



引用格式: 王定晖, 索南才让, 于红妍, 等. 祁连山国家公园青海片区森林大样地生物多样性特征[J]. 西北植物学报, 2024, 44(12): 1973-1979.
[WANG D H, SHONAN C R, YU H Y, et al. Biodiversity characteristics of large forest plots in Qinghai area of Qilian Mountain National Park[J]. *Acta Botanica Boreali-Occidentalia Sinica*, 2024, 44(12): 1973-1979.] DOI: 10.7606/j.issn.1000-4025.20240336

祁连山国家公园青海片区森林 大样地生物多样性特征

王定晖¹, 索南才让², 于红妍³, 杜岩功^{4*}

(1 青海省环境工程技术评估中心, 西宁 810008; 2 青海省饲草料技术推广站, 西宁 810007; 3 祁连山国家公园青海服务保障中心, 西宁 810056; 4 中国科学院 西北高原生物研究所, 西宁 810001)

摘要 【目的】通过监测森林大样地植物群落特征的长期动态变化, 揭示物种多样性空间格局及维持机制, 为该区域的生物多样性保护提供科学依据。【方法】以祁连山区青海云杉林生态系统为研究对象, 采用相邻格子法进行大样地乔木植株每木调查, 并解析其生物多样性调控因素。【结果】青海云杉林生态系统的乔木总数为 35 835 株, 青海云杉和祁连圆柏分别占据 57.84% 和 23.82%。物种丰富度和平均株高分别为 3 种和 10.7 m。Shannon-Wiener 指数和 Simpson 指数分别为 0.74 和 0.43, Shannon-Wiener 指数偏低, 但 Simpson 指数较高, 存在物种数量集中度较高现象。森林大样地 Shannon-Wiener 受乔木高度、物种丰富度和 Simpson 指数的极显著影响。机器学习模型训练集和测试集的决定系数分别为 0.95 和 0.93, 均方根误差分别为 0.06 和 0.08, 表明模型对 Shannon-Wiener 指数的解释能力和预测精度均较高。【结论】青海云杉林物种多样性较低且受乔木高度、物种丰富度和 Simpson 指数的显著影响, 其对维持该区域的生物多样性具有重要作用。

关键词 祁连山南坡; 森林大样地; 青海云杉林; 物种丰富度; Shannon-Wiener 指数

中图分类号 Q948.1; S718.5 **文献标志码** A

Biodiversity characteristics of large forest plots in Qinghai area of Qilian Mountain National Park

WANG Dinghui¹, SUONAN Cairang², YU Hongyan³, DU Yangong^{4*}

(1 Qinghai Provincial Environmental Engineering Technology Assessment Center, Xining 810008, China; 2 Qinghai Province Forage Technology Promotion Station, Xining 810007, China; 3 Qinghai Service Guarantee Center of Qilian Mountain National Park, Xining 810056, China; 4 Northwest Institute of Plateau Biology, Chinese Academy of Sciences, Xining 810001, China)

Abstract [Objective] Long-term monitoring of plant community dynamics in large forest plots helps reveal the spatial patterns and underlying mechanisms that sustain species diversity. These insights form a solid scientific foundation for biodiversity conservation in the region. [Methods] Taking the typical forest ecosystem as the research object in the Qinghai area of Qilian Mountain National Park, we used the adjacent grid method to conduct a survey of each tree in a 24 hm² large sample plot. [Results] There was a total of 35 835 trees, of which *Picea crassifolia* and *Juniperus przewalskii* accounted for 57.84% and 23.82%, respectively. Species richness and plant height were 3 species and 10.7 m, respectively. Shannon-Wiener and Simpson index of spruce forest were 0.74 and 0.43, respectively, Shannon-Wiener index was relatively low. The Shannon-Wiener index was significantly influenced by tree height, species rich-

收稿日期: 2024-06-10; 修改稿收到日期: 2024-07-12

基金项目: 国家自然科学基金联合基金项目(U21A20186); 祁连山国家公园青海片区森林生态系统监测大样地建设项目

作者简介: 王定晖(1975—), 女, 高级工程师, 主要从事自然保护地生物多样性研究。E-mail: 403672585@qq.com

* 通信作者: 杜岩功, 博士, 研究员, 主要从事陆地生态系统碳氮循环研究。E-mail: ygdu@nwipb.cas.cn

ness, and Simpson index. As the tree height increased, the Shannon-Wiener was decreased, while the species richness and Simpson index were increased significantly. The coefficients of determination for the training and testing sets of the machine learning model were 0.95 and 0.93, respectively, with root mean square errors of only 0.06 and 0.08. This indicated that the model had a high explanatory power and prediction accuracy for the Shannon-Wiener data. [Conclusion] The species diversity of the Qinghai spruce forest is relatively low and is significantly influenced by tree height, species richness, and the Simpson index. These factors play a crucial role in maintaining the biodiversity of the region.

