

川西王朗亚高山暗针叶林25.2 hm²动态监测样地物种组成与群落结构特征

樊凡^{1,2} 赵联军³ 马添翼¹ 熊心雨^{2,4} 张远彬⁵ 申小莉^{6*} 李晟^{1,2*}

¹北京大学生命科学学院, 北京 100871; ²北京大学生态研究中心, 北京 100871; ³王朗国家级自然保护区, 四川平武 622550; ⁴北京大学城市与环境学院, 北京 100871; ⁵中国科学院成都山地灾害与环境研究所, 成都 610041; ⁶中国科学院植物研究所植被与环境变化国家重点实验室, 北京 100093

摘要 川西亚高山暗针叶林是中国寒温带针叶林的重要代表。以云杉(*Picea* spp.)和冷杉(*Abies* spp.)为优势树种的暗针叶林是青藏高原东缘亚高山森林的主体, 也是我国长江上游重要的生态屏障。该研究基于川西王朗保护区亚高山暗针叶林25.2 hm²动态监测样地的首轮清查数据, 分析样地木本植物组成和群落结构特征。依照全球森林观测网络(ForestGEO)的标准技术规范, 建立面积为25.2 hm² (700 m × 360 m)的暗针叶林固定监测样地, 对胸径≥1 cm的木本植物进行挂牌标记、坐标定位、物种鉴定和检尺。主要结果有: 样地内共标记独立的木本植物个体56 574株, 分属15科27属46种, 其中针叶树4种, 常绿阔叶树6种, 落叶阔叶树36种; 每hm²个体数≤1的稀有种共13个, 占样地物种总数的28.26%, 占样地总个体数的0.16%。该群落以针叶树岷江冷杉(*A. fargesii* var. *faxoniana*, *n* = 9 440)和紫果云杉(*P. purpurea*, *n* = 1 645)为建群种和乔木层优势种, 重要值分别占总数的26.03%和10.69%, 其单位面积内的胸高断面面积分别占总胸高断面面积(37.87 m²·hm⁻²)的55.22%和24.84%。落叶阔叶树个体数占比最多(78.48%), 其中紫萼山梅花(*Philadelphus purpurascens*)、红脉忍冬(*Lonicera nervosa*)、冷地卫矛(*Euonymus frigidus*)为灌木层主要优势种。常绿阔叶树个体仅268株, 均为杜鹃属(*Rhododendron*)植物。木本植物的径级组成具有典型老龄林特征。单株最大胸径出现在紫果云杉, 达到127.07 cm。紫果云杉平均单株胸高断面面积(0.14 ± 0.18) m²显著高于岷江冷杉(0.056 ± 0.11) m²。所有标记个体的径级分布呈倒“J”形, 表明群落处于稳定和正常生长状态。点格局分析的结果表明5个优势种(重要值占比>5%)均呈聚集分布, 但随着空间尺度的增加, 物种聚集程度变小, 趋向于随机分布。该研究的结果为深入研究川西亚高山暗针叶林的多样性维持与更新机制和该类型森林生态系统的保护与管理提供了基础信息。

关键词 CForBio网络; 亚高山暗针叶林; 岷山; 物种组成; 群落结构; 点格局分析

樊凡, 赵联军, 马添翼, 熊心雨, 张远彬, 申小莉, 李晟 (2022). 川西王朗亚高山暗针叶林25.2 hm²动态监测样地物种组成与群落结构特征. 植物生态学报, 46, 1005-1017. DOI: 10.17521/cjpe.2022.0094

Community composition and structure in a 25.2 hm² subalpine dark coniferous forest dynamics plot in Wanglang, Sichuan, China

FAN Fan^{1,2}, ZHAO Lian-Jun³, MA Tian-Yi¹, XIONG Xin-Yu^{2,4}, ZHANG Yuan-Bin⁵, SHEN Xiao-Li^{6*}, and LI Sheng^{1,2*}

¹School of Life Sciences, Peking University, Beijing 100871, China; ²Institute of Ecology, Peking University, Beijing 100871, China; ³Wanglang National Nature Reserve, Pingwu, Sichuan 622550, China; ⁴College of Urban and Environmental Sciences, Peking University, Beijing 100871, China; ⁵Institute of Mountain Hazards and Environment, Chinese Academy of Sciences, Chengdu 610041, China; and ⁶State Key Laboratory of Vegetation and Environmental Change, Institute of Botany, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100093, China

Abstract

Aims Subalpine dark coniferous forests are an important representative of the cold-temperate coniferous forests in China. Dark coniferous forests dominated by spruce (*Picea* spp.) and fir (*Abies* spp.) are the main body of subalpine forests on the eastern edge of the Qingzang Plateau and an important ecological defense in the upper reaches of the Yangtze River in China. In this study, we examined the community composition and structure of such a dark coniferous forest based on the first census data of the 25.2 hm² Wanglang forest dynamics plot in western Sichuan.

Methods The plot was established following the standard protocol of Forest Global Earth Observation Network (ForestGEO) and all free-standing stems with diameter at breast height (DBH) ≥ 1 cm were tagged, mapped, measured and identified to species.

Important findings A total of 56 574 individuals belonging to 46 species, 27 genera and 15 families are tagged,

收稿日期Received: 2022-03-15 接受日期Accepted: 2022-05-31

* 通信作者Corresponding authors (Shen XL, xlshen@ibcas.ac.cn; Li S, shengli@pku.edu.cn)

including 4 coniferous species, 6 evergreen broad-leaved species and 36 deciduous broad-leaved species. There are 13 rare species (≤ 1 individuals per hm^2), accounting for 28.26% of the total number of species and 0.16% of the total number of individuals in the plot. *Abies fargesii* var. *faxoniana* (9 440 individuals) and *P. purpurea* (1 645 individuals) are the dominant and constructive species in canopy, accounting for 26.03% and 10.69% of the total importance value, and 55.22% and 24.84% of the total basal area ($37.87 \text{ m}^2 \cdot \text{hm}^{-2}$), respectively. The number of individuals of deciduous broad-leaved species accounted for 78.48% of the total individuals. Among them, *Philadelphus purpurascens*, *Lonicera nervosa* and *Euonymus frigidus* are the dominant species in shrub layer. The number of individuals of evergreen broad-leaved species is 268, and all these species belong to genus *Rhododendron*. The composition of the size distribution shows typical characteristics of old-growth forests. *Picea purpurea* is the largest tree species (max DBH = 127.07 cm) and the mean basal area (0.14 ± 0.18) m^2 is much higher than that of *A. fargesii* var. *faxoniana* (0.056 ± 0.11) m^2 . The size class distribution of all woody species shows an inverse J-shaped distribution, indicating that the community is in a stable and healthy recruitment state. Results of the point pattern analysis reveal that the five dominant tree species (important values ≥ 5) all show aggregated distribution patterns. However, as the spatial scale increases, all five species tend to be randomly distributed. The results of this study provide basic information for future studies on the diversity maintenance and regeneration mechanisms of subalpine dark coniferous forests in western Sichuan, and the conservation and management of this unique forest ecosystem.

Key words CForBio network; subalpine dark coniferous forest; Minshan Mountains; species composition; community structure; point pattern analysis

Fan F, Zhao LJ, Ma TY, Xiong XY, Zhang YB, Shen XL, Li S (2022). Community composition and structure in a 25.2 hm^2 subalpine dark coniferous forest dynamics plot in Wanglang, Sichuan, China. *Chinese Journal of Plant Ecology*, 46, 1005-1017. DOI: 10.17521/cjpe.2022.0094

森林是陆地生态系统的主体, 占全球无冰区陆地面积的44%以上(Potapov *et al.*, 2017), 为全球约50%的已知物种提供生存环境, 是维持全球生物多样性最重要的生态系统之一(Davies *et al.*, 2021)。永久性大型森林动态监测样地是监测森林群落组成和结构的重要研究平台, 具有传统小样方无法替代的数据优势, 已成为研究生物多样性形成和维持机制等重要生态学问题的有效手段(Condit, 1995; 马克平, 2017; Davies *et al.*, 2021)。长期的监测, 如每5年定期进行的样地复查, 对于研究森林生物多样性的动态变化及其对人为活动干扰和气候变化的响应等具有重要意义。自1980年在巴拿马建立第一个面积为50 hm^2 的森林动态监测样地以来, 截至2021年, 已经有分布在28个国家和地区的73个大型森林动态监测样地加入全球森林观测网络(ForestGEO, <https://forestgeo.si.edu/>)。

云冷杉林是我国分布最广的森林类型之一, 也是我国分布最广的一个寒温性常绿针叶林群系组(中国植被编辑委员会, 1980)。云冷杉林适生于北温带和与北温带气候相当的山地垂直带, 其中川西、滇北和藏东南是我国云冷杉林分布最为集中, 类型最为多样的地区, 同时也是世界云杉(*Picea* spp.)、冷杉(*Abies* spp.)及高山植物的分化中心(中国植被

编辑委员会, 1980; 袁睿佳等, 2007)。以云杉、冷杉为优势树种的川西亚高山暗针叶林地处青藏高原东南缘, 位于亚热带常绿阔叶林向青藏高原高寒植被过渡的区域。这些分布在岷江、雅砻江、金沙江等长江上游山地的云冷杉林(李承彪, 1990), 构成了我国长江上游地区重要的生态屏障, 在水土保持、水源涵养方面作用巨大。由于历史上大规模商业采伐等原因, 原始的亚高山暗针叶林目前仅在川西部分中高海拔地带分布。

