

李岩,何兴元,尚佰晓,陈玮,张粤,王艳林. 2023. 辽宁浑河源自然保护区蕨类植物组成及物种多样性. 生态学杂志, 42(10): 2434–2440.

Li Y, He XY, Shang BX, Chen W, Zhang Y, Wang YL. 2023. Fern species composition and diversity in Hunhe River Source Nature Reserve, Liaoning Province. *Chinese Journal of Ecology*, 42(10): 2434–2440.

辽宁浑河源自然保护区蕨类植物组成及物种多样性

李岩^{1,3} 何兴元^{1,2,3*} 尚佰晓⁴ 陈玮^{1,2,3} 张粤^{1,3} 王艳林^{1,2}

(¹中国科学院森林生态与管理重点实验室,中国科学院沈阳应用生态研究所,沈阳 110016; ²中国科学院大学,北京 100049;

³中国科学院沈阳应用生态研究所树木园,沈阳 110016; ⁴铁岭市生态环境事务服务中心,辽宁铁岭 112000)

摘要 物种多样性分布的研究对于生物多样性保护至关重要。为了解北方河流源头区蕨类植物及物种多样性分布特点,本研究以辽宁省浑河源自然保护区蕨类植物为研究对象,分析了蕨类植物的组成及不同地形条件下的物种多样性分布特征。结果表明:(1)共记录有蕨类植物 8 科 13 属 17 种,优势科为鳞毛蕨科和蹄盖蕨科。(2)木贼(*Hippochaete hyemale*)、猴腿蹄盖蕨(*Athyrium multidentatum*)、球子蕨(*Onoclea sensibilis* var. *interrupta*)、东北蛾眉蕨(*Lunathyrium pycnosorum*)、荚果蕨(*Matteuccia struthiopteris*)、粗茎鳞毛蕨(*Dryopteris crassirhizoma*)和新蹄盖蕨(*Neoathyrium crenulato-serrulatum*)是浑河源蕨类植物群落中常见并具有代表性的种类,其中木贼和猴腿蹄盖蕨是蕨类植物群落中的优势种。(3)物种多样性分布受海拔和坡向的影响显著,Margalef 指数在海拔 700~800 m 和 500~600 m 间存在显著差异($P < 0.05$),Margalef 指数和 Shannon 指数在北坡和南坡间存在显著差异($P < 0.05$)。(4)随海拔的升高,物种多样性呈先升后降的单峰分布变化,在中海拔上物种多样性达到最高;自北坡、东坡、南坡到西坡,物种多样性呈现先降后升的分布规律,在北坡物种多样性最高,南坡最低;平坡的物种多样性最低,非蕨类植物生存的适宜坡度;中坡位的物种多样性最高,是蕨类植物生存的适宜坡位。本研究可为浑河源及其相似地区蕨类植物的多样性保护和生态恢复提供科学依据。

关键词 蕨类植物; 浑河源自然保护区; 物种多样性; 地形因子; 优势种

Fern species composition and diversity in Hunhe River Source Nature Reserve, Liaoning Province. LI Yan^{1,3}, HE Xingyuan^{1,2,3*}, SHANG Baixiao⁴, CHEN Wei^{1,2,3}, ZHANG Yue^{1,3}, WANG Yanlin^{1,2} (¹CAS Key Laboratory of Forest Ecology and Management, Institute of Applied Ecology, Chinese Academy of Sciences, Shenyang 110016, China; ²University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China; ³Arboretum of Institute of Applied Ecology, Chinese Academy of Sciences, Shenyang 110016, China; ⁴Eco-environmental Affairs Service Center of Tieling City, Tieling 112000, Liaoning, China).

Abstract: Study of the distribution of species diversity is essential for biodiversity conservation. To understand fern species composition and their diversity distribution characteristics in the headwaters of the rivers in northern China, we investigated ferns in Hunhe River Source Nature Reserve in Liaoning Province and analyzed the characteristics of fern species diversity and distribution under different topographic conditions. The results showed that: (1) There were 17 fern species in the Hunhe River Source Nature Reserve, belonging to 13 genera of 8 families, and the dominant families were Dryopteridaceae and Athyridaceae. (2) *Hippochaete hyemale*, *Athyrium multidentatum*, *Onoclea sensibilis* var. *interrupta*, *Lunathyrium pycnosorum*, *Matteuccia struthiopteris*, *Dryopteris crassirhizoma*, and *Neoathyrium crenulato-serrulatum* were common and representative species in the fern community of the Hunhe River Source region, with *Hippochaete hyemale* and *Athyrium multidentatum* as the dominant species. (3) Species diversity was significantly affected by elevation and slope direction. Margalef index was significantly different between the elevation 700–800 m and 500–600 m ($P < 0.05$), and Margalef index and Shannon index were significantly different between north slope and south slope ($P < 0.05$). (4) With increasing elevation, species diversity presented unimod-

国家重点研发计划东北森林区生态保护及生物资源开发利用技术及示范(2016YFC0500300)资助。

收稿日期: 2022-05-09 接受日期: 2023-02-20

* 通信作者 E-mail: hexy@iae.ac.cn

al pattern distribution, and peaked in the mid-elevation. From north slope, east slope, south slope, then to west slope, species diversity showed a distribution pattern of the first falling and then rising, with the highest in the north slope and the lowest in the south slope. The species diversity in flat slope was the lowest, which was not the suitable slope for ferns to live on. The species diversity in the middle slope was the highest, indicating it was a suitable slope position for ferns to survive. This study provides basic data for the diversity conservation and ecological restoration of ferns in Hunhe River Source Nature Reserve and other areas with similar conditions.

