

DOI: 10.20103/j.stxb.202407121630

刘海珠, 周金星, 陆子淳, 董亮, 杨涛, 丁亚丽. 贺兰山东坡不同海拔典型植被带灌木种群生态位、种间联结及群落稳定性特征. 生态学报, 2025, 45 (17): - .

Liu H Z, Zhou J X, Lu Z C, Dong L, Yang T, Ding Y L. Niche differentiation, interspecific association and stability characteristics of shrub communities in typical vegetation zones at different altitudes on the eastern slope of Helan Mountain. Acta Ecologica Sinica, 2025, 45(17): - .

贺兰山东坡不同海拔典型植被带灌木种群生态位、种间联结及群落稳定性特征

刘海珠^{1,2,3}, 周金星^{1,2}, 陆子淳^{1,2}, 董 亮^{1,2}, 杨 涛², 丁亚丽^{1,2,*}

1 北京林业大学水土保持学院水土保持国家林业和草原局重点实验室, 北京 100083

2 北京林业大学云南建水荒漠生态系统国家定位观测研究站, 北京 100083

3 湖南省地质灾害调查监测所, 长沙 410004

摘要: 研究不同海拔群落植物生态位和种间联结可以深入解析群落的空间分布格局和生态功能, 对于干旱区脆弱山地生态系统因地制宜进行植被恢复重建具有重要指导意义。研究以贺兰山东坡 30 个样地中 17 种灌木植物为研究对象, 利用生态位宽度、Pianka 重叠指数、种间联结检验和 M.Godron 稳定性测定法, 分析不同海拔典型植被带(从低到高: 山地旱生灌丛、山地疏林草原、温性针叶林、针阔混交林、寒温性针叶林)灌木物种的生态位、群落总体联结性和种间关联性特征。结果显示: (1) 贺兰山东坡灌木群落中, 置疑小檗(*Berberis dubia*)和金露梅(*Dasiphora fruticosa*)的生态位宽度最大, 不同海拔典型植被带灌木物种生态位重叠较低, 物种对环境资源的需求存在较大差异。(2) 在山地旱生灌丛中, 群落主要物种的总体联结性呈显著正相关, 而山地疏林草原带则呈不显著正相关, 其他典型植被带呈不显著负相关。(3) 种间联结性分析显示, 除了山地旱生灌丛, 其余典型植被带灌木群落中负关联的种对均多于正关联的种对, 且多数种对呈不显著相关, 表明大部分海拔梯度下典型植被带的灌木物种分布相对独立, 种间关联松散且相关性较弱, 进一步分析表明, 随着海拔升高, 灌木群落正负联结比呈先减少后增加的趋势, 群落稳定性呈先增加后减少的趋势。研究发现贺兰山东坡温性针叶林和针阔混交林灌木群落最为稳定, 结果可为干旱区植被生态保护与可持续经营管理提供理论支持。

关键词: 贺兰山; 海拔高度; 生态位; 种间联结; 群落稳定性

Niche differentiation, interspecific association and stability characteristics of shrub communities in typical vegetation zones at different altitudes on the eastern slope of Helan Mountain

LIU Haizhu^{1,2}, ZHOU Jinxing^{1,2}, LU Zichun^{1,2}, DONG Liang^{1,2}, YANG Tao², DING Yali^{1,2,*}

1 College of Soil and Water Conservation, Beijing Forestry University, Key Laboratory of State Forestry and Grassland Administration of Soil and Water Conservation, Beijing 100083, China

2 National Positioning Observation and Research Station of Jianshui Desert Ecosystem, Beijing Forestry University, Beijing 100083, China

3 Hunan province geological disaster survey and monitoring institute, Changsha 410004, China

Abstract: The study of plant niche and interspecific association of communities at different altitudes can deeply analyze the spatial distribution pattern and ecological function of communities, which has important guiding significance for vegetation restoration and reconstruction of fragile mountain ecosystems in arid areas according to local conditions. In this study, 17

基金项目: 宁夏回族自治区重点研发项目(2021BEG02005_011); 北京林业大学“5.5 工程”科研创新团队项目(BLRC2023B09)

收稿日期: 2024-07-12; **网络出版日期:** 2025-00-00

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: dingyali@bjfu.edu.cn

shrub species in 30 plots on the eastern slope of Helan Mountain were investigated as the research objects. Niche width, niche overlap index of Pianka, interspecific association test, and M.Godron stability test method were used to analyze the niche, overall community connectivity and interspecific associations characteristics of shrub species in typical vegetation zones at different elevations (From low to high: Montane xeric shrubland, Montane open grassland, Temperate coniferous forest, Mixed coniferous broad leaved forest, and Cold-temperate coniferous forest). The results showed that: (1) In the shrub community on the eastern slope of Helan Mountain, the ecotope width of *Berberis dubia*. Schneid and *Dasiphora fruticosa* was largest, The niche overlap of shrub species in typical vegetation zones at different altitudes was low, and the demand of species for environmental resources was quite different. (2) The overall connectivity of the main species of shrub communities in the mountain dry scrub zone was significantly positively correlated, while that in the mountain open grassland zone was non-significantly positively correlated, and that in other typical vegetation zones was non-significantly negatively correlated. (3) The results of interspecific association analysis showed that in addition to mountain xerophytic shrubs, the number of negative association species pairs in shrub communities of other typical vegetation zones was more than that of positive association species pairs, and most species pairs were not significantly correlated, indicating that the distribution of shrub species in typical vegetation zones at most altitude gradients was relatively independent, and the interspecific association was loose and the correlation was weak. Further analysis showed that with the increase of altitude, the positive and negative association ratio of shrub community decreased first and then increased, and the community stability increased first and then decreased. The study found that the shrub communities of temperate coniferous forest and coniferous and broad-leaved mixed forest on the eastern slope of Helan Mountain were the most stable, and the results can provide theoretical support for vegetation ecological protection and sustainable management in arid areas.

Key Words: Helan Mountain; altitude; ecological niche; interspecific association; community stability

植物生态位和种间联结是群落生态学的重要组成部分,能共同解释物种在群落中的空间分布及其对环境的功能依赖,对于揭示植物群落物种共存机制及其与环境资源相互作用规律具有重要意义^[1]。其中,生态位是一个物种在群落中相对于其他物种的位置,能够反映群落中各物种的时空位置和功能关系^[2]。物种生态位宽度大小与其对环境的适应性呈正相关,而生态位重叠反映了群落中各物种资源共享与利用、种间竞争的能力^[3-4]。种间关联是在特定的空间尺度上,成对物种的共存频率高于或低于偶然预期的频率,可从数量结构方面反映物种间的关系和群落环境差异及稳定程度。一般来说,正关联的物种对表明植物共享相似的资源,具有广泛的生态位重叠,而负关联表明物种对由于生物学特征分化造成物种对环境异质性的适应差异较大,导致物种排斥和生态位分离,从而形成不同的栖息地和资源需求^[5-9]。根据生态学理论,群落总体联结性反映了物种间的种间竞争以及群落中物种组成和群落结构的稳定性,如果群落物种间的总体联结显著正相关,则群落组成和物种组成将逐渐趋于完善和稳定^[10-11]。对群落不同植物生态位、种间联接关系以及群落稳定性进行耦合分析,可为深入认识群落结构功能以及指导植被恢复重建等提供科学依据^[12]。

以往研究认为,植物群落的种间关联主要受种间竞争^[13]、环境变化^[14]和研究规模^[15]等因素的影响制约,其中海拔、坡度、坡向等环境因子对不同类型生态系统群落物种多样性和生态特征的分布状况有重要影响^[16-17]。Zhang 等^[18]研究发现中国太行山脉植被分布格局与海拔、坡度等生境因子之间存在显著相关关系,Jiang 等^[19]认为在钱江源国家公园原始亚热带森林中,成对物种的种间关联性具有较强的生境依赖性且随着海拔的升高而降低。Geng 等^[20]发现海拔和植被类型能显著影响生态系统稳定性,且在 500—2000 m 的中海拔地区稳定性高于海拔 2000 m 以上的高海拔地区。同时,海拔高度也是决定物种分布和森林稳定性的主要地形因子。然而,已有种间关系等相关研究多数集中在相似的生境条件下(比如同一海拔高度上)进行分析,很少有研究将海拔因素与种间关联和群落稳定性联系起来并分析两者的相互作用。