蒋有绪等(1998)对我国云冷杉林的分布范围、基本生境条件和群落学特征等做过系统描述。作为重要的经济用材林, 以往研究多集中在探究不同采伐方式和择伐强度对森林更新、树种组成及其空间分布格局的影响等方面(韩景军等, 2000; 沈林等, 2013; 曾祥谓等, 2014; 周梦雨等, 2016)。部分研究针对重要的建群树种, 如岷江冷杉(*Abies fargesii* var. *faxoniana*)、紫果云杉(*Picea purpurea*), 探究其种群结构、空间格局和更新动态, 及其影响因素等(Taylor & Qin, 1992; Taylor *et al.*, 2004, 2006; 赵常明等, 2004; 王永健等, 2007; 谭留夷等, 2011; 康瑶瑶等, 2015; 陈国鹏等, 2021)。然而, 已有的研究多基于较小的空间和时间尺度, 尚缺乏较大尺度和较长时期的森林群落监测数据, 在研究云冷杉林的群

落构建机制、森林对全球变化的响应等方面尚存在局限。

本研究选取王朗国家级自然保护区的亚高山原始针叶林,建立了面积为25.2 hm²的大型森林动态监测样地(以下简称王朗样地),拟开展长期的监测和研究。作为ForestGEO的重要组成部分,中国森林生物多样性监测网络(CForBio, <http://www.cfbiodiv.org/>)于2004年启动建设(马克平, 2015)。截至2021年3月, CForBio已包括24个大型森林动态样地和近60个面积1–5 hm²的辅助样地, 比较好地代表了中国从寒温带到热带的地带性植被类型。王朗样地是CForBio监测网络中亚高山针叶林森林类型的典型代表,也是已建设样地中少有的原始森林类型。同时,王朗样地地处西南山地生物多样性热点地区和大熊猫核心栖息地,是在精细尺度上研究动植物关系的重要平台。样地建设参照ForestGEO森林动态样地网络所共同遵循的CTFS (Center for Tropical Forest Science)标准规程(Condit, 1998),于2017年正式建成。基于王朗样地的首次森林清查数据,本研究分析了样地木本植物物种组成、区系特征、物种优势度、径级结构和个体空间分布格局,研究结果将有助于深入了解川西亚高山暗针叶林的结构组成与更新机制,为该类型森林生态系统的保护与管理提供基础信息。

1 材料和方法

1.1 研究区域概况

王朗样地位于四川省绵阳市平武县的王朗国家级自然保护区(103.83–104.97° E, 32.82–33.03° N; 图1)。该保护区成立于1965年,总面积323 km²,海拔跨度2 300–4 980 m (李晟之, 2018),是我国最早成立的4个大熊猫自然保护区之一,也是岷山山系重要的大熊猫栖息地(申国珍等, 2004; Zhan *et al.*, 2006)。保护区地处四川盆地西缘北段的岷山山系中部,区内山高谷深,V形峡谷发育。该区域属于丹巴-松潘半湿润气候区,位于季风气候向高原气候的过渡区,总温凉、湿润,降水量多、强度大且集中于夏秋季。年平均气温2.26 °C,最热月(8月)平均气温12 °C,最冷月(1月)平均气温–7.2 °C,年降水量1 088 mm。土壤以暗棕壤、棕壤和山地草甸土为主,年土壤冻结天数超过150天。区内山地植被垂直变化明显,随着海拔上升,依次分布针阔混交林

(2 300–2 650 m)、暗针叶林(2 650–3 200 m)、灌丛草甸(3 200–4 200 m)、流石滩植被和裸岩(4 200 m以上)(申国珍等, 2004)。

王朗保护区内主要森林类型是以紫果云杉和岷江冷杉为建群种的亚高山云冷杉暗针叶林(Taylor *et al.*, 2006)。除了1953–1956年间在2 700 m以下区域采伐森林和地震(比如1976年松潘-平武地震)造成的局部干扰,王朗保护区内大部分森林呈原始状态。王朗的暗针叶林具有分层结构清晰,历史上人为干扰较少等特点(申国珍等, 2002)。林下广泛生长有密集的缺苞箭竹(*Fargesia denudata*)(申国珍等, 2004; Taylor *et al.*, 2006)。

1.2 样地设置与数据收集

本研究在王朗保护区内大窝凼沟选取典型的亚高山暗针叶林建设森林动态监测样地。样地沿大窝凼沟纵向设置,水平投影面积25.2 hm²,长700 m,宽360 m。按照CTFS样地建设标准规程(Condit, 1998),用全站仪将样地划分为630个20 m × 20 m的样方,共18列,35行。以20 m × 20 m样方作为调查单元,每个样方进一步分为4个10 m × 10 m的小样方,在每个10 m位点设钢筋角桩,插上聚氯乙烯(PVC)管做标记。按小样方的顺时针顺序对样地内胸径

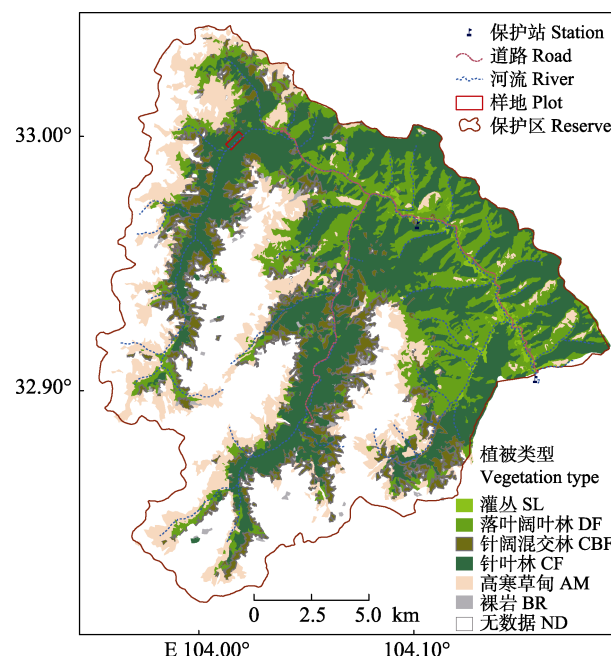


图1 王朗样地位置图。

Fig. 1 Location of Wanglang plot. AM, alpine meadow; BR, bare rock; CBF, conifer broad-leaved mixed forest; CF, conifer forest; DF, deciduous broad-leaved forest; ND, no data; SL, shrubland.

(DBH)(距离地面1.3 m高处主干直径) ≥ 1 cm的所有木本植物(包括乔木、灌木、木质藤本3类)进行挂牌、鉴定、DBH测量、定位。每株个体悬挂刻有唯一编号的铝牌并记为一株独立个体,对DBH ≥ 1 cm的分枝悬挂分枝号牌。铝牌的编号规则为“WL”+“列编号”(01, 02, 03...)+“树木的序号”(0001, 0002, 0003...)。首轮清查工作于2018年8月完成。

使用背包激光雷达扫描系统(LiBackpack DG50, 北京数字绿土科技有限公司, 北京)对王朗样地进行扫描, 利用测得的点云数据计算获取样地的海拔等地形数据。

1.3 数据处理

参照吴征镒等(2003)关于世界种子植物区系的分布区类型以及我国科、属地理区系成分的划分, 对王朗森林样地木本植物进行区系特征分析。以20 m \times 20 m样方为单元, 使用随机取样法(Gotelli & Colwell, 2001), 分别绘制王朗样地所有挂牌木本植物、乔木以及灌木和木质藤本树种的物种累积曲线。计算样地内各树种胸高断面面积和, 统计各木本植物物种的多度和在样方中出现的频度, 使用以下公式计算各木本植物物种的重要值(Greig-Smith, 1983), 以反映其在群落中的优势度:

重要值= (相对频度+相对多度+相对胸高断面面积和)/3 (1)

式中,

相对频度= (某个物种的频度/所有物种的频度和) $\times 100$ (2)

相对多度= (某个物种的多度/所有物种的多度和) $\times 100$ (3)

相对胸高断面面积和= (某个物种的胸高断面面积和/所有物种的胸高断面面积和) $\times 100$ (4)

将每 hm^2 个体数 ≤ 1 株的物种定义为稀有种, 反之为常见种(Hubbell & Foster, 1986)。使用Ripley's G-Function的单点格局分析方法(Stoyan & Stoyan, 1994), 采用完全空间随机模型作为零模型, 分析样地内重要值占比 $>5\%$ 的5个优势种的空间分布格局。 $g(r) = 1$ 时为完全随机分布; $g(r) > 1$ 时, 位点倾向于聚集分布; $g(r) < 1$ 时, 位点为均匀分布。使用Monte-Carlo拟合检验计算置信区间, 拟合次数为199次, 获取99%置信水平的上下包迹线(Binder *et al.*, 1993)。点格局分析使用R 4.0.3软件中的“spatstat”程序包(Baddeley *et al.*, 2015)完成。为了比

较不同纬度和森林类型样地的群落组成差异, 本研究选择了中国7个基于同样的CTFS规程建立的大型森林动态样地(长白山、东灵山、秦岭佛坪、玉龙雪山、八大公山、古田山和鼎湖山), 对各个样地中木本植物科的温带与热带成分比例、物种数、个体数(有唯一编号的个体数量)、落叶物种数及比例、稀有种物种数及比例进行了信息收集, 并与王朗样地进行了对比。

使用Excel 2016、R 4.0.3和Adobe Illustrator 2022软件对数据统计分析和作图。

2 结果

2.1 物种组成

王朗样地中央平坦, 有河流穿过, 两侧阴坡和阳坡的海拔升高, 样地内海拔跨度为2 849–2 947 m (图2A)。首轮清查挂牌木本植物树种计46种, 隶属于15科27属, 包括裸子植物2科4属4种, 被子植物13科23属42种; 其中乔木14种, 灌木29种, 藤本3种(附录I)。总计挂牌56 574个独立植株, 55 814个分枝, 合112 388个, 独立植株平均密度为2 245株 $\cdot \text{hm}^{-2}$ 。乔木、灌木、木质藤本独立植株分别为20 298、35 185和1 091株(附录I)。样地内包括针叶树4种, 常绿阔叶树6种(均为杜鹃属(*Rhododendron*)植物), 落叶阔叶树36种, 独立植株数分别为11 905、268和44 401株(附录I)。其他7个样地(长白山、东灵山、秦岭佛坪、玉龙雪山、八大公山、古田山和鼎湖山)的基本信息和数据特征见表1。已挂牌木本植物的空间分布见图2B。