Key words: fern; Hunhe River Source Nature Reserve; species diversity; topographic factor; dominant species.

生物物种多样性一直受到特别的关注,在不同尺度上物种多样性分布格局的形成机制是植物生态学和生物地理学研究的热点问题(Wang *et al.*, 2008; Weigand *et al.*, 2020)。分析物种多样性及其分布特征对于理解物种与其环境之间的相互作用以及制定保护生物多样性管理措施等至关重要。物种多样性沿环境梯度变化规律的研究是生物多样性研究的重要议题(Kitayama *et al.*, 1992; 郭英荣等, 2015)。在大尺度上,物种分布主要受水热条件的影响(Francis *et al.*, 2003; Kubota *et al.*, 2015; Xu *et al.*, 2019);在小尺度上,海拔、坡向、坡度等地形差异对物种多样性分布具有重要影响(Reed *et al.*, 2009; 袁铁象等, 2014; Mensah *et al.*, 2018; Woldu *et al.*, 2020)。

蕨类植物是一类以孢子繁殖的维管束植物,是陆地植物进化史上的重要类群(张宪春等, 2013)。由于对空气湿度和温度等特别敏感,蕨类植物被认为是森林环境变化的指示植物(Celia *et al.*, 2015; Pouteau *et al.*, 2016)。自2000年以来,以蕨类植物为对象的研究得到了越来越多的关注(张开梅等, 2019),学者们从不同尺度和区域对蕨类植物多样性的分布规律进行了研究(Bhattarai *et al.*, 2004; Ferrer-Castán *et al.*, 2005; Kessler *et al.*, 2011; Khine *et al.*, 2019; Weigand *et al.*, 2020; Suissa *et al.*, 2021)。

江河源头区在维系生物多样性、维护生态平衡、涵养水源等方面具有重要的作用,源头区生态保护对于全流域的水生态安全具有重要的战略意义(Clarke *et al.*, 2008; Fassnacht *et al.*, 2017)。在我国北方,辽宁浑河源地处我国中温带的长白山系龙岗山余脉,是浑河流域主要的水源涵养区,是辽宁中部城市群的重要水源地,森林覆被率高,为蕨类植物提供了适宜的生境。对浑河源的野生植物资源虽已有一些研究(王芝恩等, 2012),但涉及蕨类植物多样性方面的研究还未见报道。本研究以浑河源自然保护区的蕨类植物为研究对象,分析蕨类植物组成特征,比较不同地形条件下蕨类植物多样性差异,以期

为浑河源及其相似地区蕨类植物的多样性保护和生态恢复提供科学依据。

1 研究地区与研究方法

1.1 研究区概况

浑河源省级自然保护区(以下简称浑河源)位于辽宁省抚顺市清原满族自治县湾甸子镇和大苏河乡境内(41°50′N—42°00′N, 124°47′E—125°17′E),是浑河上游段的源头区,一般山峰海拔在500~900 m。浑河源属中温带大陆性季风气候,夏季炎热,冬季寒冷,四季分明。年均温4.2℃,年极端最高温35.8℃,年极端最低温-41.5℃,≥5℃积温3005~3203.6℃,年降雨量714.2~1025.3 mm(王芝恩等, 2012)。浑河源属长白植物区系,以红松阔叶林和阔叶混交林为主要的植被类型,针叶树主要有红松(*Pinus koraiensis*)、长白落叶松(*Larix olgensis*)、油松(*Pinus tabulaeformis*)、赤松(*Pinus densiflora*)等,阔叶树主要有胡桃楸(*Juglans mandshurica*)、蒙古栎(*Quercus mongolica*)、紫椴(*Tilia amurensis*)、黄檗(*Phellodendron amurense*)等。

1.2 研究方法

1.2.1 样方设置及调查 调查采用典型样方法,在浑河源选取蕨类植物种类丰富、兼顾不同海拔、坡向、坡度、坡位的样方,共计16个,面积为20 m×20 m,记录每个样方的海拔、坡向、坡度和坡位。在每个样方的4个角和中心点各设置1个2 m×2 m小样方,即每个样方内5个4 m²的小样方,共计80个小样方,记录小样方内蕨类植物名称、数量、平均高度。

