

兴隆山自然保护区种子植物的垂直分布格局研究

安永梅, 杜维波, 周晓雷, 张晓玮, 武利玉*

(甘肃农业大学 林学院, 兰州 730000)

摘要: 该研究通过对甘肃省兴隆山自然保护区进行野外实地调查和相关文献资料收集, 依据海拔梯度将保护区划分为 6 个植被垂直带[草原带(1 800~2 000 m)、山地灌木带(2 000~2 200 m)、亚高山针叶林带(2 200~2 900 m)、亚高山矮林带(2 900~3 000 m)、高山灌木带(3 000~3 500 m)、高山草甸带(>3 500 m)], 在整理 6 个植被垂直带植物名录的基础上, 以种子植物为研究对象, 对各植被垂直带的种子植物丰富度、生活型、区系成分和系统发育结构进行分析, 探讨植物多样性沿植被垂直带海拔升高的垂直变化规律, 以揭示植物对环境的生态适应性, 为山地植物多样性保护与开发利用提供理论依据。结果表明: (1) 按最新的分类系统划分, 兴隆山自然保护区种子植物隶属于 87 科 387 属 889 种, 植物科、属、种丰富度随植被垂直带海拔升高呈单峰分布格局, 在亚高山针叶林带达到峰值(81 科 304 属 661 种); 各植被垂直带间的 Jaccard 相似性系数呈中等不相似和极不相似水平, 海拔越靠近的植被垂直带间相似性系数越高。(2) 保护区内种子植物不同生活型的垂直变化格局存在差异, 木本植物所占比例沿植被垂直带海拔升高呈先升后降的变化趋势, 而草本植物呈相反的变化格局, 且各植被垂直带中草本植物所占比例始终高于木本植物。(3) 保护区植物在属水平上, 热带成分所占比例随植被带海拔升高呈下降的变化趋势, 而温带成分占比呈上升的变化趋势。(4) 系统发育结构在中低海拔区域的亚高山针叶林带呈发散型, 在高海拔区域(>2 900 m) 的 3 个植被带中呈聚拢型, 说明兴隆山自然保护区非随机分布格局在群落构建机制中发挥主要作用。

关键词: 兴隆山; 植物区系; 植被垂直带; 系统发育结构

中图分类号: Q948.113; Q948.5

文献标志码: A

Vertical Distribution Pattern of Seed Plants in Xinglong Mountain Nature Reserve

AN Yongmei, DU Weibo, ZHOU Xiaolei, ZHANG Xiaowei, WU Liyu*

(College of Forestry, Gansu Agricultural University, Lanzhou 730000, China)

Abstract: In this study, the reserve was divided into six vegetation vertical zones [steppe zone (1 800—2 000 m), mountain scrub zone (2 000—2 200 m), subalpine coniferous forest zone (2 200—2 900 m), subalpine dwarf forest zone (2 900—3 000 m), alpine scrub zone (3 000—3 500 m) and alpine meadow zone (>3 500 m)] according to the altitude gradient by field survey and collection of relevant literature. On the basis of the plant lists of the six vegetation vertical zones, we used seed plants as the study objects to analyze the seed plant richness, life type, zonal composition and phylogenetic structure of each vegetation vertical zone, and to explore the vertical change pattern of plant diversity along the elevation of the vegetation vertical zones, with the aim of understanding the ecological adaptability of plants to the environment. The aim was to understand the ecological adaptability of plants to the environment and to provide a

收稿日期: 2022-10-18; 修改稿收到日期: 2023-05-07

基金项目: 国家自然科学基金项目(31860197); 甘肃农业大学人才引进科研启动基金项目(GAU-KYQD-2021-36)

