

文章编号: 1008-2786-(2018)5-699-10

DOI:10.16089/j.cnki.1008-2786.000366

贺兰山灌丛群落物种多样性海拔格局及环境解释

苏 闯, 张芯毓, 马文红*, 赵利清, 梁存柱

(内蒙古大学 生态与环境学院, 呼和浩特 010000)

摘 要: 贺兰山是一条重要的草原与荒漠的自然地理分界线,也是我国西北地区一道重要的生态屏障。灌木是贺兰山最主要的植被组成,但对贺兰山灌木多样性的分布格局及其影响因素却很少有专门研究。本文对内蒙古贺兰山西坡沿不同海拔分布的 13 类主要灌丛群落进行了野外调查,探讨物种多样性沿海拔梯度的分布格局及其与海拔、土壤、人为干扰等环境因子的关系。结果表明:(1)灌木层与草本层的物种丰富度随海拔上升总体呈微弱的单峰格局,Shannon-Wiener 指数(H')、Simpson 指数(D)和 Pielou 均匀度指数(E)随着海拔上升均未表现出明显的垂直分布格局。(2)除 Pielou 均匀度指数外,灌木层郁闭度与下层草本植物的物种多样性呈显著的二项式回归关系,最大值出现在约 40% 的灌木层相对盖度处。(3)海拔、坡度和土壤质地等多种环境因子共同影响着贺兰山灌丛群落的物种组成及其多样性垂直分布格局,其中海拔是主要的限制因素。本研究有望实现对该地区灌丛群落研究的扩展和完善,并为灌丛资源的科学保育及管理提供参考。

关键词: 贺兰山;灌丛群落;物种多样性;海拔梯度;环境因子

中图分类号: Q948

文献标志码: A

山地是一个天然的生态学实验室,因其生态环境错综复杂、植物种类多样,使得山地物种多样性的垂直分布格局及其与海拔等环境因子间的关系成为近年来研究者关注的热点^[1,2]。海拔梯度涵盖了温度、降水和太阳辐射等多种环境要素的综合影响,在决定山地物种多样性垂直分布格局方面扮演着重要角色^[3,4]。大量研究表明,随着海拔的上升,物种多样性通常表现为单调下降型分布格局^[5],或没有明显的变化规律^[6],或先升高后降低的“单峰”格局^[7]等。这种单峰格局在温带干旱区山地较为常见^[8],并且往往因研究区的自然环境和研究对象等方面的差异呈现不同的生态学解释,其中以降水量在中海拔区域达到峰值^[9]和人为干扰^[10]等论断较为多见。干旱区山地的低海拔基带气候条件严酷,常年干旱

少雨,土壤相对贫瘠,植物的生长发育通常受降水限制^[11],并且容易受到人为干扰;而高海拔区域气候寒冷,雨量充沛且风速较大,受人为干扰较小,植物的生长主要受温度限制^[12];相比之下,中海拔地区则可能为植物生长提供了相对优越的水热资源配置,从而导致更高的资源利用率和更多物种的存在^[13]。

贺兰山是内蒙古境内海拔最高的山地,作为西北干旱区一条极为重要的生态屏障^[14],贺兰山在拦截源自阿拉善的沙尘暴等方面起着巨大作用^[15]。贺兰山地处温带草原与荒漠的交错带,山体高耸,植被类型复杂多样,并且具有一定的过渡特征,是内蒙古多个区域生物多样性中心的核心区域^[16],也是西北干旱区一个极为重要的生物资源宝库^[17]。灌丛

收稿日期(Received date):2018-04-22;改回日期(Accepted date):2018-09-29

基金项目(Foundation item):国家科技基础性工作专项;我国主要灌丛植物群落调查(2015FY110300)。^[National Special Project of Basic Work Of Science and Technology; Investigation of Main Scrubland Plant Community of China (2015FY110300)]

作者简介(Biography):苏闯(1993-),男,山东济宁人,硕士研究生,主要研究方向:生物多样性。^[SU Chuang (1993-), male, born in Jining, Shandong province, M. Sc. candidate, research on biodiversity] E-mail:suchuang0044@163.com

* 通讯作者(Corresponding author):马文红(1977-),女,博士,副教授,主要研究方向:草地生态系统碳循环,生物多样性与生态系统功能。^[MA Wenhong(1977-), female, Ph. D., assistant professor, specialized in grassland ecosystem carbon cycle, biodiversity and ecosystem functions.] E-mail:whmapku@126.com

是以在群落中占据优势地位的灌木物种构成的植被类型,高度在 5 米以下,覆盖度大于 30%^[18],在群落演替、资源植物、区域生态环境保护等方面都起着非常重要的作用^[19]。据统计,贺兰山地区共有 21 种灌丛群落,其中分布于山前荒漠草原带的斑茅麻黄 (*Ephedra rhytidosperma*) 群落和四合木 (*Tetraena mongolica*) 群落等更是为贺兰山所特有^[20],种类繁多的灌丛类型对于丰富干旱区生物多样性及生态系统功能具有不可估量的调控作用。因此,探讨贺兰山灌丛群落的垂直分布格局及其影响因素对于丰富我国西北部的植被研究具有重要意义。

近年来不少研究报道了贺兰山的物种多样性^[17, 21],但针对灌丛群落物种多样性的专项研究报道并不多见。不仅如此,贺兰山低海拔区域近年来经常受到旅游、放牧等人为干扰^[22],对各类灌丛群落多样性的调查和分析则是保护这些灌木资源的基础,加之全球气候变化可能对灌木物种产生多种潜在的影响,亟待我们了解这些植物资源的分布格局、生长状况及其影响因素。基于此,本文详细调查了内蒙古贺兰山主要灌丛群落的物种组成、群落结构以及与其生长发育密切关联的多个环境因子,分析灌丛群落物种多样性的垂直变化规律,并探讨其影响因素,旨在为贺兰山自然保护区灌丛资源的科学保育和合理利用提供参考。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

