

DOI: 10.20103/j.stxb.202305060941

史恭发, 徐诺, 牛钊倩, 孙炜伦, 王好, 石广振, 王玲. 内蒙古大兴安岭东部林下植物生物多样性海拔差异. 生态学报, 2024, 44(7): 3004-3015.

Shi G F, Xu N, Niu Z Q, Sun W L, Wang H, Shi G Z, Wang L. Altitudinal differences of understory plant biodiversity in eastern Greater Xing'an Mountains, Inner Mongolia. Acta Ecologica Sinica, 2024, 44(7): 3004-3015.

## 内蒙古大兴安岭东部林下植物生物多样性海拔差异

史恭发, 徐 诺, 牛钊倩, 孙炜伦, 王 好, 石广振, 王 玲\*

东北林业大学园林学院, 哈尔滨 150040

**摘要:** 海拔影响生物多样性分异, 为探究寒温带山岭地区海拔对林下植物多样性分布影响, 选择内蒙古大兴安岭东部地区, 采用样地调研法, 设置 E1 (200—350 m), E2 (350—500 m), E3 (500—650 m), E4 (650—800 m), E5 (800—950 m), E6 (950—1100 m) 6 个不同海拔梯度, 调研 165 个林地样点以了解不同海拔森林群落物种组成, 研究林下植物生物多样性海拔差异性、地形因素、乔木层优势物种与林下植物生物多样性的相关性。研究得出: (1) 调研区林下植物共 277 种隶属于 53 科 135 属, 灌木 32 种、草本 245 种; (2) 森林乔灌群落随海拔依次为蒙古栎-黑桦-榛-胡枝子群落 (E1—E2)、落叶松-白桦-榛-胡枝子群落 (E3)、落叶松-白桦-欧亚绣线菊-绣线菊群落 (E4)、落叶松-白桦-兴安杜鹃-越橘群落 (E5)、落叶松-白桦-越橘-偃松群落 (E6); (3) 林下植物群落生物多样性随海拔上升呈现明显的单峰格局。生物多样性草本层 > 灌木层, 灌木层随海拔升高呈上升趋势, 草本层呈先下降后升高再下降的波动下降趋势; (4) 草本层物种替换速率远高于灌木层, E3—E4 与 E2—E3 梯度内灌木层与草本层物种替换速率分别达到峰值; 灌木层与草本层相邻海拔梯度间相似度指数均呈先下降后升高再下降的波动形式; (5) 地理因素及优势乔木种不同能够显著影响林下植物  $\alpha$  多样性, 灌木层  $\alpha$  多样性与海拔、纬度呈正相关, 与经度、坡度呈负相关。草本层与海拔呈负相关, 与纬度、坡向呈正相关, 海拔对草本层  $\alpha$  多样性影响高于灌木层。郁闭度与灌木层  $\alpha$  多样性呈正相关, 与草本层  $\alpha$  多样性呈负相关; 落叶松增多可提升灌木层生物多样性, 黑桦会降低灌木层物种丰富度, 而山杨会降低草本层物种分布的均匀度。研究结果为保护与利用内蒙古大兴安岭林下植物, 丰富寒温带山岭地区林下植物多样性海拔分布理论提供科学依据。

**关键词:** 内蒙古大兴安岭; 林下植物群落; 生物多样性; 海拔

## Altitudinal differences of understory plant biodiversity in eastern Greater Xing'an Mountains, Inner Mongolia

SHI Gongfa, XU Nuo, NIU Zhaoqian, SUN Weilun, WANG Hao, SHI Guangzhen, WANG Ling\*

College of Landscape Architecture, Northeast Forestry University, Harbin 150040, China

**Abstract:** In order to explore the effect of altitude on the diversity of undergrowth plants in the cold temperate mountain area, we selected the eastern Greater Xing'an Mountains in Inner Mongolia by using the plot investigation method, and set six different altitude gradients: E1 (200—350 m), E2 (350—500 m), E3 (500—650 m), E4 (650—800 m), E5 (800—950 m), and E6 (950—1100 m). We investigated 165 forest sites to understand the composition of forest communities at different altitudes, and studied the relationship between the altitude difference in understory plant biodiversity, topographic factors, and dominant species in the arboreal layer and understory plant biodiversity. The results showed that: (1) there were 277 understory plant species belonging to 53 families and 135 genera, including 32 shrubs and 245 herbs. (2) The forest tree and shrub communities with different altitudes were in the order of *Quercus Mongolia*, *Betula daturic*, *Corylus heterophylla*, *Lespedeza bicolor* communities (E1—E2), *Larix gmelina*, *Betula platyphylline*, *Corylus heterophylla*, *Lespedeza bicolor* communities (E3), *Larix gmelina*, *Betula platyphylline*, *Spiraea media*, *Spiraea silicified*

**基金项目:** 国家科技基础资源调查专项 (2019FY100500); 中央高校基本科研业务费专项资金 (2572023CT18)

**收稿日期:** 2023-05-06; **网络出版日期:** 2024-01-12

\* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: wanglinghj@126.com

communities (E4), *Larix gmelina*, *Betula platyphylla*, *Rhododendron dauricum*, *Vaccinium vitis-idaea* communities (E5), *Larix gmelinii*, *Betula platyphylla*, *Vaccinium vitis-idaea*, *Pinus pumila* communities (E6). (3) The biodiversity of understory plant communities showed an obviously unimodal pattern with the increases of altitude. The herb layer was higher than the shrub layer. The shrub layer showed an increasing trend with the increasing altitude, while the herb layer showed a fluctuating decrease trend of first decreasing and then increasing and decreasing. (4) The replacement rate of species in herbaceous layer was much higher than that in shrub layer, with the replacement rate in shrub and herbaceous layer peaking in E3—E4 and E2—E3 gradients, respectively. The similarity index between shrub layer and herbaceous layer decreased first, then increased, and finally decreased. (5) The geographical factors and different dominant tree species could significantly affect the  $\alpha$  diversity of understory plants. The  $\alpha$  diversity of shrub layer was positively correlated with altitude and latitude, and negatively correlated with longitude and slope. The herbaceous layer was negatively correlated with altitude, but positively correlated with latitude and slope aspect. The effect of altitude on  $\alpha$  diversity of herbaceous layer was higher than that of shrub layer. The canopy density was positively correlated with the  $\alpha$  diversity of shrub layer and negatively correlated with the  $\alpha$  diversity of herb layer. *Larix gmelinii* increased biodiversity in shrub layer, *Betula dahurica* decreased species richness in shrub layer, and *Betula dahurica* decreased species distribution evenness in herbaceous layer. Our results provided scientific basis for the protection and utilization of undergrowth plants in the Greater Xing'an Mountains and the theory of altitudinal distribution of understory plant diversity in the cold temperate mountains.

**Key Words:** Greater Xing'an Mountain region of Inner Mongolia; understory plant community; bio-diversity; altitude pattern

生物多样性的海拔差异是生态学研究的重要问题<sup>[1-2]</sup>,海拔作为综合性驱动因子,能够引起光照、温度、降水等多方面环境因子的复合变化,对群落分布与物种多样性产生重要影响<sup>[3]</sup>。山地是具有一定海拔和坡度变化的地面<sup>[4]</sup>,其具有浓缩的环境梯度、高度异质化的生境<sup>[5]</sup>,通常具有明显的生物多样性与群落的垂直地带分异<sup>[6]</sup>,始终是生态学研究热点<sup>[7]</sup>,山地生物的垂直变化是水平梯度的近千倍<sup>[8]</sup>,山地垂直带被认为是水平地带的“微缩模型”<sup>[9]</sup>。植被的垂直带性虽在形态上与水平地带性具有一定的相似性,但绝非等同水平地带的重复<sup>[4,10]</sup>,山地生态系统植物多样性随海拔上升一般有5种形式,先升后降的单峰格局<sup>[11]</sup>与单调下降的格局较为普遍<sup>[12]</sup>,此外还存在单调升高、先降低后升高、和不具相关性3种格局<sup>[12]</sup>。根据温度和水分差异,我国山地垂直自然带划分为大陆性和季风性两类带谱体系<sup>[13]</sup>,不同地区、不同生活型的物种多样性海拔分布格局具有差异性,研究的区域不同得到的结果不同,因此对不同地区植物多样性海拔格局展开研究十分必要<sup>[12]</sup>。

