由低到高和自新

生代起生物地史由较稳定区至巨变区变化对区系变化具有深远影响, 中国杜鹃属中大类群、较广分布群及原始群和常绿杜鹃类群分布偏向于横断山及其以西地区, 故东西向的地理变化是中国杜鹃属植物 11 个分布型变化的主轴^[20]。

杜鹃属植物分布区横跨南纬 20°到北纬 65°, 覆盖寒带、北温带、温带、亚热带、热带等地区, 垂直分布于接近海平面至海拔 5 500 m 处。在世界范围内, 广泛分布于亚、欧和北美的温带地区, 大洋洲仅澳大利亚的昆士兰存在 1 种杜鹃, 非洲与南美洲尚未见野生杜鹃的踪迹。中国地区除新疆、宁夏两地未有野生杜鹃的踪迹外, 其余省份均有杜鹃的分布^[14]。中国西南地区(云南、西藏、四川)不仅是世界杜鹃的分布中心, 有世界上最大的野生杜鹃资源库——位于贵州省毕节市大方县的百里杜鹃林, 还毗邻世界杜鹃的另一个分布中心——喜马拉雅地区(不丹、尼泊尔、缅甸、印度东北部)^[21]。中国-喜马拉雅现代杜鹃花属植物分布中心具有明显分异的核心分布区, 即川西-滇东北区、滇西北-滇西区、藏东南-藏南区^[22]。

杜鹃属是杜鹃花科最大的属, 70%以上的杜鹃属植物特有种(409 种)在中国^[23-24]。都支杜鹃(*R. shanii*)为大别山地区所特有, 仅存于安徽省岳西县、霍山县与湖北省英山县三县交界处面积 110 km² 的狭长区域内, 主要分布于海拔 1 400 m 以上的山脊或靠近山脊的山坡^[25]。有鳞杜鹃亚属千里香杜鹃(*R. thymifolium*)和头花杜鹃(*R. capitatum*)分布于东祁连山海拔 3 000~4 000 m 的山地阴坡和半阴坡, 常共同作为青藏高原及周边地区群落的优势种。陇蜀杜鹃(*R. przewalskii*)分布于海拔 2 900~4 300 m 的高山林地, 常自成大面积灌丛, 分布较分散, 常见于青海、甘肃、陕西、四川; 烈香杜鹃(*R. anthopogonoides*)与陇蜀杜鹃分布相同^[26]。此外, 广西省内现有 74 种杜鹃野生种, 其中特有种 29 种^[21], 证明了广西杜鹃属植物在世界杜鹃属区系中的特殊地位。湘西南、湘南、湘西北是杜鹃在湖南省的主要分布区, 其中野生杜鹃 53 种 1 亚种 1 变种, 隶属于 4 亚属^[27]。

3 适应性

杜鹃属植物对环境的适应性, 由物种特性、环境和人为措施决定。研究表明, 杜鹃属植物的适应性与所在区系的同质性、海拔相似度、进化程度、

关键功能性状等有密切关系^[21,28-29]。杜鹃属植物对新环境的适应性与其进化程度有关, 进化程度高时适应性较弱。原始类群和主要分布于中国东部的中等进化类群适应性好于进化类群; 向西分化的高山杜鹃类群适应性最弱; 中国-日本森林植物区系的杜鹃属植物适应性比中国-喜马拉雅森林区系的更好。区系同质性高时杜鹃属植物适应性高, 因为区系交错区对杜鹃类群有更好的兼容性。纬度不同时, 海拔相似度与杜鹃属植物的适应性相关联, 杜鹃属植物在低海拔向高海拔引种时适应性优于反向引种。此外, 杜鹃属植物的形态与一些功能特征对选择适应性良好的杜鹃品种具有指导意义。个体和叶片大型化, 并且叶片少毛或无毛、鳞片较少的杜鹃属植物能更好地在少光照和潮湿阴暗的环境下生存, 适应性优良。相比之下, 个体较小的杜鹃属植物类群[如单花杜鹃亚组(subsect. *Uniflora*)]、叶片面积小[如高山杜鹃亚组(subsect. *Laponica*)]、多毛[如大理杜鹃亚组(subsect. *Taliensia*)]、多鳞片[如髯花杜鹃组(sect. *Pogonanthum*)]或花色艳丽[如深红色的似血杜鹃(*R. haematodes*)、大红色的马缨杜鹃(*R. delavayi*)]等杜鹃属植物种类适应性较差。因此, 基于进化-形态功能特征的比较方法为选育适应性优良的杜鹃品种提供了新视角^[30-31]。

杜鹃属植物对于光照、水分、海拔、温度等环境因子是非常敏感的, 主要通过改变内在生理指标和外部形态特征以响应环境变化。光饱和点(LSP)和光补偿点(LCP)是反映植物所需光照和利用强弱光能力的指标, 代表植物光合作用所需光强的上限和下限^[32-33]。光照环境不同, 杜鹃属植物的 LSP、LCP 亦不相同。生长在光能充足地区(如高海拔等)的杜鹃属植物(如头花杜鹃)具有较高的 LSP、LCP, 强光适应性好而耐阴性差; 而在光照强度长期变化较大地区生长的金背杜鹃(*R. clementinae* sp. *aureodorsale*)、药枇杷(*R. purdomii*)、秀雅杜鹃(*R. concinnum*)等的 LSP 高而 LCP 低, 能充分利用强弱光照环境、耐阴性强、生态幅宽且分布广泛^[34]; 生存环境特殊, 海拔较高但长期处于山林遮蔽的杜鹃属植物如爬枇杷(*R. taibaiense*)的 LSP 值低而 LCP 值高, 强光适应性差且利用弱光的能力也不强, 生态幅相对较窄, 对光环境变化的适应能力差。此外, 强光适应性良好的杜鹃属植物还具有叶绿素含量低但叶绿素 a/b 较高、气孔密度更大的特点^[35]。为有效防止水分的散失以适应干旱气候, 干旱区杜鹃