Key words Southern slope of Qilian Mountains; forest large sample plots; Qinghai spruce forest; species richness; Shannon-Wiener index

生物多样性是森林生态系统多功能性的关键因素,其对维持生态系统的健康和稳定至关重要^[1]。然而,受到气候变暖和人类活动的影响,生物多样性正面临前所未有的威胁^[2]。大型森林动态监测样地是研究群落尺度森林动态变化的最优途径之一,阐明森林大样地生物多样性特征和影响因素有助于解析群落的动态变化过程,提升森林生态系统功能。

森林是最具生物多样性的陆地生态系统,多样性监测是林业资源管理的重要基础^[3],中国已先后建立了浙江古田山常绿阔叶林永久样地等 24 个大样地^[4],覆盖了中国从热带到寒温带的森林类型,已有研究表明热带和亚热带森林生态系统物种多样性明显高于寒温带与温带森林,海南尖峰岭自然保护区 60 hm² 大样地内共记录到 290 种,439 676 株木本植物^[5]。云南哀牢山常绿阔叶林 20 hm² 动态样地乔木 44 168 株,隶属 36 科 63 属 104 种^[6]。浙江古田山亚热带常绿阔叶林 24 hm² 动态样地共计 159 物种,总个体数 140 700 株^[6]。长白山阔叶红松林 25 hm² 大样地乔木植物 51 种 59 158 株^[7]。不同研究区域森林大样地乔木丰富度存在较强异质性,中国森林生物多样性监测网络样地总面积达到 578.6 hm²,标记木本植物 1 827 种 244.89 万株^[8]。阐明森林大样地生物多样性特征,可为森林生态系统生物多样性维持机理研究提供科学依据。

多样性高的森林生态系统资源利用效率高^[9],亚热带森林生产力的年际变化缓冲了干旱导致的群落生产力下降趋势^[1]。地形异质性对云南普洱大样地物种多样性维持的贡献率约 7.8%^[10]。在区域尺度,物种多样性普遍随海拔的升高而下降^[10]。生态位比较分析结果显示濒危冷杉分布区的年平均气温显著高于非濒危冷杉物种^[11]。树高是引起黑龙江太平沟国家级自然保护区云冷杉红松林多样性变化的显著因素^[12]。生物多样性损失通常降低群落稳定性,并增加群落在受到干扰后的恢复时间^[13]。有研究报道了浙江古田山等森林大样地乔木丰富度等多样性特征、主要的影响因素,但尚缺乏针对祁连山寒温性针叶林生态系统森林大样

地生物多样性特征及调控机理方面的研究工作。

青海云杉林主要分布于祁连山系,祁连山区是中国西北重要的生态安全屏障,是河西内陆河流域及黄河上游重要水源地,也是中国生物多样性保护优先区域^[14]。本研究基于 24 hm² 森林动态监测大样地数据,聚焦祁连山区青海云杉林森林大样地生物多样性特征,阐明祁连山区南坡典型森林系统多样性特征及主要影响因素,为森林生物多样性保护管理等提供基础数据和理论参考依据。

1 材料和方法

1.1 研究区概况

研究区域位于青海省门源县珠固乡,祁连山国家公园青海片区内(102°22'E,37°08'N),海拔 2 523 m,具有独特的地理位置和生态环境。祁连山国家公园青海片区现有林地面积 15.24 万 hm²,寺沟森林管护站辖区面积 3.2 万 hm²。山地生境呈规律性梯度分布,植被类型垂直分布的分异性明显。管护站隶属高原大陆性气候,研究区域年平均气温为-0.1℃,降雨量为 390.9 mm,太阳辐射强、日温差较大、冷季长热季短,雨热同季。土壤类型为森林灰褐土,有机碳含量为 65.19 g/kg,土层相对较薄约 50 cm,成土母质是砾岩与紫色沙页岩等。

选择青海云杉林作为研究对象,该林区是祁连山系中典型的寒温性针叶林,对于理解该区域的生物多样性具有重要意义。设置 24 hm² 森林动态监测大样地,面积 400 m×600 m。采用相邻格子法,在监测大样地的样方内设置 20 m×20 m,共计 600 个样方,并布设永久标桩。

研究区主要植被以青海云杉林为代表的寒温性针叶林,是中国祁连山区主要的乔木建群种。森林植被类型中天然林植被主要包括青海云杉(*Picea crassifolia*)、祁连圆柏(*Sabina przewalskii*)、白桦(*Betula platyphylla*)、山杨(*Populus davidiana*)等,林龄约 70 年。