1.2.2 数据处理 采用物种重要值(IV)分析蕨类植物物种组成的数量特征。

$IV_i = (\text{相对多度} + \text{相对频度} + \text{相对高度}) / 3$ (方精云等, 2009)

其中 IV_i 为第*i*种的重要值。上述相对值是第*i*种的多度(频度、相对高度)占全部种多度(频度、相对高度)之和的百分比。

采用Margalef指数、Shannon指数和Pielou均匀度指数计算分析每个样方的α多样性,各指数计算

方法如下:

Margalef 指数:

$$d_{Ma} = (S-1) / \ln N$$

Shannon 指数:

$$H' = - \sum P_i \ln P_i$$

Pielou 均匀度指数:

$$J_{sw} = (- \sum P_i \ln P_i) / \ln S$$

其中 S 为样方中物种数目; N 为样方中所有物种个体数之和; P_i 为种 i 的个体数占该样方所有种个体数的比率。

根据样方的地形因子数据进行地形分级。海拔分 I (500~600 m)、II (600~700 m)、III (700~800 m) 和 IV (≥ 800 m) 4 个海拔; 坡向分北坡 ($315.00^\circ \sim 44.99^\circ$)、东坡 ($45.00^\circ \sim 134.99^\circ$)、南坡 ($135.00^\circ \sim 224.99^\circ$) 和西坡 ($225.00^\circ \sim 314.99^\circ$); 坡度分平坡 I ($< 5^\circ$)、斜坡 II ($5^\circ \sim 20^\circ$)、陡坡 III ($20^\circ \sim 30^\circ$) 和急坡 IV ($\geq 30^\circ$) 4 个坡度; 坡位分上坡位 I、中坡位 II 和下坡位 III。

统计各地形因子梯度下的物种丰富度和物种多样性, 分析物种多样性的地形梯度差异。采用 SPSS 24 对各地形因子不同梯度间进行单因素方差分析 (one-way ANOVA)。

2 结果与分析

2.1 蕨类植物基本组成

植物统计采用秦仁昌系统, 名称依据《东北植物检索表》第二版(傅沛云, 1995)。在浑河源的 80 个小样方中, 共记录有蕨类植物 17 种(含变种, 表 1), 隶属于 8 科 13 属。其中, 木贼科(Equisetaceae) 1 种: 木贼(*Hippochaete hyemale*); 阴地蕨科(Botrychiaceae) 1 种: 劲直假阴地蕨(*Botrypus strictus*); 碗蕨科(Dennstaedtiaceae) 1 种: 溪洞碗蕨(*Dennstaedtia wilfordii*); 蕨科(Pteridiaceae) 1 种: 蕨(*Pteridium aquilinum* var. *latiusculum*); 铁线蕨科(Adiantaceae) 1 种: 掌叶铁线蕨(*Adiantum pedatum*); 蹄盖蕨科(Athyriaceae) 4 种: 猴腿蹄盖蕨(*Athyrium multidentatum*)、朝鲜蛾眉蕨(*Lunathyrium coreanum*)、东北蛾眉蕨(*L. pycnosorum*) 和新蹄盖蕨(*Neothyrium crenulato-serrulatum*); 球子蕨科(Onocleaceae) 2 种: 荚果蕨(*Matteuccia struthiopteris*) 和球子蕨(*Onoclea sensibilis* var. *interrupta*); 鳞毛蕨科(Dryopteridaceae) 6 种: 粗茎鳞毛蕨(*Dryopteris crassirhizoma*)、华北鳞毛蕨(*D. goeringiana*)、山地鳞毛蕨(*D. monticola*)、东北亚鳞毛蕨(*D. sichotensis*)、布朗耳蕨(*Polystichum braunii*) 和三叉耳蕨(*P. tripterum*)。可以看出,