贺兰山坐落在我国温带草原与荒漠的过渡地带,地处蒙古高原阿拉善荒漠的东南边缘,地理坐标 37°40'~39°30' N, 105°20'~106°40' E^[14]。山脉总体为东北—西南走向,主峰海拔高达 3556 m,是内蒙古境内最高的山峰。由于深居内陆,贺兰山地区具有较为典型的温带大陆性气候,山体日照充足,无霜期仅 60~70 天,年均温由山前的 7.3℃ 到主峰可降至 -0.9℃;年降水量垂直分异明显并且年际间变化很大,降水跨度由山基的 200 mm 到主峰可达 500 mm^[23]。贺兰山的海拔高差超过 2000 m,植被类型多样且垂直变化明显。坡向的分异,加之地形、地貌等地理要素在不同海拔段的变化,形成贺兰山地区错综复杂的生态环境。

1.2 研究方法

我们于 2017 年 7 月,参照方精云等^[24]的方法

设置灌丛群落的调查样方,在内蒙古自治区阿拉善左旗贺兰山自然保护区,从乌斯太镇阿日善山(海拔 1283 m)到贺兰山主峰(海拔 3472 m),选择连片分布、斑块面积大于 100 m × 100 m 的灌丛群落,选取外部生境和群落结构都相对均匀的样地,沿对角线设置 3 个 5 m × 5 m 的样方,调查灌木及乔木,在每个样方内沿对角线布置 3 个 1 m × 1 m 的小样方进行草本层植物调查。样点的选取及布设主要兼顾以下原则:①地域代表性:灌丛群落在该区域重点分布;②灌丛的重要性:虽然分布面积小,但是具有科学、经济、生态、珍稀等重要价值的群落类型也应纳入调查范围;③调查地区的可达性:结合实际考虑调查的可到达性等因素。综合上述样地选取原则及样方设置方法,累计布设 13 个样地(图 1),39 个灌木样方和 117 个草本样方,样地基本信息见表 1。

1.3 调查内容

1.3.1 野外植被调查

本研究的调查内容包括:(1)样地基本信息,包括调查地点、优势灌丛群落类型、经纬度、海拔、坡向、坡度、样地是否受到干扰及干扰类型和强度等。其中坡向的原始记录是以地质罗盘仪 0°(正北方向)为起点,逆时针旋转的角度表示:0°和 360°(N)、90°(E)、180°(S)、270°(W)。干扰强度分为无干扰、轻微、中度和重度干扰:若草本层受到影响而灌木层未受影响视为轻微干扰;当灌木层受到轻微影响时视为中度干扰;若灌木层物种组成或优势种生长受到较大影响,则视为重度干扰。干扰类型包括自然(地质灾害、气候灾害)、火烧、人为放牧、砍伐、工程建设等。(2)对于乔木层,记录样方内出现的所有乔木种的种名、高度、胸围和物候期。(3)对灌木层,目测样方内灌木层总盖度,详细调查灌木物种名、每种灌木的最大高度、平均高度、冠幅(长轴和短轴)、茎秆平均基径、物候期,以及样方内的灌木物种数和植株个体数(株丛数)等。(4)对于草本层,详细调查并记录样方内出现的草本物种名、盖度、高度、物种数、多度级和物候期。(5)在 1 m × 1 m 小样方内记录苔藓层总盖度,对于优势灌木物种的更新苗,记录其物种名、平均高度、多度级等信息。野外采集所调查到的乔木、灌木和草本植物标本,室内鉴定准确的物种名称。本研究共调查到种子植物 46 科 124 属 205 种,其中灌木物种(包括灌木状的青海云杉和杜松)^[25]分布有限,共记录 21 科 32 属 39 种,而草本物种类型较为丰富,包括