贺兰山位于腾格里沙漠边缘,是草原向沙漠的过渡地带,也是干旱区和半干旱区分界线,植被分布格局受

气候和地形因素的强烈影响^[21]。然而,以往对贺兰山不同海拔植物群落的研究主要集中于物种多样性海拔格局^[22—23]、植物区系^[24]、叶片功能性状^[25]、植物光合和水分利用效率^[26]、植物群落与环境的关系^[27]等角度,尚缺乏针对贺兰山东坡灌木群落的生态位特征及种间联结的相关研究。因此,本研究以贺兰山东坡 30 个样地中 17 种物种为研究对象,在植物群落学调查的基础上,基于物种重要值,分析不同海拔梯度下灌木物种的生态位特征、种间关联和群落稳定性,以期揭示贺兰山灌木群落随着海拔梯度的变化和主要灌木物种的种间关系、群落组成的结构变化特征以及群落的演替规律,为宁夏贺兰山自然保护区生物多样性保护和森林管理提供依据,对于区域生态保护政策制定具有重要指导意义。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

试验地位于贺兰山东麓,位于阿拉善高原和银川平原之间(地处北纬 38°27′—39°30′,东经 105°41′—106°41′之间),具有典型大陆性气候和山地气候特征,年平均气温 9.0 ℃,年降水量 200—400 mm。且随海拔变化,水热条件具有明显规律性差异,海拔平均每上升 100 m,降水量增加 13.2 mm。随着海拔升高,植被类型和土壤类型均表现出明显的空间异质性,土壤类型自下而上依次为灰漠土、棕钙土、灰褐土以及亚高山草甸土,植被类型分依次为蒙古扁桃灌丛、灰榆林、油松林、松杨混交林、青海云杉林^[28]。主要灌木物种为置疑小檗(*Berberis dubia*)、金露梅(*Dasiphora fruticosa*)、小叶忍冬(*Lonicera microphylla*)、绣线菊(*Spiraea salicifolia*)等。

1.2 样地设置与植被调查

本研究于 2021 年 7—8 月,在贺兰山东坡沿海拔梯度 1309—2590 m,选取 5 个典型植被类型样地:山地旱生灌丛、山地疏林草原、温性针叶林、针阔混交林、寒温性针叶林,样地面积为 20 m×20 m,每个样地设置 3 个相邻小区,样地基本信息见表 1。每个样地设置 16 个 5 m×5 m 的测量样方。选取小区内的四角和中间的 5 m×5 m 小样方,分别标记为 0101、0104、0401、0404 和 M,对这 5 个小样方内的灌木进行测量,并记录植物的种类、株数、高度等。

1.3 数据分析

1.3.1 重要值

重要值可用于表征各灌木物种在群落中地位和作用,计算公式如下^[29]:

$$IV_{\text{灌木}} = (\text{相对高度} + \text{相对密度} + \text{相对盖度}) / 3 \quad (1)$$

1.3.2 生态位宽度

本研究采用 Levins 指数 $B_{(L)i}$ 和 Shannon 生态位宽度 $B_{(S)i}$ 计算物种的生态位宽度。计算公式为:

$$B_{(L)i} = 1 / \sum_{j=1}^r P_{ij}^2 \quad (2)$$

$$B_{(S)i} = - \sum_{j=1}^r P_{ij} \ln P_{ij} \quad (3)$$

式中: r 为资源位数量(样方数), P_{ij} 代表种 i 在第 j 资源位上的重要值占其在所有资源位上重要值的百分比。

1.3.3 生态位重叠

采用 Pianka 重叠指数 O_{ij} 计算并测定植物生态位重叠。其计算公式如下:

$$O_{ij} = \sum_{k=1}^r P_{ik} P_{jk} / \sqrt{\sum_{k=1}^r P_{ik}^2 \sum_{k=1}^r P_{jk}^2} \quad (4)$$

式中 P_{ik} 与 P_{jk} 分别代表物种 i 和 j 在第 k 资源状态上的重要值占其在所有资源位上重要值的百分比。

1.3.4 总体关联性联结

采用 Schluter 的方差比率法(VR)来检验植物群落所有物种间的总体联结性,VR 的显著性通过统计量 W 检验,计算公式如下:

表 1 样地信息表
Table 1 Plot information table

植被带 Vegetation zones	海拔 Elevation/m	经度 Longitude	纬度 Latitude	坡度 Slope/(°)	坡向 Aspect	植被状况 Conditions of vegetation
山地旱生灌丛 Montane xeric shrubland	1670 1676 1716	105°94'16" E 105°94'16" E 105°56'32" E	38°74'36" N 38°74'38" N 38°44'41" N	38	东坡阳坡	灌木:蒙古扁桃(<i>Prunus mongolica</i>)、狭叶锦鸡儿(<i>Caragana stenophylla</i>);草本:阿拉善鹅观草(<i>Elymus alashanicus</i>)
山地旱生灌丛 Montane xeric shrubland	1721 1722 1723	105°94'57" E 105°55'46" E 105°56'45" E	38°74'50" N 38°44'42" N 38°44'42" N	15	东坡阴坡	灌木:蒙古扁桃(<i>Prunus mongolica</i>)、荒漠锦鸡儿(<i>Caragana roborovskyi</i>);草本:阿拉善鹅观草(<i>Elymus alashanicus</i>)
山地疏林草原带 Montane open grassland	1953 1968 1971	105°92'27" E 105°92'26" E 105°92'28" E	38°76'96" N 38°76'99" N 38°76'98" N	28	东坡阴坡	乔木:灰榆林(<i>Ulmus glaucescens</i>);灌木:金露梅(<i>Dasiphora fruticosa</i>);草本:阿拉善鹅观草(<i>Elymus alashanicus</i>)
山地疏林草原带 Montane open grassland	2012 2022 2043	105°92'32" E 105°92'27" E 105°92'30" E	38°77'19" N 38°77'23" N 38°77'28" N	6	东坡阳坡	乔木:灰榆林(<i>Ulmus glaucescens</i>);灌木:置疑小檗(<i>Berberis dubia</i>);草本:阿拉善鹅观草(<i>Elymus alashanicus</i>)
温性针叶林 Temperate coniferous forest	2030 2034 2036	105°91'11" E 105°91'10" E 105°91'11" E	38°74'85" N 38°74'83" N 38°74'84" N	32	东坡阴坡	乔木:油松(<i>Pinus tabuliformis</i>)、杜松(<i>Juniperus rigida</i>);灌木:置疑小檗(<i>Berberis dubia</i>)、小叶忍冬(<i>Lonicera microphylla</i>);草本:苔草(<i>Carex</i> spp)、蒙古冰草(<i>Agropyron mongolicum</i>)
温性针叶林 Temperate coniferous forest	2277 2283 2305	105°90'73" E 105°90'70" E 105°90'58" E	38°77'73" N 38°77'72" N 38°77'73" N	19	东坡阳坡	乔木:油松(<i>Pinus tabuliformis</i>)、杜松(<i>Juniperus rigida</i>);灌木:置疑小檗(<i>Berberis dubia</i>)、小叶忍冬(<i>Lonicera microphylla</i>)、西北栒子(<i>Cotoneaster zabelii</i>);草本:苔草(<i>Carex</i> spp)、阿拉善鹅观草(<i>Elymus alashanicus</i>)
针阔混交林 Mixed coniferous broad leaved forest	2227 2238 2243	105°91'21" E 105°91'15" E 105°91'11" E	38°73'80" N 38°73'73" N 38°73'68" N	19	东坡阴坡	乔木:青海云杉(<i>Picea crassifolia</i>)、山杨(<i>Populus davidiana</i>);灌木:小叶忍冬(<i>Lonicera microphylla</i>)、置疑小檗(<i>Berberis dubia</i>);草本:苔草(<i>Carex</i> spp)、贺兰山岩黄芩(<i>Hedysarum petrovii</i>)
针阔混交林 Mixed coniferous broad leaved forest	2336 2340 2344	105°90'46" E 105°90'45" E 105°90'40" E	38°77'71" N 38°77'69" N 38°77'71" N	5	东坡阳坡	乔木:青海云杉(<i>Picea crassifolia</i>)、山杨(<i>Populus davidiana</i>)、杜松(<i>Juniperus rigida</i>);灌木:置疑小檗(<i>Berberis dubia</i>);草本:苔草(<i>Carex</i> spp)、阿拉善鹅观草(<i>Elymus alashanicus</i>)
寒温性针叶林 Cold-temperate coniferous forest	2395 2396 2401	105°90'15" E 105°90'10" E 105°90'08" E	38°77'66" N 38°77'67" N 38°77'68" N	27	东坡阴坡	乔木:青海云杉(<i>Picea crassifolia</i>);灌木:置疑小檗(<i>Berberis dubia</i>);草本:苔草(<i>Carex</i> spp)、小红菊(<i>Chrysanthemum chanetii</i>)
寒温性针叶林 Cold-temperate coniferous forest	2416 2510 2520	105°54'11" E 105°53'58" E 105°53'58" E	38°46'44" N 38°46'45" N 38°46'45" N	16	东坡阳坡	乔木:青海云杉(<i>Picea crassifolia</i>);灌木:置疑小檗(<i>Berberis dubia</i>)、小叶忍冬(<i>Lonicera microphylla</i>);草本:苔草(<i>Carex</i> spp)、铁线莲(<i>Clematis florida</i>)