1.2 主要研究方法

2022 年 8 月,针对样地内胸径>1 cm 的乔木树种进行物种鉴定和编号,选择在同一方向采用铝钉固定挂牌,于高度 1.3 m 的胸径处漆上红漆。测量记录乔木树种、树高等。依据野外调查获取到的乔木植物的物种数量,选取常用的香农指数、Simpson 指数和物种丰富度来表征物种多样性。Shannon-Wiener 指数(H)计算公式为:

$$H=-\sum_{i=1}^S(P_i)(\ln P_i)$$

(1)

式中: P_i 为样本中属于第 i 种个体的比例(N_i/N); N 为样本总个体数; N_i 为第 i 种个体数; S 为样方的物种总数。

Simpson 多样性指数(D),亦称优势度指数,主要通过分析同种群的个体数来反映种类丰富度的大小,该指数值在 0~1 之间,值越大表示物种鉴别度越低、物种数量集中度越高。

$$D=1-\sum_{i=1}^SP_i^2$$

(2)

物种丰富度指数(R): $R=S$

(3)

1.3 数据处理与统计分析

用 Excel 统计分析 600 个样方乔木调查数据,青海云杉林 Shannon-Wiener 指数、物种丰富度、树高及 Simpson 指数耦合关系用线性回归分析(R 语言)。祁连山森林大样地物种丰富度、树高、生物多样性指数特征及其与物种丰富度和高度间关系图,用 Sigmaplot 12.0 制作。

用 Python 的 pandas 库读取包含物种丰富度、Simpson 指数、树高作为特征变量(x),提取 Shannon-Wiener 指数作为目标变量(y),且使用 StandardScaler 对特征变量进行标准化处理,使得每个特征具有零均值和单位方差,有效提高模型的稳定性和精确度。评估模型的泛化能力,将数据集划分为训练集和测试集,比例为 80%和 20%,测试集用于模型的性能评估。基于支持向量机回归(support vector regression)进行模型训练。采用 5 折交叉验证,循环 5 次,确保每个子集都被验证过 1 次。分别

计算训练集和测试集的均方根误差(root mean square error, RMSE)和决定系数。

2 结果与分析

2.1 祁连山国家公园青海片区寺沟森林大样地乔木物种丰富度特征

在祁连山国家公园青海片区寺沟森林大样地,共记录到乔木 5 科 6 属 7 种,其中优势树种为青海云杉和祁连圆柏。青海云杉林物种丰富度相对偏低,乔木物种丰富度介于 1~7 种之间,平均物种丰富度为 3 种(图 1)。森林大样地乔木共计 35 835 株,其中青海云杉和祁连圆柏分别为 20 726,8 535 株,占总株数的 57.84%和 23.82%;红桦(*Betula albosinensis*)、白桦和山杨分别为 4 233,1 032,994 株,占总株数的 11.81%、2.88%和 2.77%(表 1)。

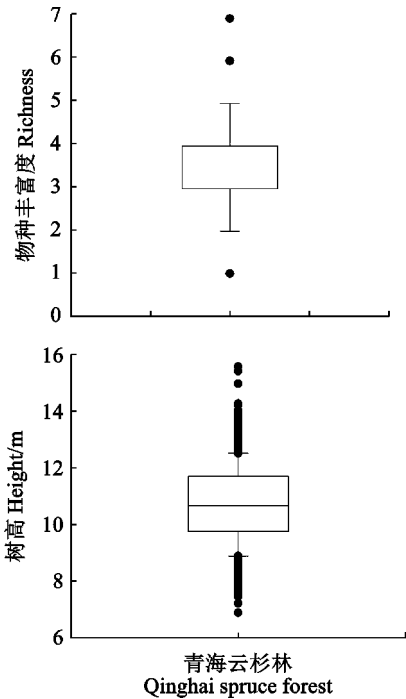


图 1 青海云杉林生态系统物种丰富度和株高特征

Fig. 1 Species richness and tree height characteristics of the Qinghai spruce forest ecosystem

表 1 祁连山国家公园青海片区寺沟森林大样地乔木株树特征

Table 1 Characteristics of arboreal trees in the large sample plot in Sigou forest in Qinghai area of the Qilian Mountain National Park

项目 Item	青海云杉 <i>P. crassifolia</i>	祁连圆柏 <i>S. przewalskii</i>	红桦 <i>B. albosinensis</i>	白桦 <i>B. platyphylla</i>	山杨 <i>P. davidiana</i>	花楸 <i>S. pohuashanensis</i>	乌柳 <i>S. cheilophila</i>	合计 Total
数量 Quantity	20 726	8 535	4 233	1 032	994	158	157	35 835
占比 Ratio/%	57.84	23.82	11.81	2.88	2.77	0.44	0.44	100.00