作者简介: 安永梅(1998—), 女, 在读硕士研究生, 主要从事生物多样性监测与保护方面研究。E-mail: 1515558940@qq.com

* 通信作者: 武利玉, 副教授, 硕士生导师, 主要从事生物多样性监测与保护方面研究。E-mail: liyu199738@163.com

theoretical basis for the conservation and exploitation of plant diversity in mountainous areas. The results show that: (1) According to the latest classification system, the seed plants of Xinglong Mountain Nature Reserve belonged to 87 families, 387 genera and 889 species, and the richness of plant families, genera and species followed a unimodal distribution pattern with the elevation of the vegetation vertical zone, reaching a peak in the subalpine coniferous forest zone (81 families, 304 genera and 661 species); the Jaccard similarity coefficient among the vegetation vertical zones was moderately dissimilar and extremely dissimilar. The higher the similarity coefficient between vegetation vertical zones, the closer the altitude was to the vegetation vertical zone. (2) There were differences in the pattern of vertical variation in the different life types of seed plants in the reserve, with the proportion of woody plants increasing and then decreasing along the elevation of the vegetation vertical zone, while the herbaceous plants showed the opposite variation pattern, and the proportion of herbaceous plants in each vegetation vertical zone was always higher than that of woody plants. (3) Seed plants of the reserve at the genus level, the proportion of tropical components in protected areas tended to decrease as the elevation of vegetation zones increases, while the proportion of temperate components tended to increase. (4) The phylogenetic structure was dispersed in the subalpine coniferous forest zone at middle and low altitudes, and aggregated in the three vegetation zones at high altitudes ($>2\ 900\text{ m}$), indicating that the non-random distribution pattern of the Xinglong Mountain Nature Reserve played a major role in the community construction mechanism.

Key words: Xinglong Mountain; flora; vegetation vertical zone; phylogenetic structure

植物多样性随环境梯度的变化规律一直是植物生态学研究的核心问题之一^[1]。山地生态系统因具有浓缩的环境梯度和生境异质性高的特点,为各植物类群提供了天然的生存场所和分化条件,成为了植物多样性的富集地^[2],也是研究植物多样性的热点区域,一直备受各类学者的关注^[3]。山地生态系统由于海拔升高使得气候条件、植被类型、土壤等特征发生了相应的变化,从而形成了植被垂直带,对山地植物多样性沿植被垂直带海拔升高的分布规律进行研究,可以揭示植物长期演替下的生态适应性。国内外开展的有关山地植物多样性随海拔梯度变化的研究表明,山地植物多样性垂直分布格局存在单峰曲线、先降后升、单调递增或递减和无明显变化 5 种分布模式^[4-8],这可能与山体所处的区域位置、气候条件、山体高度和生活型等方面的差异相关。已有研究表明,在热带地区山地植物多样性随着海拔升高以单调递减变化趋势为主,亚热带地区主要呈单峰曲线的变化趋势,但针对温带半干旱区研究较少变化趋势尚不明确^[9-13]。

兴隆山自然保护区地处中国西北部,植被呈垂直地带性分布,目前,关于该保护区的研究主要集中在植物保护利用^[14]、资源调查^[15]和土壤理化性质^[16]等方面,而针对植物区系成分和系统发育结构沿植被垂直带的变化规律尚不明晰。因此研究半干旱区山地植物垂直分布格局,对阐明植物多样性与环境间的关系具有重要意义。基于此,本研究运用植物区系地理学和系统发育学的相关理论和方法,对保护

区各植被垂直带种子植物生活型、区系地理成分的变化趋势进行分析,进一步揭示植物多样性沿山地环境变化的垂直分布规律,可以为山地植物多样性保护、植物资源合理开发利用和引种驯化等方面提供科学的理论依据^[17],利用物种间的系统发育关系探明该保护区系统发育结构,对了解植物起源、分化、物种适应性及群落构建机制具有重要意义。

1 研究区概况

兴隆山国家级自然保护区($103^{\circ}50' - 104^{\circ}10' \text{E}$, $35^{\circ}38' - 35^{\circ}58' \text{N}$)位于甘肃省兰州市榆中县境内,在植物地理区划上是黄土高原、青藏高原和蒙新高原的交汇地带,主要是由马衔山、兴隆山及沟谷丘陵地组成,其山脉属于祁连山东延余脉,总面积为 $33\ 301\text{ hm}^2$,海拔 $1\ 800 \sim 3\ 670\text{ m}$ ^[18]。保护区内气候特征表现为大陆性温带半湿润气候,年平均气温在 $3 \sim 7\text{ }^{\circ}\text{C}$,年均降水量在 600 mm 以上,平均无霜期为 103 d ^[15]。随着海拔的升高,保护区内土壤和植被均呈垂直地带性分布,马衔山的褶穹和兴隆山褶凹的构造单元可视为同一巨大山体研究其植被垂直带^[19],各垂直带间存在着一定的过渡性。