表 1 蕨类植物物种的数量特征

Table 1 Quantitative characteristics of fern species

物种名 Species	多度 Abundance	相对多度 Relative abundance (%)	频度 Frequency (%)	相对频度 Relative frequency (%)	平均高度 Height (cm)	相对高度 Relative height (%)	重要值 IV
木贼 <i>Hippochaete hyemale</i>	737	58.12	26.25	13.91	49.76±7.4	5.43	25.82
劲直假阴地蕨 <i>Botrypus strictus</i>	3	0.24	1.25	0.66	50.00	5.46	2.12
溪洞碗蕨 <i>Dennstaedtia wilfordii</i>	5	0.39	2.50	1.32	37.50±2.5	4.10	1.94
蕨 <i>Pteridium aquilinum</i> var. <i>latiusculum</i>	3	0.24	2.50	1.32	72.50±2.5	7.92	3.16
掌叶铁线蕨 <i>Adiantum pedatum</i>	17	1.34	11.25	5.96	38.33±14	4.19	3.83
猴腿蹄盖蕨 <i>Athyrium multidentatum</i>	188	14.83	55.00	29.14	55.23±13	6.03	16.67
东北蛾眉蕨 <i>Lunathyrium pycnosorum</i>	21	1.66	20.00	10.60	45.31±11	4.95	5.73
朝鲜蛾眉蕨 <i>Lunathyrium coreanum</i>	22	1.74	6.25	3.31	60.00±15	6.55	3.87
新蹄盖蕨 <i>Neothyrium crenulato-serrulatum</i>	64	5.05	7.50	3.97	63.33±15	6.92	5.31
荚果蕨 <i>Matteuccia struthiopteris</i>	40	3.15	13.75	7.28	53.18±6.4	5.81	5.42
球子蕨 <i>Onoclea sensibilis</i> var. <i>interrupta</i>	107	8.44	8.75	4.64	55.71±7.6	6.08	6.39
粗茎鳞毛蕨 <i>Dryopteris crassirhizoma</i>	25	1.97	15.00	7.95	56.00±16	6.12	5.34
华北鳞毛蕨 <i>Dryopteris goeringiana</i>	15	1.18	2.50	1.32	50.00	5.46	2.66
山地鳞毛蕨 <i>Dryopteris monticola</i>	3	0.24	1.25	0.66	60.00	6.55	2.48
东北亚鳞毛蕨 <i>Dryopteris sichotensis</i>	6	0.47	2.50	1.32	72.50	7.92	3.24
布朗耳蕨 <i>Polystichum braunii</i>	7	0.55	7.50	3.97	55.00±23	6.01	3.51
三叉耳蕨 <i>Polystichum tripterum</i>	5	0.39	5.00	2.65	41.25±16	4.51	2.52
合计 Total	1268	100	-	100	-	100	100

浑河源蕨类植物的优势科为鳞毛蕨科和蹄盖蕨科。

2.2 蕨类植物物种的数量特征

2.2.1 多度 17种蕨类植物的个体数共1268株,其中有4种超过50株以上,分别为木贼(737株)、猴腿蹄盖蕨(188株)、球子蕨(107株)和新蹄盖蕨(64株)。木贼的相对多度为58.12%,猴腿蹄盖蕨的相对多度为14.83%,而41.18%的种类相对多度都在1%以下(即个体数在13株以下)(表1)。可见,与其他种类的蕨类植物个体数目相比,木贼在森林中的种群数量最大,其次是猴腿蹄盖蕨。

2.2.2 密度 按调查的320 m²面积统计,蕨类植物的种密度是1种·18.82 m⁻²,蕨类植物的种群密度是1株·0.25 m⁻²。在17种蕨类植物中,种群密度相对较大有木贼1株·0.43 m⁻²、猴腿蹄盖蕨1株·1.70 m⁻²和球子蕨1株·2.99 m⁻²,种群密度最小的是1株·106.67 m⁻²(表1),为蕨、劲直假阴地蕨和山地鳞毛蕨。

2.2.3 频度 在所调查的80个小样方中,半数以上均出现猴腿蹄盖蕨,频度为55.00%;出现在10~20个小样方即频度在12.50%~25.00%的种有4个,分别为木贼(26.25%)、东北蛾眉蕨(20.00%)、粗茎鳞毛蕨(15.00%)和荚果蕨(13.75%);出现在10个以下小样方即频度在12.50%以下的种有12个,分别为掌叶铁线蕨(11.25%)、球子蕨(8.75%)、新蹄盖蕨(7.50%)、布朗耳蕨(7.50%)等(表1)。

总的来看,林下出现频度较高且常见的蕨类植物主要为猴腿蹄盖蕨、木贼和东北蛾眉蕨。

2.2.4 高度 在所调查的17种蕨类植物中,各种的平均高度在37.50~72.50 cm,平均高度较高的有东北亚鳞毛蕨(72.50 cm)、蕨(72.50 cm)、新蹄盖蕨(63.33 cm)、朝鲜蛾眉蕨(60.00 cm)和山地鳞毛蕨(60.00 cm),平均高度较矮的有溪洞碗蕨(37.50 cm)、掌叶铁线蕨(38.33 cm)和三叉耳蕨(41.25 cm)(表1)。

2.2.5 重要值 由图1可知,单种重要值在10以上的有木贼(25.82)和猴腿蹄盖蕨(16.67);5以上的有球子蕨(6.39)、东北蛾眉蕨(5.73)、荚果蕨(5.42)、粗茎鳞毛蕨(5.34)和新蹄盖蕨(5.31),上述7个种重要值之和占总重要值的70.68%,而朝鲜蛾眉蕨等10个种重要值之和只占29.32%。上述重要值在5以上的7个种是该森林蕨类植物群落中常见并具有代表性蕨类植物,其中木贼和猴腿蹄盖蕨也是蕨类植物群落中占优势的种类。