属植物叶片都有较厚的角质层、含晶细胞、鳞片或表皮毛等结构^[36-37]。生长环境水分更为匮乏时,杜鹃叶片的中脉厚度和最大导管直径均较大,因此能够充分利用生境中有限的水分,这是杜鹃属植物对干旱环境的一种适应机制^[34]。杜鹃属植物还可通过改变叶片功能性状来适应海拔和其它环境因子的变化。相关研究表明,不同海拔下,杜鹃属植物的叶片功能性状差异显著。叶片的干物质含量(LDMC)与比叶面积(SLA)是反映植物养分保存能力及资源利用效率的主要指标,与环境变化密切相关,且随海拔升高 LDMC 增加,SLA 则减小^[38],推测是由于植物叶片通过减少细胞体积和细胞间隙以提高抗寒能力因而造成 SLA 的减小,这可能是杜鹃属植物对高海拔低温的一种适应性对策^[39]。除受海拔影响外,植物的叶片功能性状还受到坡向和坡度的影响^[38]。此外,杜鹃属植物受低温胁迫时叶片的可溶性糖含量会增加,其余生理指标(如可溶性蛋白、MDA 和 H_2O_2 含量及 POD、SOD 活性)因物种而存在差异,这可能与各物种对低温的承受阈值不同有关^[40]。

4 杜鹃灌丛的群落结构特征

植物的群落结构包括垂直结构、水平结构、年龄结构等时空维度的多个方面^[41]。

垂直结构 根据杜鹃灌丛群落组成的不同,其垂直结构的复杂程度差异较大。当杜鹃灌丛群落中植物的生活型以地面芽、高位芽为主时,群落各层次优势种显著,群落稳定性和均匀度较高,成层较明显,可形成含灌木层与乔木层的垂直结构(图 1);或者形成乔木层和林下层组成的垂直结构,林下层植物种类主要以杜鹃属灌木[如毛锦杜鹃(*R. moulmianense*)等]和大型蕨类为主,乔木层组成物种以地带性森林演替前期树种[如桉树(*Eucalyptus urophylla*)等]为主^[42]。有些杜鹃群落分布于亚热带北缘[如华顶杜鹃(*R. huadingense*)、映山红(*R. simsii*)等],所处环境温热多湿并具有一定热带区系性质,海拔 900~1 150 m,群落总郁闭度可达 60%~90%,群落结构更为复杂,层次显著,层间植物较为丰富,形成乔木层、灌木层和草本层 3 个层次的垂直结构,其中灌木层高度一般为 2~3 m,杜鹃属灌木位于此层^[43]。在此垂直结构中,高位芽植物占优势,而地上芽、地面芽植物和一年生植物很少;植物以单叶

种类、小型叶和中型叶占优势,乔木层优势种多为落叶树种或针叶树种。刘敏^[44]在研究西藏色季拉山林线杜鹃群落生物量和养分积累时,根据养分含量在垂直结构各层的分布特征,将垂直结构细分到了苔藓层。在该群落中,养分浓度为苔藓层>草本层>灌木层,这可能是由于苔藓层、草本层处于下层,为了增强光合作用而采取了提高养分浓度的策略。因杜鹃灌丛为高原寒冷环境下的顶级群落,故优势种杜鹃属灌木所属灌木层生物量大,稀释了养分浓度致使灌木层养分浓度最低。虽然苔藓层和草本层在高寒地区杜鹃灌丛群落中具有重要作用,但是灌木层养分积累量仍最高,草本层最低。此外,王敏^[45]报道,落叶阔叶林与常绿针叶林中野生杜鹃种群的生长状况相似,但是落叶阔叶林中野生杜鹃的数量多于常绿针叶林中野生杜鹃,可见落叶阔叶林群落垂直结构中的上层林更适宜野生杜鹃的生长和繁殖。

水平结构 杜鹃灌丛群落水平结构表现出一定的特殊性,往往呈现集群或随机分布(图 2)。在水平方向上,杜鹃灌丛群落优势种杜鹃主要表现为集群分布。由于受种子传播方式的影响,随着杜鹃种群年龄增长出现自疏效应,群落内植物种间、种内竞争加剧,优势种杜鹃变为随机分布^[45]。种子扩散方式、萌生能力和耐荫特性等生物学特性决定了杜鹃种群有性繁殖层能否持续更新,也是改变杜鹃灌丛空间格局及水平结构的主要驱动因子。马缨杜鹃种子耐荫性低,林内郁闭度的提高会令种子因接收光照不足而难以萌发;又因其种子细小,蒴果开裂后种子不易直接落入土壤,使种子萌发时缺水。种子萌发困难威胁到了马缨杜鹃种群的持续稳定,并进一步使群落的水平结构发生改变^[46]。此外,杜鹃种群在不同的群落中表现出一定的多元化,有时以稳定种群存在,在部分地段却又呈衰退状。值得一提的是,高山杜鹃群落的水平分布格局更易受土壤类型和海拔的影响,其物种丰富度、香农-威纳指数和 Simpson 指数随海拔的升高而不断降低,而 Pielou 指数与海拔间无显著相关关系^[47]。

年龄结构 杜鹃灌丛群落结构也表现出明显的时间变异性,形成群落年龄结构相关的特性。基径级结构可用来表示杜鹃灌丛的年龄结构,结合静态生命表中存活、死亡和消失曲线特征可以分析群落年龄结构的变化^[48-50]。群落中杜鹃种群幼龄树多而老龄树少,径级分布呈倒“J”形时,植物自我更