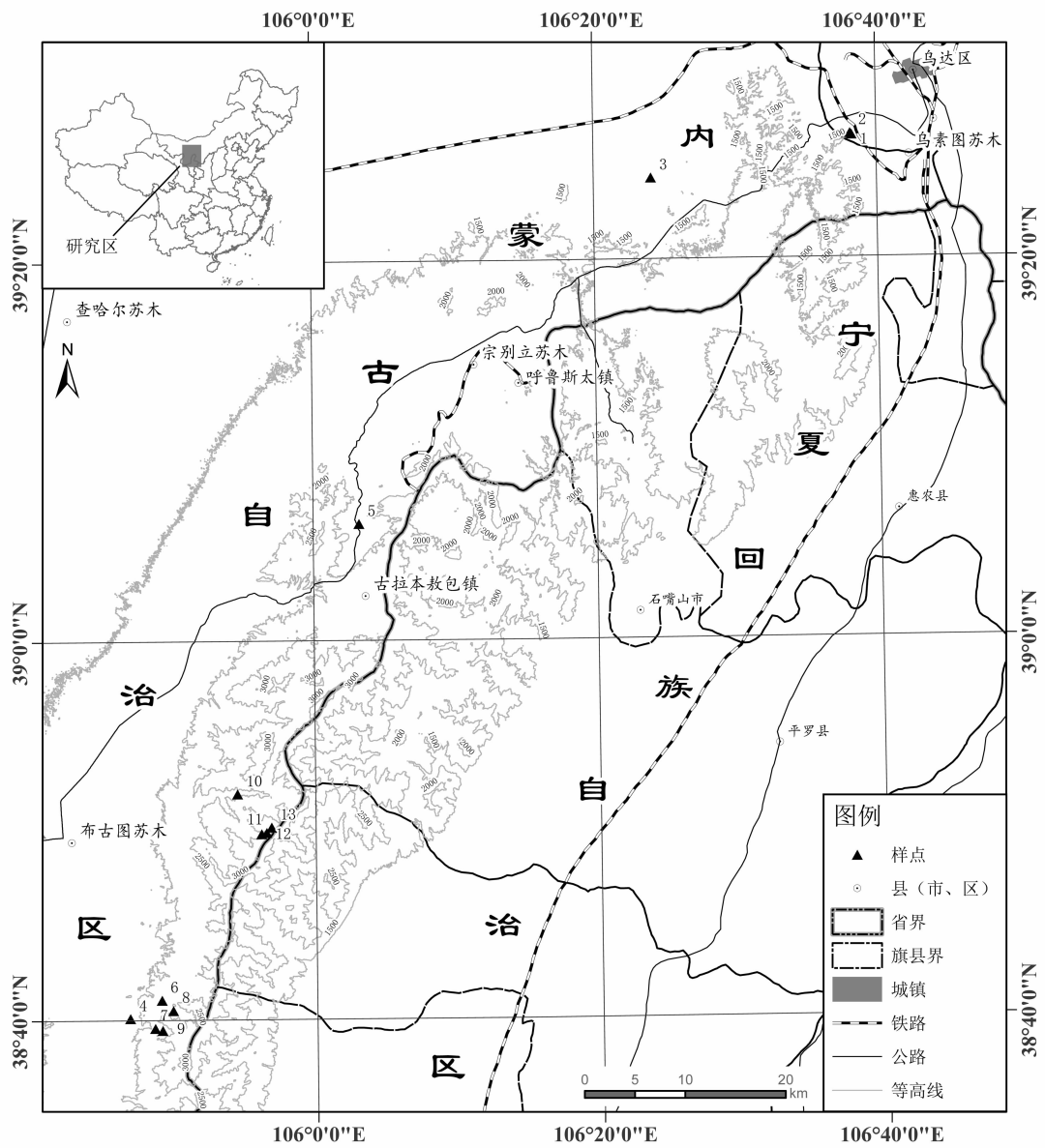


图 1 13 个调查样点的分布示意图

Fig. 1 Distribution of 13 survey samples over the Helan Mountains, China

35 科 99 属 166 种。

1.3.2 土壤理化性质测定

土壤是构成陆地碳库的重要组分,与凋落物分解、土壤呼吸等多种生物化学过程密切相关,尤以表层土壤聚集了大量的枯落物及碳素、氮素等营养元素,是土壤有机碳(Soil Organic Carbon, SOC)的主要贮存场所^[26],对气候变化的影响较为敏感。群落特征调查完成后,在每个 5 m × 5 m 样方内沿对角线选择 3 个点,先去除未分解及半分解的凋落物层(不能分辨形状的有机质层记入土壤),用土钻钻取 0 ~ 20 cm 的土样,混合均匀后装入塑封袋。利用 METTLER TOLEDO 台式 pH 仪测定土壤酸碱度

(水:土 = 2.5:1);采用实验室常用的重铬酸钾容量法对表层土壤中有机质的含量进行测定,运用 vario MACRO cube 元素分析仪采用燃烧法测定全氮含量,土壤粒径各组分的百分含量则通过 Microtrac S3500 型激光粒度仪测定。

1.4 物种多样性分析

1.4.1 重要值

分别计算灌木和草本物种的重要值,由于灌木层和草本层植物或丛生、或单生,个体间存在明显差异,而高度和盖度指标能充分反映其实际生长状况,故用相对高度和相对盖度计算其重要值,公式为^[27]:

重要值(%): $IV = (\text{相对高度} + \text{相对盖度})/2$ (1)

表 1 贺兰山样地基本信息
Tab. 1 Basic information of the plots selected over the Helan Mountain

样地 编号 Plot No.	群落类型 Community type	纬度 Latitude	经度 Longitude	海拔 Altitude (m)	坡向 Exposure (°)	坡度 Slope (°)	坡位 Slope position	干扰强度 Disturbance intensity	干扰类型 Disturbance type
1	四合木 <i>Tetraena mongolica</i>	39°26'27.80"	106°38'15.18"	1283	—	—	—	无	无
2	半日花 <i>Helianthemum songaricum</i>	39°26'32.65"	106°38'08.85"	1295	95	22	下部	无	无
3	霸王 <i>Zygophyllum xanthoxylon</i>	39°24'18.56"	106°24'02.86"	1355	—	—	—	轻微	放牧
4	斑叶麻黄 <i>Ephedra lepidosperma</i>	38°40'06.62"	105°46'53.83"	1832	113	28	下部	轻微	放牧
5	蒙古扁桃 <i>Amygdalus mongolica</i>	39°06'10.52"	106°03'12.93"	1853	214	23	下部	无	无
6	准噶尔栒子 <i>Cotoneaster soongoricus</i>	38°41'03.91"	105°49'07.02"	2060	20	31	中部	无	无
7	紫丁香 <i>Syringa oblata</i>	38°39'34.93"	105°48'38.63"	2074	351	46	中部	无	无
8	小叶金露梅 <i>Potentilla parvifolia</i>	38°40'31.10"	105°49'54.43"	2179	213	24	中部	中度	放牧
9	虎榛子 <i>Ostryopsis davidiana</i>	38°39'28.52"	105°49'09.39"	2196	314	31	中部	无	无
10	小叶忍冬 <i>Lonicera microphylla</i>	38°51'56.39"	105°54'31.24"	2333	347	35	中部	无	无
11	银露梅 <i>Potentilla glabra</i>	38°49'48.94"	105°56'11.45"	2876	253	26	上部	无	无
12	山生柳 <i>Salix oritrepha</i>	38°49'53.27"	105°56'32.18"	3053	275	39	上部	无	无
13	鬼箭锦鸡儿 <i>Caragana jubata</i>	38°50'09.92"	105°56'53.12"	3472	270	23	上部	无	无

1.4.2 物种多样性测度

采用多种测度多样性的指数^[28]进行计算和分析:

物种丰富度: S = 出现在样方内的物种数
Shannon-Wiener 物种多样性指数:

$$H' = - \sum_{i=1}^S P_i \ln P_i \tag{2}$$

Simpson 生态优势度指数:

$$D = 1 - \sum_{i=1}^S P_i^2 \tag{3}$$

Pielou 均匀度指数:

$$E = H' / \ln S \tag{4}$$

式中, P_i 为物种 i 的重要值, 各物种的重要值及群落物种多样性指数的计算与制图均在 R 3.4.4 软件中完成。

1.5 DCCA 分析

以 205 个物种在 39 个样方中的重要值(草本各物种的重要值为每个灌木样方中 3 个草本样方各物种重要值的均值)构建重要值矩阵。选择海拔、坡向、土壤有机质和全氮含量等 10 个环境因子, 构建环境因子矩阵。其中对坡位和坡向指标进行数量分级^[29], 坡向: 阴坡(0 ~ 45°、315° ~ 360°) 1.0、半阴坡(45° ~ 135°) 0.8、半阳坡(225° ~ 315°) 0.5、阳坡(135° ~ 225°) 0.3; 坡位: 上部(0.4)、中部(1.0)、下