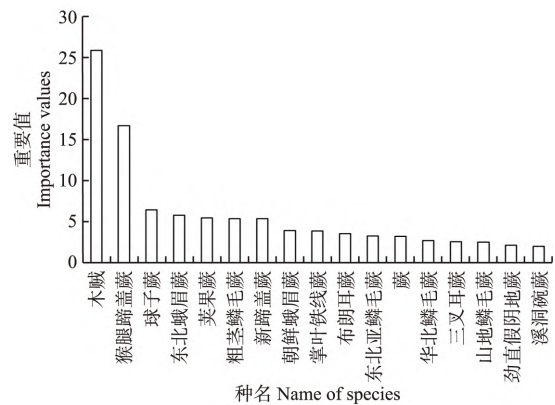


图1 蕨类植物物种的重要值
Fig.1 Importance values (IV) of fern species

2.3 不同地形梯度下蕨类植物物种多样性分布特征

2.3.1 蕨类植物物种多样性沿海拔梯度的分布特征 由图2可见,随海拔的增加,Margalef指数和Shannon指数呈现出“高一高一低”的变化趋势,而Pielou指数有所不同,呈现出“低一高一低”的变化。上述3个指数最大值均出现在海拔III上,Shannon指数和Pielou指数最小值出现在海拔IV上,Margalef指数最小值出现在海拔I上。物种丰富度在海拔II最高,其次是海拔III,海拔I和IV最低。可见,3个指数和物种丰富度的最大值在海拔II和III,而最小值在海拔I和IV,海拔III的3个指数高于其他海拔。

差异显著性检验的结果表明,仅有Magalef指数在海拔III和海拔I间呈显著差异($P < 0.05$),其他多样性指数在海拔间无显著差异($P > 0.05$)。

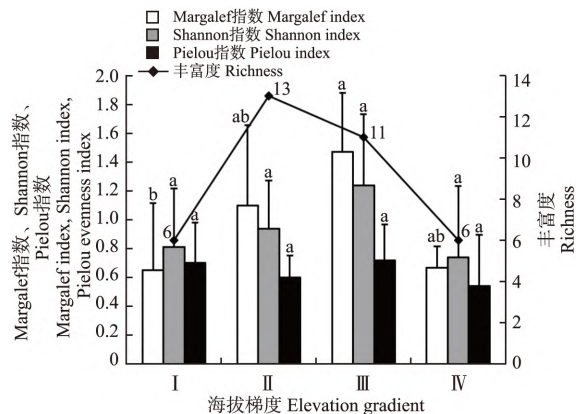


图2 不同海拔的蕨类植物多样性指数
Fig.2 Species diversity indices of ferns in different elevations

注:不同小写字母表示同一多样性指数在不同海拔间差异显著($P < 0.05$),下同。

Note: Different lowercase letters indicate significant differences among different elevations in the same species diversity index. The same below.

2.3.2 蕨类植物物种多样性在不同坡向上的分布特征 由图3可以看出,从北坡到西坡,Margalef指数和Shannon指数呈现出“低—低—高”的变化趋势,而Pielou指数呈现“高—低—高”的变化。上述3个指数最小值均出现在南坡,Margalef指数和Shannon指数最大值出现在北坡,Pielou指数最大值出现在东坡。物种丰富度的分布规律与Margalef指数和Shannon指数相同,丰富度在北坡最高,南坡最低,东坡和西坡居中。可见,南坡的3个指数和物种丰富度值均最低,北坡的Margalef指数、Shannon指数和丰富度均最高。

差异显著性检验的结果表明,Margalef指数和Shannon指数在北坡和南坡间呈显著差异($P < 0.05$),其他多样性指数的坡向间无显著差异($P > 0.05$)。

2.3.3 蕨类植物物种多样性在不同坡度上的分布特征 图4显示,随坡度的增加,Shannon指数和

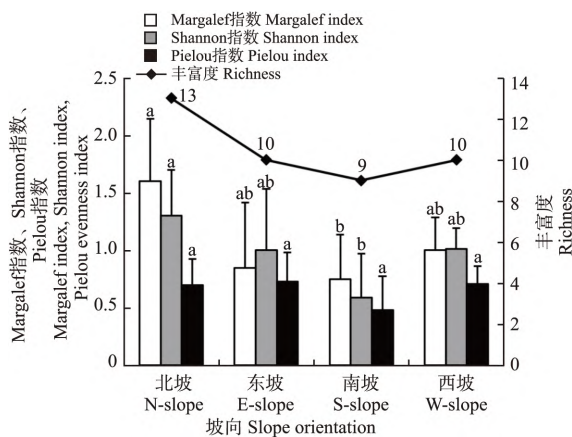


图3 不同坡向的蕨类植物多样性指数
Fig.3 Species diversity indices of ferns in different slope orientations