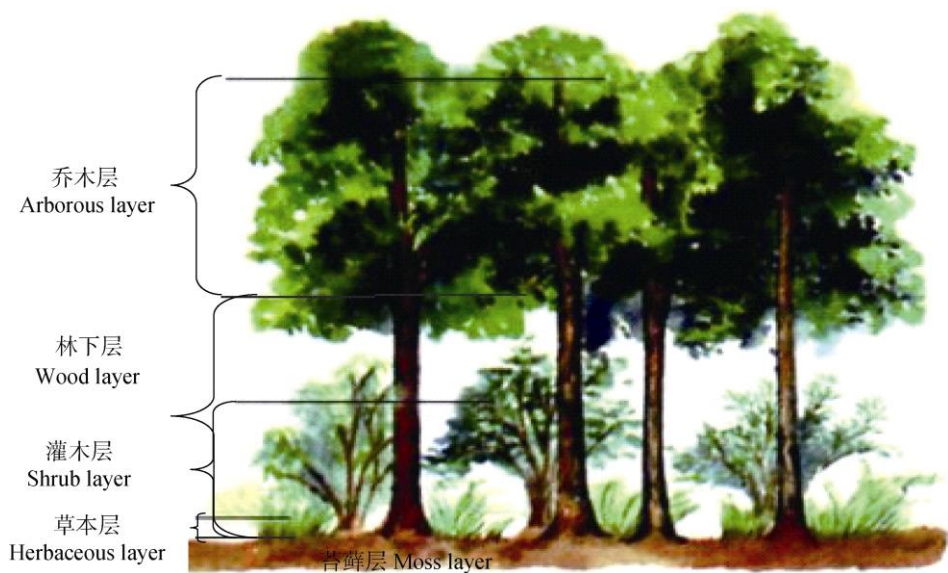


图 1 杜鹃灌丛群落垂直结构示意图(引用修改自 <https://max.book118.com/html/2017/0613/114593904.shtml>)
Fig. 1 Vertical structure diagram of *Rhododendron* shrub community (Cited to modified from <https://max.book118.com/html/2017/0613/114593904.shtml>)

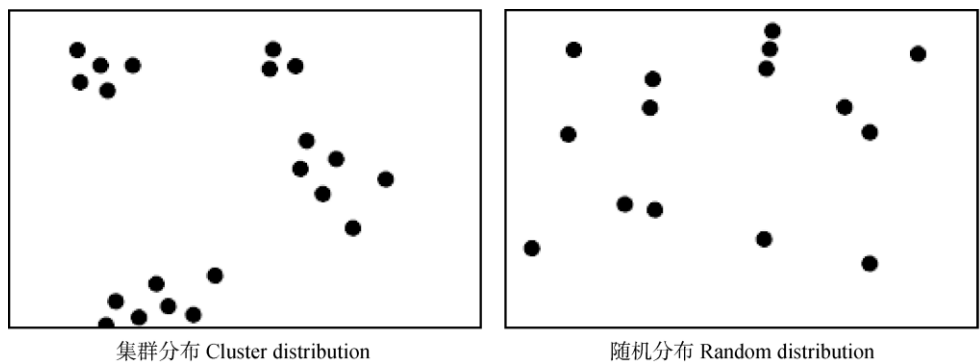


图 2 杜鹃灌丛群落水平结构示意图
Fig. 2 Horizontal structure diagram of *Rhododendron* shrub community

新状况良好、种群稳定且生长较快,属增长型种群,杜鹃成为优势种群;若其他高大乔木径级分布呈倒“J”型时,则杜鹃将因光照不足而衰退,高大乔木将取代杜鹃而成为优势种群,群落结构因而随时间发生改变。当单峰型结构出现时,杜鹃灌丛群落中木本植物种类不发生变化,且杜鹃的基径结构和垂直结构基本保持不变,年龄结构保持稳定^[51]。此外,若种群在 4 龄级(大树)阶段发生波动,存活曲线将趋向于 Deevey-III 型,径级结构呈倒“J”型;而种群波动发生在 3 龄级时,则主要与林木间对光照、水肥的竞争有关^[42]。因此,随群落演替,杜鹃群落年龄结构发生改变,种群个体将面临更加激烈的竞争,但杜鹃种群或其他优势种群的增长趋势仍存在逆转的可能性,在深圳梧桐山等地已实现逆转^[52]。

5 杜鹃灌丛群落的演替特征

5.1 自然演替特征

在气候条件没有根本改变的情况下,杜鹃灌丛群落会遵循旱生植物群落的一般演替规律,即草本群落→灌木林群落→乔木林群落,最终演替至“顶级群落”,杜鹃种群会逐渐衰退,最终退出群落^[53]。当杜鹃灌丛群落出现物种多样性偏低且低于混交林群落、植物物种分布不均时,表示群落处于早期的演替阶段^[54]。苗木等级以基径大小来划分,常以杜鹃灌丛群落内各苗木等级的比例来判定其演替方向。一般 II 级苗木较多会判定为杜鹃灌丛群落为发展中的群落,但当发展成为顶极群落后,若 I 级幼苗贮备严重不足,杜鹃灌丛群落在自然状态下趋

向衰退^[48]。需注意的是,杜鹃灌丛群落短期动态变化与长期变化的演替特征相异,短期内的演替特征主要表现为杜鹃灌丛群落季相变化、基径级变化、高度级变化和群落物种的死亡与断梢,在一定程度上表征群落结构和空间格局的变化。

一般地,杜鹃灌丛群落所处气候条件独特,影响了群落演替。如山顶立地条件较差,气候环境恶劣,故杜鹃灌丛群落演替持续的时间比丘陵、低山植物群落要长得多,演替异常缓慢。虽然最终演替方向杜鹃灌丛群落→常绿落叶阔叶混交林或常绿阔叶林不可更改,但在较长时间内杜鹃灌丛群落仍然较为稳定。因此,在对杜鹃灌丛群落演替进行预测时,应将演替进程格外漫长考虑在内^[51]。