不同尺度区域下,植物群落分布的影响因子不同,小尺度区域植物群落主要由地形、土壤等方面影响,大尺度区域主要由气候、地势等方面决定<sup>[14]</sup>。许多单一山体按一定方向呈带状延伸形成山岭,相比于单个山体,山岭地区具有经纬度跨度更大的水平地带性与干湿度地带性,具有海拔变化梯度更大的垂直地带性,因此具有更丰富的“三维空间”分布现象,此外还具有人类干扰程度较小,对气候环境反应灵敏等特点,彼此之间相互交叉过渡,更容易形成生物多样性的聚集地。对于山岭地区植被随海拔梯度的分布规律相对于单一山体更能得出山地植被垂直分布的一般规律性。我国植物多样性海拔梯度的研究集中于单独山体<sup>[15-18]</sup>,并且近一个世纪山地植被地带性垂直分布变化格局的相关研究集中于我国横断山区、青藏高原、长白山及秦岭区域<sup>[13]</sup>,十分缺乏东北山岭地区植被地带性垂直分布格局的相关研究。

大兴安岭位于大陆性气候和温带季风气候区分界线与我国地势二三级阶梯分界线,具有较大的海拔差异。内蒙古大兴安岭林区占整个大兴安岭的46%,森林面积8.37万 $\text{km}^2$ <sup>[19]</sup>并以天然林为主,包括110万 $\text{hm}^2$ 未开发的原始森林,森林覆盖率78.39%,居国有林区之首,在东北地区具有丰富的植物资源。林下植物是森林生态系统的重要组成部分,在维持生态系统稳定性、促进群落演替更新、保证人工林生物多样性与生态功能

可持续发展等方面具有重要作用<sup>[20-21]</sup>。林下植物蕴含大量药用、食用、观赏等方面的经济植物类群<sup>[22-24]</sup>,在推动当地林下产业经济发展方面具有重大潜力。了解林下植物的物种组成和生物多样性梯度分布是进一步开展保护与开发内蒙古大兴安岭林下植物群落的先期工作。

目前对于内蒙古大兴安岭植物研究多集中于典型森林群落多样性的纬度格局<sup>[25]</sup>,多样性与群落结构间关系<sup>[26-27]</sup>,林下经济植物资源分布与评价<sup>[22,28-31]</sup>,落叶松林下植物多样性<sup>[32]</sup>与火烧迹地植物多样性<sup>[33]</sup>等方面。本文选取内蒙古大兴安岭东部林下植物多样性海拔分布差异为研究对象,通过 200—1100 m 连续分布样地调研方法减少因局部小气候等因素产生的影响,根据重要值、 $\alpha$  多样性指数与拟合曲线分析、 $\beta$  多样性指数,林下植物多样性与地理因素及优势乔木种的相关性等方法研究了内蒙古大兴安岭东部森林植被物种组成与林下植物多样性沿海拔梯度的分布规律,将灌木层与草本层相比较,分析两种群落层次间差异,考虑乔木层优势物种比重对林下植物多样性的影响,旨在深入了解内蒙古大兴安岭东部森林群落随海拔分布、林下灌木与草本物种多样性的海拔分布、地理因子与乔木优势物种组成对林下植物多样性的影响等问题。丰富了我国寒温带山岭森林植被垂直地带性分布的研究内容,填补了我国东北地区山岭植被垂直地带性分布的研究空缺,为了解大陆性和季风性两类带谱过渡地区垂直自然带谱分布特征及其规律,保护与利用内蒙古大兴安岭林下植物,开展不同海拔梯度人工林营造等工作提供科学依据。

## 1 研究区概况

研究区位于内蒙古大兴安岭林区东部莫力达瓦达斡尔族自治县(莫旗)与鄂伦春族自治县(鄂旗),为北半球中高纬度地区( $48^{\circ}64'—51^{\circ}13' N, 122^{\circ}05'—125^{\circ}14' E$ ),位于大兴安岭东南坡。调研区属寒温带大陆性季风气候,冬寒夏暖,昼夜温差大,1 月份平均气温  $-24—-31^{\circ}C$ ,7 月份平均气温  $16—20^{\circ}C$ ,平均年降水量 300—500 mm,河流较多,以嫩江水系为主;地势沿东南至西北方向海拔迅速升高,坡度逐渐增加,海拔 164—1484 m 之间,具有较大落差,以山地、丘陵、平原等地貌为主。

## 2 研究方法

### 2.1 样地设置与调研方法

调研使用典型取样与随机取样相结合的样地调研方法,在内蒙古大兴安岭东部莫旗及鄂旗两地沿海拔 200—1100 m 范围分布的森林设置 6 个不同海拔梯度样带:E1:200—350 m,E2:350—500 m,E3:500—650 m,E4:650—800 m,E5:800—950 m,E6:950—1100 m。根据实际可达性,选取 165 个森林样地开展实地调查(图 1)。

调查方法以王纯华等人<sup>[26,34-36]</sup>为参考,根据本调研目的做出调整。每个样点在半径 500 m 范围内设置 3 个标准地(即 3 个重复),尽可能涵盖样点区域不同林地位置与方向以获取全面的物种分布信息,每个标准地由 1 个  $20 m \times 20 m$  乔木样方及其东北角 1 个  $5 m \times 5 m$  灌木样方、4 个分布于 4 角的  $1 m \times 1 m$  草本样方组成,总调研 495 个标准地,调研面积  $198000 m^2$ 。记录每个样点的经纬度、海拔、坡度、坡向、郁闭度、林型等信息(表 1)。坡向数据以丛静等人<sup>[35]</sup>方法进行赋值,数字越大越向阳干热。乔木、灌木与草本样方中记录物种名、株数等;对各调研样点生境、林下植物均拍照记录。现场鉴定参考第二版《东北植物检索表》<sup>[37]</sup>,借鉴《额尔古纳自然保护区生物多样性》植物名录辅助鉴定<sup>[38]</sup>,最终植物正名参考中国植物志(网址:<http://www.iplant.cn/frps>)。调研时间为 2022 年 6 月—2022 年 9 月。

### 2.2 数据处理

运用 Adobe Lightroom Classic 管理样地植物照片,辅助植物鉴定与统计;运用 Office Excel(2019)汇总数据并计算  $\alpha$  与  $\beta$  多样性;使用 IBM SPSS Statistics26 进行单因素方差分析、Pearson 相关性分析与线性回归分析;运用 Origin(2021)生成  $\alpha$  多样性与海拔散点分布图并使用 Simple Fit 插件生成  $\alpha$  多样性与海拔的拟合方程。运用最小显著差异法检验群落相应条件下多样性指数在置信区间( $P < 0.05$ )水平上的差异显著性。