2.2 物种累积曲线

样地内所有木本植物物种累积曲线显示, 在0–100个样方数(面积0–4 hm^2)时, 累积树种数量随样地面积的增大而迅速增加; 100–300个样方数(4–12 hm^2)时, 累积树种数量增长缓慢; 面积达到12 hm^2 后, 曲线趋于平缓(图3)。样方数为全部数量一半时(315个样方), 物种累计到达43种, 占全部物种数的93.48%, 进一步增加样方数至630个, 物种数仅增加3个。对样地内乔木、灌木/藤本分别进行物种累积曲线作图, 相比于物种数更多的灌木/藤本, 累积乔木树种数量在较少的样方数内即可达到平台期。

2.3 优势度

样地内个体优势度明显, 个体数大于1 000株的

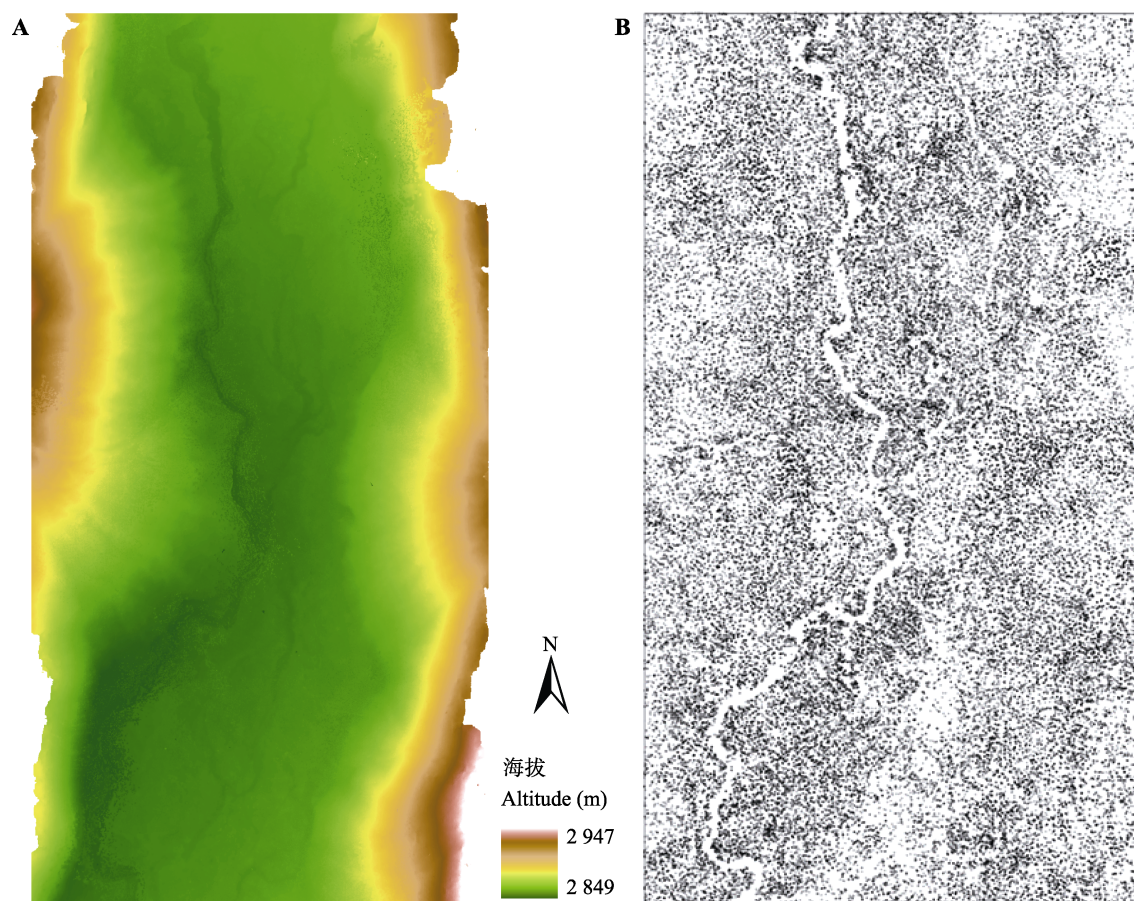


图2 王朗样地海拔(A)和挂牌木本植物(B)分布图。由于林下竹丛过于密集, 导致工作人员在进行背包雷达扫描时无法直立行走, 因此样地边缘存在部分海拔空白值。B用大小一致的黑点标记已挂牌木本植株。

Fig. 2 Altitude (A) and distribution of all tagged individual woody plants (B) in Wanglang plot. Blank values in A are due to the inaccessibility caused by the dense bamboo understory during the backpack radar scanning. Each dot represents an individual tagged woody plant in B.

物种有16个, 占样地物种总数的34.78%, 占样地总个体数的90.91%。稀有种(每hm²个体数≤1)共13个, 占样地物种总数的28.26%, 占样地总个体数的0.16%, 其中川杨(*Populus szechuanica*)、灌柳(*Salix rehderiana* var. *dolia*)和南川绣线菊(*Spiraea rosthornii*)仅1株个体(附录I)。

重要值占比超过5%的优势种5个。其中, 岷江冷杉和紫果云杉为乔木优势种, 紫萼山梅花(*Philadelphus purpurascens*)、红脉忍冬(*Lonicera nervosa*)和冷地卫矛(*Euonymus frigidus*)为灌木优势种(附录I)。乔木优势种有个体数少、胸高断面积大的特点。如岷江冷杉共有9 440株个体(16.69%), 胸高断面积为所有物种中最大, 占样地总胸高断面积和的55.22%, 平均单株胸高断面积0.056 m², 重要值占比仅为26.03%; 其次为紫果云杉, 重要值10.69%, 共有1 645株个体(2.91%), 平均单株胸高

断面积0.14 m², 为所有物种中最大。灌木物种的总重要值为45.30%。相较于乔木物种, 灌木的个体数多, 但单株个体胸径较小: 其个体数占样地全部挂牌植株个体数的62.19% (35 185株), 总胸高断面积和仅占样地全部挂牌植株个体总胸高断面积和的9.55%。

2.4 径级结构

以2 cm等级排列, 所有标记个体的径级分布明显呈倒“J”形(图4A), 其中DBH ≤ 10 cm的个体数量居多, 独立个体数47 833株, 占全部个体的84.55%; 10 < DBH ≤ 30 cm的独立个体5 461株, 占比9.65%; DBH > 30 cm的个体3 280株, 占比5.80%。样地内1 306株个体的胸径超过50 cm, 其中99.23%为针叶树。

针叶树种径级分布为“L”形, 有数量少、径级大的特点(图4B); 胸径最大的个体为紫果云杉(DBH =

表1 王朗25.2 hm²森林动态监测样地与其他7个不同纬度、不同植被类型样地特征比较

Table 1 Comparison of the major characteristics of Wanglang 25.2 hm² forest dynamics plot with seven other plots of different latitudes and vegetation types

样地名称 Plot name	纬度 Latitude (°N)	森林类型 Forest type	海拔范围 Altitude range (m)	面积 Area (hm ²)	科的温带/热带成分 Temperate/tropical composition at the family level (%/%)	木本植物物种数 No. of woody plant species	独立个体数 No. of individuals	落叶阔叶树物种 及比例* No. of deciduous species* (%)	稀有物种 种数及比例* No. of rare species* (%)	来源 Reference
王朗 Wanglang	33	亚热带寒温带针叶林 Subtropical cold-temperate coniferous forest	2 849–2 947	25.2	46.67/26.67	46	56 574	36 (78.26)	13 (28.26)	本研究 This study
长白山 Changbaishan	42	温带阔叶红松林 Temperate broad-leaved Korean pine mixed forest	792–810	25	–	52	38 902	49 (94.23)	18 (34.62)	Hao <i>et al.</i> , 2008
东灵山 Donglingshan	40	暖温带落叶阔叶次生林 Warm temperate deciduous broad-leaved secondary forest	1 290–1 509	20	93.75/3.13	58	52 136	58 (100.00)	11 (18.97)	Liu <i>et al.</i> , 2011
秦岭佛坪 Qinling-Foping	33	落叶阔叶林 Deciduous broad-leaved forest	1 716–1 835	25	60.00/24.62	119	47 739	106 (89.07)	51 (42.86)	Xie <i>et al.</i> , 2019
玉龙雪山 Yulong Xueshan	27	亚热带寒温带针叶林 Subtropical cold-temperate coniferous forest	3 220–3 344	25	42.31/26.92	69	47 751	50 (72.46)	22 (35.48)	Huang <i>et al.</i> , 2017
八大公山 Badagongshan	29	亚热带常绿阔叶林 Subtropical evergreen deciduous broad-leaved forest	1 355–1 456	25	–	232	186 575	139 (59.91)	103 (44.40)	Qin <i>et al.</i> , 2018
古田山 Gutianshan	29	中亚热带常绿阔叶林 Mid-subtropical evergreen broad-leaved forest	446–715	24	26.53/48.98	159	140 700	68 (42.77)	59 (37.11)	Zhu <i>et al.</i> , 2008
鼎湖山 Dinghushan	23	南亚热带常绿阔叶林 Lower subtropical evergreen broad-leaved forest	230–470	20	6.72/89.92	210	71 617	110 (52.38)	110 (52.38)	Ye <i>et al.</i> , 2008

*落叶阔叶树/稀有物种的物种数占样地物种总数的比例, 其中每hm²个体数≤1株的物种定义为稀有种。-, 无数据。

*Proportion of rare and deciduous species in the plot, species with less than 1 individual per hm² are defined as rare species. -, no data.