部(0.8)。通过对调查样方和环境参数进行 DCCA (Detrended Canonical Correspondence Analysis) 排序分析, 绘制排序图^[3], 并采用蒙特卡罗置换检验法(499 permutations)对 DCCA 排序轴进行显著性检验, 该过程在 Canoco for Windows 4.5 软件中完成。

2 结果与分析

2.1 物种多样性沿海拔梯度的分布

贺兰山灌丛群落的物种多样性指数随海拔梯度的变化趋势见图 2。可以看出, 灌木层与草本层的物种数随着海拔上升总体都表现出先增加后降低的趋势, 即微弱的单峰分布格局, 两者在 1800 ~ 2500 m 的中海拔区域均出现较高的分布值, 并分别在海拔 2333 m 和 2196 m 处达到各自的峰值(分别为 7.3 和 28.7)。海拔 3472 m 的贺兰山顶完全被高寒灌丛鬼箭锦鸡儿(*Caragana jubata*)占据, 故灌木层物种丰富度处在极低水平。不仅如此, 除鬼箭锦鸡儿群落的灌木层以外(仅有一个物种, 灌木层 H' 、 D 、 E 为空值), Shannon-Wiener 指数(H')、Simpson 指数(D)沿海拔梯度均未表现出明显的垂直梯度格局, Pielou 均匀度指数(E)沿海拔的波动较大, 也没有表现出明显的变化规律。

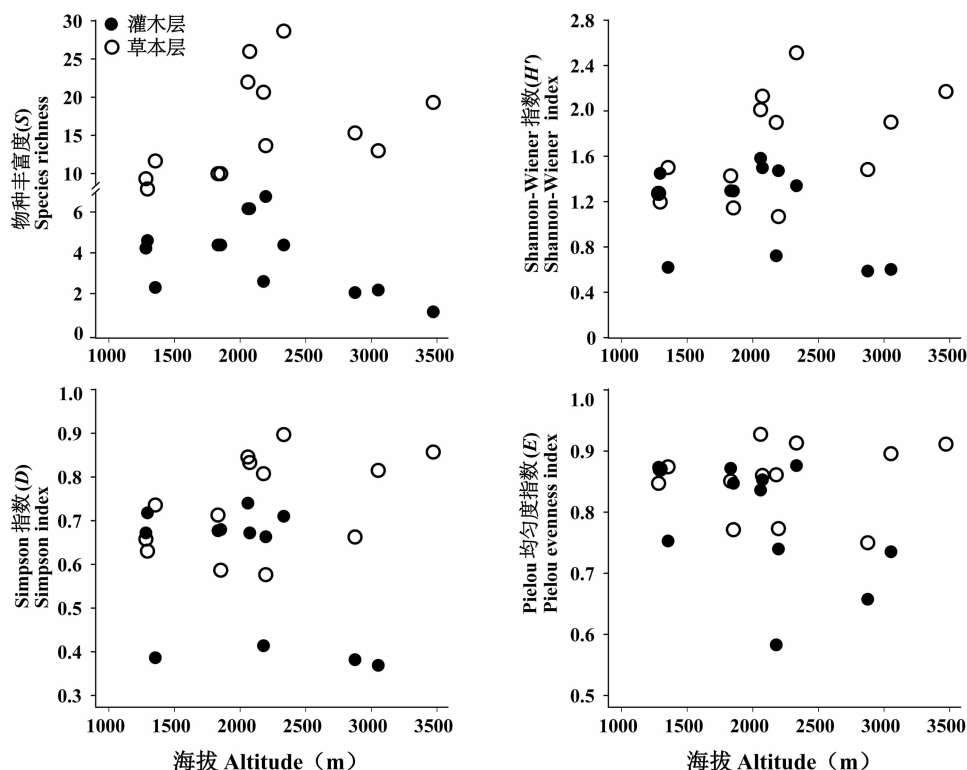


图2 灌木层和草本层物种多样性指数的垂直分布格局

Fig. 2 Vertical distribution pattern of species diversity index in shrub layer and herb layer

2.2 灌木层郁闭度与草本层物种多样性的关系

本研究以灌木层相对盖度和草本层物种多样性指数建立回归关系,分析不同的灌木层郁闭度对下层草本物种多样性的影响(图3)。可以看出,草本层的物种丰富度(S)、Shannon-Wiener 指数(H')和 Simpson 指数(D)与灌木层相对盖度之间具有显著的二项式回归关系($P < 0.01$)。当样方内灌木层的相对盖度低于约40%时,下层草本的物种数和多样性随着灌木层郁闭度的增加而增加;当相对盖度超过40%时,随着灌木层郁闭度的增加,草本层物种数和多样性均逐渐降低,Pielou 均匀度指数(E)与灌木层郁闭度没有表现出显著关系。

2.3 DCCA 排序及环境解释

采用 DCCA 对贺兰山灌丛群落进行排序分析,结果见图4。图中各箭头代表海拔、坡向和坡度等环境要素,箭头与其所连线段的长短表征该环境要素与灌丛群落空间分布的相关性的强弱。由图可知,DCCA 排序轴基本反映了贺兰山灌丛群落所在的环境梯度。第一排序轴主要反映了海拔、土壤有机质和土壤全氮含量的变化,即沿着第一轴从左到右,三种环境因子梯度均逐渐升高;第二排序轴则基