$$VR=S_T^2/\delta_T^2 \tag{5}$$

$$S_T^2=\frac{1}{N}\sum_{i=1}^S(T_j-t)^2 \tag{6}$$

$$\delta_T^2=\sum_{i=1}^SP_i(1-P_i) \tag{7}$$

式中,S 为物种总数,N 为采样点总数; T_j 为样方 j 内出现的优势种的物种数目,t 为样方中物种平均数, P_i 为物种 i 出现的样方数目占样方总数(N)的比例。

1.3.5 种间关联性联结

采用 Pearson 相关系数、Spearman 秩相关系数和联结系数 AC 检验物种之间的种间关联^[30],计算公式

如下:

$$r_p(i, k) = \frac{\sum_{j=1}^N (x_{ij} - \bar{x}_i) (x_{kj} - \bar{x}_k)}{\sqrt{\sum_{j=1}^N (x_{ij} - \bar{x}_i)^2 \sum_{j=1}^N (x_{kj} - \bar{x}_k)^2}} \quad (8)$$

$$r(i, j) = 1 - \frac{6 \sum_{p=1}^N (x_{ij} - x_{kj})^2}{N^3 - N} \quad (9)$$

若 $ad \geq bc$, 则:

$$AC = \frac{ad - bc}{(a+b)(b+d)} \quad (10)$$

若 $bc > ad$ 且 $d \geq a$, 则:

$$AC = \frac{ad - bc}{(a+b)(a+c)} \quad (11)$$

若 $bc > ad$ 且 $d < a$, 则:

$$AC = \frac{ad - bc}{(b+d)(d+c)} \quad (12)$$

式中 x_{ij} 和 x_{kj} 分别表示在样方 k 中物种 i 和物种 j 的秩; a 为样方内出现的两个目标物种数; b 和 c 为样方内出现的任意一个目标物种数; d 为样方内没有出现的目标物种数。

本研究采用 Microsoft Excel 计算物种重要值和群落稳定性; 使用 spaa 包中的函数计算生态位宽度、生态位重叠、种间总体关联性和种间联结, 使用 spaa 包中的 plotlowertri 函数绘制半矩阵图, 以上数据分析在 R4.3.2 中进行。使用 Origin2022 及 Adobe Illustrator2022 进行绘图。

2 结果与分析

2.1 不同海拔典型植被带灌木种群重要值

经野外植被样方调查, 在贺兰山东坡不同海拔梯度共发现 17 种灌木物种, 隶属于 11 科 15 属, 以蔷薇科 (Rosaceae)、豆科 (Fabaceae) 等为主。其中山地旱生灌丛 (GC) 有 11 个物种, 山地疏林草原带 (SL) 存在 9 个物种, 温性针叶林 (WZ) 存在 8 个物种, 针阔混交林带 (ZK) 有 6 个物种, 寒温性针叶林带 (HZ) 存在 4 个物种, 其中置疑小檗、金露梅、小叶忍冬在 5 个典型植被带中重要值均较高 (表 2)。

2.2 不同海拔典型植被带灌木物种生态位宽度及重叠特征

由表 3 可知, 在山地旱生灌丛中, 荒漠锦鸡儿和松叶猪毛菜的生态位宽度最宽, 小叶忍冬生态位宽度最窄。在山地疏林草原带中, 生态位最宽的物种为金露梅, 最窄的为甘蒙锦鸡儿。温性针叶林中置疑小檗的生态位宽度最宽, 蒙古莢蒾、虎榛子的生态位较窄。在针阔混交林中, 置疑小檗生态位宽度最宽, 西北栒子、美丽茶藨子生态位宽度较窄。寒温性针叶林中, 置疑小檗生态位宽度最宽, 西北栒子生态位最窄。总体来说, 置疑小檗和金露梅生态位宽度最大。生态位宽度值和重要值的排序稍有差异, 但总体上较为相同, 但两者排序并非完全一致, 例如山地旱生灌丛带中, 单瓣黄刺玫和荒漠锦鸡儿的重要值相近, 但荒漠锦鸡儿的 $B_{(L)i}$ 是单瓣黄刺玫的 1.8 倍, 这说明荒漠锦鸡儿在群落中分布频度较高, 分布频度对生态位宽度具有一定的影响。

山地旱生灌丛带灌木层中, Pianka 重叠指数 $O_{ij} \geq 0.5$ 的种对有 18 对 (占物种总对数的 32.73%), $0 < O_{ij} < 0.5$ 的种对有 31 对 (56.36%), $O_{ij} = 0$, 不发生重叠的种对有 6 对 (10.9%), 其中生态位重叠指数较大的种对为内蒙野丁香-小叶忍冬 (1.44)、金露梅-小叶忍冬 (1.17) 和内蒙野丁香-鼠李 (0.98), 这说明这些种对对生境要求最为相似。在山地疏林草原带, 8 对 (22.22%) 物种对的生态位重叠值 $O_{ij} > 0.5$, 16 对 (44.45%) 物种对的生态位重叠值 $0 < O_{ij} < 0.5$, 12 对 (33.33%) 种对不发生重叠, 其中西北栒子-蒙古扁桃 (1.21) 和置疑小檗-蒙古扁桃

表 2 主要优势种重要值
Table 2 Important value of main dominant species

缩写 Abbreviation	物种 Species	重要值 Importance value/%				
		GC	SL	WZ	ZK	HZ
Ct	刺旋花 <i>Convolvulus tragacanthoides</i>	2.5	—	—	—	—
Rx	单瓣黄刺玫 <i>Rosa xanthina</i>	10.5	9.9	—	—	—
Cr	荒漠锦鸡儿 <i>Caragana roborovskyi</i>	9.4	—	—	—	—
Sl	松叶猪毛菜 <i>Salsola laricifolia</i>	17.3	—	—	—	—
Cs	狭叶锦鸡儿 <i>Caragana stenophylla</i>	16.2	—	—	—	—
Bd	置疑小檗 <i>Berberis dubia</i>	11.8	13.9	35.0	46.7	65.5
Df	金露梅 <i>Dasiphora fruticosa</i>	7.1	24.5	11.3	18.3	7.9
Pm	蒙古扁桃 <i>Prunus mongolica</i>	11.5	0.6	—	—	—
Lo	内蒙野丁香 <i>Leptodermis ordosica</i>	10.9	—	—	—	—
Rd	鼠李 <i>Rhamnus davurica</i>	2.1	3.1	—	—	—
Lm	小叶忍冬 <i>Lonicera microphylla</i>	0.7	5.7	14.2	20.4	22.7
Cz	西北栒子 <i>Cotoneaster zabelii</i>	—	1.3	20.4	2.5	3.9
Ss	绣线菊 <i>Spiraea salicifolia</i>	—	31.4	8.1	9.6	—
Co	甘蒙锦鸡儿 <i>Caragana opulens</i>	—	9.6	—	—	—
Vm	蒙古荚蒾 <i>Viburnum mongolicum</i>	—	—	2.8	—	—
Od	虎榛子 <i>Ostryopsis davidiana</i>	—	—	4.4	—	—
Rp	美丽茶藨子 <i>Ribes pulchellum</i>	—	—	3.8	2.5	—