花楸 (*Sorbus pohuashanensis*) 和乌柳 (*Salix cheilophila*) 依次为 157, 158 株。将青海云杉和祁连圆柏归为针叶树木, 共计 29 261 株, 占总株数的 81.65%。红桦、白桦、山杨、乌柳、花楸归为阔叶树木, 共计 6 574 株, 占总株数的 18.35%。

2.2 祁连山国家公园寺沟森林大样地乔木高度对比分析

祁连山国家公园寺沟森林大样地乔木平均株高 (h) 约为 (10.7 ± 6.52) m (图 1), 其中 $0 < h \leq 10$ m 乔木有 19 913 株, 占总株数的 55.57%。 $10 \text{ m} < h \leq 20$ m 乔木有 11 672 株, 占总株数的 32.57%。 $h > 20$ m 乔木有 4 250 株 (表 2), 占总株数的 11.86%。祁连山南坡森林大样地乔木高度相对偏低, 低于 20 m 植株占比约为 88.14%。

2.3 祁连山国家公园青海片区寺沟森林生物多样性指数影响因素解析及机器学习模型模拟

祁连山国家公园青海片区典型青海云杉林 Shannon-Wiener 指数和 Simpson 指数分别为 0.74 ± 0.29 和 0.43 ± 0.17 (图 2), Shannon-Wiener 指数相对偏低。Simpson 指数相对较高, 物种的鉴别程度偏低、物种数量集中度高。青海云杉林生物多样性受乔木高度、物种丰富度和 Simpson 指数影响, 决定系数 R^2 分别为 0.230, 0.508 和 0.924, 且均达到极显著水平 ($P < 0.001$)。

Shannon-Wiener 指数受到物种丰富度和 Simpson 指数的正向调控影响, 物种丰富度和均匀度指数增加均显著提高青海云杉林生物多样性。但随树高增加 Shannon-Wiener 指数逐渐降低 (图 3)。

表 2 祁连山国家公园青海片区寺沟分类树种树高

种类 Tree species	$0 < h \leq 10$ m	$10 \text{ m} < h \leq 20$ m	$h > 20$ m
青海云杉 <i>P. crassifolia</i>	8 646	7 926	4 154
祁连圆柏 <i>S. przewalskii</i>	7 413	1 059	63
红桦 <i>B. albosinensis</i>	2 536	1 676	21
白桦 <i>B. platyphylla</i>	490	534	8
山杨 <i>P. davidiana</i>	514	476	4
花楸 <i>S. pohuashanensis</i>	158	—	—
乌柳 <i>S. cheilophila</i>	156	1	—
合计 Total	19 913	11 672	4 250

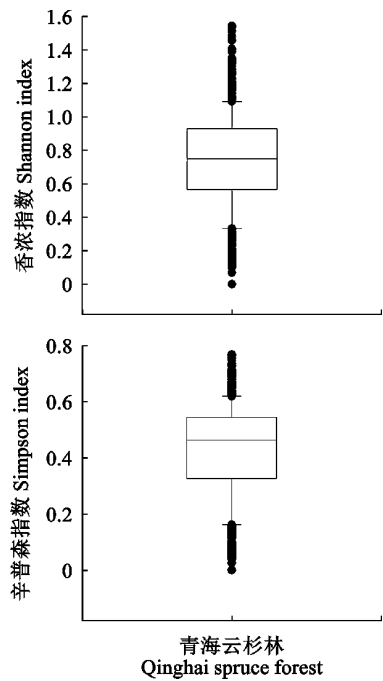


图 2 青海云杉林 Shannon-Wiener 指数和 Simpson 指数特征
Fig. 2 Shannon index and Simpson index characteristics of the Qinghai Spruce Forest