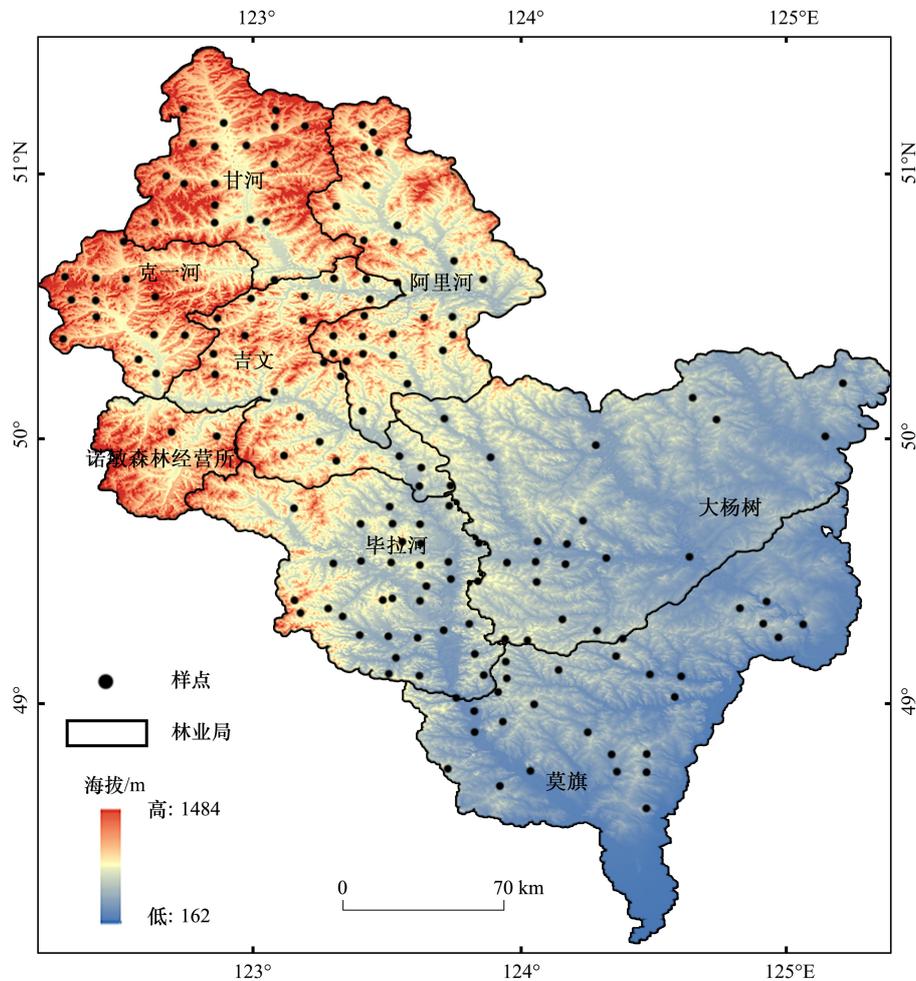


图 1 调研样点

Fig.1 Survey sample point

表 1 研究区 6 个海拔梯度调研样地特征

Table 1 Characteristics of six altitude gradient survey sample sites in the study area

海拔等级 Altitude level	海拔梯度 Altitude gradient/m	样点数量 Number of sample points	平均乔木高 Average tree height/m	平均郁闭度 Average canopy density	平均灌木高 Average shrub height/m
E1	200—350	30	9.24	0.54	0.95
E2	350—500	35	9.68	0.62	0.99
E3	500—650	34	12.21	0.67	1.08
E4	650—800	27	14.99	0.70	0.94
E5	800—950	28	13.87	0.66	0.80
E6	950—1100	11	9.48	0.50	0.27

### 2.2.1 重要值<sup>[39]</sup>

$$V = (\text{相对盖度} + \text{相对频度} + \text{相对密度}) / 3$$

### 2.2.2 $\alpha$ 多样性

(1) 物种丰富度指数 (Patrick 指数) ( $R$ )<sup>[20,40]</sup>, 指数值越高说明物种丰富度越高。

$$R = S$$

(2) 物种多样性指数 Shannon-Wiener ( $H'$ ), 指数值越高说明物种多样性越高<sup>[33,40]</sup>。

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

(3) 辛普森指数(优势度指数) Simpson 指数值 ( $D$ ), 指假设在无限个群落随机抽取样本, 样本中两个不同物种个体相遇的概率为多样性测度<sup>[20,26]</sup>, 指数值越高说明物种多样性越高, 而物种优势度越低。数值范围在 0—1 之间。

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

(4) 均匀度指数 Pielou 指数 ( $J$ ), 表示与物种丰富度无关的均匀度指数<sup>[7,40]</sup>, 指数值越高说明物种在样方内分布越均匀。数值范围在 0—1 之间。

$$J = H' / \ln S$$

$S$  表示研究系统中物种总数,  $P_i$  表示第  $i$  个物种的相对密度 ( $P_i = N_i / N$ ,  $N$  为所存在群落全部种的个数之和,  $N_i$  代表第  $i$  个种的个体数)。

### 2.2.3 $\beta$ 多样性

(1) Cody 指数  $\beta_c$ <sup>[1]</sup>

$$\beta_c = \frac{g(H) + l(H)}{2}$$

$g(H)$  为沿海拔梯度增加的物种数目;  $l(H)$  为沿海拔梯度失去的物种数目,  $\beta_c$  数值越高表示海拔梯度间物种替换速率越快。

(2) 群落相似度指数  $C_s$ <sup>[1]</sup>

$$C_s = \frac{2c}{a + b}$$

$c$  为两群落共有的物种数,  $a$  和  $b$  分别为两群落各自物种数,  $C_s$  数值越高表示海拔梯度间物种相似度越高。  $C_s$  值在 0.8—1.0 之间为高度相似, 0.6—0.8 为中度相似, 0.4—0.6 为低度相似, 0.2—0.4 为非常低的相似, 0—0.2 表示海拔梯度间物种几乎没有相似之处。

## 3 结果分析

### 3.1 林下植物物种组成

调研区林下植物共 277 种隶属于 53 科 135 属, 灌木 32 种、草本 245 种。按照植物类群划分, 蕨类植物共有 4 科 5 属 6 种、裸子植物共有 2 科 3 属 3 种、被子植物共有 47 科 127 属 268 种(其中单子叶植物共有 9 科 14 属 27 种, 双子叶植物共有 38 科 113 属 241 种)。以属与种数量为依据排序前十科为菊科(24 属 63 种)、蔷薇科(14 属 35 种)、豆科(7 属 16 种)、伞形科(8 属 15 种)、毛茛科(4 属 14 种)、桔梗科(3 属 10 种)、牻牛儿苗科(1 属 9 种)、石竹科(4 属 9 种)、堇菜科(1 属 7 种)、天门冬科(4 属 7 种)共 70 属 185 种, 占调研样地属种的 51.85% 与 66.79%。以群落内植株数量为依据, 灌木层群落以蔷薇科(50.61%)、桦木科(25.95%)、豆科(15.17%)、杜鹃花科(6.64%)等为优势科, 草本层以莎草科(32.44%)、蔷薇科(15.57%)、杜鹃花科(8.79%)、天门冬科(7.09%)、菊科(6.05%)、鸢尾科(5.17%)等为优势科, 不同海拔梯度常见科的种类与占比有所不同。由于实际分类精确问题, 参考丁茂等人<sup>[39]</sup>方法, 将林下莎草科(Cyperaceae) 薹草属(*Carex* sp.) 植物统一标记为薹草属。

### 3.2 林地优势物种组成及其重要值沿海拔梯度变化

随着海拔梯度的不断升高, 乔灌草层内优势物种重要值发生明显变化(表 2)。乔木层中落叶松、白桦呈上升趋势, 蒙古栎、黑桦与山杨呈下降趋势; 灌木层中榛、胡枝子集中分布于 E1—E3 梯度, 并随海拔升高呈下降趋势。刺蔷薇、越橘、西伯利亚刺柏、杜香、偃松等随海拔呈上升趋势, 西伯利亚刺柏、偃松等仅分布于 E5—

E6 梯度。土庄绣线菊、珍珠梅、绣线菊、兴安杜鹃、笃斯越橘等呈先上升后下降趋势;草本层红花鹿蹄草、石生悬钩子、舞鹤草等随海拔升高呈上升趋势,铃兰、莓叶委陵菜、路边青等随海拔呈下降趋势,而藁草属、蚊子草、单花鸢尾、草问荆、小玉竹、唐松草、褐苞蒿、柳兰、矮山黧豆等随海拔上升呈下降趋势。

表 2 内蒙古大兴安岭林区东部不同海拔梯度林地优势物种组成及其重要值

Table 2 Important values of understory plants in the eastern part of the Greater Xing'an Mountains forest region, Inner Mongolia