物种多度、苗木等级、气候特征等均影响杜鹃灌丛群落的短期动态与长期演替,但某些特征与演替进程的关系仍存在争议,由某些演替特征推断出的演替方向的可信度仍待验证。如在百里杜鹃群落中,根据优势种生态位宽度大、种间生态位相似性较小的特点,可初步认为该群落处在顶级演替阶段^[55]。而与此不同,李苇洁等^[46]认为,即使群落内优势种马缨杜鹃生态位宽度大、与其他种生态位相似性小,且在其分布区内属于稳定存在的群落类型,该群落也未演替至顶极。尽管如此,杜鹃灌丛群落演替过程中常出现的演替特征对理解杜鹃群落所处的演替阶段、预测下一步的演替方向都有很好的指示意义。

5.2 人为干扰对杜鹃群落演替的影响

人为干扰会使杜鹃群落出现特殊的演替过程。有研究表明,采煤塌陷会改变百里杜鹃群落演替,随塌陷年限的延长,群落变化愈加符合植物群落次生演替规律^[16]。封禁影响杜鹃灌丛群落演替,封禁时间较短时,灌丛处于演替的前中期或者中期,群落不稳定;若封禁延长,杜鹃灌丛将会演替为常绿、落叶阔叶混交林。此外,干扰强度也影响杜鹃群落的演替走向,中等强度的人类活动有利于增加群落结构复杂性,使其群落垂直结构层次更加分明,并提高群落物种多样性、丰富度、均匀度等指数^[56]。孔德明等认为,持续高强度的干扰会破坏群落生境,导致群落走向衰退^[57]。因此,在杜鹃灌丛群落内进行适度疏伐并开辟一些数量的林隙与林窗,以便于杜鹃小苗在林内生长,从而有利于杜鹃群落的自我更新,保持群落的稳定与正常演替。

6 总结和展望

在过去的 40 年间,国内对杜鹃属植物的研究主要从起源、分布型、特有种及适应性方面着手,已取得很大的进展。近年来,对于杜鹃属植物更加深入系统的了解也促进了杜鹃灌丛群落特性等领域研究。根据研究可以得出以下 4 个重要结论,(1) 起源与分布特征方面:中国西南地区以及喜马拉雅至缅甸北部地区为杜鹃起源中心;分布型从原先 3 个亚属级细分至 11 个组与亚组级;中国拥有 70% 以上的杜鹃特有种(409 种);(2) 适应性方面:杜鹃属植物引种时的适应性和所在区系的同质性、海拔相似度、进化程度、关键功能性状紧密相关;进化-形态功能特征方法的提出,为挑选适应性优良的杜鹃品种提供了新角度;(3) 群落结构特征方面:垂直结构复杂时可分为乔木层、灌木层、草本层,根据养分浓度还可细分出苔藓层,杜鹃属灌丛位于灌木层;杜鹃灌丛群落水平结构常呈现集群或随机分布;杜鹃种群径级分布若呈倒“J”型,则为增长型种群,若呈单峰型,则较为稳定;(4) 演替特征方面:物种多度、苗木等级、气候特征等均可作为群落演替特征指示杜鹃灌丛群落自然演替趋势;人为干扰会使杜鹃群落出现特殊的演替过程,干扰强度与杜鹃群落的演替走向密切相关。

目前为止,尽管杜鹃属植物、灌丛群落等相关研究对利用和保护杜鹃资源做出了积极贡献,并对生态环境保护发挥了重要的启发性,但关于杜鹃灌丛群落的研究仍存在一定问题,希望在未来研究中能进一步关注与解决。

(1) 国内对杜鹃灌丛群落结构研究多从垂直、水平、年龄结构入手,时相结构层面的研究匮乏,仍需深入探讨。群落的时相结构是指群落中的物种由于物候更替而引起种群和个体数目的周期结构性变化,也叫群落在时间上的成层,与垂直结构有关,当群落层次分明时,时相结构也较明显。但研究表明常绿树种杜鹃灌丛群落虽层次分明,时相交换时却模糊^[48]。目前学界还未对杜鹃灌丛群落在时相结构上的特殊性做出解释,建议加强杜鹃灌丛群落时相结构领域的相关研究。

(2) 自然演替特征方面,由于条件限制,前人研究往往未能充分考虑土壤、地形等因素的影响,尤其在杜鹃灌丛群落短期动态变化的观测中,没有考虑温度和水分等因素对群落动态的影响。因此,

未来研究可综合气候、土壤等因素, 结合演替特征, 对演替进程进行更加全面的研究和预测。此外, 具备优势种生态位宽度大且种群间生态位相似性比例较小特征的杜鹃灌丛群落即为顶级, 该观点存在争议仍有待考证。

(3) 近年来, 杜鹃灌丛分布区内人类活动愈加频繁, 杜鹃灌丛群落受到不同程度的人为干扰。自然环境中的杜鹃灌丛群落常遵循旱生植物群落的演替规律, 但有研究表明, 遭受人为干扰的杜鹃群落会出现特殊的演替过程^[16]。目前学界主要围绕自然演替特征方向进行研究工作, 而对人为干扰下的杜鹃群落演替关注较少。因此, 我们建议未来需加强该领域的研究, 为人类活动背景下的灌丛生态环境保护提供科学依据。