GC:山地旱生灌木丛 Montane xeric shrubland;SL:山地疏林草原带 Montane open grassland;WZ:温性针叶林 Temperate coniferous forest;ZK:针阔混交林 Mixed coniferous broad leaved forest;HZ:寒温性针叶林 Cold-temperate coniferous forest

表 3 主要优势种生态位
Table 3 Niche of main dominant species

缩写 Abbreviation	物种 Species	GC		SL		WZ		ZK		HZ	
		$B_{(L)i}$	$B_{(SW)i}$	$B_{(L)i}$	$B_{(SW)i}$	$B_{(L)i}$	$B_{(SW)i}$	$B_{(L)i}$	$B_{(SW)i}$	$B_{(L)i}$	$B_{(SW)i}$
Ct	刺旋花 <i>C. tragacanthoides</i>	4.59	6.98	—	—	—	—	—	—	—	—
Rx	单瓣黄刺玫 <i>Rosa xanthina</i>	2.98	5.70	2.89	2.23	—	—	—	—	—	—
Cr	荒漠锦鸡儿 <i>C. roborovskyi</i>	5.35	7.86	—	—	—	—	—	—	—	—
Sl	松叶猪毛菜 <i>S. laricifolia</i>	5.37	7.74	—	—	—	—	—	—	—	—
Cs	狭叶锦鸡儿 <i>C.stenophylla</i>	4.03	6.08	—	—	—	—	—	—	—	—
Bd	置疑小檗 <i>Berberis dubia</i>	2.10	4.43	2.69	4.54	5.40	5.74	5.12	3.55	5.16	1.86
Df	金露梅 <i>Dasiphora fruticosa</i>	3.83	7.37	5.10	5.33	2.37	2.40	3.58	3.15	2.00	1.06
Pm	蒙古扁桃 <i>Prunus mongolica</i>	3.66	6.61	1.00	2.93	—	—	—	—	—	—
Lo	内蒙野丁香 <i>Leptodermis ordosica</i>	3.37	7.01	—	—	—	—	—	—	—	—
Rd	鼠李 <i>Rhamnus davurica</i>	2.80	6.75	2.99	3.30	—	—	—	—	—	—
Lm	小叶忍冬 <i>Lonicera microphylla</i>	1.98	6.98	2.45	4.07	3.81	4.61	3.86	2.27	3.72	1.68
Cz	西北栒子 <i>Cotoneaster zabelii</i>	—	—	1.94	4.03	3.68	2.83	1.78	2.69	1.00	1.26
Ss	绣线菊 <i>Spiraea salicifolia</i>	—	—	4.90	3.35	1.92	3.67	2.00	2.82	—	—
Co	甘蒙锦鸡儿 <i>Caragana opulens</i>	—	—	1.00	1.59	—	—	—	—	—	—
Vm	蒙古荚蒾 <i>Viburnum mongolicum</i>	—	—	—	—	1.00	3.10	—	—	—	—
Od	虎榛子 <i>Ostryopsis davidiana</i>	—	—	—	—	1.00	2.21	—	—	—	—
Rp	美丽茶藨子 <i>Ribes pulchellum</i>	—	—	—	—	2.54	3.00	1.77	2.38	—	—

(0.84)的生态位重叠值较高。在温性针叶林带, $O_{ij}>0.5$ 的种对仅3对(10.71%), $0<O_{ij}<0.5$ 的种对有10对(35.71%),15对(39.47%)种对不发生重叠,生态位重叠值最大的为置疑小檗-美丽茶藨子(1.44)。在针阔混交林带, $0<O_{ij}<0.5$ 的种对有9对(60.00%), $O_{ij}\geq 0.5$ 的种对有2对(13.33%),4对(26.67%)种对未产生生态位重叠,其中生态位重叠指数较大的种对为置疑小檗-美丽茶藨子(0.66)和西北栒子-绣线菊(0.64)。寒温性针叶林带灌木群落中,生态位重叠值 $O_{ij}=0$ 、 $0<O_{ij}<0.5$ 和 $O_{ij}\geq 0.5$ 的种对分别占总种对数的33.33%、50.00%以及16.67%,金露梅-小叶忍冬(0.75)的生态位重叠值最大(图1)。总体来说,贺兰山东坡不同海拔梯度下灌木植物生态位重叠指数普遍较小,表明群落中灌木物种对生态资源的需求相似度不高,种间竞争较缓和^[31]。



2.3 不同海拔典型植被带群落种间联结性

2.3.1 不同海拔典型植被带群落总体联结性分析

贺兰山东坡不同海拔典型植被带群落总体联结性分析结果显示,山地旱生灌丛灌木群落总体方差比率 $VR>1$, $W>X^2_{0.05}(df)$, 表明物种间总体呈现显著正联结;山地疏林草原带灌木群落总体方差比率 $VR>1$, 且 W 落在 $X^2_{0.95}(df)$ 和 $X^2_{0.05}(df)$ 之间, 表明物种间总体呈现不显著正联结;温性针叶林、针阔混交林和寒温性针叶林灌木群落 $VR<1$, 且 W 落在 $X^2_{0.95}(df)$ 和 $X^2_{0.05}(df)$ 之间, 表明物种间总体呈现不显著负联结(表 4)。

表 4 群落总体关联性
Table 4 Overall association of community

植被带 Vegetation belt	方差比率 Variance ratio VR	检验统计量 W Test statistic W	df	X^2 的临界值	检验结果 Results
山地旱生灌丛 Mountain xerophytic shrubland	1.99	52.72	26	[15.38, 38.89]	显著正关联
山地疏林草原 Mountain sparse forest grassland	1.09	29.49	26	[15.38, 38.89]	不显著正关联
温性针叶林 Temperate coniferous forest	0.93	23.16	24	[13.85, 36.42]	不显著负关联
针阔混交林 Mixed coniferous-broad forest	0.86	17.97	20	[10.85, 31.41]	不显著负关联
寒温性针叶林 Cold temperate coniferous forest	0.73	12.40	16	[7.96, 26.30]	不显著负关联

2.3.2 不同海拔典型植被带灌木种对间联结关系

山地旱生灌丛(GC)正负相关物种对数分别为 34 个和 21 个,分别占总对数的 61.8%和 38.2%,正负关联比为 1.62,该植被带正负关联比最大,说明该群落各灌木种群之间关联性最强,竞争关系最弱;山地疏林草原带(SL)群落中有 16 个(44.4%)种对呈正相关,20 个(55.6%)种对呈负相关,正负关联比为 0.80;温性针叶林带(WZ)群落的 28 个种对中,8 个种对呈正相关,20 个种对呈负相关,正负关联比为 0.4;针阔混交林(ZK)正负相关物种对数分别为 8 个(53.3%)和 7 个(46.7%),正负关联比为 1.14;寒温性针叶林(HZ)正负关联比为 0.5(图 2)。总体来说,灌木物种种对之间的正负关联比表现为 $GC>ZK>SL>HZ>WZ$,即随着海拔升高,主要灌木物种种对之间的正负关联比呈先减少后增加的趋势,说明海拔升高会影响群落中灌木物种对之间的依存关系。