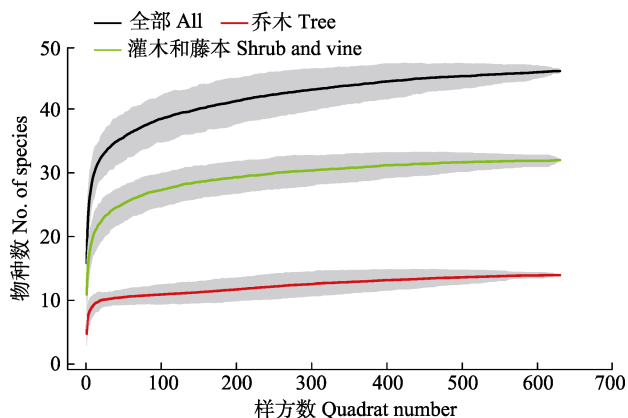


图3 王朗样地木本植物物种累积曲线(20 m × 20 m样方总数= 630)。灰色区域表示95%置信区间。

Fig. 3 Species accumulation curve of woody plants in Wanglang plot (20 m × 20 m quadrat number = 630). Grey shadow areas represent the 95% confidence intervals.

127.07 cm)。落叶乔木和灌木(包括藤本物种)径级分布为倒“J”形(图4C、4D)。落叶乔木个体数较少(8 393株), 但平均胸高断面积和大于灌木(图4C)。灌木是样地内独立个体数的主要组成部分, 具有个体数量

多、径级小的特点(图4D)。

5个优势种的径级分布见图5。乔木层优势树种岷江冷杉和紫果云杉的径级结构存在明显差异。岷江冷杉(图5A)个体数多, 幼龄个体占比大; 紫果云杉(图5B)个体数少, 但高径级个体比例高。同时, 紫果云杉径级呈多峰值分布, 说明其幼苗个体的萌发和存活存在大小年。3种灌木树种(图5C、5D、5E)的径级结构相似, 均呈倒“J”形, 表现出低龄级个体比例高的特点。

2.5 优势种分布格局

优势种的点格局分析结果显示, 红脉忍冬在小尺度上呈聚集分布, 随半径增加至约60 m尺度, $g(r)$ 曲线观察值逐渐与理论值的置信区间重叠, 开始趋向于随机分布, 其他4个树种在研究区域内均呈现聚集分布(图6A2–6E2)。根据空间分布格局, 不同树种存在显著的生境偏好(图6A1–6E1)。如岷江冷杉、紫果云杉和冷地卫矛有在水源聚集的趋势, 这可能与物种属性(如喜湿性、耐阴性)相关。

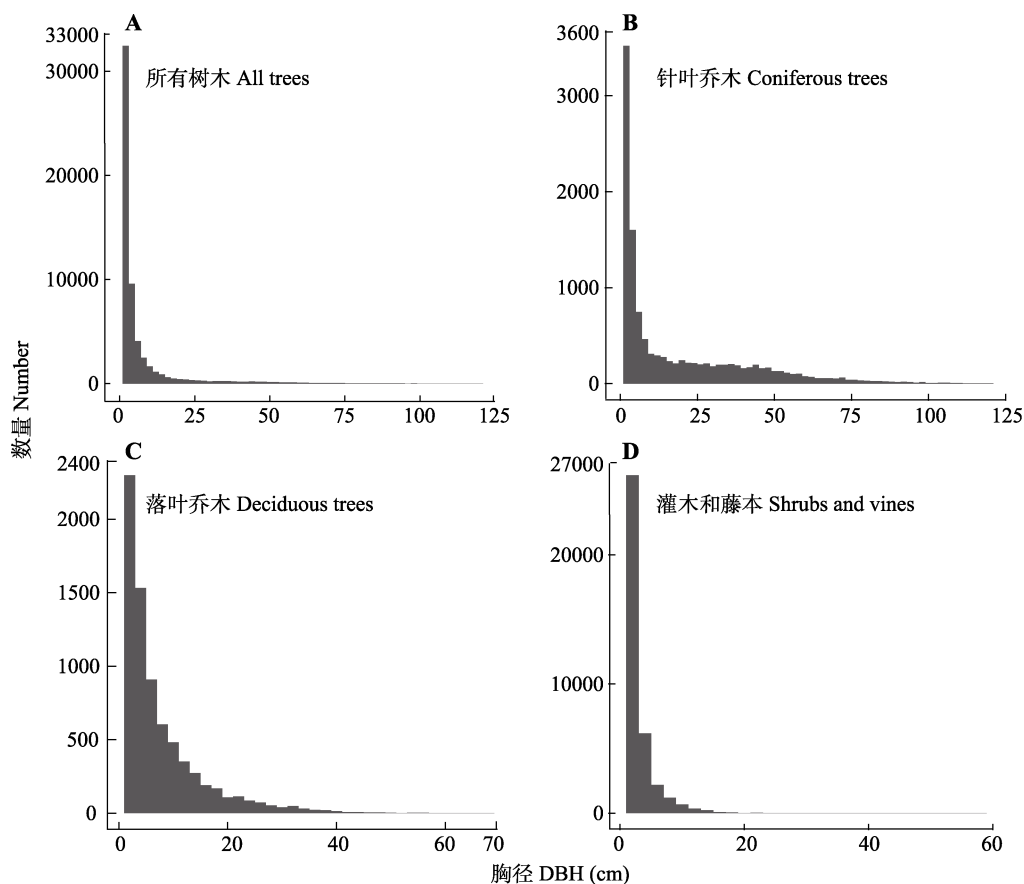


图4 王朗样地内所有挂牌木本植物、针叶乔木、落叶乔木及灌木/藤本物种的径级分布。

Fig. 4 Diameter at breast height (DBH) distributions of all tagged woody plants, coniferous trees, deciduous trees, and shrubs and vines in Wanglang plot.

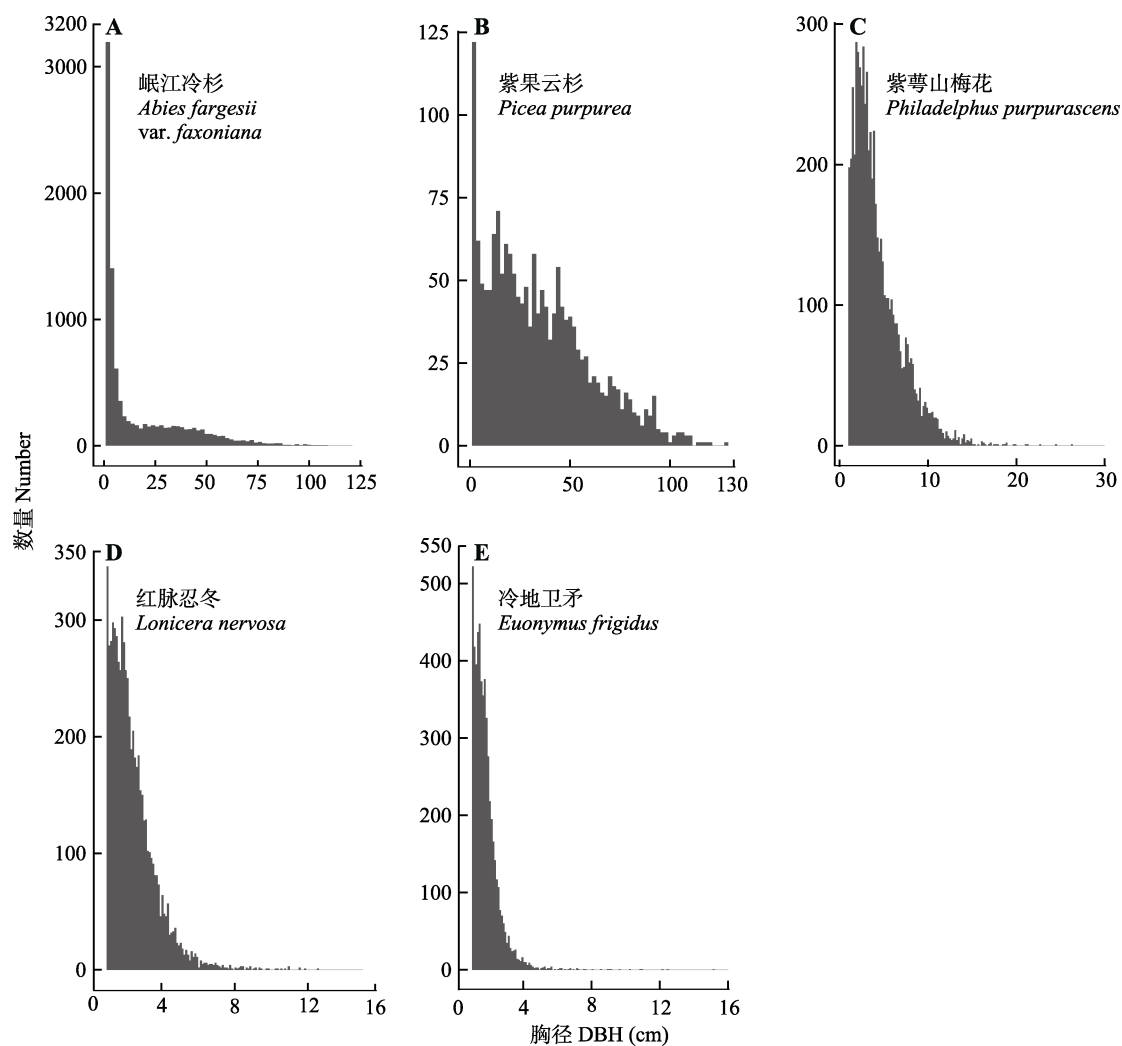


图5 王朗样地内重要值排序前5位木本植物的径级分布。

Fig. 5 Diameter at breast height (DBH) distributions of the top five woody species according to the rank of important value in Wanglang plot.