参考文献

- [1] CHAMBERLAIN D F, HYAM R, ARGENT G, et al. The Genus *Rhododendron*, Its Classification and Synonymy [M]. Edinburgh: Royal Botanic Garden Edinburgh, 1996: 71–111.
- [2] HUANG M R. *Rhododendron* [M]. Shanghai: Shanghai Science and Technology Press, 1998.
- 黄茂如. 杜鹃花 [M]. 上海: 上海科学技术出版社, 1998.
- [3] WU F Q, SHEN S K, ZHANG X J, et al. Genetic diversity and population structure of an extremely endangered species: The world's largest *Rhododendron* [J]. *AoB Plants*, 2015, 7: plu082. doi: 10.1093/aobpla/plu082.
- [4] SHEN S K, WU F Q, YANG G S, et al. Seed germination and seedling emergence in the extremely endangered species *Rhododendron protistum* var. *giganteum*: The world's largest *Rhododendron* [J]. *Flora Morphol, Distrib, Funct Ecol Plants*, 2015, 216: 65–70. doi: 10.1016/j.flora.2015.08.006.
- [5] MAO A A, GOGOI R. *Rhododendrons* of Manipur and Nagaland, India [J]. *NeBio*, 2012, 3(1): 1–10.
- [6] Editorial Committee of Encyclopedia of China Agriculture. Encyclopedia of China Agriculture, Volum Forestry (1) [M]. Beijing: Agricultural Press, 1989: 126–127.
- 中国农业百科全书编辑部. 中国农业百科全书·林业卷上 [M]. 北京: 农业出版社, 1989: 126–127.
- [7] FANG J Y, GUO Z D, PIAO S L, et al. Terrestrial vegetation carbon sinks in China, 1981–2000 [J]. *Sci China Ser D Earth Sci*, 2007, 50(9): 1341–1350. doi: 10.3969/j.issn.1674-7240.2007.06.012.
- 方精云, 郭兆迪, 朴世龙, 等. 1981~2000年中国陆地植被碳汇的估算 [J]. 中国科学D辑: 地球科学, 2007, 37(6): 804–812. doi: 10.3969/j.issn.1674-7240.2007.06.012.
- [8] China Vegetation Commission. *China Vegetation* [M]. Beijing: Science Press, 1980: 430–432.
- 中国植被编辑委员会. 中国植被 [M]. 北京: 科学出版社, 1980: 430–432.
- [9] LAUSANNE L D. Development and Environment of Qinghai Tibet Plateau [M]. Beijing: China Tibetology Press, 1996: 74–77.
- 洛桑·灵智多杰. 青藏高原环境与发展概论 [M]. 北京: 中国藏学出版社, 1996: 74–77.
- [10] YU Y W, HU Z Z, ZHANG D G, et al. The net primary productivity of *Potentilla fruticosa* shrub [J]. *Acta Pratac Sin*, 2000, 9(4): 33–39.
- 于应文, 胡自治, 张德罡, 等. 金露梅灌丛净第一性生产力 [J]. 草业学报, 2000, 9(4): 33–39.
- [11] ZHANG D G. Effect of deforestation and landslide on soil of *Rhododendron* shrub ecosystem in the eastern Qilian Mountains [J]. *Acta Pratac Sin*, 2002, 11(3): 72–75. doi: 10.3321/j.issn:1004-5759.2002.03.012.
- 张德罡. 砍伐与滑坡对东祁连山杜鹃灌丛草地土壤肥力的影响 [J]. 草业学报, 2002, 11(3): 72–75. doi: 10.3321/j.issn:1004-5759.2002.03.012.
- [12] HUTCHINSON J. The Distribution of *Rhododendrons* [M]. London: The Royal Horticultural Society, 1947: 87–98.
- [13] TAKHTAJAN A. HUANG G C translated. The World Plant District is Divided into the Division of the World Plant District [M]. Beijing: Science Press, 1988: 13–101, 208–212.
- 塔赫他间. 黄观程 译. 世界植物区系区划 [M]. 北京: 科学出版社, 1988: 13–101, 208–212.
- [14] MIN T L, FANG R Z. On the origin and geographic distribution of genus *Rhododendron* L. [J]. *Acta Bot Yunnan*, 1979, 1(2): 17–28.
- 闵天禄, 方瑞征. 杜鹃属(*Rhododendron* L.)的地理分布及其起源问题的探讨 [J]. 云南植物研究, 1979, 1(2): 17–28.
- [15] ZHANG X. Community structure characteristics and short-term dynamic of *Rhododendron simii* shrubland at Daweishan [D]. Changsha: Central South University of Forestry & Technology, 2015.
- 张旭. 大围山杜鹃灌丛群落结构特征及短期动态 [D]. 长沙: 中南林业科技大学, 2015.
- [16] XIE Y G, LONG X Q, LIU J M, et al. Influences of coal mining collapse on characteristics of plant community of Hundred-mile Azalea Area of Guizhou [J]. *J Nanjing For Univ (Nat Sci)*, 2012, 36(6): 37–41. doi: 10.3969/j.issn.1000-2006.2012.06.008.
- 谢元贵, 龙秀琴, 刘济明, 等. 采煤塌陷对百里杜鹃林区植物群落特征的影响 [J]. 南京林业大学学报(自然科学版), 2012, 36(6): 37–41. doi: 10.3969/j.issn.1000-2006.2012.06.008.