贺兰山东坡不同海拔梯度下主要灌木物种的 Pearson 相关性检验结果表明,在 GC 中有 31 个(56.4%)种对呈正相关,24 个(43.6%)种对呈负相关,正负关联比为 1.29(图 3)。其中 11 对具有显著相关性,如荒漠锦鸡儿和松叶猪毛菜、刺旋花和金露梅呈极显著正相关($P<0.01$),狭叶锦鸡儿和单瓣黄刺玫、置疑小檗和单瓣黄刺玫呈显著负相关($P<0.05$)。SL 群落中正负相关物种对数分别为 13 对(36.1%)和 23 对(63.9%),正负关联比为 0.57。其中金露梅和绣线菊呈显著正相关,西北栒子和蒙古扁桃呈极显著正相关。在 WZ 群落中,有 7 个(25.0%)种对呈正相关,21 个(75%)种对呈负相关,正负关联比为 0.33,其中置疑小檗和美丽茶藨子呈极显著正相关。在 ZK 群落中,有 6 个(40.0%)种对呈正相关,9 个(60.0%)种对呈负相关,正负关联比为 0.67,其中西北栒子和绣线菊呈极显著正相关。HZ 群落中物种对正负关联比为 0.50,其中金露梅和小叶忍冬呈极显著正相关。Spearman 秩相关性检验结果表明(图 4)GC、SL、WZ、ZK、HZ 中的正相关种对数分别为 29、17、9、6、2,负相关总对数分别为 26、18、19、9、4,正负关联比分别为 1.12、0.94、0.47、0.67、0.50。总来说,贺兰山东坡灌木物种对正负关联比均表现为 $GC>ZK>SL>HZ>WZ$,Pearson 相关性、Spearman 秩相关性在物种对间正负联结种对数变化趋势一致,即随着海拔升高呈先减后增的趋势,且群落中大部分灌木物种对均未达到显著相关性,进一步表明灌木物种对相关性较弱,这与 AC 检验结果基本一致。

2.4 不同海拔典型植被带灌木群落稳定性

不同海拔梯度下群落稳定性分析结果表明:在山地旱生灌丛、山地疏林草原带、温性针叶林、针阔混交林

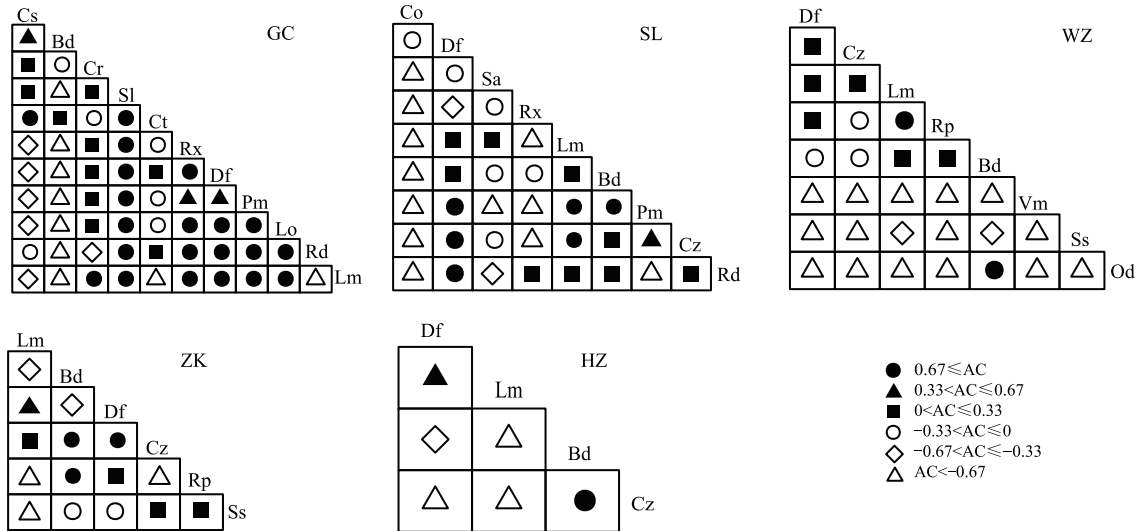


图2 植物种间联结 AC 值半矩阵图

Fig.2 Semi-matrix diagram of AC value of plant interspecific association

AC: 联结系数 Association coefficient; ● 极显著正联结; ▲ 显著正联结; ■ 不显著正联结; ○ 不显著负联结; ◇ 显著负联结; △ 极显著负联结;
Cs: 狭叶锦鸡儿 *Caragana stenophylla*; Bd: 置疑小檗 *Berberis dubia*; Cr: 荒漠锦鸡儿 *Caragana roborovskii*; Sl: 松叶猪毛菜 *Salsola laricifolia*; Ct: 刺旋花 *Convolvulus tragacanthoides*; Rx: 单瓣黄刺玫 *Rosa xanthina*; Df: 金露梅 *Dasiphora fruticosa*; Pm: 蒙古扁桃 *Prunus mongolica*; Lo: 内蒙野丁香 *Leptodermis ordosica*; Rd: 鼠李 *Rhamnus davurica*; Lm: 小叶忍冬 *Lonicera microphylla*; Co: 甘蒙锦鸡儿 *Caragana opulens*; Ss: 绣线菊 *Spiraea salicifolia*; Cz: 西北栒子 *Cotoneaster zabelii*; Rp: 美丽茶藨子 *Ribes pulchellum*; Vm: 蒙古荚蒾 *Viburnum mongolicum*; Od: 虎榛子 *Ostryopsis davidiana*

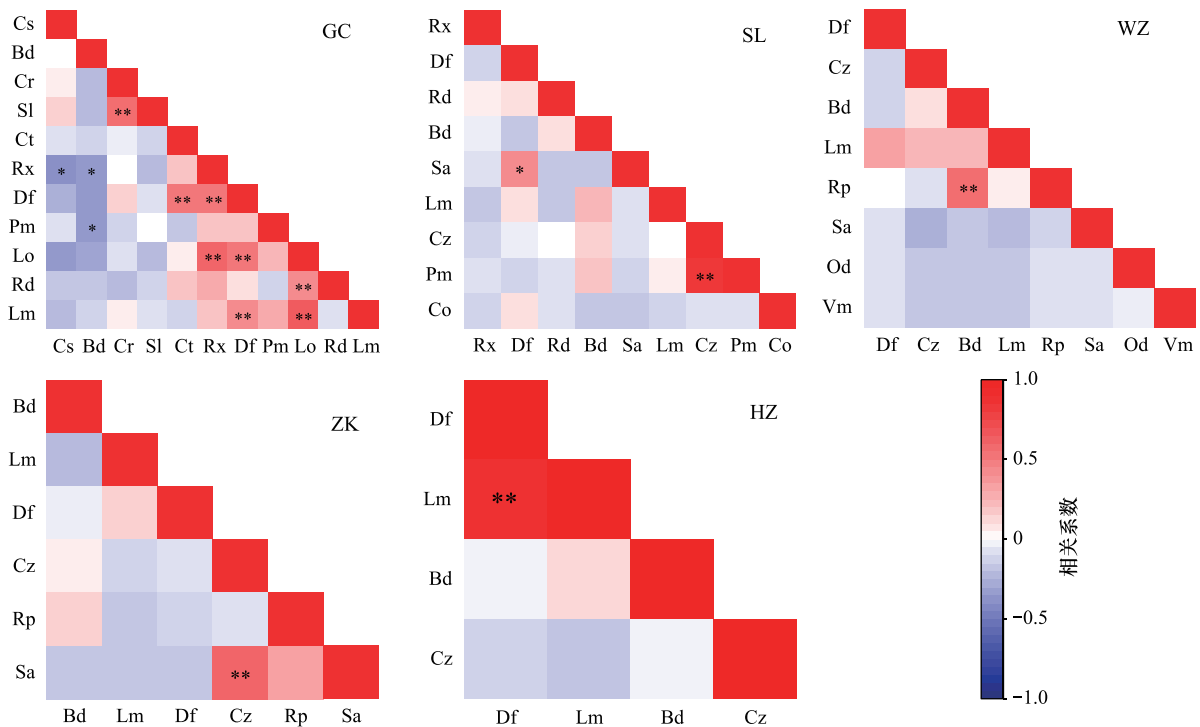


图3 种间联结 Pearson 相关性系数图

Fig.3 Pearson correlation coefficient diagram of interspecific association

和寒温性针叶林带灌木群落模拟曲线的 R^2 值分别为 0.9921、0.9864、0.9895、0.9921 和 0.9985, 5 个回归模型的交点到稳定点 (20, 80) 的距离分别为 37.31、35.40、26.52、26.10、42.09, 均远离稳定点 (图 5 和表 5)。根据