3 讨论

3.1 物种组成和区系特征

王朗25.2 hm²亚高山暗针叶林样地的物种组成具有典型的山地寒温性针叶林特征,是北半球分布纬度较南的暗针叶林(蒋有绪, 1963)。王朗样地位于从东部亚热带向青藏高原过渡的川西峡谷山地区域,其气候特征与北温带相似,但其植物区系组成呈现出与北方暗针叶林区系组成不完全相似的特征。西南亚高山暗针叶林和北方暗针叶林的区系组成均以北温带成分为主、暗针叶树树种丰富,王朗样地还包括了部分热带型物种,如丰富的杜鹃属植物,为典型的热带高山起源(蒋有绪, 1963)。在科水平上,王朗样地木本植物热带成分组成与同为亚高山暗针叶林的玉龙雪山样地接近,高于秦岭样地和东灵山

样地,低于古田山样地和鼎湖山样地(表1)。从样地物种累积曲线来看,随样方数增加,累积物种数快速增加。当样方数为全部数量一半时,物种累计达43种,占全部物种数的93.48%,进一步增加样方数,记录到的树种数增长缓慢。可见,王朗样地对该区域亚高山针叶林木本植物多样性有较为充分的覆盖。

乔木层群落环境在决定林下群落结构和组成,及其生态特征方面均有重要作用(中国植被编辑委员会, 1980)。王朗样地针叶树种丰富,岷江冷杉、紫果云杉、方枝柏(*Juniperus saltuaria*)和刺柏(*J. formosana*)等针叶树均为中国特有种。其中,岷江冷杉与紫果云杉是乔木层的优势物种,为主要建群种。王朗样地落叶树种中蔷薇科物种最多,占物种总数的23.91%,同时忍冬科、槭树科、虎耳

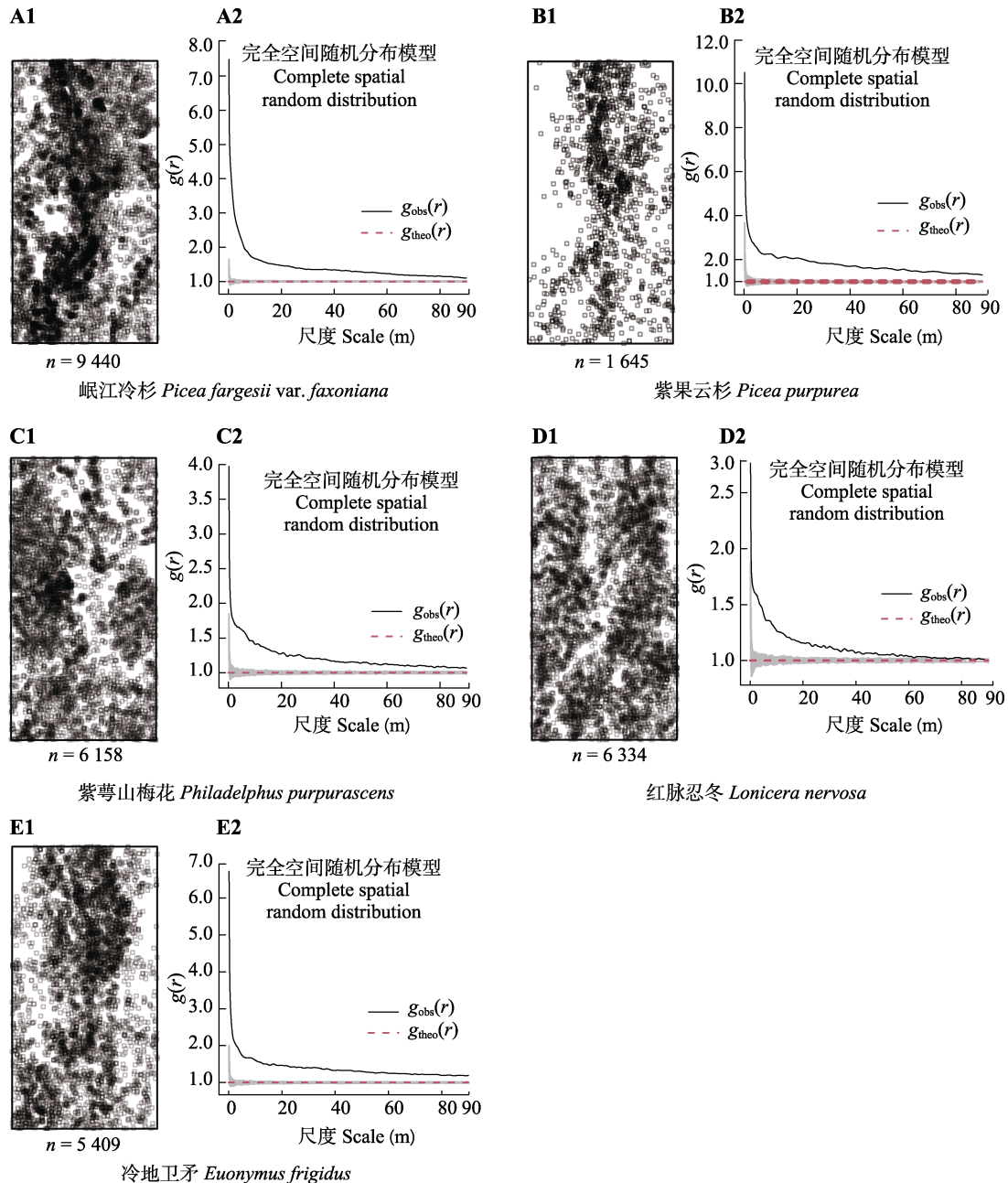


图6 王朗样地5种优势木本植物的空间分布和点格局分析。A1–E1, 各优势种的空间分布。A2–E2, 与完全空间随机分布模型对比的G函数分析结果。 $g_{\text{obs}}(r)$, 观测值; $g_{\text{theo}}(r)$, 理论值; 灰色区域为95%置信区间。

Fig. 6 Spatial distributions and the results of point pattern analysis of the five dominant woody species in Wanglang plot. A1–E1, Spatial distributions of individual woody plants. A2–E2, Results of G-function analysis compared with complete spatial random distribution model. $g_{\text{obs}}(r)$, observed value; $g_{\text{theo}}(r)$, theoretical values from simulated null model; grey area is 95% confidence interval.

草科及杨柳科物种等也均为王朗样地中典型的木本植物组成。相同的科属在玉龙雪山样地与长白山样地中均有报道(郝占庆等, 2008; 黄华等, 2017)。这种不同地理带生长的寒温性针叶林林下植被组成趋同的现象, 与乔木层如云杉属、冷杉属及松属(*Pinus*)等针叶树种的强烈建群作用相关(中国植被编辑委员会, 1980)。针叶树作为乔木层的优势种, 其自然

整枝进行较慢, 易形成稠密郁闭的林冠, 导致林下光照微弱、相对湿度较高。这种环境特别适合槭属(*Acer*)、忍冬属、花楸属(*Sorbus*)、卫矛属、五加属(*Acanthopanax*)等中生耐阴类型物种生存(中国植被编辑委员会, 1980)。

王朗样地中稀有种占样地个体数比例不大, 仅0.16%, 但占物种数比例较高(28.26%)。稀有种是木

本植物多样性的重要组成部分, 根据已有样地报道, 不同森林类型中均有较高比例的稀有种存在(表1)。如长白山样地阔叶红松林和玉龙雪山样地寒温带针叶林中, 稀有种比例分别高达34.6%和35.48% (郝占庆等, 2008; 黄华等, 2017); 亚热带与热带森林如古田山亚热带常绿阔叶林样地和巴拿马 Barro Colorado Island (BCI) 热带雨林样地中, 稀有种比例分别为37.1%和36.8% (He *et al.*, 1997; 祝燕等, 2008)。稀有种在生境中的个体数量虽少, 但其对生态系统功能和服务的贡献不完全依赖于个体数量 (Lyons *et al.*, 2005; Laura *et al.*, 2019)。已有研究表明, 稀有种可能通过影响种间相互作用等间接过程增强生态系统功能 (Laura *et al.*, 2019)。如通过与微生物的互惠作用, 具有固氮作用的稀有种可以促进土壤肥力的增加, 从而使生态系统获得更高的生产力 (Marsh *et al.*, 2000)。另外, 根据Janzen-Connell理论, 稀有种的负密度制约强度较弱, 生长速率更快, 同时, 稀有种的存在可以稀释广布种的负密度制约强度, 从而减小其种内竞争强度, 最终促进整体生态系统服务 (Janzen, 1970; Holt *et al.*, 1994)。然而, 由于个体数量稀少、调查成本高、短期研究难以探测到其显著影响等原因, 对于稀有种的研究仍较不充分, 其对生态系统的影响普遍被低估 (Lyons *et al.*, 2005; Laura *et al.*, 2019)。森林动态监测样地具有调查面积大、监测时间长等特点, 是深入研究稀有种在维持物种多样性及促进生态系统服务等作用的重要平台 (Mi *et al.*, 2012), 因此, 在王朗样地未来的研究中应更多地关注稀有种的生态功能。

3.2 群落径级结构与更新

王朗样地中各优势物种种群的径级结构呈倒“J”形或“L”形频度分布, 且未出现明显断层, 说明木本植物群落结构稳定且更新良好。乔木层优势种岷江冷杉在径级0–10 cm的个体数最多, 也有一定数量的中等径级个体, 表明冷杉种群生长良好且更新速度较快, 是样地中典型的增长型种群, 这与康东伟等(2010)在本地区调查得到的结果一致。紫果云杉作为另一种优势乔木, 与岷江冷杉相比, 个体数少但平均胸高断面面积更大, 成熟个体数量较多, 这与Taylor等(2006)的调查结果相一致, 表明该物种更新速率较冷杉慢, 可能存在周期性集中更新的现象, 因而可在一定时期内保持其种群密度的相对稳定, 是典型的稳定型种群。紫果云杉大径级组成