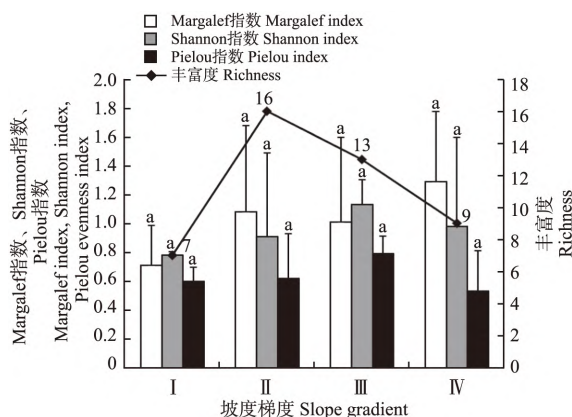


图4 不同坡度的蕨类植物多样性指数
Fig.4 Species diversity indices of ferns in different slope gradients

Pielou指数呈现出“高—高—低”的变化趋势,而Margalef指数呈现出“高—低—高”的变化。上述3个指数中,Shannon指数和Pielou指数最大值出现在坡度III上,Margalef指数最大值出现在坡度IV上,而Margalef指数和Shannon指数最小值出现在坡度I上,Pielou指数最小值出现在坡度IV上。物种丰富度在坡度II最高,坡度I最低。可见,Margalef指数、Shannon指数和丰富度的最小值均在坡度I上,Pielou指数最小值在坡度IV上;随着坡度的增大,3个指数和物种丰富度的最大值出现在坡度较大的II、III和IV上。

差异显著性检验的结果表明,坡度对多样性指数无显著影响($P > 0.05$)。

2.3.4 蕨类植物物种多样性在不同坡位上的分布特征 由图5可见,随坡位的变化,Margalef指数、Shannon指数和Pielou指数呈现出先高后低的变化趋势。上述3个指数最大值均出现在坡位II上,最小值出现在坡位I上。物种丰富度的变化趋势与3个指数相同,其最大值和最小值分别出现在坡位II和I上。可见,3个指数和物种丰富度,最大值均在中坡位的坡位II上,最小值均在上坡位的坡位I上。

差异显著性检验的结果表明,坡位对多样性指数无显著影响($P > 0.05$)。

3 讨论

蕨类植物是林下草本层的重要组成部分,研究蕨类植物物种组成不仅有助于了解林下的物种多样性,对蕨类植物的保护和恢复研究也具有重要意义。本调查研究发现,浑河源共有8科13属17种蕨类植物,均为土生蕨类。优势科为鳞毛蕨科和蹄盖蕨科,这也与中国排名前2位的优势科(周喜乐等,

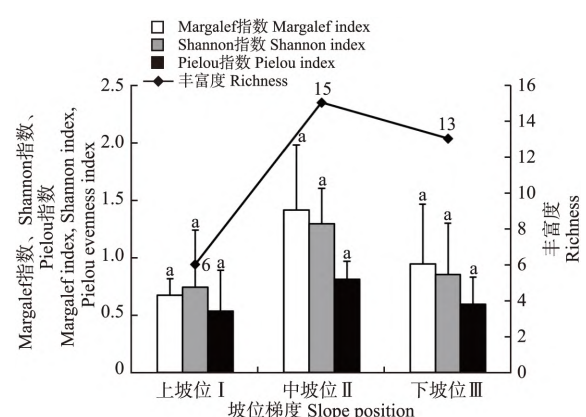


图5 不同坡位的蕨类植物多样性指数
Fig.5 Species diversity indices of ferns in different slope positions

2016) 是相同的。浑河源蕨类植物种的重要值排序是具有“长尾”效应的,木贼和猴腿蹄盖蕨的重要值明显高于其他种类,即只有少数蕨类植物种类在群落中是优势类群,大多数种不占优势,这也与广东古兜山蕨类植物群落(严岳鸿等,2003)和西双版纳蕨类植物群落(李保贵,2015)的发现是一致的。从多度上看,浑河源木贼的相对多度为 58.12%,在森林中的种群数量最大;从频度上看,猴腿蹄盖蕨频度值最高,出现在半数(40 个)以上的小样方中。可见,无论从重要值、多度和频度看,木贼和猴腿蹄盖蕨都显示出它们在蕨类植物群落中的优势地位,它们不但更适应水源涵养区的低山丘陵、高森林覆被率的环境条件,而且具有较强的竞争力。

在小尺度上,地形因子导致的水热状况改变会造成环境异质性,进而影响植物多样性的分布(Moeslund *et al.* 2013; Wu *et al.* 2021)。在区域尺度上物种多样性的分布随海拔的变化而呈现出不同的规律。本研究发现,浑河源蕨类植物物种多样性在整个海拔梯度上的分布不均匀,随海拔的升高呈先升后降的单峰分布格局,Margalef 指数、Shannon 指数和物种丰富度在海拔 600~800 m 间最高,在海拔 500~600 m 和 800~900 m 最低。本次调查样方的海拔跨度不大,但海拔 700~800 m 的 Margalef 指数显著高于海拔 500~600 m。一些研究也表明,蕨类植物的物种多样性在海拔梯度的分布呈现明显的中域效应特征(Watkins *et al.* 2006; Xu *et al.* 2017; 胡佳玉等 2022),本研究结果也呈现出该特征。可见,中海拔上物种多样性最高,也是蕨类植物生存较适宜的海拔。