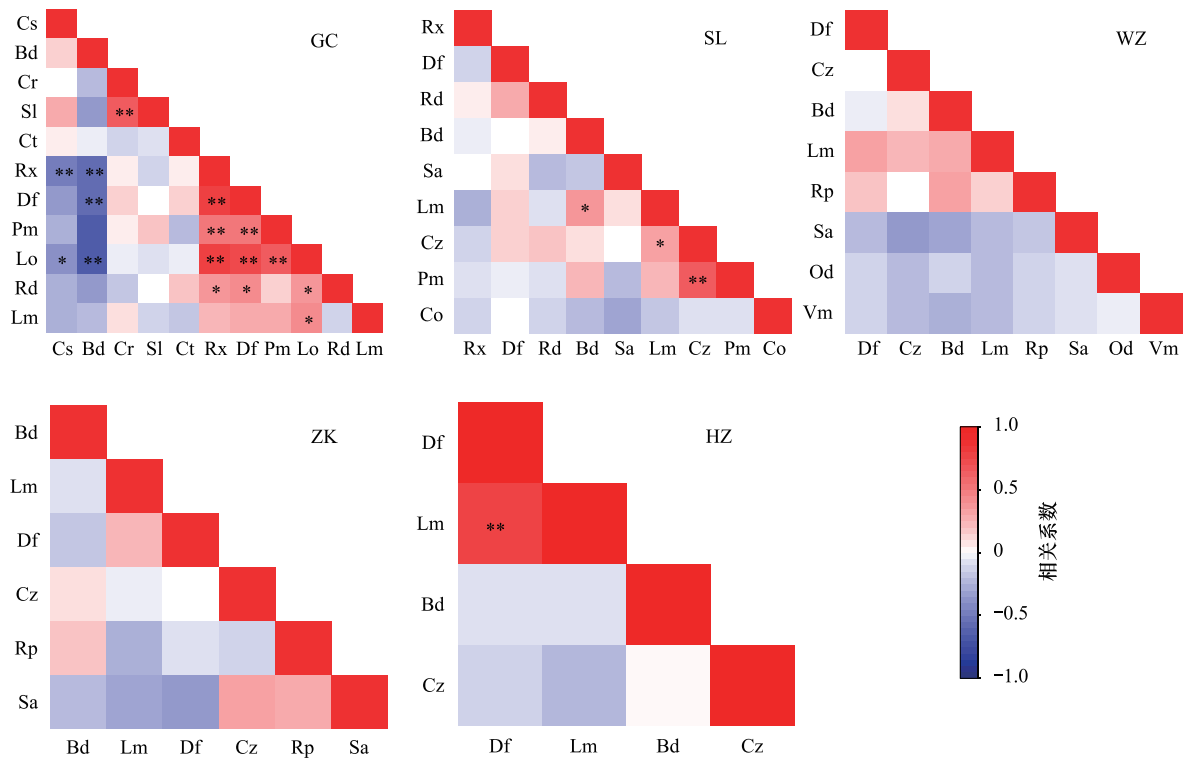


图 4 种间联结 Spearman 秩相关性系数图

Fig.4 Spearman rank correlation coefficient diagram of interspecific association

Godron 稳定性判断方法分析得到,温性针叶林、针阔混交林群落稳定性较强,但贺兰山东坡灌木群落整体处于不稳定演替阶段,群落稳定性随着海拔的升高而呈先增加后减少的趋势。

3 讨论

3.1 贺兰山东坡不同海拔典型植被带灌木物种生态位特征

植物生态位特征能够表征不同物种在生境中的资源利用模式,从而为深入解析植被群落内物种竞争和共存机制提供关键理论依据^[1]。本研究通过对贺兰山东坡 30 个样地中 17 种灌木物种的生态位计算分析发现,置疑小檗和金露梅的重要值最大,其对应的生态位宽度也较大,均远大于不同海拔群落的其他灌木物种。表明这两种灌木植物能够充分利用环境资源,具有较强的生态环境适应能力,对于维持群落结构组成和生态系统稳定性发挥着关键作用^[32]。比较分析显示,甘蒙锦鸡儿、蒙古荚蒾和虎榛子等物种的重要值和生态位宽度相对较低,表明此类植物可能属于群落生态特化种,其资源利用谱较窄,环境适应能力相对有限,在群落演替过程中可能面临竞争劣势。进一步分析表明,随海拔升高,不同灌木物种生态位宽度变化趋势存在分异现象,说明海拔因子是贺兰山灌木物种分布格局和资源利用策略的重要影响因子。

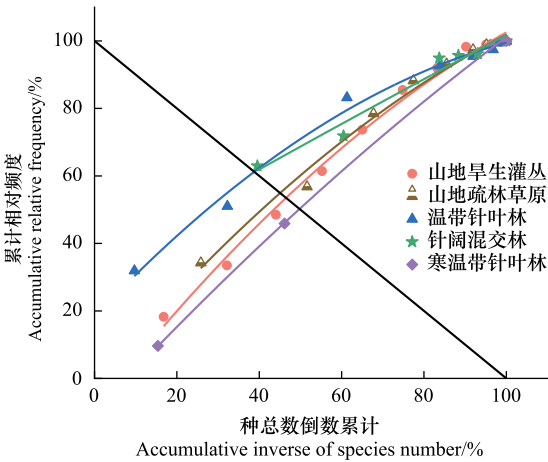


图 5 贺兰山东坡不同海拔梯度下灌木群落稳定性

Fig.5 The stability of shrub communities at different altitude gradients on the eastern slope of Helan Mountain

表 5 不同海拔梯度下灌木群落稳定性

Table 5 Stability of shrub communities under different altitude gradients

植被带 Vegetation belt	曲线方程 Curvilinear equation	相关系数 Correlation coefficient	交点坐标 Intersection point coordinate	交点到稳定点的距离 Distance from intersection point to stable point
CG	$y = -0.0044x^2 + 1.5554x - 9.4245$	0.9921	(46.40, 53.63)	37.31
SL	$y = -0.0041x^2 + 1.4475x - 2.0091$	0.9864	(44.94, 54.88)	35.40
WZ	$y = -0.0048x^2 + 1.2955x + 18.2336$	0.9895	(38.78, 61.27)	26.52
ZK	$y = -2.5101x^2 + 0.6990x + 34.3589$	0.94766	(38.68, 61.77)	26.10
HZ	$y = -0.0020x^2 + 1.3114x - 10.1691$	0.9985	(49.70, 50.17)	42.09

前期研究发现,正关联的物种对利用相似资源且生态习性相近,具有广泛的生态位重叠,而负关联表明物种具有不同的栖息地和资源需求^[7-9]。在本研究中,生态位重叠指数(O_{ij})范围为 0.00—1.45,平均值为 0.28。随着海拔升高,灌木群落中 $O_{ij} > 0.5$ 的种对所占比例呈先减小后增大的趋势。同时,大多数物种的生态位重叠指数也相对较低,表明灌木层中大多数物种之间对资源的需求不同,竞争不剧烈。同时,贺兰山东坡大部分灌木群落总体种间关联呈不显著关联,说明大多数物种相对独立,受其它共生物种影响的可能性较小,与生态位重叠结果一致。

3.2 贺兰山东坡不同海拔典型植被带灌木种间联结关系

群落总体联结性反映了群落结构、物种组成的稳定性以及群落演替进程^[33-34]。研究结果表明,在贺兰山东坡灌木群落中,山地旱生灌丛群落总体联结呈显著正相关,说明该带灌木群落处于稳定的演替阶段,群落结构和物种组成趋于完整和动态平衡^[35-36],温性针叶林、针阔混交林和寒温性针叶林灌木群落总体联结性为不显著负相关,表明这些群落处于演替早期,群落组成和结构尚不稳定,种间关联性不高。这可能是由于物种在不同生境中具有不同的生存策略^[14],最终表现为种间关联随海拔等环境梯度而变化^[33]。本研究发现与海南吊罗山不同海拔热带雨林的的研究结果存在差异^[37],这可能与群落特征及其所处的演替阶段、植物生态学特性和人为干扰强度等有关,本研究区域为贺兰山自然保护区以温带成分为主的植物群落,物种组成和群落结构复杂度显著低于热带雨林。