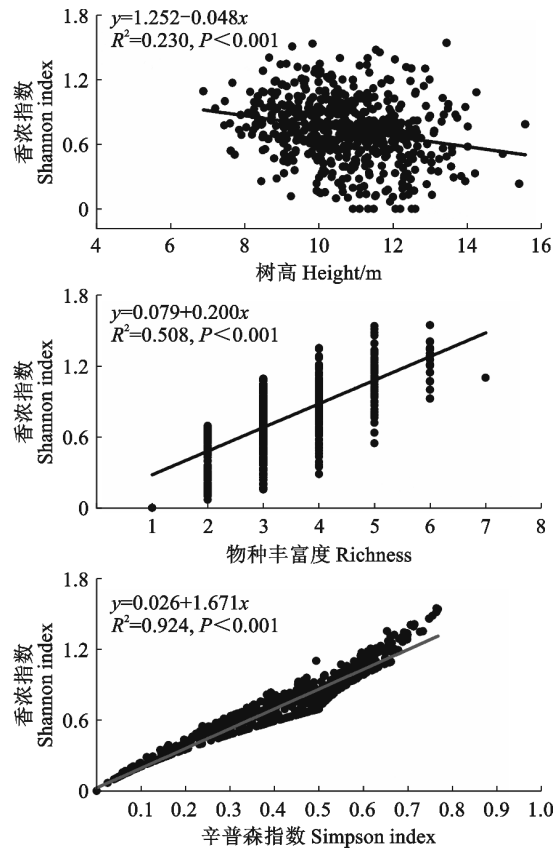


图 3 青海云杉林 Shannon-Wiener 指数与树高、物种丰富度和 Simpson 指数耦合关系
Fig. 3 Coupling relationship between the Shannon-Wiener index and tree height, species richness, and Simpson index in the Qinghai Spruce Forest

构建的机器学习模型在训练集和测试集上的表现效果很好(图 4),训练集和测试集的決定系数分别为 0.95 和 0.93,表明模型对数据的解释能力较强,可以有效拟合 Simpson 指数、丰富度和树高等

特征变量与目标变量 Shannon-Wiener 指数之间的关系。均方根误差(RMSE)仅为 0.06 和 0.08,表明模型预测值与真实值之间的平均误差较低,模型预测精度越高。

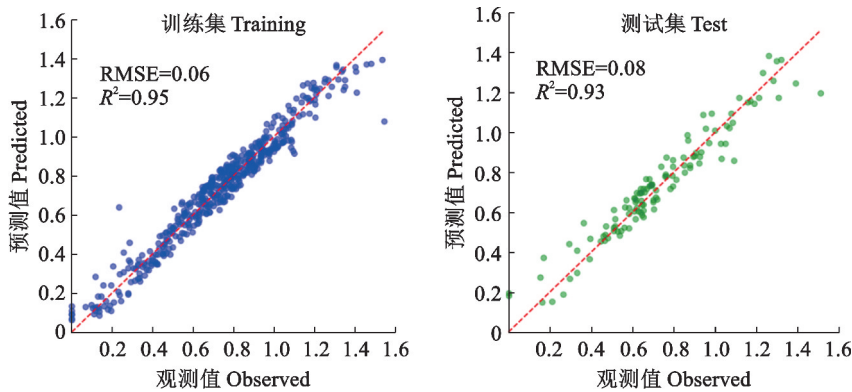


图 4 机器学习模型对青海云杉林 Shannon-Wiener 指数的训练和模拟结果
Fig. 4 Training and simulation results of Shannon-Wiener of *Picea crassifolia* forests in Qinghai based on machine learning model

3 讨论

生境的多样性导致森林群落物种组成的显著异质性,这种异质性通过资源的互补作用,对树木生长和生物多样性的维持具有重要影响^[15]。全球增温引起干旱加剧,严重威胁森林生长和生存^[16]。竞争力较强物种通过互补资源利用或促进作用提高森林生产力,增产效应最终可以增加群落的稳定性^[7]。生物多样性保险假说认为:生物多样性越高生态系统功能越稳定^[17]。多样性研究不仅有助于深入了解生态系统稳定运转机制,且为揭示全球气候变化对植物多样性的影响提供研究思路。

大型森林动态样地代表性强,监测的样本量大,已成为回答群落生态学问题的重要科研平台^[18]。本研究发现祁连山国家公园青海片区寺沟 24 hm² 森林大样地,胸径>1.0 cm 乔木 35 835 株,隶属 5 科 6 属 7 种。已有研究发现云南普洱 30 hm² 森林动态监测样地,木本植物个体 153 418 株 271 种^[10]。湖北木林子自然保护区 15 hm² 森林动态监测样地木本植物 84 189 株 228 种^[19]。黑龙江太平沟国家级自然保护区云冷杉红松林物种数仅为 14 种^[12]。祁连山北坡青海云杉林更新苗密度的均值为 11 470 株/hm²,空间分布格局趋向斑块性聚集分布^[20]。不同样地间优势种、群落组成与森林结构存在明显差异^[8]。扩散限制可通过降低局域尺度的遗传多样性提高负密度制约强度^[18]。

祁连山区物种丰富度和木本植物株数均明显低于热带和亚热带区域森林大样地。这可能是因为祁连山区位于高寒地区,气候条件较为严酷,年平均气温较低,同时降雨量偏低,因此气候条件不利于植物的生长和繁殖,导致物种丰富度较低。该区域海拔较高,生态环境独特,植被类型呈垂直分布,这种环境异质性虽然能够支持一些特有物种,但总体上限制了更多物种的适应和生存。此外,祁连山区的土壤类型为森林灰褐土,土层相对较薄,有机质含量较低,土壤条件对植物的生长也存在限制,导致了其当前较低的物种丰富度和植物株数。这些原因需要在未来的研究中进一步探讨,以制定更加有效的保护和管理策略,提升该区域的生物多样性。