本显示出坡位梯度和坡向梯度的变化,沿着第二轴从下到上,坡向逐渐由阴坡、半阴坡过渡为半阳坡、阳坡,坡位也由下坡位逐渐向上坡位过渡。排序图的左侧区域分布着四合木、半日花、霸王和斑子麻黄群落,生境温暖干旱;而靠右侧区域则排布着银露梅、山生柳和鬼箭锦鸡儿群落,生境寒冷湿润,与贺兰山实际灌丛群落沿海拔梯度的分布基本相符,排序效果较好。总体来看,环境因子的矢量线均相对较长,与灌丛群落的分布关系密切。

表2为 DCCA 各环境要素与前两个排序轴之间的相关系数、特征值等排序结果,可以看出,前两个排序轴均达到显著性水平($F = 2.379, P = 0.002$)。除坡向和坡位之外,第一排序轴与海拔、坡度、全氮、pH、土壤有机质、砂砾、粉粒和黏粒含量共8种环境要素的相关性均达到极显著水平($P < 0.001$),其中与海拔的相关性最高,各环境要素与灌木物种之间的相关系数为0.996。第二排序轴与坡向、坡位和坡度均呈极显著正相关($P < 0.001$),这三种环境要素与灌木物种之间的相关系数为0.928,前两轴累计解释了各环境因子与灌丛群落分布之间关系的32.3%。

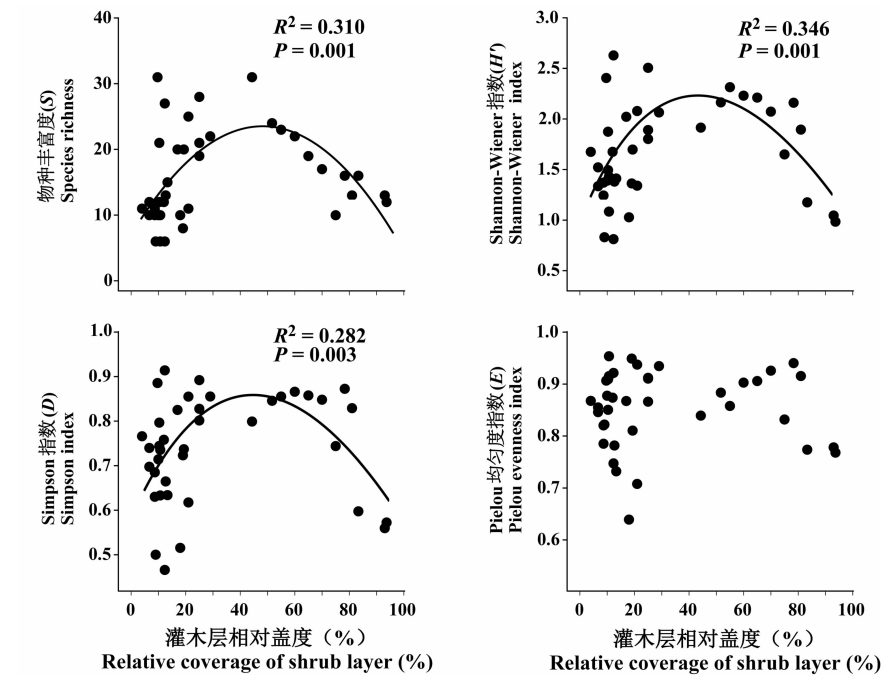
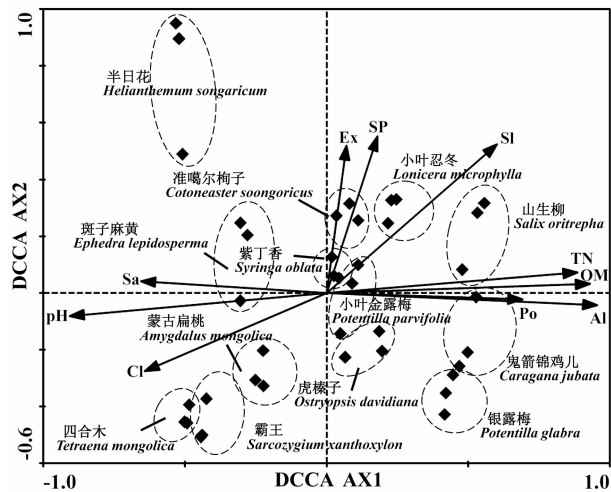


图3 灌木层相对盖度与草本物种多样性指数回归分析

Fig.3 Regression analysis of relative coverage of shrub layer and diversity index of herbaceous species



(Ex:坡向 Exposure; SP:坡位 Slope position; SI:坡度 Slope; TN:土壤全氮 Total nitrogen; OM:土壤有机质 Organic matter; Al:海拔 Altitude; Po:粉粒含量 Powder content; Cl:土壤黏粒含量 Clay content; pH:pH value; Sa:土壤砂粒含量 Sand content)

图4 DCCA 二维排序图

Fig.4 DCCA 2D Layout of 39 samples

3 讨论

3.1 贺兰山灌丛群落物种多样性的垂直分布格局

过去的研究表明,“单峰”格局是山地植被物种多样性较为常见的分布格局。Parastoo Mahdavi^[30]在伊朗半干旱区的 Alborz 山,以及 LEE ChangBae^[31]

表2 各环境要素与前两个排序轴间的相关系数、特征值和解释方差排序结果

Tab.2 Correlation coefficient, eigenvalue and explanatory variance ranking results of environmental factors and first two species ranking axis of DCCA

指标 Indications	第一轴 Axis 1	第二轴 Axis 2
海拔 Altitude	0.9519 ***	-0.0403
坡向 Exposure	0.0697	0.4823 **
坡度 Slope	0.5996 ***	0.4855 **
坡位 Slope position	0.1788	0.5121 ***
全氮 Total nitrogen	0.8819 ***	0.0670
有机质 Organic matter	0.9265 ***	0.0297
pH	-0.9039 ***	-0.0753
砂砾 Sand	-0.6528 ***	0.0384
粉粒 Powder	0.6892 ***	-0.0214
黏粒 Clay	-0.6398 ***	-0.2550
特征值 Eigenvalues	0.953	0.552
物种-环境相关系数 Species-environment correlations	0.996	0.928
物种-环境关系方差累计贡献率 Cumulative percentage variance of species data/%	20.4	32.3
排序轴显著性检验	F = 2.379	P = 0.002