种间关联性代表了不同生境中物种对之间的关系,并显示了它们对环境因子的生态适应性^[8]。物种间的关联主要受差异(负关联)、相似性(正关联)、共生或共生引起的正关联、竞争相同资源时相互排斥引起的负关联以及物种间物理或化感作用引起的正或负关联效应的影响^[38]。物种对之间的正相关性表明它们对环境资源的需求相同或相似,并存在互惠互利关系,负相关性物种对之间的关系则相反^[7]。例如山地旱生灌丛带的金露梅和单瓣黄刺玫呈极显著正相关,这是因为两者都耐寒喜光,且耐贫瘠。一般而言,正负关联比例越高,群落结构越稳定^[39]。但许多研究表明,当物种在群落中分布相对独立且物种相遇概率较低时,物种对呈正联结特征的比例较低,相反,大多数物种对呈现出弱联结、无联结或负联结特征^[40-41]。本研究基于 AC 联结系数、Pearson 相关检验、Spearman 秩相关系数检验 3 种方法研究灌木物种的种间关系,结果表明,随着植物群落所处海拔的升高,灌木群落的正负关联比总体呈先减少后增加的趋势,这说明灌木种对之间的相关性和相互依存性先减弱后增强,且海拔因素可能影响种对间的关联性和相互依存的关系。山地旱生灌丛带存在许多显著正相关的物种对,因此低海拔地区优势物种对之间的关联性更强,这与灌木群落总体联结性结果一致,这是由于该海拔区域温度高、降水稀少,导致蒸散量和干旱程度高,是灌木生长的有利环境,灌木层各物种间竞争不激烈,因此该群落物种种对间正联结占比高。但不同海拔梯度下,大多数灌木物种对不存在显著相关性,这说明贺兰山东坡灌木层种间关联较松散,每个灌木物种的分布相对独立。山地旱生灌丛正负关联比最大,这反映出群落中存在大量竞争相同或相近资源的物种,这种资源竞争的加剧导致了群落的总体资源利用效率较低,并进一步影响了群落的稳定性^[42],这与本研究中 M.Gordon 群落稳定性分析结果一致。

3.3 贺兰山东坡不同海拔典型植被带灌木群落稳定性

Godron 方法在描述群落稳定性方面具有全面性和系统性,可以进一步明确种间关联的分析结果。在本

研究中,回归模型的交点坐标由山地旱生灌丛的(46.40, 53.63)到山地疏林草原带的(44.94, 54.88)到温性针叶林的(38.78, 61.27),再到针阔混交林(38.68, 61.77)和寒温性针叶林的(49.70, 50.17)。可以看出,与其他海拔梯度相比,温性针叶林和针阔混交林的稳定点坐标更接近 Godron 稳定点。这是因为海拔是影响群落结构和植物区系划分的重要因素,山地旱生灌丛和山地疏林草原带处于低海拔地区,易受到人为干扰,而寒温性针叶林带由于风蚀严重、温度较低以及土壤肥力差而生境较差,影响了物种在植物群落中的地位和作用,从而影响了群落稳定性^[43-44]。综上所述,贺兰山东坡灌木群落处于相对不稳定的演替阶段,物种组成、群落结构和竞争性波动,但温性针叶林、针阔混交林群落较为稳定。

在本研究中,海拔高度对于贺兰山东坡典型植被带灌木物种种间关联和群落稳定性具有影响作用。然而,对于种间关联形成的具体原因机制尚不明确,其驱动因素通常涉及复杂多尺度生态过程。因此,未来研究应综合考虑森林空间结构指数、土壤理化性质、地形异质性以及气候因子等多维要素及其交互作用,系统解析脆弱生态系统灌木群落物种种间关联等现象的主导机制和生态学成因。

4 结论

贺兰山东坡灌木群落中,置疑小檗和金露梅的生态位宽度较大,具有较强的资源利用和环境适应能力,对群落组成及稳定性起着重要作用,在贺兰山自然保护区进行植被保护和生态修复过程中应优先考虑。不同海拔梯度下灌木植物生态位重叠程度普遍较低,表明其灌木层主要物种对环境资源的需求存在很大的差异,物种间竞争较缓和,种间关系较稳定。此外,群落总体联结性结果表明,山地旱生灌丛带($VR = 1.99, W = 52.72$)灌木群落主要物种的总体联结性呈显著正相关,山地疏林草原带($VR = 1.09, W = 29.49$)灌木群落总体联结性呈不显著正相关,其他海拔梯度下灌木群落总体联结性呈不显著负相关,种间联结性分析结果也显示,除了山地旱生灌丛带,其余海拔梯度灌木群落中负关联的种对均多于正关联的种对,且绝大多数种对呈不显著相关,说明大部分海拔梯度下灌木物种分布相对独立,种间关联松散且相关性较弱,且随着海拔升高,灌木群落正负联结比呈先减少后增加的趋势,群落稳定性呈先增加后减少的趋势。这说明相较于山地旱生灌丛、山地疏林草原带和寒温性针叶林带,温性针叶林和针阔混交林带灌木生态位分化,竞争减少,呈现植物群落区域共存格局,群落较为稳定。

参考文献 (References):

- [1] Colwell R K, Futuyma D J. On the measurement of niche breadth and overlap. *Ecology*, 1971, 52(4): 567-576.
- [2] 白晓航, 张金屯. 小五台山森林群落优势种的生态位分析. *应用生态学报*, 2017, 28(12): 3815-3826.
- [3] 陈林, 辛佳宁, 苏莹, 李月飞, 宋乃平, 王磊, 杨新国, 卞莹莹, 田娜. 异质生境对荒漠草原植物群落组成和种群生态位的影响. *生态学报*, 2019, 39(17): 6187-6205.
- [4] Wu S N, Dong S K, Wang Z Y, Li S M, Ma C H, Li Z Y. Response of species dominance and niche of plant community to wetland degradation along alpine lake riparian. *Frontiers in Plant Science*, 2024, 15: 1352834.
- [5] 吕安琪, 李东海, 杨小波, 吴律欣. 海南三亚滨海雨林、半落叶季雨林到落叶季雨林的植物群落多样性及种间联结研究. *广西植物*, 2021, 41(3): 384-395.
- [6] 吴丹婷, 吴初平, 盛卫星, 焦洁洁, 江波, 朱锦茹, 袁位高. 浙江建德楠木天然林群落种间联结动态. *浙江农林大学学报*, 2021, 38(4): 671-681.
- [7] Gu L, Gong Z W, Li W Z. Niches and interspecific associations of dominant populations in three changed stages of natural secondary forests on Loess Plateau, PR China. *Scientific Reports*, 2017, 7(1): 6604.
- [8] 刘润红, 姜勇, 常斌, 李娇凤, 荣春艳, 梁士楚, 杨瑞岸, 刘星童, 曾惠帆, 苏秀丽, 袁海莹, 傅桂焕, 吴燕慧. 漓江河岸带枫杨群落主要木本植物种间联结与相关分析. *生态学报*, 2018, 38(19): 6881-6893.
- [9] Su S J, Liu J F, He Z S, Zheng S Q, Hong W, Xu D W. Ecological species groups and interspecific association of dominant tree species in Daiyun Mountain National Nature Reserve. *Journal of Mountain Science*, 2015, 12(3): 637-646.
- [10] 简敏菲, 刘琪, 朱笃, 游海. 九连山常绿阔叶林乔木优势种群的种间关联性分析. *植物生态学报*, 2009, 33(4): 672-680.
- [11] Zhang M T, Kang X G, Meng J H, Zhang L X. Distribution patterns and associations of dominant tree species in a mixed coniferous-broadleaf forest in the Changbai Mountains. *Journal of Mountain Science*, 2015, 12(3): 659-670.
- [12] Sanjerehei M M, Rundel P W. A comparison of methods for detecting association between plant species. *Ecological Informatics*, 2020, 55: 101034.
- [13] Kim T N, Underwood N, Inouye B D. Insect herbivores change the outcome of plant competition through both inter- and intraspecific processes. *Ecology*, 2013, 94(8): 1753-1763.