- [17] ZHUANG P, ZHENG Y R, SHAO H M, et al. An assessment on the adaptability of *Rhododendron* plants under *ex situ* conservation [J]. Biodiv Sci, 2012, 20(6): 665–675. doi: 10.3724/SP.J.1003.2012.11063.
庄平, 郑元润, 邵慧敏, 等. 杜鹃属植物迁地保育适应性评价 [J]. 生物多样性, 2012, 20(6): 665–675. doi: 10.3724/SP.J.1003.2012.11063.
- [18] WULFF E B. ZHONG C X translated. Geography of Historical Plants [M]. Beijing: Beijing Science Press, 1964.
E. B. 吴鲁夫. 仲崇信 译. 历史植物地理学 [M]. 北京: 北京科学出版社, 1964.
- [19] FANG R Z, MIN T L. The floristic study on the genus *Rhododendron* [J]. Acta Bot Yunnan, 1995, 17(4): 359–379.
方瑞征, 闵天禄. 杜鹃属植物区系的研究 [J]. 云南植物研究, 1995, 17(4): 359–379.
- [20] ZHUANG P. Discuss on the *Rhododendron* geographical distribution types and their cause of formation in China [J]. Guihaia, 2012, 32(2): 150–156. doi: 10.3969/j.issn.1000-3142.2012.02.003.
庄平. 中国杜鹃花属植物地理分布型及其成因的探讨 [J]. 广西植物, 2012, 32(2): 150–156. doi: 10.3969/j.issn.1000-3142.2012.02.003.
- [21] LI G Z. A revision and geographical distribution of the genus *Rhododendron* in Guangxi [J]. Guihaia, 1995, 15(3): 193–208.
李光照. 广西杜鹃花属的修订及其地理分布 [J]. 广西植物, 1995, 15(3): 193–208.
- [22] ZHUANG P, WANG F, SHAO H M. Comparative study on *Rhododendron* and its distribution in W-Sichuan and SE-Tibet [J]. Guihaia, 2013, 33(6): 791–797, 803. doi: 10.3969/j.issn.1000-3142.2013.06.013.
庄平, 王飞, 邵慧敏. 川西与藏东南地区杜鹃花属植物及其分布的比较研究 [J]. 广西植物, 2013, 33(6): 791–797, 803. doi: 10.3969/j.issn.1000-3142.2013.06.013.
- [23] KUMAR V, SURI S, PRASAD R, et al. Bioactive compounds, health benefits and utilization of *Rhododendron*: A comprehensive review [J]. Agric Food Secur, 2019, 8(1): 6. doi: 10.1186/s40066-019-0251-3.
- [24] PRADHAN S. Antihyperglycemic effect of various medicinal plants of Sikkim Himalayas-A review [J]. Int J Res Phytochem Pharmacol, 2011, 13: 124–130.
- [25] ZHAO K, SHAO J W, WANG G, et al. Analyses of geographical distribution and population status of *Rhododendron shanii* [J]. J Plant Resour Environ, 2012, 21(3): 93–97. doi: 10.3969/j.issn.1674-7895.2012.03.015.
赵凯, 邵剑文, 王刚, 等. 都支杜鹃地理分布及种群现状分析 [J]. 植物资源与环境学报, 2012, 21(3): 93–97. doi: 10.3969/j.issn.1674-7895.2012.03.015.
- [26] CAO W X, ZHANG D G, XU C L, et al. Vertical distribution strategy of *Rhododendron* in eastern Qilian mountains [J]. Grassland Turf, 2003(2): 19–22. doi: 10.3969/j.issn.1009-5500.2003.02.005.
曹文侠, 张德罡, 徐长林, 等. 东祁连山几种高山杜鹃的种群垂直分布对策 [J]. 草原与草坪, 2003(2): 19–22. doi: 10.3969/j.issn.1009-5500.2003.02.005.
- [27] KANG Y Q, PENG C L, LIAO J Y, et al. Discussion on development and utilization of *Rhododendron* resources in Hunan [J]. J CSh Univ For Technol, 2010, 30(8): 57–63. doi: 10.3969/j.issn.1673-923X.2010.08.011.
康用权, 彭春良, 廖菊阳, 等. 湖南杜鹃花资源及其开发利用 [J]. 中南林业科技大学学报, 2010, 30(8): 57–63. doi: 10.3969/j.issn.1673-923X.2010.08.011.
- [28] ZHANG C Q, FENG B J, ZHAO G Y, et al. Seed propagation of *Rhododendron* [J]. Acta Bot Yunnan, 1992, 14(1): 87–91.
张长芹, 冯宝钧, 赵革英, 等. 杜鹃花的种子繁殖 [J]. 云南植物研究, 1992, 14(1): 87–91.
- [29] XU M Y, LI Y L, REN H. A primarily study on the introduction and cultivation of *Rhododendrons* in South China Botanical Garden [J]. J Fujian For Sci Technol, 2004, 31(1): 53–56. doi: 10.13428/j.cnki.fjlk.2004.01.014.
许明英, 李跃林, 任海. 杜鹃花在华南植物园引种栽培的初步研究 [J]. 福建林业科技, 2004, 31(1): 53–56. doi: 10.13428/j.cnki.fjlk.2004.01.014.
- [30] FENG Z B, ZHUANG P, ZHANG C, et al. An adaptive evaluation of wild *Rhododendron* under *ex-situ* conservation [J]. Acta Bot Yunnan, 2004, 26(5): 497–506.
冯正波, 庄平, 张超, 等. 野生杜鹃花迁地保护适应性评价 [J]. 云南植物研究, 2004, 26(5): 497–506.
- [31] ZHANG L H. A study on the introduction and adaptability of *Rhododendron* in Lushan Botanical Garden [J]. J Nanjing For Univ (Nat Sci), 2004, 28(4): 92–96. doi: 10.3969/j.issn.1000-2006.2004.04.021.
张乐华. 杜鹃属植物的引种适应性研究 [J]. 南京林业大学学报(自然科学版), 2004, 28(4): 92–96. doi: 10.3969/j.issn.1000-2006.2004.04.021.
- [32] LU Z G, ZHAO C Q, HAN Y, et al. Comparative studie on photo-synthetic characteristics of *Taxus media* cv. Hicksii grown at different light condition [J]. J SW China Norm Univ (Nat Sci), 2003, 28(1): 117–121. doi: 10.3969/j.issn.1000-5471.2003.01.027.
芦站根, 赵昌琼, 韩英, 等. 不同光照条件下生长的曼地亚红豆杉光合特性的比较研究 [J]. 西南师范大学学报(自然科学版), 2003, 28(1): 117–121. doi: 10.3969/j.issn.1000-5471.2003.01.027.
- [33] ZHANG D G, HU Z Z. Studies on shrub restoration of *Rhododendron* shrublands under disturbance in eastern Qilian Mountains [J]. Acta