比例更高, 个体寿命长、存活率高可能是紫果云杉得以与岷江冷杉共存而不被竞争排除的重要生存策略 (Taylor *et al.*, 2006)。此外, 灌木层的优势种紫萼山梅花、红脉忍冬和冷地卫矛等均有大量小径级个体, 更新状况良好。

从径级组成看, 王朗样地具有典型老龄林特征, 即具有大径级建群树种。样地内胸径最大的一株乔木为紫果云杉, 达到127.07 cm。大径级树木个体有重要建群作用, 对森林结构和生态系统功能如生物量和碳汇等有重要贡献 (Lutz *et al.*, 2013)。在ForestGEO样地网络中, 位于北美洲西海岸地中海气候区的优赛美地(Yosemite) 25.6 hm²样地是另一个大径级个体较多的老龄林, 该样地内径级最大的1.4%的个体即贡献了49.4%的地上生物量 (Lutz *et al.*, 2012)。由于大径级树木个体在生境中占比较少, 且多集中在人迹罕至的原始林或者环境较为恶劣的生境, 相关的研究仍较为匮乏 (Larson & Franklin, 2010; Lutz *et al.*, 2013)。因此, 在王朗样地中, 大径级树木个体对群落结构和生态系统功能的影响有待进一步深入研究。

3.3 空间分布

王朗样地的优势树种多呈聚集分布, 随着空间尺度的增加, 聚集程度降低, 趋向于随机分布。这与以往关于岷江冷杉及其伴生种的空间分布格局研究结果 (赵常明等, 2004; 康瑶瑶等, 2015) 相一致。扩散限制和生境过滤是导致树木个体呈聚集分布的两个重要机制 (Getzin *et al.*, 2008; Hu *et al.*, 2012)。由于扩散限制作用, 种子密度在距离母树越近的区域越高 (Condit *et al.*, 2000)。同时, 同种幼苗个体存在相似的生境偏好, 在生境过滤作用下亦表现为小尺度聚集。然而, 不同树种的属性和对资源的利用偏好不同, 使得其空间分布格局存在差异, 从而促进物种共存。如数量最多的岷江冷杉表现出明显的喜湿特征, 在河流两侧分布较为集中。未来的研究将结合更全面的环境因子数据, 如土壤和气候数据, 进一步探究物种的生境偏好和亚高山针叶林生态系统中的物种共存机制。

综上所述, 王朗样地属典型的亚高山暗针叶林, 为演替顶极阶段的老龄林。分析王朗样地的群落组成和结构为进一步研究亚高山暗针叶林的物种共存机制、群落动态及演替规律等提供了基础信息, 为该类型森林生态系统的保护与管理提供科学支持。

王朗样地的建设为森林生物多样性及相关生态学研究提供了很好的基础研究平台, 在不同森林类型生物多样性的对比研究中有重要意义。

致谢 感谢香港海洋公园保育基金(GP05_1415)和王朗国家级自然保护区基金(平采单[2016]4号, 5107272018000046)的资助。感谢龙溪-虹口自然保护区朱大海老师、中国科学院华西亚高山植物园王飞老师, 以及曲上老师、王家才老师在样地植物鉴定工作中给予的帮助, 感谢北京大学冯禹昊在样地地形测绘中提供的帮助, 感谢罗春平、梁春平、黎运喜、郑勇、王小蓉、欧阳杰、陈万里、白杨、魏晓彤、周俊明等保护区工作人员和众多志愿者在样地建设和野外调查中的辛苦努力! 感谢王朗国家级自然保护区、北京大学生命科学学院、北京大学生态研究中心、香港海洋公园、平武县林业局、平武森林保护协会提供的各项支持。

参考文献

- Baddeley A, Rubak E, Turner R (2015). *Spatial Point Patterns: Methodology and Applications with R*. CRC Press, Boca Raton.
- Binder K, Heermann D, Roelofs L, Mallinckrodt AJ, McKay S (1993). Monte Carlo simulation in statistical physics. *Computers in Physics*, 7, 156-157.
- Chen GP, Xian JR, Yu XY (2021). Effect of forest gap on accumulations and allocations of root biomass in *Abies faxoniana* regeneration seedlings. *Acta Ecologica Sinica*, 41, 5685-5694. [陈国鹏, 鲜骏仁, 俞筱押 (2021). 林窗对岷江冷杉更新幼苗根系生物量积累与分配的影响. *生态学报*, 41, 5685-5694.]
- Condit R (1995). Research in large, long-term tropical forest plots. *Trends in Ecology & Evolution*, 10, 18-22.
- Condit R (1998). *Tropical Forest Census Plots: Methods and Results from Barro Colorado Island, Panama and a Comparison with Other Plots*. Springer Science & Business Media, New York.
- Condit R, Ashton PS, Baker P, Bunyavejchewin S, Gunatilleke S, Gunatilleke N, Hubbell SP, Foster RB, Itoh A, LaFrankie JV, Lee HS, Losos E, Manokaran N, Sukumar R, Yamakura T (2000). Spatial patterns in the distribution of tropical tree species. *Science*, 288, 1414-1418.
- Davies SJ, Abiem I, Salim KA, Aguilar S, Allen D, Alonso A, Anderson-Teixeira K, Andrade AC, Arellano G, Ashton PS, Baker PJ, Baker ME, Baltzer JL, Basset Y, Bissengou P, et al. (2021). ForestGEO: understanding forest diversity and dynamics through a global observatory network. *Biological Conservation*, 253, 108907. DOI: 10.1016/j.biocon.2020.108907.
- Getzin S, Wiegand T, Wiegand K, He FL (2008). Heterogeneity influences spatial patterns and demographics in forest stands. *Journal of Ecology*, 96, 807-820.
- Gotelli NJ, Colwell RK (2001). Quantifying biodiversity: procedures and pitfalls in the measurement and comparison of species richness. *Ecology Letters*, 4, 379-391.
- Greig-Smith P (1983). *Quantitative Plant Ecology: Vol. 9*. University of California Press, Oakland, USA.
- Han JJ, Xiao WF, Luo JC (2000). Effects of different cutting methods on regeneration and habitat for spruce-fir forests. *Scientia Silvae Sinicae*, 36(Sp.1), 90-96. [韩景军, 肖文发, 罗菊春 (2000). 不同采伐方式对云冷杉林更新与生境的影响. *林业科学*, 36(专刊1), 90-96.]
- Hao ZQ, Li BH, Zhang J, Wang XG, Ye J, Yao XL (2008). Broad-leaved Korean pine (*Pinus koraiensis*) mixed forest plot in Changbaishan (CBS) of China: community composition and structure. *Journal of Plant Ecology (Chinese Version)*, 32, 238-250. [郝占庆, 李步杭, 张健, 王绪高, 叶吉, 姚晓琳 (2008). 长白山阔叶红松林样地(CBS): 群落组成与结构. *植物生态学报*, 32, 238-250.]
- He FL, Legendre P, LaFrankie JV (1997). Distribution patterns of tree species in a Malaysian tropical rain forest. *Journal of Vegetation Science*, 8, 105-114.
- Holt RD, Grover J, Tilman D (1994). Simple rules for interspecific dominance in systems with exploitative and apparent competition. *The American Naturalist*, 144, 741-771.
- Hu YH, Sha LQ, Blanchet FG, Zhang JL, Tang Y, Lan GY, Cao M (2012). Dominant species and dispersal limitation regulate tree species distributions in a 20-ha plot in Xishuangbanna, Southwest China. *Oikos*, 121, 952-960.
- Huang H, Chen ZF, Liu DT, He GX, He RH, Li DZ, Xu K (2017). Species composition and community structure of the Yulongxueshan (Jade Dragon Snow Mountains) forest dynamics plot in the cold temperate spruce-fir forest, Southwest China. *Biodiversity Science*, 25, 255-264. [黄华, 陈智发, 刘德团, 和国星, 和荣华, 李德铤, 许琨 (2017). 玉龙雪山寒温性云冷杉林动态监测样地的物种组成及群落结构. *生物多样性*, 25, 255-264.]
- Hubbell SP, Foster RB (1986). *Commonness and Rarity in a Neotropical Forest, Implications for Tropical Trees Conservation*. Sinauer, Sunderland, UK.
- Janzen DH (1970). Herbivores and the number of tree species in tropical forests. *The American Naturalist*, 104, 501-528.
- Jiang YX (1963). Community characteristics and their classification principles of subalpine dark coniferous forest in western Sichuan. *Acta Phytocologica et Geobotanica Sinica*, 1, 42-50. [蒋有绪 (1963). 川西亚高山暗针叶林的群落特点及其分类原则. *植物生态学与地植物学丛刊*, 1, 42-50.]
- Jiang YX, Guo QS, Ma J (1998). *Taxonomy and Community*