林层 Forest layer	物种 Species	重要值 Importance value/%					
		E1	E2	E3	E4	E5	E6
乔木层 Tree layer	落叶松 <i>Larix gmelinii</i>	9.11	6.18	47.27	64.49	61.84	76.03
	蒙古栎 <i>Quercus mongolica</i>	53.11	56.31	16.53	2.71	1.35	0.83
	白桦 <i>Betula platyphylla</i>	9.52	12.75	20.48	28.47	29.98	23.97
	黑桦 <i>Betula dahurica</i>	18.47	16.63	3.47	1.03	0.27	—
	山杨 <i>Populus davidiana</i>	10.42	6.51	6.13	6.19	2.14	—
灌木层 Shrub layer	榛 <i>Corylus heterophylla</i>	46.52	45.00	22.00	8.55	6.35	—
	刺蔷薇 <i>Rosa acicularis</i>	3.29	3.36	11.24	11.07	9.75	13.75
	胡枝子 <i>Lespedeza bicolor</i>	22.45	35.81	15.14	1.67	—	—
	越橘 <i>Vaccinium vitis-idaea</i>	—	1.11	4.15	6.00	11.88	29.36
	土庄绣线菊 <i>Spiraea pubescens</i>	0.96	1.42	11.01	15.63	6.82	—
	珍珠梅 <i>Sorbaria sorbifolia</i>	0.49	4.41	6.14	8.37	5.96	—
	绣线菊 <i>Spiraea salicifolia</i>	0.49	0.52	4.74	10.44	3.58	4.51
	兴安杜鹃 <i>Rhododendron dauricum</i>	—	—	5.35	7.40	15.92	9.13
	西伯利亚刺柏 <i>Juniperus communis</i>	—	—	—	—	2.81	10.82
	杜香 <i>Rhododendron tomentosum</i>	—	—	0.15	3.40	6.05	6.12
	笃斯越橘 <i>Vaccinium uliginosum</i>	—	—	1.84	2.11	4.15	1.23
	偃松 <i>Pinus pumila</i>	—	—	—	—	3.45	19.15
	草本层 Field layer	藁草属 <i>Carex</i> sp.	9.64	11.39	13.03	12.55	12.39
蚊子草 <i>Filipendula palmata</i>		4.71	8.72	9.60	18.87	17.70	5.15
红花鹿蹄草 <i>Pyrola asarifolia</i>		—	6.17	9.35	12.99	15.95	19.19
东方草莓 <i>Fragaria orientalis</i>		4.26	6.44	6.39	6.73	6.30	5.96
地榆 <i>Sanguisorba officinalis</i>		5.34	6.09	4.20	5.29	5.27	3.36
单花鸢尾 <i>Iris uniflora</i>		7.76	9.03	5.55	4.94	2.73	0.83
大叶章 <i>Deyeuxia purpurea</i>		4.52	4.24	5.17	4.75	8.94	7.38
铃兰 <i>Convallaria keiskei</i>		8.80	7.25	7.42	5.21	4.52	3.75
草问荆 <i>Equisetum pratense</i>		2.86	4.99	5.96	5.18	3.42	3.26
莓叶委陵菜 <i>Potentilla fragarioides</i>		8.28	3.62	2.56	1.20	1.11	—
小玉竹 <i>Polygonatum humile</i>		2.46	3.11	5.40	3.51	2.06	—
唐松草 <i>Thalictrum aquilegifolium</i>		2.49	2.59	2.75	1.49	1.12	0.80
褐苞蒿 <i>Artemisia phaeolepis</i>		0.74	0.78	1.27	1.77	0.86	—
北悬钩子 <i>Rubus arcticus</i>		1.04	2.27	3.00	3.42	1.91	0.82
石生悬钩子 <i>Rubus saxatilis</i>		—	1.47	2.41	3.25	4.10	—
柳叶蒿 <i>Artemisia integrifolia</i>		0.87	0.70	2.10	0.42	0.19	0.29
路边青 <i>Geum aleppicum</i>		4.50	1.72	1.27	1.18	0.14	—
柳兰 <i>Chamerion angustifolium</i>		1.30	1.35	2.53	2.73	1.88	1.45
舞鹤草 <i>Maianthemum bifolium</i>		—	0.72	1.81	1.90	2.78	2.91
矮山黧豆 <i>Lathyrus humilis</i>	1.31	2.05	2.68	1.25	0.40	—	

E1:200—350 m, E2:350—500 m, E3:500—650 m, E4:650—800 m, E5:800—950 m, E6:950—1100 m; 乔木层列举重要值排名前 5 名物种, 灌木层列举重要值排名前 12 名物种, 草本层列举重要值排名前 20 名物种

林下植物多样性与林地上层植被类型组成密切相关<sup>[41]</sup>, 根据物种重要值差异将同一海拔梯度内乔灌群

落类型进行划分<sup>[36]</sup>,在 200—1100 m 海拔高度内,以 150 m 为 1 个海拔梯度,海拔由低至高乔灌群落依次为:蒙古栎-黑桦-榛-胡枝子群落(E1—E2)、落叶松-白桦-榛-胡枝子群落(E3)、落叶松-白桦-欧亚绣线菊-绣线菊群落(E4)、落叶松-白桦-兴安杜鹃-越橘群落(E5)、落叶松-白桦-越橘-偃松群落(E6)。

### 3.3 林下植物 $\alpha$ 多样性沿海拔梯度变化

$\alpha$  多样性是反映群落丰富度与均匀度的综合指标。研究发现(图 2),灌木层  $\alpha$  多样性 Patrick、Shannon-Wiener 与 Simpson 指数呈波动上升趋势,E4 梯度 Patrick 与 Simpson 指数分别达到最高值 4.62 与 0.79,Shannon-Wiener 指数则于 E6 梯度呈现最高值 0.683。Pielou 指数波动较大,随海拔梯度上升呈现“W”型趋势;草本层  $\alpha$  多样性随海拔梯度升高变化基本一致,呈现先下降后升高再下降的波动下降趋势,各  $\alpha$  多样性指数在 E3 海拔梯度均达到最高;同一海拔梯度草本层  $\alpha$  多样性指数均高于灌木层,说明研究区林下草本生物多样性大于灌木层,并且灌木层与草本层  $\alpha$  多样性随海拔梯度的变化形式不同,灌木层总体呈现波动上升趋势,草本层呈现先下降后升高再下降的波动下降趋势,相比草本,灌木对于较高海拔梯度环境适应性更强。Shannon-Wiener 指数能综合地描述物种多样性水平<sup>[17]</sup>,以 Shannon-Wiener 指数为评判标准,灌木层与草本层物种多样性分别在 E6 与 E3 海拔梯度达到峰值。