生物多样性时空格局及其驱动机制是生物多样性保护研究的重要基础,森林生物多样性是世界生物多样性保护的关键,中国森林类型多样且树种资源丰富,现有乔木树种 2 000 余种^[21]。物种丰富的森林(如湿润的热带阔叶林)抗旱性最高,平均树种数为 65,物种贫乏的森林(如干旱林地和地中海森林,平均树种数为 2)抗旱性最低^[22]。与较低的植物物种数量相比,高物种数量可以更大程度地抵消干旱效应^[17]。年均气温是乔木物种丰富度的主要预测因子,这与生物多样性代谢理论^[23]最相符。本研究区域多年平均气温和年降雨量分别介于(−2.3)~2.2℃和 277.4~504.5 mm 之间,气温较低和干旱均可能是物种丰富度相对偏低的重要原因。

近年来中国森林生态系统多样性指数呈上升趋势,年均增长 3.27%^[21]。香农指数和 Simpson 指数是 2 个重要的生物多样性指数,已有研究发现浙江古田山常绿阔叶林物种 Shannon-Wiener 指数和 Simpson 指数分别为 2.50 和 0.13^[4]。云南哀牢山常绿阔叶林 Shannon-Wiener 指数和 Simpson 指数分别约为 3.32 和 0.72^[5]。黑龙江太平沟国家级自然保护区云冷杉、红松林 Shannon-Wiener 指数与 Simpson 指数分别为 0.90 和 0.46^[12]。本研究结果表明,祁连山区国家公园青海片区寺沟森林站青海云杉林 Shannon-Wiener 指数和 Simpson 指数分别为 0.74±0.29 和 0.43±0.17。与上述研究进行对比分析发现青海云杉林 Shannon-Wiener 指数明显低于常绿阔叶林,略低于黑龙江云冷杉、红松林。但 Simpson 指数相对较高,表明该区域物种数量集中度高。

气候变化、森林片段化和退化导致森林生物多样性下降、改变森林群落组成并使其趋向同质化^[18]。多样性通过异步性和耐旱多样性促进森林稳定性,随物种丰富度的增加,江西新岗山亚热带森林群落生产力的稳定性显著提高^[1]。排序分析得出坡度、树高是引起森林多样性变化的显著因素^[12]。不同于干旱敏感型的树种混合种植,可以缓解干旱胁迫

和促进生长,是森林生物多样性促进水分利用策略的生态位分化机制^[24]。与其他生境聚集过程相比,生境异质性对森林生态系统物种空间分布的影响较大^[25]。生境过滤是驱动寒温带兴安落叶松林群落构建的关键因子^[26]。冠层结构多样性对生产力存在负效应,可能源于上层和下层树冠对光资源的不对称竞争^[27]。热带地区更稳定的气候条件和生产力促进物种产生生境专一性及利用资源的能力,降低稀有种局部灭绝的风险^[28]。

4 结 论

(1)祁连山国家公园青海片区森林大样地共有 35 835 株乔木,其中青海云杉和祁连圆柏分别占 57.84%和 23.82%,在树种组成方面占据主导地位。

(2)研究区域内 Shannon-Wiener 指数为 0.74, Simpson 指数表明物种数量集中度较高。Shannon-Wiener 指数受乔木高度、物种丰富度和 Simpson 指数的极显著影响;随树高增加,Shannon-Wiener 指数逐渐降低,而物种丰富度和 Simpson 指数显著增加。

(3)采用支持向量机回归方法构建的机器学习模型在解释和预测 Shannon-Wiener 指数数据方面表现出高精度。研究建议通过增加物种丰富度和改善森林结构来提升生态系统的稳定性和抗逆性。

参考文献:

[1] 卢子欣,卢晓琳,余鸿君,等. 喜马拉雅山脉种子植物多样性特征及分布格局[J]. 西北植物学报, 2023, 43(4): 698-707.
LU Z X, LU X L, YU H J, *et al.* Diversity characteristics and distribution patterns of seed plants in the Himalaya[J]. *Acta Botanica Boreali-Occidentalia Sinica*, 2023, 43(4): 698-707.

[2] 尚帅斌,范琳,刘楠,等. 昆仑山国家公园青海片区评估区种子植物区系研究[J]. 西北植物学报, 2024, 44(3): 491-501.
SHANG S B, FAN L, LIU N, *et al.* Flora of seed plants in Qinghai Area of the Kunlun Mountain National Park[J]. *Acta Botanica Boreali-Occidentalia Sinica*, 2024, 44(3): 491-501.