- Characteristics of Forest Communities in China*. Science Press, Beijing. [蒋有绪, 郭泉水, 马娟 (1998). 中国森林群落分类及其群落学特征. 科学出版社, 北京.]
- Kang DW, Liu XM, Tan LY, Kang W (2010). Population structure of *Abies faxoniana* in Wanglang Nature Reserve, Sichuan. *Journal of Hebei Forestry Science*, (3), 15-17. [康东伟, 刘夏明, 谭留夷, 康文 (2010). 四川省王朗自然保护区岷江冷杉种群结构特征研究. 河北林业科技, (3), 15-17.]
- Kang YY, Li RS, Gao YL (2015). Spatial pattern of dominant and main companion tree species in an *Abies faxoniana* forest in Wanglang Nature Reserve. *Journal of West China Forestry Science*, 44(2), 48-53. [康瑶瑶, 李瑞生, 高永龙 (2015). 王朗自然保护区岷江冷杉林优势种与主要伴生种的空间格局. 西部林业科学, 44(2), 48-53.]
- Laura ED, Jane C, Forest I, Stephanie P, Steven DG, Peter BR (2019). When do ecosystem services depend on rare species? *Trends in Ecology & Evolution*, 34, 746-758.
- Larson AJ, Franklin JF (2010). The tree mortality regime in temperate old-growth coniferous forests: the role of physical damage. *Canadian Journal of Forest Research*, 40, 2091-2103.
- Li CB (1990). *Forest Ecology Research in Sichuan*. Sichuan Science and Technology Press, Chengdu. [李承彪 (1990). 四川森林生态研究. 四川科技出版社, 成都.]
- Li SZ (2018). *History of Wanglang: Wanglang National Nature Reserve in Sichuan (1965-2015)*. Sichuan Science and Technology Press, Chengdu. [李晟之 (2018). 王朗志: 四川王朗国家级自然保护区志(1965-2015). 四川科学技术出版社, 成都.]
- Liu HF, Li L, Sang WG (2011). Species composition and community structure of the Donglingshan forest dynamic plot in a warm temperate deciduous broad-leaved secondary forest, China. *Biodiversity Science*, 19, 232-242. [刘海丰, 李亮, 桑卫国 (2011). 东灵山暖温带落叶阔叶次生林动态监测样地: 物种组成与群落结构. 生物多样性, 19, 232-242.]
- Lutz JA, Larson AJ, Freund JA, Swanson ME, Bible KJ (2013). The importance of large-diameter trees to forest structural heterogeneity. *PLOS ONE*, 8, e82784. DOI: 10.1371/journal.pone.0082784.
- Lutz JA, Larson AJ, Swanson ME, Freund JA (2012). Ecological importance of large-diameter trees in a temperate mixed-conifer forest. *PLOS ONE*, 7, e36131. DOI: 10.1371/journal.pone.0036131.
- Lyons KG, Brigham CA, Traut BH, Schwartz MW (2005). Rare species and ecosystem functioning. *Conservation Biology*, 19, 1019-1024.
- Ma KP (2015). Biodiversity monitoring in China: from CForBio to Sino BON. *Biodiversity Science*, 23, 1-2. [马克平 (2015). 中国生物多样性监测网络建设: 从CForBio到Sino BON. 生物多样性, 23, 1-2.]
- Ma KP (2017). Forest dynamics plot is a crosscutting research platform for biodiversity science. *Biodiversity Science*, 25, 227-228. [马克平 (2017). 森林动态大样地是生物多样性科学综合研究平台. 生物多样性, 25, 227-228.]
- Marsh AS, Arnone III JA, Bormann BT, Gordon JC (2000). The role of *Equisetum* in nutrient cycling in an Alaskan shrub wetland. *Journal of Ecology*, 88, 999-1011.
- Mi XC, Swenson NG, Valencia R, Kress WJ, Erickson DL, Pérez ÁJ, Ren HB, Su SH, Gunatilleke N, Gunatilleke S, Hao ZQ, Ye WH, Cao M, Suresh HS, Dattaraja HS, et al. (2012). The contribution of rare species to community phylogenetic diversity across a global network of forest plots. *The American Naturalist*, 180, E17-E30.
- Potapov P, Hansen MC, Laestadius L, Turubanova S, Yaroshenko A, Thies C, Smith W, Zhuravleva I, Komarova A, Minnemeyer S, Esipova E (2017). The last frontiers of wilderness: tracking loss of intact forest landscapes from 2000 to 2013. *Science Advances*, 3, e1600821. DOI: 10.1126/sciadv.1600821.
- Qin YZ, Zhang JX, Liu JM, Liu MT, Wan D, Wu H, Zhou Y, Meng HJ, Xiao ZQ, Huang HD, Xu YZ, Lu ZJ, Qiao XJ, Jiang MX (2018). Community composition and spatial structure in the Badagongshan 25 ha Forest Dynamics Plot in Hunan Province. *Biodiversity Science*, 26, 1016-1022. [秦运芝, 张佳鑫, 刘检明, 刘梦婷, 万丹, 吴浩, 周阳, 孟红杰, 肖之强, 黄汉东, 徐耀粘, 卢志军, 乔秀娟, 江明喜 (2018). 湖南八大公山25 ha常绿落叶阔叶混交林动态监测样地群落组成与空间结构. 生物多样性, 26, 1016-1022.]
- Shen GZ, Li JQ, Jiang SW (2004). Structure and dynamics of subalpine forests in giant panda habitat. *Acta Ecologica Sinica*, 24, 1294-1299. [申国珍, 李俊清, 蒋仕伟 (2004). 大熊猫栖息地亚高山针叶林结构和动态特征. 生态学报, 24, 1294-1299.]
- Shen GZ, Li JQ, Ren YL, Ma YF (2002). Disturbances and subalpine forest structure in giant panda's habitat. *Journal of Beijing Forestry University*, 24(5), 115-119. [申国珍, 李俊清, 任艳林, 马宇飞 (2002). 大熊猫栖息地亚高山针叶林结构和干扰关系研究. 北京林业大学学报, 24(5), 115-119.]
- Shen L, Yang H, Kang XG, Yue G (2013). Effects of selective cutting intensity on spatial distribution pattern of natural spruce-fir forests. *Journal of Central South University of Forestry & Technology*, 33(1), 68-74. [沈林, 杨华, 亢新刚, 岳刚 (2013). 择伐强度对天然云冷杉林空间分布格局的影响. 中南林业科技大学学报, (1), 68-74.]
- Stoyan D, Stoyan H (1994). *Fractals, Random Shapes and Point Fields: Methods of Geometrical Statistics*. Wiley-Blackwell, Hoboken, USA.
- Tan LY, Zhao ZJ, Kang DW, Kang W, Li JQ (2011). A study on the relationship between the radial growth of *Picea purpurea* and the climatic factors in Wanglang National

- Nature Reserve. *Journal of Sichuan Agricultural University*, 29, 29-34. [谭留夷, 赵志江, 康东伟, 康文, 李俊清 (2011). 王朗自然保护区紫果云杉径向生长与气候因子的关系. *四川农业大学学报*, 29, 29-34.]
- Taylor AH, Huang JY, Zhou SQ (2004). Canopy tree development and undergrowth bamboo dynamics in old-growth *Abies-Betula* forests in southwestern China: a 12-year study. *Forest Ecology and Management*, 200, 347-360.
- Taylor AH, Jiang SW, Zhao LJ, Liang CP, Miao CJ, Huang JY (2006). Regeneration patterns and tree species coexistence in old-growth *Abies-Picea* forests in southwestern China. *Forest Ecology and Management*, 223, 303-317.
- Taylor AH, Qin ZS (1992). Tree regeneration after bamboo die-back in Chinese *Abies-Betula* forests. *Journal of Vegetation Science*, 3, 253-260.
- The Editorial Committee of Vegetation of China (1980). *Vegetation of China*. Science Press, Beijing. [中国植被编辑委员会 (1980). 中国植被. 科学出版社, 北京.]
- Wang YJ, Tao JP, Li Y, Yu XH, Xi Y (2007). Effects of *Fargesia nitida* on species diversity and trees regeneration in different forest cycles of subalpine forest in Wolong Nature Reserve. *Scientia Silvae Sinicae*, 43(2), 1-7. [王永健, 陶建平, 李媛, 余小红, 席一 (2007). 华西箭竹对卧龙亚高山森林不同演替阶段物种多样性与乔木更新的影响. *林业科学*, 43(2), 1-7.]
- Wu ZY, Zhou ZK, Li DZ, Peng H, Sun H (2003). The areal-types of the world families of seed plants. *Acta Botanica Yunnanica*, 25, 245-257. [吴征镒, 周浙昆, 李德铎, 彭华, 孙航 (2003). 世界种子植物科的分布区类型系统. *云南植物研究*, 25, 245-257.]
- Xie FL, Zhou Q, Shi H, Shu X, Zhang KR, Li T, Feng SY, Zhang QF, Dang HS (2019). Species composition and community characteristics of a 25 ha forest dynamics plot in deciduous broad-leaved forest, Qinling Mountains, north-central China. *Biodiversity Science*, 27, 439-448. [谢峰淋, 周全, 史航, 舒泉, 张克荣, 李涛, 冯水园, 张全发, 党海山 (2019). 秦岭落叶阔叶林25 ha森林动态监测样地物种组成与群落特征. *生物多样性*, 27, 439-448.]
- Ye WH, Cao HL, Huang ZL, Lian JY, Wang ZG, Li L, Wei SG, Wang ZM (2008). Community structure of a 20 hm² lower subtropical evergreen broadleaved forest plot in Dinghushan, China. *Journal of Plant Ecology (Chinese Version)*, 32, 274-286. [叶万辉, 曹洪麟, 黄忠良, 练琚愉, 王志高, 李林, 魏识广, 王章明 (2008). 鼎湖山南亚热带常绿阔叶林20公顷样地群落特征研究. *植物生态学报*, 32, 274-286.]
- Yuan RJ, Wang BR, Yang SH (2007). Comparative study on *Picea* and *Abies* in Hengduan mountainous areas. *Journal of West China Forestry Science*, 36(1), 16-21. [袁睿佳, 王宝荣, 杨树华 (2007). 横断山区云杉林与冷杉林的对比较研究. *西部林业科学*, 36(1), 16-21.]
- Zeng XW, Yu B, Wu J, Hong Y, Da L, Yang H (2014). Analysis of structure characteristics of main tree species in spruce-fir overcutting forest. *Forest Research*, 27, 481-486. [曾祥谓, 玉宝, 乌吉斯古楞, 红玉, 达楞巴雅尔, 杨浩 (2014). 云冷杉过伐林主要树种结构特征分析. *林业科学研究*, 27, 481-486.]
- Zhan XJ, Li M, Zhang ZJ, Goossens B, Chen YP, Wang HJ, Bruford MW, Wei FW (2006). Molecular censusing doubles giant panda population estimate in a key nature reserve. *Current Biology*, 16, 451-452.
- Zhao CM, Chen QH, Qiao YK, Pan KW (2004). Structure and spatial pattern of a natural *Abies faxoniana* population on the eastern edge of Qinghai-Tibetan Plateau. *Acta Phytocologica Sinica*, 28, 341-350. [赵常明, 陈庆恒, 乔永康, 潘开文 (2004). 青藏高原东缘岷江冷杉天然群落的种群结构和空间分布格局. *植物生态学报*, 28, 341-350.]
- Zhou ML, Zhang Q, Kang XG, Yang YJ, Wang QJ (2016). Dynamic response to selective cutting intensity on tree species structure and species diversity in a natural spruce-fir forest. *Plant Science Journal*, 34, 56-66. [周梦丽, 张青, 亢新刚, 杨英军, 王全军 (2016). 云冷杉天然林乔木树种组成及物种多样性对择伐强度的动态响应. *植物科学学报*, 34, 56-66.]
- Zhu Y, Zhao GF, Zhang LW, Shen GC, Mi XC, Ren HB, Yu MJ, Chen JH, Chen SW, Fang T, Ma KP (2008). Community composition and structure of Gutianshan forest dynamic plot in a mid-subtropical evergreen broad-leaved forest, East China. *Journal of Plant Ecology (Chinese Version)*, 32, 262-273. [祝燕, 赵谷风, 张俐文, 沈国春, 米湘成, 任海保, 于明坚, 陈建华, 陈声文, 方腾, 马克平 (2008). 古田山中亚热带常绿阔叶林动态监测样地——群落组成与结构. *植物生态学报*, 32, 262-273.]