- Pratac Sin, 2003, 12(3): 28–33. doi: 10.3321/j.issn:1004-5759.2003.03.005.
- 张德罡, 胡自治. 东祁连山杜鹃灌丛草地灌木受损恢复生长的研究 [J]. 草业学报, 2003, 12(3): 28–33. doi: 10.3321/j.issn:1004-5759.2003.03.005.
- [34] CAO X J. Study on adaptability of photosynthetic physiology and morphological anatomy for *Rhododendron*. of Taibai Mountain [D]. Yangling: Northwest Agriculture & Forestry University, 2010.
- 曹晓娟. 太白山杜鹃花属植物光合生理及形态解剖适应性研究 [D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2010.
- [35] CAI Z Q, CAO K F, FENG Y L, et al. Acclimation of foliar photosynthetic apparatus of three tropical woody species to growth irradiance [J]. Chin J Appl Ecol, 2003, 14(4): 493–496. doi: 10.13287/j.1001-9332.2003.0111.
- 蔡志全, 曹坤芳, 冯玉龙, 等. 热带雨林三种树苗叶片光合机构对光强的适应 [J]. 应用生态学报, 2003, 14(4): 493–496. doi: 10.13287/j.1001-9332.2003.0111.
- [36] XIONG Z X, MA X L. A micro-morphological observation of scales on the lower leaf-surface of *Rhododendron* subgenus *Pseudorhodorastrum* [J]. Acta Bot Yunnan, 1992, 14(2): 224–226.
- 熊子仙, 马献力. 糙叶杜鹃亚属叶背鳞片显微形态观察 [J]. 云南植物研究, 1992, 14(2): 224–226.
- [37] XIONG Z X, WANG Q D. The micro-morphological study on the scale on the lower leaf-surface of species in subgen *Rhododendron* from China [J]. Acta Bot Boreali-Occid Sin, 1997, 17(1): 65–77.
- 熊子仙, 王启德. 中国有鳞杜鹃叶背鳞片显微形态研究 [J]. 西北植物学报, 1997, 17(1): 65–77.
- [38] XIANG L, CHEN F Q, GENG M Y, et al. Response of leaf functional traits of shrubs to altitude in *Rhododendron latoucheae* communities in Mt. Jinggangshan, Jiangxi, China [J]. J Trop Subtrop Bot, 2019, 27(2): 129–138. doi: 10.11926/jtsb.3930.
- 向琳, 陈芳清, 耿梦娅, 等. 井冈山鹿角杜鹃群落灌木层植物叶功能性状对海拔梯度的响应 [J]. 热带亚热带植物学报, 2019, 27(2): 129–138. doi: 10.11926/jtsb.3930.
- [39] CORDELL S, GOLDSTEIN G, MUELLER-DOMBOIS D, et al. Physiological and morphological variation in *Metrosideros polymorpha*, a dominant Hawaiian tree species, along an altitudinal gradient: The role of phenotypic plasticity [J]. Oecologia, 1998, 113(2): 188–196. doi: 10.1007/s004420050367.
- [40] LIU X M. Comprehensive evaluation of cold resistance and the effect of abscisic acid on chilling resistance of *Rhododendron* [D]. Yangling: Northwest Agriculture & Forestry University, 2017.
- 刘旭梅. 杜鹃花品种的抗寒性评价及外源 ABA 对其抗寒性的影响 [D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2017.
- [41] Editorial Committee of Encyclopedia of China Agriculture. Encyclopedia of China Agriculture, Volume Biology [M]. Beijing: Agricultural Press, 1991: 47–348.
- 中国农业百科全书编辑部. 中国农业百科全书·生物学卷 [M]. 北京: 农业出版社, 1991: 47–348.
- [42] MO L J, CHEN K X, HUANG Q L, et al. Population structure and dynamic of *Rhododendron moulmainsense* in the Lianhua Mountain in Dongguan [J]. Guangdong For Sci Technol, 2015, 31(6): 1–7.
- 莫罗坚, 陈葵仙, 黄倩琳, 等. 东莞莲花山毛棉杜鹃种群结构动态分析 [J]. 广东林业科技, 2015, 31(6): 1–7.
- [43] ZHOU Y Y, SUN L, CHEN Z L, et al. Community characteristics of *Rhododendron huadingense*, a species endangered and endemic in China [J]. J Hangzhou Norm Univ (Nat Sci), 2012, 11(3): 211–216. doi: 10.3969/j.issn.1674-232X.2012.03.004.
- 周莹莹, 孙莉, 陈子林, 等. 珍稀特有植物华顶杜鹃的群落基本特征分析 [J]. 杭州师范大学学报(自然科学版), 2012, 11(3): 211–216. doi: 10.3969/j.issn.1674-232X.2012.03.004.
- [44] LIU M. Biomass and nutrient accumulation and distribution of *Rhododendron* at timberline on Sejila Mountain of Tibet [D]. Lasa: Tibet University, 2008.
- 刘敏. 西藏色季拉山林线杜鹃群落生物量及养分的积累与分布 [D]. 拉萨: 西藏大学, 2008.
- [45] WANG M. Study on the natural community of azalea in Jinzhai County [D]. Hefei: Anhui Agricultural University, 2016.
- 王敏. 金寨县杜鹃天然种群的研究 [D]. 合肥: 安徽农业大学, 2016.
- [46] LI W J, CHEN X. A preliminary study on structure and regeneration of *Rhododendron delavayi* population in Baili Azalea Forest Park [J]. Guizhou Sci, 2005, 23(3): 46–49. doi: 10.3969/j.issn.1003-6563.2005.03.011.
- 李苇洁, 陈训. 百里杜鹃森林公园马缨杜鹃种群结构与更新初步研究 [J]. 贵州科学, 2005, 23(3): 46–49. doi: 10.3969/j.issn.1003-6563.2005.03.011.
- [47] SHEN L, SHI S L, LI J J, et al. Community diversity of alpine *Rhododendron* in Qomolangma National Nature Reserve [J]. Acta Bot Boreali-Occid Sin, 2014, 34(12): 2553–2561. doi: 10.7606/j.issn.1000-4025.2014.12.2553.
- 沈丽, 石松林, 李景吉, 等. 珠穆朗玛峰国家级自然保护区高山杜鹃群落多样性研究 [J]. 西北植物学报, 2014, 34(12): 2553–2561. doi: 10.7606/j.issn.1000-4025.2014.12.2553.
- [48] CHEN Y H. The study on plant scape of *Rhododendron fortunei* communities in Yangmingshan in Hunan [D]. Changsha: Central South