坡向显著影响地表接受的太阳光照,导致水热因子分布产生差异。本研究中,随坡向从北坡、东坡、南坡到西坡的变化,物种多样性呈现先降后升的分布规律,Margalef 指数、Shannon 指数和物种丰富度在北坡最高,在南坡最低,北坡的 Margalef 指数和 Shannon 指数显著高于南坡。严岳鸿等(2011)发现,蕨类植物多样性分布格局具有明显的坡向差异,东坡和北坡物种多样性最丰富。Marler 等(2018)研究表明,坡向差异对物种组成具有强而持续的影响,与南坡相比蕨类植物在北坡更常见。本研究结果也与之相一致,北坡是蕨类植物生存较适宜的坡向。

有研究发现,坡度和坡位对蕨类分布的影响不显著(区余端等 2011),本研究结果与之相似,即坡度和坡位对蕨类物种多样性指数影响均未达显著水平。但本研究中,物种多样性的分布也有一定的规

律:就坡度而言,平坡的 Margalef 指数、Shannon 指数和物种丰富度都最低,非蕨类植物生存的适宜坡度;就坡位而言,物种多样性的 3 个指数和物种丰富度变化趋势一致,即中坡位最高,上坡位最低,中坡位是蕨类植物生存较适宜的坡位。但也有研究表明蕨类植物丰富度在下坡位最高(Tsujino *et al.* 2013)。

本研究中,强调均匀度的 Pilon 指数数值差异较小,且在不同海拔、坡向和坡度的物种多样性变化趋势与 Margalef 指数和 Shannon 指数不同,也许是强调物种丰富度的指数比强调均匀度的指数具有更大的区别差异的能力(马克平等,1994),需要进一步探讨。在考虑对浑河源及其相似地区蕨类植物资源保护和生态恢复时,应重视地形差异对物种多样性的影响,优先选择中海拔、北坡、中坡位且非平坡,加强对其生存森林环境的保护,提高保护的成效。

参考文献

- 方精云,王襄平,沈泽昊,等. 2009. 植物群落清查的主要内容、方法和技术规范. 生物多样性, 17(6): 533-548.
- 傅沛云. 1995. 东北植物检索表(第二版). 北京: 科学出版社.
- 郭英荣,雷平,晏雨鸿,等. 2015. 江西武夷山黄岗山西北坡植物物种多样性沿海拔梯度的变化. 生态学杂志, 34(11): 3002-3008.
- 胡佳玉,蒋勇,王宇,等. 2022. 贡嘎山石松类和蕨类植物的多样性与海拔分布. 广西植物, 42(2): 220-227.
- 李保贵. 2015. 西双版纳勐腊望天树热带季节雨林蕨类植物组成及生态特征. 广西植物, 35(1): 42-52.
- 马克平,刘玉明. 1994. 生物群落多样性的测度方法: α 多样性的测度方法(下). 生物多样性, 2(4): 231-239.
- 区余端,苏志尧,李镇魁,等. 2011. 地形因子对粤北山地森林不同生长型地表植物分布格局的影响. 应用生态学报, 22(5): 1107-1113.
- 王芝恩,周强,金星,等. 2012. 浑河源地区野生药用植物资源种类调查. 黑龙江农业科学, (3): 120-124.
- 严岳鸿,何祖霞,苑虎,等. 2011. 坡向差异对广东古兜山自然保护区蕨类植物多样性的生态影响. 生物多样性, 19(1): 41-47.
- 严岳鸿,秦新生,邢福武. 2003. 广东古兜山自然保护区蕨类植物群落的特征. 热带亚热带植物学报, 11(2): 109-116.
- 袁铁象,张合平,欧芷阳,等. 2014. 地形对桂西南喀斯特山地森林地表植物多样性及分布格局的影响. 应用生态学报, 25(10): 2803-2810.
- 张开梅,沈羽,周晓丽,等. 2019. 21 世纪以来蕨类植物研究论文的发表情况: 基于 Web of Science 的数据库统计. 生物多样性, 27(11): 1245-1250.
- 张宪春,卫然,刘红梅,等. 2013. 中国现代石松类和蕨类的系统发育与分类系统. 植物学报, 48(2): 119-137.
- 周喜乐,张宪春,孙久琼,等. 2016. 中国石松类和蕨类植物的多样性与地理分布. 生物多样性, 24(1): 102-107.