* P < 0.05; ** P < 0.01; *** P < 0.001

在韩国 Baekdudaegan 山的研究均发现,物种丰富度及其他多样性指数随着海拔上升呈单峰格局,国内的相关研究也得到同样的结论^[32]。本文与上述国内外多个地区以及朱源^[25]早先在贺兰山的研究结果相似,灌木层和草本层物种丰富度沿海拔梯度均呈微弱的单峰格局,但是变化趋势并不显著,各多样性指数 H' 、 D 、 E 均没有明显的垂直变化规律。分析认为,贺兰山低海拔区域干旱少雨的气候条件,加上相对贫瘠的土壤质地,可能导致仅有少数耐旱性较强的灌木和草本物种生存,物种数和多样性均处在较低水平;到达中海拔区域,降水量充沛,温度适宜,优越的水热条件促使灌木和草本物种的丰富度和多样性都逐渐达到峰值;位于高海拔区域的贺兰山顶,山体陡峭,日照时间长,风速较大,导致土壤蒸发强烈,容易造成严重的干旱缺水^[33],加上气候寒冷且昼夜温差大^[12],仅少数适应性较强的高寒灌丛、高山草甸和嵩草生存,所以物种数量有限,物种丰富度和多样性水平较低。

3.2 干扰对物种多样性的影响

植物的生长发育及其多样性分布除了受自身的生物学特性及自然环境影响外,还受到外界的干扰,不同类型和强度的干扰可能导致其外部生存环境和内部群落结构等发生改变。冯建孟等^[34]研究表明,干扰可能会降低物种多样性,而郝建锋等^[22]研究发现,同一群落中不同生活型植物对外界干扰的响应也存在明显差异。从本文的测度结果来看,位于中低海拔区域的霸王和小叶金露梅群落均受到不同强度的放牧干扰,表现出灌木层较低但草本层却相对较高的物种多样性水平。霸王和小叶金露梅的饲口性较好,为贺兰山地区马鹿、岩羊等野生动物或家畜所喜食,很可能在生长季被大量啃食,加上灌木的更新速度相对较慢,故其物种多样性相对较低。然而对草本植物而言,动物的践踏和啃食降低了上层郁闭度,为下层草本植物提供了更充足的光照条件和生存空间,并对优势灌木物种占据的生态位起到一定的限制作用,削弱了种间竞争,加上草本植物的更新速度相对较快,多种因素的综合影响可能导致其形成相对较高的物种多样性。

3.3 灌木层郁闭度对草本层物种多样性的影响

郁闭度是影响下层草本物种组成及多样性的重要环境因子,上层植被的郁闭度通过光照、局部区域温度和紫外线强度等多方面的差异实现对温度和湿

度的再分配,从而间接影响草本植物的分布^[35]。本研究中,草本层物种丰富度和其他多样性指数在中海拔区域的虎榛子群落均处于相对较低的水平,这很可能是由于该群落极高的灌木层盖度(约 90%)使得下层草本生存生长所必需的光照条件无法得到充分保障,导致其物种多样性较低。总体来看,随着灌木层相对盖度的增加,下层草本趋于先增后减的多样性变化趋势,这一结果与刘晓瞳等^[36]的研究结果类似。分析认为,这可能是由于在一定范围内,上层灌木的相对盖度逐渐增加,为低海拔区域草本植物提供了良好的遮阴作用,减少了地表水分的蒸发,使草本层物种数和多样性随着灌木层盖度的增加而逐渐上升。当灌木层盖度超过一定阈值(约 40%)时,过多的荫蔽使得草本植物生长所必需的光照减少,物种多样性降低。

3.4 灌丛群落物种多样性沿海拔分布的环境解释

通过将灌木物种与各环境因子进行排序分析,可以找到制约或影响灌丛群落沿海拔梯度分布的关键因子。DCCA 能同时将植被数据和环境因子有机结合进行计算和排序,是近年来探索植被的空间分布并找寻其外在影响因素的重要方法。一般而言,在景观尺度上,海拔等环境因子的改变可以对局部气候产生一定影响,从而在一定程度上对植被类型做出改变,而局部微环境、小气候和土壤质地等通常是形成植物群落的决定性因素^[37]。本文的排序结果显示,DCCA 排序图中位置邻近的植物群落,其实际生境也存在一定的相似性。贺兰山灌丛群落沿海拔梯度的分布受多种环境因子的共同影响,其中海拔高度是最关键的限制因子,它与坡向、坡位、坡度以及土壤理化性质等协调作用,通过改变温度、水分、光照及养分等物质和能量的再分配^[38],共同影响贺兰山地区灌丛群落的垂直分布格局。

4 结论

(1) 灌丛群落物种多样性沿海拔梯度总体呈微弱的“单峰”型分布格局,灌木层和草本层的物种丰富度均在 1800 ~ 2500 m 的中海拔区域出现较高的分布值。

(2) Shannon-Wiener 指数、Simpson 指数和 Pielou 均匀度指数随着海拔上升均未表现出明显的垂直梯度格局。

(3)除 Pielou 均匀度指数外,下层草本植物的物种丰富度和其他多样性指数随着灌木层郁闭度的增加呈先升高后降低的变化趋势,当灌木层郁闭度达到约 40% 时,草本层物种多样性达到最大值。

(4)海拔是影响灌丛群落结构、物种组成及其多样性垂直分布的主要环境因子,它与坡度、坡向、土壤理化性质等共同影响贺兰山灌丛群落的物种多样性海拔梯度格局。

致谢:感谢内蒙古大学董雷和苗百岭博士,以及本科生张晋元和闵永恩在野外调查过程中给予的支持和帮助,感谢旭日博士为标本鉴定做出的贡献!