[3] 唐欣,刘世荣,许涵,等. 海南尖峰岭热带山地雨林 60 hm² 动态监测样地土壤微生物物种估算[J]. 林业科学, 2019, 55(12): 84-92.
TANG X, LIU S R, XU H, *et al.* Estimation of soil microbial species in a 60 hm² dynamic monitoring plot of tropical mountain rain forest in Jianfengling, Hainan, China[J]. *Scientia Silvae Sinicae*, 2019, 55(12): 84-92.

[4] 金毅,陈建华,米湘成,等. 古田山 24 hm² 森林动态监测样地常绿阔叶林群落结构和组成动态: 探讨 2008 年冰雪灾害的影响[J]. 生物多样性, 2015, 23(5): 610-618.
JIN Y, CHEN J H, MI X C, *et al.* Impacts of the 2008 ice

storm on structure and composition of an evergreen broad-leaved forest community in Eastern China[J]. *Biodiversity Science*, 2015, 23(5): 610-618.

[5] 温韩东,林露湘,杨洁,等. 云南哀牢山中山湿性常绿阔叶林 20 hm² 动态样地的物种组成与群落结构[J]. 植物生态学报, 2018, 42(4): 419-429.
WEN H D, LIN L X, YANG J, *et al.* Species composition and community structure of a 20 hm² plot of mid-mountain moist evergreen broad-leaved forest on the Mts. Ailaoshan, Yunnan Province, China[J]. *Chinese Journal of Plant Ecology*, 2018, 42(4): 419-429.

[6] 王宁宁,米湘成,童光蓉,等. 2018 年浙江古田山 24 hm² 亚热带常绿阔叶林动态监测样地林冠结构与地形数据集[J]. 中国科学数据, 2024, 9(1): 190-201.
WANG N N, MI X C, TONG G R, *et al.* The canopy structure and topography dataset of Zhejiang Gutianshan 24-hectare subtropical evergreen broad-leaved forest dynamic plot in 2018 [J]. *China Scientific Data*, 2024, 9(1): 190-201.

[7] 肖欢,叶尔江·拜克吐尔汗,张春雨,等. 长白山阔叶红松林林层群落结构与生产力的关系[J]. 林业科学, 2024, 60(3): 57-64.
XIAO H, Baiketuerhan Yeerjiang, ZHANG C Y, *et al.* Relationship between forest layer community structure and produc-

tivity of broad-leaved Korean pine forest in Changbai Mountain [J]. *Scientia Silvae Sinicae*, 2024, 60(3): 57-64.

[8] 马克平, 徐学红. 中国森林生物多样性监测网络有力支撑生物群落维持机制研究[J]. *中国科学: 生命科学*, 2020, 50(4): 359-361.

MA K P, XU X H. Chinese forest biodiversity monitoring network well developed for community assembly studies[J]. *Scientia Sinica (Vitae)*, 2020, 50(4): 359-361.

[9] YAN P, FERNÁNDEZ-MARTÍNEZ M, VAN MEERBEEK K, *et al.* The essential role of biodiversity in the key axes of ecosystem function[J]. *Global Change Biology*, 2023, 29(16): 4569-4585.

[10] 王艳红, 李帅锋, 郎学东, 等. 地形异质性对云南普洱季风常绿阔叶林物种多样性的影响[J]. *植物生态学报*, 2020, 44(10): 1015-1027.

WANG Y H, LI S F, LANG X D, *et al.* Effects of topographic heterogeneity on species diversity in a monsoon evergreen broadleaved forest in Pu'er, Yunnan, China[J]. *Chinese Journal of Plant Ecology*, 2020, 44(10): 1015-1027.

[11] 杨玲, 梁思琪, 潘佳明, 等. 濒危植物百山祖冷杉和资源冷杉的物种划分及其遗传资源的保护[J]. *植物生态学报*, 2023, 47(12): 1629-1645.

YANG L, LIANG S Q, PAN J M, *et al.* Species delimitation and genetic conservation of the endangered firs *Abies beshanzenensis* and *A. ziyuanensis* [J]. *Chinese Journal of Plant Ecology*, 2023, 47(12): 1629-1645.

[12] 韩铭, 李华, 蔡体久. 黑龙江太平沟国家级自然保护区森林群落植物多样性特征[J]. *森林工程*, 2023, 39(5): 40-47.

HAN M, LI H, CAI T J. Plant diversity of forest community in Taipinggou National Nature Reserve, Heilongjiang Province[J]. *Forest Engineering*, 2023, 39(5): 40-47.

[13] HATTON I A, MAZZARISI O, ALTIERI A, *et al.* Diversity begets stability: Sublinear growth and competitive coexistence across ecosystems[J]. *Science*, 2024, 383(6688): eadg8488.