- Bhattarai KR , Vetaas OR , Grytnes JA. 2004. Fern species richness along a central Himalayan elevational gradient , Nepal. *Journal of Biogeography* , **31**: 389–400.
- Celia SF , Isolda LV , Raul CM , *et al.* 2015. Diversity , endemism and conservation of ferns (Polypodiales) in the Mexican Mountain Component. *Journal of Mountain Science* , **12**: 891–904.
- Clarke A , Nally RM , Bond N , *et al.* 2008. Macroinvertebrate diversity in headwater streams: A review. *Freshwater Biology* , **53**: 1707–1721.
- Fassnacht SR , Webb RW , Sanford WE. 2017. Headwater regions—Physical , ecological , and social approaches to understand these areas: Introduction to the special issue. *Frontiers of Earth Science* , **11**: 443–446.
- Ferrer-Castán D , Vetaas OR. 2005. Pteridophyte richness , climate and topography in the Iberian Peninsula: Comparing spatial and nonspatial models of richness patterns. *Global Ecology and Biogeography* , **14**: 155–165.
- Francis AP , Currie DJ. 2003. A globally consistent richness-climate relationship for angiosperms. *American Naturalist* , **161**: 523–536.
- Kessler M , Kluge J , Hemp A , *et al.* 2011. A global comparative analysis of elevational species richness patterns of ferns. *Global Ecology and Biogeography* , **20**: 868–880.
- Khine PK , Kluge J , Kessler M , *et al.* 2019. Latitude-independent , continent-wide consistency in climate-richness relationships in Asian ferns and lycophytes. *Journal of Biogeography* , **46**: 981–991.
- Kitayama K. 1992. An altitudinal transect study of the vegetation of Mount Kinabalu , Borneo. *Vegetatio* , **102**: 149–171.
- Kubota Y , Shiono T , Kusumoto. 2015. Role of climate and geo-historical factors in driving plant richness patterns and endemism on the East Asian continental islands. *Ecography* , **38**: 639–648.
- Marler TE , Moral RD. 2018. Increasing topographic influence on vegetation structure during primary succession. *Plant Ecology* , **219**: 1009–1020.
- Mensah S , Salako VK , Assogbadjo AE , *et al.* 2018. Differential responses of taxonomic , structural , and functional diversity to local-scale environmental variation in afro-montane forests in South Africa. *Tropical Conservation Science* , **11**: 1–13.
- Moeslund JE , Arge L , Bocher PK , *et al.* 2013. Topography as a driver of local terrestrial vascular plant diversity patterns. *Nordic Journal of Botany* , **31**: 129–144.
- Pouteau R , Meyer JY , Blanchard P , *et al.* 2016. Fern species richness and abundance are indicators of climate change on high-elevation islands: Evidence from an elevational gradient on Tahiti (French Polynesia) . *Climatic Change* , **138**: 143–156.
- Reed DN , Anderson TM , Dempewolf J , *et al.* 2009. The spatial distribution of vegetation types in the Serengeti ecosystem: The influence of rainfall and topographic relief on vegetation patch characteristics. *Journal of Biogeography* , **36**: 770–782.
- Suissa JS , Sundue MA , Testo WL. 2021. Mountains , climate and niche heterogeneity explain global patterns of fern diversity. *Journal of Biogeography* , **48**: 1296–1308.
- Tsujino R , Yumoto T. 2013. Vascular plant species richness along environmental gradients in a cool temperate to sub-alpine mountainous zone in central Japan. *Journal of Plant Research* , **126**: 203–214.
- Wang XG , Hao ZQ , Ye J , *et al.* 2008. Spatial variation of species diversity across scales in an old-growth temperate forest of China. *Ecological Research* , **23**: 709–717.
- Watkins JE , Cardelus C , Colwell RK , *et al.* 2006. Species richness and distribution of ferns along an elevational gradient in Costa Rica. *American Journal of Botany* , **93**: 73–83.
- Weigand A , Abrahamczyk S , Aubin I , *et al.* 2020. Global fern and lycophyte richness explained: How regional and local factors shape plot richness. *Journal of Biogeography* , **47**: 59–71.
- Woldu G , Solomon N , Hishe N , *et al.* 2020. Topographic variables to determine the diversity of woody species in the enclosure of Northern Ethiopia. *Heliyon* , **6**: e03121.
- Wu BC , Zhou LJ , Qi S , *et al.* 2021. Effect of habitat factors on the understory plant diversity of *Platyclus orientalis* plantations in Beijing mountainous areas based on MaxEnt model. *Ecological Indicators* , **129**: 107917.
- Xu X , Zhang HY , Luo J , *et al.* 2017. Area-corrected species richness patterns of vascular plants along a tropical elevational gradient. *Journal of Mountain Science* , **14**: 694–704.
- Xu XT , Dimitrov D , Shrestha N , *et al.* 2019. A consistent species richness-climate relationship for oaks across the Northern Hemisphere. *Global Ecology and Biogeography* , **28**: 1051–1066.

作者简介 李岩,女,1980年生,博士,工程师,主要从事植物多样性、分布格局和保护方面研究。E-mail: liyan@iae.ac.cn

责任编辑 张敏