- University of Forestry & Technology, 2006.
- 陈艳华. 湖南阳明山云锦杜鹃群落景观研究 [D]. 长沙: 中南林业科技大学, 2006.
- [49] CAI X, CHEN B, CHEN F, et al. Population structure and interspecific association of *Rhododendron huadingense*, a rare and endemic species in China [J]. J Zhejiang Univ (Sci), 2019, 46(3): 354–363. doi: 10.3785/j.issn.1008-9497.2019.03.014.
- 蔡鑫, 陈波, 陈锋, 等. 珍稀特有植物华顶杜鹃的种群结构和种间联结 [J]. 浙江大学学报(理学版), 2019, 46(3): 354–363. doi: 10.3785/j.issn.1008-9497.2019.03.014.
- [50] WANG F, HUO H C, ZHAO Y, et al. Population structure and dynamics of original *Abies faxoniana* Rehd.-*Rhododendron simsii* Planch in high-mountain timberline of southern Gansu Province [J]. Bull Bot Res, 2019, 39(5): 664–672. doi: 10.7525/j.issn.1673-5102.2019.05.004.
- 王飞, 霍怀成, 赵阳, 等. 甘南高山林线岷江冷杉-杜鹃种群结构与动态 [J]. 植物研究, 2019, 39(5): 664–672. doi: 10.7525/j.issn.1673-5102.2019.05.004.
- [51] LI J X, ZHANG X, XIE Z Q, et al. Community composition and structure of *Rhododendron simsii* shrubland in the Dawei Mountain, Hunan Province [J]. Biodiv Sci, 2015, 23(6): 815–823. doi: 10.17520/biods.2015024.
- 李家湘, 张旭, 谢宗强, 等. 湖南大围山杜鹃灌丛的群落组成及结构特征 [J]. 生物多样性, 2015, 23(6): 815–823. doi: 10.17520/biods.2015024.
- [52] WU Z, LIU N, WANG D Y, et al. Status analysis of *Rhododendron moulmainsense* population of Xiaowutong Mountain in Shenzhen [J]. For Resour Manag, 2009(5): 69–72. doi: 10.13466/j.cnki.lyzygl.2009.05.012.
- 吴志, 刘念, 王定跃, 等. 深圳市小梧桐毛棉杜鹃种群现状分析 [J]. 林业资源管理, 2009(5): 69–72. doi: 10.13466/j.cnki.lyzygl.2009.05.012.
- [53] CHEN S Q, WEI X L, AN M T, et al. Species diversity of plant communities at different succession stages in Baili *Rhododendron* Nature Reserve of Guizhou [J]. Acta Bot Boreali-Occid Sin, 2019, 39(7): 1298–1306. doi: 10.7606/j.issn.1000-4025.2019.07.1298.
- 陈胜群, 韦小丽, 安明态, 等. 贵州百里杜鹃自然保护区不同演替阶段植物群落物种多样性 [J]. 西北植物学报, 2019, 39(7): 1298–1306. doi: 10.7606/j.issn.1000-4025.2019.07.1298.
- [54] LIU Y Z, GUO M, ZOU T C, et al. Investigation and analysis on species diversity of three *Rhododendron* communities in Hundred-mile Azalea [C]// Proceedings of 2008 Annual Conference of China Botanical Garden. Guiyang: Chinese Botanical Society, 2008: 94–98.
- 刘应珍, 郭曼, 邹天才, 等. 百里杜鹃三种杜鹃群落类型物种多样性调查分析 [C]// 2008 年中国植物园学术年会论文集. 贵阳: 中国植物学会植物园分会, 2008: 94–98.
- [55] WU Q N, DONG J W, ZHENG Y, et al. Niches of the main plant species in Baili *Rhododendron* National Forest Park [J]. J Nanjing For Univ (Nat Sci), 2017, 41(2): 175–180. doi: 10.3969/j.issn.1000-2006.2017.02.026.
- 吴倩楠, 董建文, 郑宇, 等. 百里杜鹃国家森林公园优势种生态位研究 [J]. 南京林业大学学报(自然科学版), 2017, 41(2): 175–180. doi: 10.3969/j.issn.1000-2006.2017.02.026.
- [56] SURIGUGA, ZHANG J T, WANG Y X. Species diversity of forest communities and its forecasting by neural network in the Songshan National Nature Reserve, Beijing [J]. Acta Ecol Sin, 2013, 33(11): 3394–3403. doi: 10.5846/stxb201203290440.
- 苏日古嘎, 张金屯, 王永霞. 北京松山自然保护区森林群落物种多样性及其神经网络预测 [J]. 生态学报, 2013, 33(11): 3394–3403. doi: 10.5846/stxb201203290440.
- [57] KONG D M, RAN J C, AN M T, et al. Analysis on structure characteristics and regeneration trend of typical *Rhododendron* communities at Baili *Rhododendron* Nature Reserve [J]. Non-wood For Res, 2019, 37(4): 112–119. doi: 10.14067/j.cnki.1003-8981.2019.04.015.
- 孔德明, 冉景丞, 安明态, 等. 百里杜鹃自然保护区典型杜鹃群落结构特征与更新趋势分析 [J]. 经济林研究, 2019, 37(4): 112–119. doi: 10.14067/j.cnki.1003-8981.2019.04.015.