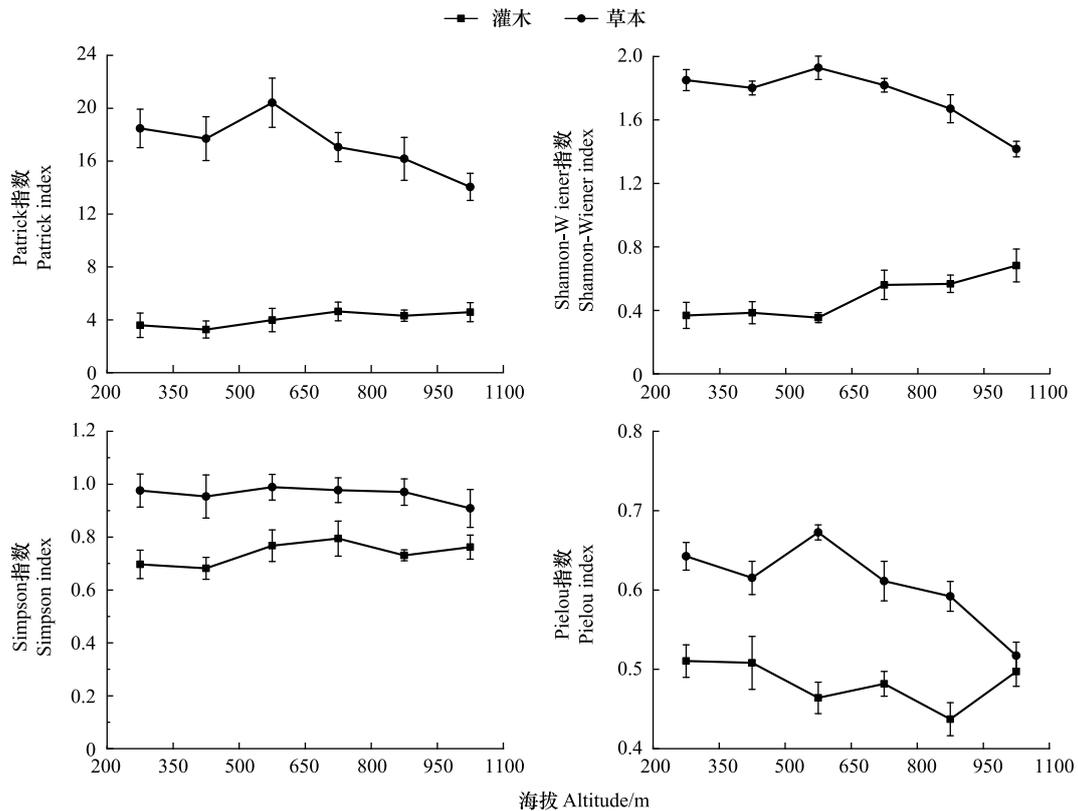
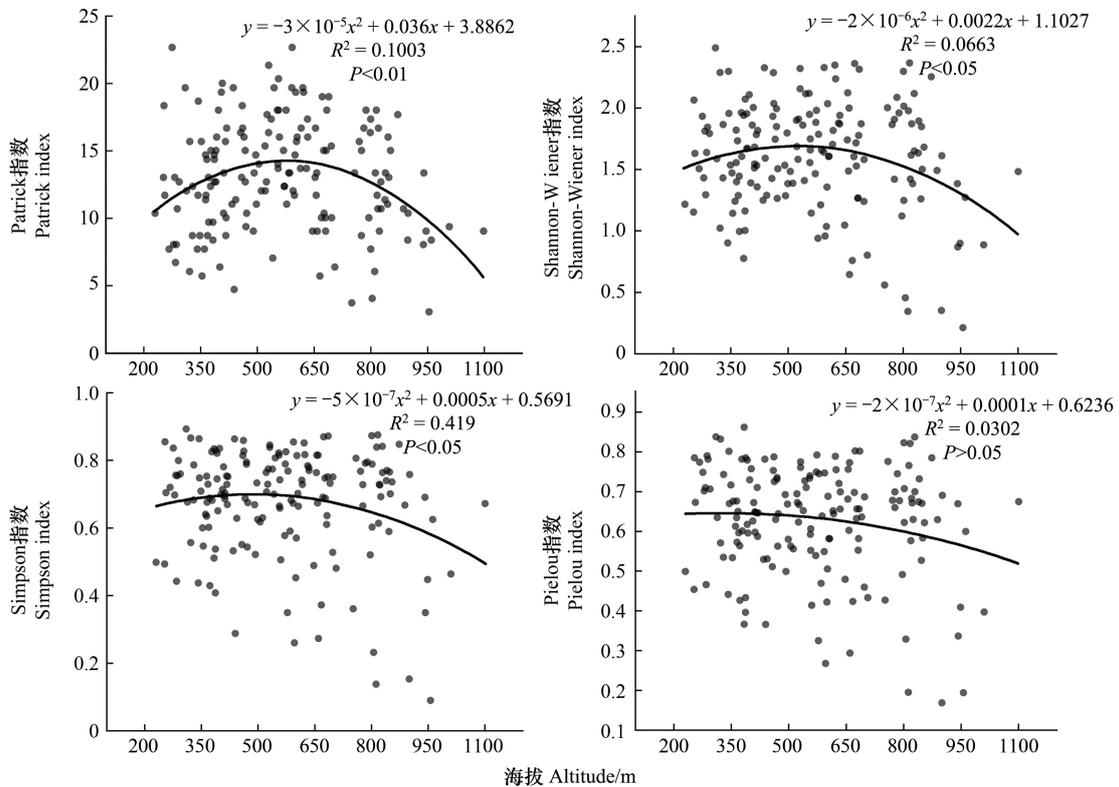


图 2 林下植物灌木层与草本层  $\alpha$  多样性指数海拔变化特征

Fig.2 Shrubs and herbaceous layers of understory plants  $\alpha$  altitude variation characteristics of diversity index

进一步对林下植物群落  $\alpha$  多样性指数随海拔升高变化绘制散点图,并使用多项式生成相应的拟合曲线(图 3),拟合曲线均为二项式。调研区林下植物群落 Patrick、Shannon-Wiener 与 Simpson 指数均呈现较为明显地先升高后降低的单峰形式曲线。Patrick 指数拟合曲线,E1—E2 梯度内上升,至 E3 梯度达到峰值,E4—E6 梯度内迅速下降( $P < 0.01$ ),Shannon-Wiener 指数拟合曲线,E1—E2 梯度缓慢上升、E3—E6 梯度缓慢下降( $P < 0.05$ )。Simpson 指数拟合曲线在 E1 梯度内呈缓慢上升趋势,在 E2—E6 梯度呈现缓慢下降趋势( $P < 0.05$ ),Pielou 指数拟合曲线呈现随海拔升高而降低的趋势( $P > 0.05$ )。

图3 林下植物  $\alpha$  多样性指数与海拔的拟合方程Fig.3 Understory plant  $\alpha$  fitting equation between diversity and altitude

### 3.4 林下植物 $\beta$ 多样性沿海拔梯度变化

#### 3.4.1 林下植物 Cody 指数 ( $\beta_c$ ) 随海拔梯度变化

在 E1—E6 海拔梯度分别统计到 16、12、22、25、15、19 种灌木与 135、166、151、116、65、28 种草本, E4 梯度灌木物种最丰富, E2 梯度草本物种最丰富。灌木层与草本层相邻海拔梯度间 Cody 指数 ( $\beta_c$ ) 值均先上升后下降(表 3), 灌木层 E3—E4 海拔梯度间达到相邻海拔梯度间最高值 10, 此区间段内灌木物种替换速率最高。草本层在前两个相邻海拔梯度间达到 44.5 与 49.5, 随后逐渐下降, 说明在 E1 与 E2、E2 与 E3 海拔梯度间, 草本层物种具有较高的替换速率, 并在 E2 与 E3 梯度间达到峰值。灌木层与草本层均在物种种类最丰富的海拔梯度间出现  $\beta_c$  极值, 此外, 草本层  $\beta_c$  值均远高于灌木层, 说明草本层对于海拔升高产生的环境异质性较灌木层更加敏感, 物种替换速率更高。

#### 3.4.2 林下植物相似度指数 ( $C_s$ ) 随海拔梯度变化

灌木层与草本层相邻海拔梯度间相似度指数  $C_s$  均呈先下降后升高再下降的波动形式(表 3)。灌木层在 E1 与 E2、E3 与 E4、E3 与 E5、E4 与 E5 海拔梯度间均呈现中等相似水平; 在 E1 与 E3、E2 与 E3、E1 与 E4、E2 与 E4、E3 与 E6、E4 与 E6 海拔梯度间均呈现低度相似水平, 其余海拔梯度间呈非常低的相似水平。草本层在 E1 与 E2、E2 与 E3、E3 与 E4 海拔梯度间呈现中度相似水平, E1 与 E3、E1 与 E4、E2 与 E4、E1 与 E5、E2 与 E5、E3 与 E5、E4 与 E5、E5 与 E6 海拔梯度间呈现低度相似水平, 其余海拔梯度间呈现非常低的相似水平。

### 3.5 林下植物多样性与地理因素及优势乔木种的关系

地理因素、优势林木组成与林下植物多样性相关性分析表明(表 4), 灌木层 Patrick 与 Shannon-Wiener 指数与海拔呈显著正相关 ( $P < 0.05$ ), 相关性为 0.191 与 0.225, 与经度呈显著负相关 ( $P < 0.05$ ), 相关性为 -0.161 与 -0.163, 与坡度呈显著负相关 ( $P < 0.05$ ), 相关性为 -0.238 与 -0.155; 灌木层 Patrick 与 Simpson 指数与纬度呈显著正相关 ( $P < 0.05$ ), 相关性为 0.368 与 0.180, Shannon-Wiener 指数与纬度呈极显著正相关 ( $P < 0.01$ ), 相