参考文献 (References)

- [1] WHITTAKER R H. Gradient analysis of vegetation[J]. Biological reviews of the Cambridge Philosophical Society, 1967, **42**(2): 207–264
- [2] PAULI H, GOTTFRIED M, DULLINGER S, et al. Recent plant diversity changes on Europe's mountain summits[J]. Science, 2012, **336**(6079): 353–355
- [3] 徐远杰, 陈亚宁, 李卫红, 等. 伊犁河谷山地植物群落物种多样性分布格局及环境解释[J]. 植物生态学报, 2010, **34**(10): 1142–1154 [XU Yuanjie, CHEN Yaning, LI Weihong, et al. Distribution pattern and environmental interpretation of plant species diversity in the mountainous region of ili River Valley, Xinjiang, China[J]. Chinese Journal of Plant Ecology, 2010, **34**(10): 1142–1154]
- [4] 李海东, 陈斌, 曹学章, 等. 基于 SPOT-VGT NDVI 的雅鲁藏布江流域植被动态变化[J]. 《山地学报》, 2016, **34**(2): 249–256 [LI Haidong, CHEN Bin, CAO Xuezhong, et al. Dynamic changes in vegetation coverage in the Yarlung Zangbo River Basin based on SPOT-VGT NDVI[J]. Mountain Research, 2016, **34**(2): 249–256]
- [5] GLENN-LEWIN D C. Species diversity in North American temperate forests[J]. Vegetatio, 1977, **33**(2–3): 153–162
- [6] WILSON J B, SYKES M T. Some tests for niche limitation by examination of species diversity in the Dunedin area, New Zealand[J]. New Zealand Journal of Botany, 1988, **26**(2): 237–244
- [7] LIU B. Vertical patterns in plant diversity and their relations with environmental factors on the southern slope of the Tianshan Mountains (middle section) in Xinjiang (China)[J]. Journal of Mountain Science, 2017, **14**(4): 742–757
- [8] LIU Z, LI Q, CHEN D, et al. Patterns of plant species diversity along an altitudinal gradient and its effect on above-ground biomass in alpine meadows in Qinghai-Tibet Plateau[J]. Biodiversity Science, 2015, **23**(4): 451–462
- [9] TANG C Q, OHSAWA M. Zonal transition of evergreen, deciduous, and coniferous forests along the altitudinal gradient on a humid subtropical mountain, Mt. Emei, Sichuan, China[J]. Plant Ecology, 1997, **133**(1): 63–78
- [10] SANDERS N J. Elevational gradients in ant species richness: area, geometry, and Rapoport's rule[J]. Ecography, 2002, **25**(1): 25–32
- [11] WANG Z H, TANG Z Y, FANG J Y. Altitudinal patterns of seed plant richness in the Gaoligong Mountains, south-east Tibet, China[J]. Diversity & Distributions, 2007, **13**(6): 845–854
- [12] 唐志尧, 方精云. 植物物种多样性的垂直分布格局[J]. 生物多样性, 2004, **12**(1): 20–28 [TANG Zhiyao, FANG Jingyun. A review on the elevational patterns of plant species diversity[J]. Biodiversity Science, 2004, **12**(1): 20–28]
- [13] MCCAIN C M. Could temperature and water availability drive elevational species richness patterns? A global case study for bats[J]. Global Ecology and Biogeography, 2007, **16**(1): 1–13
- [14] LIU B. Changes in soil microbial biomass carbon and nitrogen under typical plant communities along an altitudinal gradient in east side of Helan Mountain[J]. Ecology & Environmental Sciences, 2010, **19**(4): 883–888
- [15] ZHENG J G, CHEN Y W, WU G X. Association of vegetation patterns and environmental factors on the arid western slopes of the Helan Mountains, China[J]. Mountain Research and Development, 2013, **33**(3): 323–331
- [16] WANG H S, ZHANG Y L. The bio-diversity and characters of spermatophytic genera endemic to China[J]. Acta Botanica Yunnanica, 1994, **16**(3): 209–220
- [17] 梁存柱, 朱宗元, 王炜, 等. 贺兰山植物群落类型多样性及其空间分异[J]. 植物生态学报, 2004, **28**(3): 361–368 [LIANG Cunzhu, ZHU Zongyuan, WANG Wei, et al. The diversity and spatial distribution of plant communities in the Helan Mountains[J]. Chinese Journal of Plant Ecology, 2004, **28**(3): 361–368]
- [18] 胡会峰, 王志恒, 刘国华, 等. 中国主要灌丛植被碳储量[J]. 植物生态学报, 2006, **30**(4): 539–544 [HU Huifeng, WANG Zhiheng, LIU Guohua, et al. Vegetation carbon storage of major shrublands in China[J]. Chinese Journal of Plant Ecology, 2006, **30**(4): 539–544]
- [19] JIN M, LI Y, WANG S L, et al. Alpine shrubs biomass and its distribution characteristics in Qilian Mountains[J]. Arid Land Geography, 2012, **35**(6): 952–959
- [20] LIANG C Z, LIU Z L, ZHU Z Y, et al. Specific diversity and distribution characteristics of annual synusia in Alashan desert[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2003, **14**(6): 897–903
- [21] ZHU Y, KANG M Y, JIANG Y. Elevational patterns of structures and diversities of coniferous forests in Helan Mountain[J]. Journal of Northeast Forestry University, 2010, **38**(9): 44–47
- [22] 郝建锋, 李艳, 齐锦秋, 等. 人为干扰对碧峰峡栲树次生林群落物种多样性及其优势种群生态位的影响[J]. 生态学报, 2016, **36**(23): 7678–7688 [HAO Jianfeng, LI Yan, QI Jinqiu, et al. Effects of anthropogenic disturbances on the species diversity and niche of the dominant populations in a Castanopsis fargesii