2 材料和方法

2.1 植物名录的构建

研究以《甘肃兴隆山国家级自然保护区资源本底调查研究》的种子植物名录为基础^[19],搜集并查阅文献、书籍和标本记录^[20-24]对保护区植物遗漏种

进行增补。在此基础上,结合保护区的地形、生境和植被群落类型等特征,通过样线法进行野外实地调查,记录所观察到的植物种类、生境特征、海拔高度等信息,采用《中国生物物种名录》2022 版(<http://sp2000.org.cn>)对植物科、属、种名及拉丁名进行核对校正,对异名、重复、无海拔及栽培种数据进行修正和剔除。通过实地调查并参考文献[9]将保护区划分为 6 个植被垂直带(表 1),并根据植物的海拔分布范围整理出 6 个植被垂直带的植物名录,用于后续分析。

表 1 兴隆山自然保护区的植被垂直带
Table 1 Vertical zone of vegetation in Xinglong Mountain Nature Reserve

植被垂直带 Vegetation vertical zone	海拔 Altitude/m
草原带 Steppe zone (SZ)	1 800~2 000
山地灌丛带 Mountain scrub zone (MSZ)	2 000~2 200
亚高山针叶林带 Subalpine coniferous forest zone (SCFZ)	2 200~2 900
亚高山矮林带 Subalpine dwarf forest zone (SDFZ)	2 900~3 000
高山灌丛带 Alpine scrub zone (ASZ)	3 000~3 500
高山草甸带 Alpine meadow zone (AMZ)	>3 500

注:植被垂直带划分参考文献[19]。
Note: Classification of vegetation vertical zones reference [19].

2.2 群落相似性

Jaccard 相似性系数表征植被垂直带间物种更替的速率,其值越小,则表示植被带间共有物种越少,物种更替速率越大^[25],其计算公式为:

$$q = \frac{c}{a + b - c}$$
 (1)

式中: c 为两植被带共有物种数; a 和 b 分别为两植被带的物种总数,当 q 在 0~0.25 间表示极不相似性,在 0.25~0.5 间表示中等不相似,在 0.5~0.75 间表示中等相似,在 0.75~1 间表示极相似^[26]。

2.3 植物区系成分

根据《中国维管植物科属志》^[27]对中国种子植物属的区系分布类型界定的划分方法,将兴隆山自然保护区种子植物属的区系成分划分为世界广布型(T_1)、中国特有成分(T_{15})、热带区系成分(T_r)和温带区系成分(T_w)4 类进行统计分析^[28]。

2.4 系统发育指数的选取

研究利用 R 软件中的 V. PhyloMaker 程序包^[29],以兴隆山自然保护区种子植物的拉丁名为基础构建了带有枝长的系统发育树(图 1)。将系统发

育树与植被垂直带物种数据相匹配计算系统发育多样性(phylogenetic distance, PD)和净种间亲缘关系指数(net relatedness index, NRI), PD 值越大表明该植被带在保护区系统发育多样性的比重越高^[30], NRI 侧重从整体出发反映研究群落物种所形成的系统发育结构^[31]。计算各植被垂直带所有物种对的平均谱系距离(mean phylogenetic distance, MPD),保持丰富度与发生频率不变,运用独立置换的方法将各植被带内的植物在物种库中随机抽取 999 次,从而获得各植被带植物在随机零模型下的 MPD 分布,最后利用随机分布结果将观察值标准化,从而得出 NRI ^[32-33],其计算公式为:

$$NRI = -1 \times \frac{MPD - MPD'}{SD(MPD')}$$
 (2)

式中: MPD 为观察值; MPD' 为随机零模型期望值; $SD(MPD')$ 为标准偏差。 NRI 是 MPD 标准化效应指数的负值, $Mpd. obs. p$ (P -value of observed mpd vs. null communities)是观察值与零模型期望值相比的显著度,若 $NRI > 0$ 且 $Mpd. obs. p < 0.05$ 时,则表明该植被带的系统发育结构为聚集显著;若 $NRI < 0$ 且 $Mpd. obs. p > 0.95$ 时,则表明该植被带系统发育结构发散显著; $NRI = 0$ 则表明系统发育结构呈随机分布。 NRI 的绝对值要小于 1.96,否则被认为系统发育结构显著偏离零模型^[34-35],计算过程中不使用多度加权,以上计算均在 R 软件的 Picante 包中进行。