关性为 0.261; 灌木层  $\alpha$  多样性与坡向呈负相关但未达到显著性水平 ( $P>0.05$ )。草本层 Patrick、Shannon-Wiener 与 Pielou 指数与海拔呈极显著负相关 ( $P<0.01$ ), 相关性为 -0.314、-0.244 与 -0.428; 草本层 Patrick 与 Pielou 指数与纬度呈显著正相关 ( $P<0.05$ ), 相关性为 0.204、0.253, Shannon-Wiener 指数与纬度呈极显著正相关 ( $P<0.01$ ), 相关性为 0.147; 草本层 Patrick 与 Shannon-Wiener 指数与坡向呈显著正相关 ( $P<0.05$ ), 相关性为 0.335 与 0.245。说明灌木层  $\alpha$  多样性随海拔与纬度的增高而升高, 随经度与坡度的增高而下降。草本层  $\alpha$  多样性随海拔升高而下降, 随纬度增高与坡向朝阳而上升。海拔变化对草本层  $\alpha$  多样性影响高于灌木层, 坡度的升高对灌木层  $\alpha$  多样性产生明显影响, 而坡向则对草本层  $\alpha$  多样性产生明显影响。

表 3 林下植物 Cody 指数 ( $\beta_C$ ) 与相似度指数 ( $C_S$ )Table 3 Cody index of understory plant community ( $\beta_C$ ) similarity index ( $C_S$ )

指数 Index	海拔 Altitude	灌木层 Shrub layer						草本层 Herb layer					
		E1	E2	E3	E4	E5	E6	E1	E2	E3	E4	E5	E6
$\beta_C$	E1	0.00	4.00	9.00	9.50	10.00	11.50	0.00	44.50	63.50	56.50	57.00	61.50
	E2		0.00	7.00	9.50	11.00	12.50		0.00	49.50	57.00	60.50	72.00
	E3			0.00	10.00	5.00	7.50			0.00	37.50	53.00	62.50
	E4				0.00	5.50	9.00				0.00	37.50	45.00
	E5					0.00	5.50					0.00	23.50
	E6						0.00						0.00
$C_S$	E1	1.00	0.71	0.49	0.44	0.38	0.33	1.00	0.70	0.56	0.55	0.43	0.25
	E2		1.00	0.47	0.54	0.35	0.38		1.00	0.69	0.59	0.48	0.26
	E3			1.00	0.62	0.65	0.52			1.00	0.72	0.51	0.30
	E4				1.00	0.74	0.47				1.00	0.59	0.38
	E5					1.00	0.59					1.00	0.49
	E6						1.00						1.00

E1: 200—350 m, E2: 350—500 m, E3: 500—650 m, E4: 650—800 m, E5: 800—950 m, E6: 950—1100 m

表 4 林下植物群落物种多样性与地理因素及优势乔木种 Pearson 相关性

Table 4 Correlation between species diversity of understory plant community and geographical factors and Pearson dominant tree species

项目 Project		Patrick 指数 Patrick index		Shannon-Wiener 指数 Shannon-Wiener index		Simpson 指数 Simpson index		Pielou 指数 Simpson index index	
		灌木层 Shrub layer	草本层 Herb layer	灌木层 Shrub layer	草本层 Herb layer	灌木层 Shrub layer	草本层 Herb layer	灌木层 Shrub layer	草本层 Herb layer
		地理因素 Geographic factors	海拔/m	0.191 *	-0.314 **	0.225 *	-0.244 **	0.096	-0.028
Geographic factors	经度/(°)	-0.161 *	-0.127	-0.163 *	-0.136	0.077	-0.060	0.033	-0.052
	纬度/(°)	0.368 *	0.204 *	0.261 **	0.147 **	0.180 *	0.080	-0.130	0.253 *
	坡度/(°)	-0.238 *	0.108	-0.155 *	0.133	0.057	0.035	-0.074	0.094
	坡向	-0.010	0.335 *	-0.002	0.245 *	-0.079	0.163	-0.036	-0.049
优势林木组成 Dominant forest composition	郁闭度 Canopy density	0.153 **	-0.413 *	0.183 *	-0.362 *	-0.088	-0.155 *	-0.144	-0.035
Dominant forest composition	落叶松 <i>L. gmelinii</i> /%	0.227 **	-0.118	0.171 *	-0.103	0.180 *	-0.058	0.012	0.042
	蒙古栎 <i>Q. mongolica</i> /%	-0.229	0.108	-0.074	0.130	0.096	0.072	-0.022	0.055
	白桦 <i>B. platyphylla</i> /%	-0.015	-0.054	0.027	0.039	0.024	0.115	-0.026	0.065
	黑桦 <i>B. dahurica</i> /%	-0.187 *	0.096	-0.148	-0.039	0.070	-0.143	0.055	-0.146
	山杨 <i>P. davidiana</i> /%	-0.158	-0.014	-0.141	-0.094	0.070	-0.136	0.034	-0.158 *

\*:  $P<0.05$ ; \*\*:  $P<0.01$

灌木层 Patrick 指数与郁闭度呈极显著正相关 ( $P<0.01$ ), 相关性为 0.153, Shannon-Wiener 指数与郁闭度呈显著正相关 ( $P<0.05$ ), 相关性为 0.183; 草本层 Patrick、Shannon-Wiener 与 Simpson 指数则与郁闭度呈显著负相关 ( $P<0.05$ ), 相关性为 -0.413、-0.362 与 -0.155。说明郁闭度的升高对于灌木层与草本层  $\alpha$  多样性存在相反的影响, 灌木层  $\alpha$  多样性随郁闭度升高略有升高, 草本层  $\alpha$  多样性随郁闭度升高而下降明显。林木组成

同样对林下植物多样性产生影响,林间落叶松数量占比与灌木层 Patrick 指数呈极显著正相关( $P<0.01$ ),相关性为 0.227,与灌木层 Shannon-Wiener 和 Simpson 指数呈显著正相关( $P<0.05$ ),相关性为 0.171 与 0.180;林间黑桦数量占比与灌木层 Patrick 指数呈显著负相关( $P<0.05$ ),相关性为-0.187;林间山杨数量占比与草本层 Pielou 指数呈显著负相关( $P<0.05$ ),相关性为-0.158。说明调研区落叶松增多可提升灌木层生物多样性,黑桦增多会降低灌木层物种丰富度,而山杨的增多会降低草本层物种分布的均匀度。

#### 4 讨论

调研区为内蒙古大兴安岭的东南坡,地势沿东南至西北方迅速升高,随纬度升高逐渐升高,为寒温带气候区内典型的山岭地区,拥有广袤的森林地带。林下植物是森林生态系统的重要组成部分,研究寒温带山岭地区林下植物生物多样性随海拔差异变化有助于了解寒温带山岭地区植物随海拔梯度分布规律,丰富生物多样性海拔格局理论,掌握内蒙古大兴安岭地区林下植物资源现状。调研区林下植物共 277 种隶属于 53 科 135 属,灌木 32 种、草本 245 种,与张喜亭等人<sup>[42]</sup>对大兴安岭多布库尔国家级自然保护区调研的 269 种植物相似。调研区森林乔灌群落随海拔梯度不断变化,乔木层由低海拔梯度以蒙古栎、黑桦为主,逐渐变为以落叶松、白桦为主,灌木层由以榛、胡枝子为主过渡到兴安杜鹃、越橘等为主,与邻近地区类似海拔梯度如鄂伦春旗多布库尔保护区(400—600 m)<sup>[42]</sup>、呼中森林自然保护区(800—1200 m)<sup>[43]</sup>乔灌群落构成具有较高的相似性。林下植物调查中发现了野大豆(*Glycine soja*)、大花杓兰(*Cypripedium macranthos*)、蒙古黄芪(*Astragalus membranaceus* var. *mongholicus*)、紫点杓兰(*Cypripedium guttatum*)、樱草(*Primula sieboldii*)等多种国家珍稀濒危、重点保护植物,使得了解与保护内蒙古大兴安岭东部林下植物生物多样性更有必要。