- secondary forest community in Bifengxia, Sichuan [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2016, **36**(23):7678–7688]
- [23] DU Q. Diversity of vegetation types and the characteristics of spatial distribution in Helan Mountain [J]. *Journal of Anhui Agricultural Sciences*, 2010, **38**(7):3666–3667
- [24] 方精云, 王襄平, 沈泽昊, 等. 植物群落清查的主要内容和规范和技术规范[J]. 生物多样性, 2009, **17**(6):533–548 [FANG Jingyun, WANG Xiangping, SHEN Zehao, et al. Methods and protocols for plant community inventory [J]. *Biodiversity Science*, 2009, **17**(6):533–548]
- [25] 朱源, 康慕谊, 江源, 等. 贺兰山木本植物群落物种多样性的海拔格局[J]. 植物生态学报, 2008, **32**(3):574–581 [ZHU Yuan, KANG Muyi, JIANG Yuan, et al. Altitudinal pattern of species diversity in woody plant communities of Mountain Helan, northwestern China [J]. *Chinese Journal of Plant Ecology*, 2008, **32**(3):574–581]
- [26] PREGITZER K S, EUSKIRCHEN E S. Carbon cycling and storage in world forests: biome patterns related to forest age[J]. *Global Change Biology*, 2010, **10**(12):2052–2077
- [27] DONG L S, ZHANG X D, ZHOU J X, et al. Quantitative classification and ordination of shrub species and communities in a loess landscape of western Shanxi [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2007, **27**(7):3072–3080
- [28] MAGURRAN A E. Ecological Diversity and Its Measurement[J]. *Biometrics*, 1989, **46**(2):81–99
- [29] 刘创民, 李昌哲, 史敏华, 等. 多元统计分析在森林土壤肥力类型分辨中的应用[J]. 生态学报, 1996, **16**(4):444–447 [LIU Chuangmin, LI Changzhe, SHI Minhua, et al. Multivariate statistical analysis techniques applied in differentiation of soil fertility [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 1996, **16**(4):444–447]
- [30] MAHDAVI P, AKHANI H, VAN der MAAREL E. Species diversity and life-form patterns in steppe vegetation along a 3000 m altitudinal gradient in the Alborz Mountains, Iran [J]. *Folia Geobotanica*, 2013, **48**(1):7–22
- [31] LEE C, CHUN J, CHO H. Elevational patterns and determinants of plant diversity in the Baekdudaegan Mountains, South Korea: Species vs. functional diversity [J]. *Chinese Science Bulletin*, 2013, **58**(31):3747–3759
- [32] 刘增力, 郑成洋, 方精云. 河北小五台山北坡植物物种多样性的垂直梯度变化[J]. 生物多样性, 2004, **12**(1):137–145 [LIU Zengli, ZHENG Chengyang, FANG Jingyun. Changes in plant species diversity along an elevation gradient on Mt. Xiaowutai, Hebei, China [J]. *Chinese Biodiversity*, 2004, **12**(1):137–145]
- [33] 兰斯安, 宋敏, 曾馥平, 等. 木论喀斯特森林木本植物多样性垂直格局[J]. 生态学报, 2016, **36**(22):7374–7383 [LAN Sian, SONG Min, ZENG Fuping, et al. Altitudinal pattern of woody plant species diversity in the karst forest in Mulun, China [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2016, **36**(22):7374–7383]
- [34] 冯建孟, 王襄平, 徐成东, 等. 玉龙雪山植物物种多样性和群落结构沿海拔梯度的分布格局[J]. 山地学报, 2006, **24**(1):110–116 [FENG Jianmeng, WANG Xiangping, XU Chengdong, et al. Altitudinal patterns of plant species diversity and community structure on Yulong Mountains, Yunnan, China [J]. *Mountain Research*, 2006, **24**(1):110–116]
- [35] DENG H B, HAO Z Q, WANG Q L. The changes of co-occurrence of plant species between communities with altitudes on northern slope of Changbai Mountain [J]. *Journal of Forestry Research*, 2001, **12**(2):89–92
- [36] 刘晓瞳, 戴兴安, 胡婷, 等. 基于1公顷样地的上海崇明岛人工林草本植物多样性及其对林冠结构的响应[J]. 生态学杂志, 2017, **36**(6):1564–1569 [LIU Xiaotong, DAI Xingan, HU Ting, et al. Herbaceous plant diversity and its response to canopy structure of tree plantation based on 1 hm² plot at Chongming Island, Shanghai [J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2017, **36**(6):1564–1569]
- [37] BURKE A. Classification and ordination of plant communities of the Naukluft Mountains, Namibia [J]. *Journal of Vegetation Science*, 2001, **12**(1):53–60
- [38] QIONG L, Grytnes J A, BIRKS H J B. Alpine vegetation and species-richness patterns along two altitudinal gradients in the Gyama Valley, south-central Tibet, China [J]. *Plant Ecology & Diversity*, 2010, **3**(3):235–247

Altitudinal Pattern and Environmental Interpretation of Species Diversity of Scrub Community in the Helan Mountains, China

SU Chuang, ZHANG Xinyu, MA Wenhong*, ZHAO Liqing, LIANG Cunzhu

School of Ecology and Environment, Inner Mongolia University, Hohhot 010000, China)

Abstract: The Helan Mountain is an important natural geographical dividing line between grassland and desert, and also an important ecological defense in northwest China. Shrubs are the most important vegetation composition in the Helan Mountain, but there is little research on the distribution pattern and influencing factors of shrub diversity in Helan Mountain. In this paper, 13 types of shrub communities distributed at different altitudes along the west slopes of the Helan Mountain of Inner Mongolia were investigated in the field, and the vertical distribution pattern of species diversity and its relationship with environmental factors such as altitude, soil and human disturbance were discussed. The results showed that: (1) The species abundance of shrub layer and herb layer showed a weak unimodal pattern with the elevation gradient as a whole, but the Shannon — Wiener index (H'), Simpson index (D) and Pielou evenness index (E) did not show an obvious vertical variation. (2) Except for Pielou evenness index, the canopy density of shrub layer had a significant binomial regression relationship with the species diversity of herbaceous plants in the lower layer, with the maximum occurring at about 40 % of the relative coverage of shrub layer. (3) Various environmental factors such as altitude, slope and soil physical and chemical properties jointly affected the species composition and the vertical distribution pattern of diversity of shrub communities in the Helan Mountain, and altitude was the main influencing factor. This study is expected to expand and improve the study of shrub communities in this area and provides reference for scientific conservation and management of shrub resources.

Key words: helan mountain; scrub community; species diversity; elevational gradient; environmental factors