- [14] Yuan Z L, Wei B L, Chen Y, Jia H R, Wei Q N, Ye Y Z. How do similarities in spatial distributions and interspecific associations affect the coexistence of *Quercus* species in the Baotianman National Nature Reserve, Henan, China. *Ecology and Evolution*, 2018, 8(5): 2580-2593.
- [15] Ding Z Q, Ma K M. Identifying changing interspecific associations along gradients at multiple scales using wavelet correlation networks. *Ecology*, 2021, 102(6): e03360.
- [16] Burke I C, Lauenroth W K, Riggle R, Brannen P, Madigan B, Beard S. Spatial variability of soil properties in the shortgrass steppe: the relative importance of topography, grazing, microsite, and plant species in controlling spatial patterns. *Ecosystems*, 1999, 2: 422-438.
- [17] Yang W J, Wang Y H, Webb A A, Li Z Y, Tian X, Han Z T, Wang S L, Yu P T. Influence of climatic and geographic factors on the spatial distribution of Qinghai spruce forests in the dryland Qilian Mountains of Northwest China. *Science of the Total Environment*, 2018, 612: 1007-1017.
- [18] Zhang J T, Xi Y, Li J. The relationships between environment and plant communities in the middle part of Taihang Mountain Range, North China. *Community Ecology*, 2006, 7(2): 155-163.
- [19] Jiang C C, Fu J Q, Wang Y Q, Chai P T, Yang Y D, Mi X C, Yu M J, Ma K P, Chen J H. The habitat type and scale dependences of interspecific associations in a subtropical evergreen broad-leaved forest. *Forests*, 2022, 13(8): 1334.
- [20] Geng S B, Shi P L, Song M H, Zong N, Zu J X, Zhu W R. Diversity of vegetation composition enhances ecosystem stability along elevational gradients in the Taihang Mountains, China. *Ecological Indicators*, 2019, 104: 594-603.
- [21] Cheng Y, Liu H Y, Dong Z B, Duan K Q, Wang H Y, Han Y. East Asian summer monsoon and topography co-determine the Holocene migration of forest-steppe ecotone in northern China. *Global and Planetary Change*, 2020, 187: 103135.
- [22] 梁存柱, 朱宗元, 王炜, 裴浩, 张韬, 王永利. 贺兰山植物群落类型多样性及其空间分异. *植物生态学报*, 2004, (3): 361-368.
- [23] 杨壹, 邱开阳, 李静尧, 谢应忠, 刘王锁, 黄业芸, 王思瑶, 鲍平安. 贺兰山东坡典型植物群落多样性垂直分布特征与土壤因子的关系. *生态学报*, 2023, 43(12): 4995-5004.
- [24] 李志刚, 梁存柱, 王炜, 王立新, 贾成朕. 贺兰山植物区系的特有性. *内蒙古大学学报(自然科学版)*, 2012, 43(06): 630-638.
- [25] 李佳婧, 梁咏亮, 李静尧, 李小伟, 杨君珑. 基于叶片功能性状的贺兰山西坡植物生态策略分析. *生态环境学报*, 2024, 33(1): 45-53.
- [26] 陈高路, 庞丹波, 马进鹏, 万红云, 王继飞, 李静尧, 陈林, 李学斌. 贺兰山 10 种典型植物光合及水分利用效率特征研究. *西北植物学报*, 2021, 41(2): 290-299.
- [27] Zheng J, Arif M, He X R, Ding D D, Zhang S L, Ni X L, Li C X. Plant community assembly is jointly shaped by environmental and dispersal filtering along elevation gradients in a semiarid area, China. *Frontiers in Plant Science*, 2022, 13: 1041742.
- [28] 吴梦瑶, 陈林, 庞丹波, 刘波, 刘丽贞, 邱开阳, 李学斌. 贺兰山不同海拔土壤团聚体碳氮磷含量及其化学计量特征变化. *应用生态学报*, 2021, 32(4): 1241-1249.
- [29] Chen M, Mo F Y, Zheng L L, Bin G L, Zou Z Y, Chen P Q, Xue Y G. Correlation and community stability analysis of herbaceous plants in Dashiwei Tiankeng Group, China. *Forests*, 2023, 14(6): 1244.
- [30] Bishara A J, Hittner J B. Testing the significance of a correlation with nonnormal data: comparison of Pearson, Spearman, transformation, and resampling approaches. *Psychological Methods*, 2012, 17(3): 399-417.
- [31] 刘润红, 白金连, 包含, 农娟丽, 赵佳佳, 姜勇, 梁士楚, 李月娟. 桂林岩溶石山青冈群落主要木本植物功能性状变异与关联. *植物生态学报*, 2020, 44(8): 828-841.
- [32] Shao L Y, Zhang G F. Niche and interspecific association of dominant tree populations of *Zelkova schneideriana* communities in Eastern China. *Botanical Sciences*, 2021, 99(4): 823-833.
- [33] Haak C R, Hui F K C, Cowles G W, Danylchuk A J. Positive interspecific associations consistent with social information use shape juvenile fish assemblages. *Ecology*, 2020, 101(2): e02920.
- [34] Jin S S, Zhang Y Y, Zhou M L, Dong X M, Chang C H, Wang T, Yan D F. Interspecific association and community stability of tree species in natural secondary forests at different altitude gradients in the southern Taihang mountains. *Forests*, 2022, 13(3): 373.
- [35] Liu Z W, Zhu Y, Wang J J, Ma W, Meng J H. Species association of the dominant tree species in an old-growth forest and implications for enrichment planting for the restoration of natural degraded forest in subtropical China. *Forests*, 2019, 10(11): 957.
- [36] 高亮, 江子涵, 洪子辰, 郑笑, 周艳, 陈水飞, 陈世品, 林文俊. 武夷山国家公园甜槠林主要树种生态位与种间联结分析. *植物资源与环境学报*, 2024, 33(6): 65-73.
- [37] 李佳灵, 林育成, 王旭, 刘海伟, 文关四, 王帅, 张晓琳. 海南吊罗山不同海拔高度热带雨林种间联结性对比研究. *热带作物学报*, 2013, 34(3): 584-590.
- [38] Yavitt J B, Smith E L. Spatial patterns of mesquite and associated herbaceous species in an Arizona desert grassland. *American Midland Naturalist*, 1983, 109(1): 89-93.
- [39] Ma Y M, Li Q H, Pan S P, Liu C, Han M S, Brancelj A. Niche and interspecific associations of *Pseudoanabaena limnetica*-Exploring the influencing factors of its succession stage. *Ecological Indicators*, 2022, 138: 108806.
- [40] 陈倩, 陈杰, 钟娇娇, 姬柳婷, 康冰. 秦岭山地油松天然次生林灌木层主要种群种间联结性与功能群划分. *应用生态学报*, 2018, 29(6): 1736-1744.
- [41] 李意德, 许涵, 陈德祥, 骆士寿, 莫锦华, 罗文, 陈焕强, 蒋忠亮. 从植物种群间联结性探讨生态种组与功能群划分——以尖峰岭热带低地雨林乔木层数据为例. *林业科学*, 2007, 43(4): 9-16.
- [42] 裴顺祥, 法蕾, 杜满义, 郭嘉, 辛学兵. 种间关系对中条山油松人工林天然更新及群落稳定性的影响. *林业科学研究*, 2022, 35(1): 150-157.
- [43] Cabrera O, Benítez Á, Cumbicus N, Naranjo C, Ramón P, Tinitana F, Escudero A. Geomorphology and altitude effects on the diversity and structure of the vanishing montane forest of southern Ecuador. *Diversity*, 2019, 11(3): 32.
- [44] 陈绪辉, 叶宝鉴, 潘标志, 林碧华, 罗敏贤, 肖丽芳, 刘宝, 何宗明, 郑世群. 珍稀濒危植物江南油杉群落乔木层主要树种种间关联性分析. *热带亚热带植物学报*, 2023, 31(1): 21-30.