林下植物  $\alpha$  多样性随海拔梯度呈现先上升后下降趋势,与常见的生物多样性随海拔升高的单峰格局相符<sup>[17,36,44]</sup>。林下草本层为林下植物生物多样性的主要贡献层,其  $\alpha$  多样性高于灌木层,这与岳永杰<sup>[25]</sup>、张殷波等人<sup>[45]</sup>研究一致。林下草本层与灌木层  $\alpha$  多样性的海拔差异性存在明显不同,随海拔上升,草本层  $\alpha$  多样性均先下降,在 E2 区间内达到谷值,至 E3 梯度到达最高峰后持续下降的变化趋势,与传统的单峰格局有所不同,根据实际调研情况,E2 梯度多位于莫旗与鄂旗的东南部,此地区人口相对较多,森林内部常出现大量农田区域,一方面严重破坏了森林连续度,另一方面农田耕作造成明显的水土流失、农药污染,加之此地区的放牧、采山等活动,推测其为 E2 梯度林下草本群落  $\alpha$  多样性下降的重要原因之一。灌木层 Patrick、Shannon-Wiener 与 Simpson 指数随海拔梯度升高呈逐渐上升趋势,而 Pielou 指数呈波动下降趋势,灌木层相比于草本层更能适应高海拔梯度的生境。

灌木层 Cody 指数在 E2 与 E3、E3 与 E4 相邻两海拔梯度值逐渐升高,在 E3 与 E4 海拔区域内灌木物种替换速率最高,灌木也在此区间内由植株较高,叶片较大的榛、胡枝子、珍珠梅等,转变为了植株较矮,叶片较小的土庄绣线菊、绣线菊、刺蔷薇等植物,随着海拔进一步升高,越橘、杜香、笃斯越橘、偃松等植叶片更小的灌木逐渐变为优势物种。草本层则具有更高的 Cody 指数,在 E2 与 E3 区间内物种替换速率最高。

大尺度区域内,植物群落多样性主要受到气候、地势的影响,小尺度区域易受到区域小气候、土壤等方面的影响<sup>[14]</sup>。相比于单独山体的植物多样性海拔差异性研究<sup>[15-18]</sup>,山岭地区植物多样性不仅会受到小区域山体坡向、坡度的影响,同时受到经度与纬度与海拔相结合的多重影响。林下灌木层多样性与海拔、纬度呈现正相关、与经度呈现负相关,根据相关性,这三种因素对于灌木层生物多样性影响排序为纬度>海拔>经度,调研区随着纬度的上升海拔逐渐升高。草本层与海拔呈负相关,与纬度呈正相关,结合调研区地势随经纬度变化的情况,这种相关性符合前面的结果,值得注意的是,纬度同时与灌木层、草本层均呈正相关,推测一方面这是由于调研区东南部低纬度地区人口密集,农耕放牧活动对森林生态造成的破坏导致林下植物生物多样性的下降,与另一方面调研区西北部纬度较高地区相较于东南部具有更复杂的地形起伏更高的环境异质性,并且良好的封山育林环境促使林下生物多样性上升导致的。从行政区域表现则为莫旗林下植物多样性低于鄂旗。坡度方面,平缓地区灌木多样性较高。坡向方面,草本层多样性阴坡小于阳坡,而对灌木层多样性影响不明

显。郁闭度的增加一定程度上能提高灌木层多样性,却显著降低草本层多样性,鉴于草本层对于林下植物多样性的突出贡献,建议定期对过密林分间伐以获取较好的林下植物多样性,间伐强度与频率有待于进一步研究<sup>[46]</sup>。此外,不同的乔木组成能够提供不同的林下生存环境,从而产生不同的林下植物群落结构,调研区内落叶松的加入能够一定程度上增加灌木层多样性,并有降低草本层多样性的趋势,这可能是相对于阔叶林,落叶松林下调落物分解速率较慢,养分补充缓慢,表层土壤组成不同导致的。

本研究主要针对海拔这一因素,探讨内蒙古大兴安岭地区林下植物多样性海拔差异性变化。林下植物多样性受到多种环境异质性影响,调研时还发现向阳山坡通常具有较多种类的林下植物,林缘林下植物多样性普遍较高,较潮湿或离水源较近的林地物种乔木与灌木丰富度往往较高等规律,不同的土壤、不同的林型<sup>[47]</sup>、不同坡向与坡度<sup>[48]</sup>、不同季节、不同林龄、不同育林手段对林下植物多样性均可能产生影响。在今后的研究应重视不同因素综合对林下植物的影响,并增加不同调研季节,考虑气候因素,全面分析,对于掌握林下植物多样性的多方面规律具有重要意义。

## 5 结论

内蒙古大兴安岭东部林下植物共 277 种隶属于 53 科 135 属,灌木 32 种、草本 245 种;随海拔梯度升高,森林乔灌群落依次为蒙古栎-黑桦-榛-胡枝子群落(E1—E2)、落叶松-白桦-榛-胡枝子群落(E3)、落叶松-白桦-欧亚绣线菊-绣线菊群落(E4)、落叶松-白桦-兴安杜鹃-越橘群落(E5)、落叶松-白桦-越橘-偃松群落(E6);林下植物物种多样性随海拔上升呈现明显的单峰格局。草本层物种多样性普遍高于灌木层,灌木层生物多样性随海拔升高呈上升趋势,草本层呈现先下降后升高再下降的波动下降趋势;E3—E4 与 E2—E3 梯度内灌木层与草本层物种替换速率分别达到峰值,草本层物种替换速率远高于灌木层;灌木层与草本层相邻海拔梯度间相似度指数均呈先下降后升高再下降的波动形式;地理因素及优势乔木种不同能够显著影响林下植物  $\alpha$  多样性,灌木层与海拔、纬度呈正相关,与经度、坡度呈负相关,草本层与海拔呈负相关,与纬度、坡向呈正相关,海拔对草本层  $\alpha$  多样性影响高于灌木层。郁闭度与灌木层  $\alpha$  多样性呈正相关,与草本层  $\alpha$  多样性呈负相关;落叶松增多可提升灌木层生物多样性,黑桦增多会降低灌木层物种丰富度,而山杨的增多会降低草本层物种分布的均匀度。

## 参考文献 (References):

- [ 1 ] 牟长城,倪志英,李东,孙晓新,陈加利. 长白山溪流河岸带森林木本植物多样性沿海拔梯度分布规律. 应用生态学报, 2007, 18(5): 945-952.
- [ 2 ] Mäsviken J, Dalerum F, Cousins S A O. Contrasting altitudinal variation of alpine plant communities along the Swedish Mountains. *Ecology and Evolution*, 2020, 10(11): 4838-4853.
- [ 3 ] Oldfather M F, Britton M N, Papper P D, Koontz M J, Halbur M M, Dodge C, Flint A L, Flint L E, Ackerly D D. Effects of topoclimatic complexity on the composition of woody plant communities. *AoB Plants*, 2016, 8: plw049.
- [ 4 ] 刘华训. 我国山地植被的垂直分布规律. 地理学报, 1981, 36(3): 267-279.
- [ 5 ] 孙然好,陈利顶,张百平,傅伯杰. 山地景观垂直分异研究进展. 应用生态学报, 2009, 20(7): 1617-1624.
- [ 6 ] 杨朗生,刘兴良,刘世荣,潘红丽,冯秋红,李迈和. 卧龙巴郎山山川滇高山栎群落植物生活型海拔梯度特征. 生态学报, 2017, 37(21): 7170-7180.
- [ 7 ] 金慧,赵莹,赵伟,尹航,秦立武,崔凯峰,李晓杰,黄祥童. 长白山牛皮杜鹃群落物种多样性的海拔梯度变化及相似性. 生态学报, 2015, 35(1): 125-133.
- [ 8 ] Jeník J. H. Walter Vegetation of the earth in relation to climate and the eco-physiological conditions. *Folia Geobotanica et Phytotaxonomica*, 1975, 10(1): 100.
- [ 9 ] Körner C. Why are there global gradients in species richness? mountains might hold the answer. *Trends in Ecology & Evolution*, 2000, 15(12): 513-514.
- [ 10 ] Ulf Molau, 方静. 低纬与高纬地区的山地生物多样性格局. *AMBIO-人类环境杂志*, 2004, 33(S1): 25-29, 57.
- [ 11 ] 姚兰,艾训儒,吕世安,冯广,刘峻城,黄永涛. 湖北星斗山天然次生林的群落类型、结构与物种多样性特征. 林业科学, 2015, 51(11): 1-7.
- [ 12 ] 朱源,康慕谊,江源,刘全儒. 贺兰山木本植物群落物种多样性的海拔格局. 植物生态学报, 2008, 32(3): 574-581.
- [ 13 ] 梁红柱,刘丽丽,付同刚,高会,李敏,刘金铜. 山地植被垂直分布变化格局研究进展与述评. 中国生态农业学报: 中英文, 2022, 30

(7): 1077-1090.