责任编辑: 陈磊 编辑: 乔鲜果

附录I 王朗样地木本植物物种多度、胸高断面面积及重要值

Supplement I Abundance, basal area and important value of all woody species in Wanglang plot

<https://www.plant-ecology.com/fileup/1005-264X/PDF/cjpe.2022.0094-S1.pdf>

樊凡, 赵联军, 马添翼, 熊心雨, 张远彬, 申小莉, 李晟 (2022). 川西王朗亚高山暗针叶林 25.2 hm² 动态监测样地物种组成与群落结构特征. 植物生态学报, 46, 1005-1017. DOI: 10.17521/cjpe.2022.0094
Fan F, Zhao LJ, Ma TY, Xiong XY, Zhang YB, Shen XL, Li S (2022). Community composition and structure in a 25.2 hm² subalpine dark coniferous forest dynamics plot in Wanglang, Sichuan, China. *Chinese Journal of Plant Ecology*, 46, 1005-1017. DOI: 10.17521/cjpe.2022.0094
<http://www.plant-ecology.com/CN/10.17521/cjpe.2022.0094>

附录I 王朗样地木本植物物种多度、胸高断面积和重要值
Supplement I Abundance, basal area and important value of all woody species in Wanglang plot
<https://www.plant-ecology.com/fileup/1005-264X/PDF/cjpe.2022.0094-S1.pdf>

中文名 Chinese name	拉丁名 Scientific name	生活型 Life form	多度 Abundance	多度占比 Abundance (%)	分枝数 Number of stems	胸高断面积 Basal area (m ² ·hm ⁻²)	胸高断面积占比 Basal area (%)	重要值 Important value (%)
乔木 Tree								
岷江冷杉	<i>Abies fargesii</i> var. <i>faxoniana</i>	CT	9 440	16.69	213	20.91	55.22	26.03
紫果云杉	<i>Picea purpurea</i>	CT	1 645	2.91	42	9.41	24.84	10.69
方枝柏	<i>Juniperus saltuaria</i>	CT	816	1.44	85	0.66	1.75	1.64
川滇长尾槭	<i>Acer caudatum</i> var. <i>prattii</i>	DT	3 441	6.08	2 998	1.01	2.67	4.42
红桦	<i>Betula albosinensis</i>	DT	2 561	4.53	408	1.39	3.66	4.26
川西樱桃	<i>Prunus trichostoma</i>	DT	960	1.70	1 423	0.15	0.38	2.09
锐齿臭樱	<i>Maddenia incisoserrata</i>	DT	952	1.68	997	0.04	0.10	1.54
细齿稠李	<i>Padus obtusata</i>	DT	270	0.48	153	0.51	1.35	1.14
太白深灰槭	<i>Acer caesium</i> subsp. <i>giraldii</i>	DT	101	0.18	75	0.11	0.30	0.36
皂柳	<i>Salix wallichiana</i>	DT	104	0.18	102	0.06	0.17	0.31
刺柏	<i>Juniperus formosana</i>	CT	4	0.01	0	<0.01	<0.01	0.01
五尖槭	<i>Acer maximowiczii</i>	DT	2	<0.01	2	<0.01	<0.01	0.01
川杨	<i>Populus szechuanica</i>	DT	1	<0.01	1	<0.01	<0.01	<0.01
灌柳	<i>Salix rehderiana</i> var. <i>dolia</i>	DT	1	<0.01	0	<0.01	<0.01	<0.01
灌木 Shrub								
紫萼山梅花	<i>Philadelphus purpurascens</i>	DS	6 158	10.88	9 266	1.04	2.73	6.57
红脉忍冬	<i>Lonicera nervosa</i>	DS	6 334	11.20	4 880	0.24	0.63	6.03
冷地卫矛	<i>Euonymus frigidus</i>	DS	5 409	9.56	3 931	0.14	0.38	5.26
陕甘花楸	<i>Sorbus koehneana</i>	DS	2 670	4.72	7 312	0.99	2.60	4.40
华西忍冬	<i>Lonicera webbia</i>	DS	2 475	4.37	6 362	0.50	1.33	3.50
唐古特忍冬	<i>Lonicera tangutica</i>	DS	2 617	4.63	2 370	0.09	0.24	3.42

附录 I (续) Supplement I (Continued)								
中文名 Chinese name	拉丁名 Scientific name	生活型 Life form	多度 Abundance	多度占比 Abundance (%)	分枝数 Number of stems	胸高断面积 Basal area (m ² ·hm ⁻²)	胸高断面积占比 Basal area (%)	重要值 Important value (%)
华西蔷薇	<i>Rosa moyesii</i>	DS	1 560	2.76	3 686	0.15	0.40	2.77
细枝茶藨子	<i>Ribes tenue</i>	DS	1 819	3.22	2 563	0.05	0.12	2.67
峨眉蔷薇	<i>Rosa omeiensis</i>	DS	1 683	2.97	2 379	0.07	0.20	2.54
蓝果忍冬	<i>Lonicera caerulea</i>	DS	1 634	2.89	1 623	0.04	0.10	2.12
长叶毛花忍冬	<i>Lonicera trichosantha</i> var. <i>deflexicalyx</i>	DS	769	1.36	1 394	0.15	0.39	1.52
华西小檗	<i>Berberis silva-taroucana</i>	DS	559	0.99	1 229	0.03	0.08	1.22
高丛珍珠梅	<i>Sorbaria arborea</i>	DS	495	0.87	591	0.03	0.07	0.68
刚毛忍冬	<i>Lonicera hispida</i>	DS	210	0.37	294	0.01	0.03	0.54
红毛五加	<i>Eleutherococcus giraldii</i>	DS	190	0.34	137	<0.01	0.01	0.53
四川茶藨子	<i>Ribes setchuense</i>	DS	190	0.34	160	<0.01	0.01	0.48
山光杜鹃	<i>Rhododendron oreodoxa</i>	ES	176	0.31	209	0.02	0.05	0.41
灰栒子	<i>Cotoneaster acutifolius</i>	DS	70	0.12	170	<0.01	0.01	0.20
川滇绣线菊	<i>Spiraea schneideriana</i>	DS	42	0.07	24	<0.01	<0.01	0.11
紫花杜鹃	<i>Rhododendron amesiae</i>	ES*	48	0.08	68	0.01	0.01	0.10
无柄杜鹃	<i>Rhododendron watsonii</i>	ES	21	0.04	14	<0.01	<0.01	0.07
黄毛杜鹃	<i>Rhododendron rufum</i>	ES	18	0.03	15	<0.01	<0.01	0.06
长果茶藨子	<i>Ribes stenocarpum</i>	DS	16	0.03	53	<0.01	<0.01	0.04
银露梅	<i>Potentilla glabra</i>	DS	8	0.01	5	<0.01	<0.01	0.02
四川挂苦绣球	<i>Hydrangea xanthoneura</i>	DS	4	0.01	7	<0.01	<0.01	0.02
美容杜鹃	<i>Rhododendron calophytum</i>	ES	3	0.01	7	<0.01	<0.01	0.01
松潘小檗	<i>Berberis dictyoneura</i>	DS	4	0.01	10	<0.01	<0.01	0.01
陇蜀杜鹃	<i>Rhododendron przewalskii</i>	ES	2	<0.01	2	<0.01	<0.01	<0.01
南川绣线菊	<i>Spiraea rosthornii</i>	DS	1	<0.01	0	<0.01	<0.01	<0.01
木质藤本Vine								
猕猴桃藤山柳	<i>Clematoclethra scandens</i> subsp. <i>actinidioides</i>	V	741	1.31	487	0.06	0.16	1.38
薄叶铁线莲	<i>Clematis gracilifolia</i>	V	342	0.60	65	<0.01	0.01	0.78
须蕊铁线莲	<i>Clematis pogonandra</i>	V	8	0.01	2	<0.01	<0.01	0.03

CT, 针叶乔木; DS, 落叶灌木; DT, 落叶乔木; ES, 常绿灌木; V, 木质藤本。

CT, coniferous tree; DS, deciduous shrub; DT, deciduous tree; ES, evergreen shrub; V, woody vine.