[14] 马剑, 刘贤德, 金铭, 等. 祁连山 5 种典型灌丛土壤生态化学计量特征[J]. *西北植物学报*, 2021, 41(8): 1391-1400.

MA J, LIU X D, JIN M, *et al.* Soil ecological stoichiometry of five typical shrubs in Qilian Mountain[J]. *Acta Botanica Boreali-Occidentalia Sinica*, 2021, 41(8): 1391-1400.

[15] ZHANG H T, OVASKAINEN O, CHI X L, *et al.* Spatio-temporal variation in the negative effect of neighbourhood crowding on stem growth[J]. *Journal of Ecology*, 2024, 112(5): 1140-1149.

[16] 王川, 王丽莎, 张勇勇, 等. 2000—2020 年祁连山植被净初级生产力时空变化及其驱动因素[J]. *生态学报*, 2023, 43(23): 9710-9720.

WANG C, WANG L S, ZHANG Y Y, *et al.* Spatiotemporal change and driving factors of net primary productivity in Qilian Mountains from 2000 to 2020[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2023, 43(23): 9710-9720.

[17] LUAN J W, LI S Y, LIU S R, *et al.* Biodiversity mitigates drought effects in the decomposer system across biomes[J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2024, 121(13): e2313334121.

[18] 徐学红, 王巍伟, 米湘成, 等. 中国森林生物多样性监测网络(CForBio): 20 年进展与展望[J]. *生物多样性*, 2023, 31(12): 132-146.

XU X H, WANG W W, MI X C, *et al.* The Chinese forest biodiversity monitoring network: 20-year achievements and outlook[J]. *Biodiversity Science*, 2023, 31(12): 132-146.

[19] 姚兰, 崔国发, 易咏梅, 等. 湖北木林子保护区大样地的木本植物多样性[J]. *林业科学*, 2016, 52(1): 1-9.

YAO L, CUI G F, YI Y M, *et al.* Species diversity of woody plants in Mulinzi Nature Reserve of Hubei Province[J]. *Scientia Silvae Sinicae*, 2016, 52(1): 1-9.

[20] 薛春, 许尔文, 赵维俊, 等. 祁连山青海云杉林动态监测大样地林分断面积对其天然更新的影响研究[J]. *农业与技术*, 2023, 43(23): 55-57.

XUE C, XU E W, ZHAO W J, *et al.* Dynamic monitoring of *Picea crassifolia* forest in Qilian Mountains study on the influence of forest breaking area on its natural regeneration in large sample plots[J]. *Agriculture and Technology*, 2023, 43(23): 55-57.

[21] 张颖. 基于森林资源清查的中国森林生物多样性变化状态的评价分析[J]. *环境保护*, 2021, 49(21): 22-25.

ZHANG Y. Assessment and analysis of the change status of forest biodiversity in China based on forest inventory[J]. *Environmental Protection*, 2021, 49(21): 22-25.

[22] LIU D, WANG T, PEÑUELAS J, *et al.* Drought resistance enhanced by tree species diversity in global forests[J]. *Nature Geoscience*, 2022, 15: 800-804.

[23] LIANG J J, GAMARRA J G P, PICARD N, *et al.* Co-limitation towards lower latitudes shapes global forest diversity gradients[J]. *Nature Ecology & Evolution*, 2022, 6(10): 1423-1437.

[24] ZHANG H T, GHEYRET G, BAI Y H, *et al.* Functional dissimilarity in mixed forests promotes stem radial growth by mitigating tree water deficit[J]. *National Science Review*, 2023, 11(3): nwd320.

[25] SHEN G C, HE F L, WAAGEPETERSEN R, *et al.* Quantifying effects of habitat heterogeneity and other clustering processes on spatial distributions of tree species[J]. *Ecology*, 2013, 94(11): 2436-2443.

[26] 朱道光, 徐学红, 杨立宾, 等. 寒温带落叶松林优势乔木叶和茎及根的性状特征[J]. *中国科学: 生命科学*, 2020, 50(4): 398-405.

ZHU D G, XU X H, YANG L B, *et al.* Characteristics of leaves, stems and roots of dominant trees in *Larix gmelinii* forest in the cold temperate zone[J]. *Scientia Sinica (Vitae)*, 2020, 50(4): 398-405.

[27] YI X X, WANG N N, REN H, *et al.* From canopy complementarity to asymmetric competition: The negative relationship between structural diversity and productivity during succession[J]. *Journal of Ecology*, 2021, 110: 457-465.

[28] CAO K, CONDIT R, MI X C, *et al.* Species packing and the latitudinal gradient in beta-diversity[J]. *Proceedings Biological Sciences*, 2021, 288(1948): 20203045.