- [14] 刘星宏,张青青,徐海量,张鹏,张广鹏,李宏. 北疆盐碱地植物群落空间分布及物种多样性. 生态学报, 2021, 41(4): 1501-1513.
- [15] 陈绪辉,林碧华,罗敏贤,刘宝,刘金福,郑世群. 福建灵源山森林群落林下灌草生态位特征. 森林与环境学报, 2023, 43(2): 152-159.
- [16] 冯相艳,赵文智,蔺鹏飞,王川. 祁连山北坡主要木本植物功能性状及其海拔分异. 生态学报, 2022, 42(23): 9726-9735.
- [17] 李梦佳,何中声,江蓝,谷新光,晋梦然,陈博,刘金福. 戴云山物种多样性与系统发育多样性海拔梯度分布格局及驱动因子. 生态学报, 2021, 41(3): 1148-1157.
- [18] 向琳,陈芳清,官守鹏,王玉兵,吕坤. 井冈山鹿角杜鹃群落灌木层功能多样性及其随海拔梯度的变化. 生态学报, 2019, 39(21): 8144-8155.
- [19] 连承杰. 内蒙古大兴安岭林区林下经济发展现状与对策. 中国林业经济, 2021(1): 43-45.
- [20] 王群,李东海,杨小波,曾润娟,夏丹,王豪,戚春林,郝杰威. 海南霸王岭橡胶林林下植物多样性特征研究. 林业资源管理, 2022(5): 76-83.
- [21] 谭许脉,张文,肖纳,莫雪青,高冠女,尤业明,明安刚,黄雪蔓. 杉木林改造成乡土阔叶林对林下植物物种组成和多样性的影响. 生态学报, 2022, 42(7): 2931-2942.
- [22] 王纯华. 大兴安岭林区乔木树种与林下伴生经济植物分布情况. 现代农业科技, 2020(13): 120, 122.
- [23] 王纪坤,兰国玉,陈帮乾,谢贵水. 海南橡胶林林下药用植物资源调查. 南方农业学报, 2013, 44(3): 391-396.
- [24] 陈树彪,郑野,李秀英. 大兴安岭呼中林业局林下主要经济植物资源的调查. 内蒙古林业调查设计, 2011, 34(5): 27-28, 124.
- [25] 岳永杰,苏志成,韩君,格日乐高娃,乌云珠拉. 内蒙古大兴安岭林区典型森林群落物种多样性研究. 内蒙古农业大学学报: 自然科学版, 2020, 41(4): 21-26.
- [26] 张建宇. 大兴安岭森林植物多样性、群落结构特征及耦合关系分析[D]. 哈尔滨: 东北林业大学, 2018.
- [27] 崔佳佳,铁牛. 大兴安岭北部森林群落结构及植物多样性特征研究. 西北林学院学报, 2021, 36(2): 24-30.
- [28] 李桂茹. 内蒙古大兴安岭林区野生经济植物资源评价. 内蒙古林业调查设计, 2011, 34(1): 98-99, 120.
- [29] 冶连华,吕金娃. 内蒙古大兴安岭林区野生宿根花卉资源调查. 河北林业科技, 2013(2): 25-29.
- [30] 王翠敏. 内蒙古大兴安岭林区兴安落叶松林下分布主要经济植物的经济价值及开发与利用. 内蒙古林业调查设计, 2014, 37(2): 35-37, 134.
- [31] 魏麒麟. 内蒙古大兴安岭北部原始林区植物资源评价. 内蒙古林业调查设计, 2020, 43(2): 32, 63-64.
- [32] 张重岭,周本志,兰学君,杜德刚. 内蒙古大兴安岭北部原始林区兴安落叶松林植物多样性的调查. 内蒙古林业调查设计, 2003, 26(1): 41-44.
- [33] 王丽红,辛颖,邹梦玲,赵雨森,刘双江,任清胜. 大兴安岭火烧迹地植被恢复中植物多样性与生物量分配格局. 北京林业大学学报, 2015, 37(12): 41-47.
- [34] 王纯华. 大兴安岭野生经济植物资源调查方法. 现代农业科技, 2020(10): 122, 125.
- [35] 丛静,尹华群,卢慧,宿秀江,杨敬元,李迪强,张于光. 神农架保护区典型植被的物种多样性和环境解释. 林业科学, 2013, 49(05): 30-35.
- [36] 董雪,李永华,辛智鸣,段瑞兵,姚斌,包岩峰,张正国,刘源. 河西走廊西段荒漠戈壁灌木群落物种多样性的海拔格局. 林业科学, 2021, 57(2): 168-178.
- [37] 傅沛云. 东北植物检索表. 第2版. 北京: 科学出版社, 1995: 1-906.
- [38] 赵敏,郑宝江,孙海,吕连宽,赵宝军,胡建民,周明,龚文峰,许青,崔岱宗,吴玉环,任强,陶雷,邵景文,黄世臣. 额尔古纳国家级自然保护区生物多样性研究. 北京: 科学出版社, 2015: 1-150.
- [39] 丁茂,郑标,王丽,张金铭,周守标,王智. 鹤落坪国家级自然保护区草本植物多样性及空间分布. 生态学报, 2022, 42(19): 8015-8030.
- [40] 黄甫昭,丁涛,李先琨,郭屹立,王斌,向悟生,文淑均,李冬兴,何运林. 弄岗喀斯特季节性雨林不同群丛物种多样性随海拔的变化. 生态学报, 2016, 36(14): 4509-4517.
- [41] 张涵丹,康希睿,邵文豪,杨旭,张建锋,刘学全,陈光才. 不同类型杉木人工林林下草本植物多样性特征. 生态学报, 2021, 41(6): 2118-2128.
- [42] 张喜亭,张建宇,肖路,陈胜仙,仲召亮,高薇,王文杰. 大兴安岭多布库尔国家级自然保护区植物多样性和群落结构特征. 生态学报, 2022, 42(1): 176-185.
- [43] 孙玉成,张喜亭,季倩如,张建宇,王文杰. 大兴安岭泰加林植物多样性特征调查与分析. 林业资源管理, 2022(6): 124-130.
- [44] 王采娥,黄梅,王文银,李子好,张涛,马林,白彦福,王彦龙,施建军,龙瑞军,刘玉,王晓丽,马玉寿,尚占环. 三江源区高寒坡地退化植物群落多样性和地上生物量沿海拔梯度的变化特征. 生态学报, 2022, 42(9): 3640-3655.
- [45] 张殷波,秦浩,孟庆欣,张峰,唐志尧. 太行山森林群落物种多样性空间格局及其影响因素. 应用与环境生物学报, 2022, 28(2): 331-338.
- [46] 龚固堂,牛牧,慕长龙,陈俊华,黎燕琼,朱志芳,郑绍伟. 间伐强度对柏木人工林生长及林下植物的影响. 林业科学, 2015, 51(4): 8-15.
- [47] 杨光辉,秦树林,金光泽. 小兴安岭五种林型早春草本植物多样性及其环境解释. 生态学报, 2023, 43(3): 1234-1246.
- [48] 崔博亮,安彦明,张起鹏,蒲萌,陈克龙. 坡度对亚高寒草甸狼毒群落植物多样性的影响. 草业科学, 2021, 38(5): 823-834.