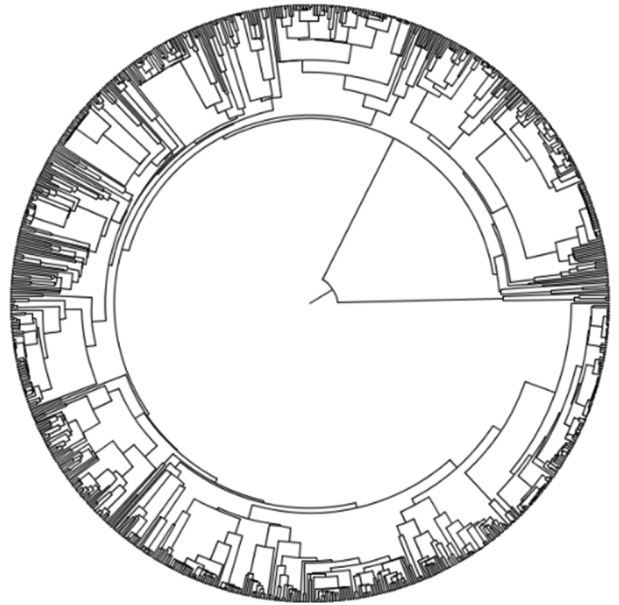


图 1 兴隆山自然保护区种子植物系统发育树
Fig.1 Phylogenetic tree of seed plants in Xinglong Mountain Nature Reserve

3 结果与分析

3.1 各植被垂直带种子植物的数量特征和相似性

3.1.1 各植被垂直带种子植物数量分布特征 如表 2 所示,按最新的分类系统划分,兴隆山自然保护区种子植物隶属于 87 科 387 属 889 种,构成各植被垂直带植物物种数量分别为:草原带 40 科 128 属 200 种,81 科 304 属 661 种,亚高山针叶林带 81 科 304 属 661 种,亚高山矮林带 37 科 83 属 137 种,高山灌丛带 31 科 75 属 135 种,高山草甸带 26 科 57 属 119 种。植物科、属、种丰富度及其占比随着植被带海拔升高呈单峰分布格局,均在亚高山针叶林带达到峰值。

3.1.2 各植被垂直带的群落相似性 从两植被垂直带间共有植物物种数量可以得出(表 3),山地灌丛带和亚高山针叶林带间共有物种数最高,达 181 种,其次是草原带和亚高山针叶林带间,共有种数为 109 种,草原带和高山草甸带间共有种数最少,仅有 2 种。通过 Jaccard 相似性系数分析表明,亚高山矮林带和高山灌丛带间的相似性系数最大(0.402),其次是高山灌丛带和高山草甸带间(0.373),均属于中等不相似;其他各植被带间相似系数均在 0~0.25

间,属于极不相似。此外,各植被垂直带间的相似性随海拔高度差的增加而逐渐降低,海拔高度越接近的植被带间相似性越高。

3.2 各植被垂直带的生活型特征

如图 2 所示,木本植物沿植被垂直带海拔升高呈先升后降的变化格局,乔、灌木峰值略有差异。灌木所占比例在山地灌丛带达到峰值,为 19.12%;乔木所占比例呈“Λ”字形,在亚高山针叶林带达到峰值,为 4.39%,在草原带、高山灌丛带和高山草甸带均没有分布;藤本所占比例最低,在草原带至亚高山针叶林带变化较为平缓,随后下降至 0%。在各植被垂直带中草本植物所占比例始终高于木本植物,沿植被带自下而上依次为 90.50%、78.09%、79.12%、81.75%、84.44%和 89.92%,呈先降后升的变化趋势。一年生草本所占比例随植被带海拔升高呈单调递减的变化趋势,从草原带的 25%降低至高山草甸带的 7.56%;多年生草本所占比例呈先降后升的变化趋势,这是由于在高海拔区域的高山草甸带中有大量多年生草本植物存在。上述结果表明,保护区内植物生活型所占比例的垂直变化趋势与植被垂直带类型变化相对应。

表 2 兴隆山自然保护区各植被垂直带种子植物数量统计

植被垂直带 Vegetation vertical zone	科 Family		属 Genus		种 Species	
	数量 Number	比例 Percentage/%	数量 Number	比例 Percentage/%	数量 Number	比例 Percentage/%
草原带 Steppe zone (SZ)	40	45.98	128	33.07	200	22.50
山地灌丛带 Mountain scrub zone (MSZ)	55	63.22	160	41.34	251	28.23
亚高山针叶林带 Subalpine coniferous forest zone (SCFZ)	81	93.10	304	78.55	661	74.35
亚高山矮林带 Subalpine dwarf forest zone (SDFZ)	37	42.53	83	21.45	137	15.41
高山灌丛带 Alpine scrub zone (ASZ)	31	35.63	75	19.38	135	15.19
高山草甸带 Alpine meadow zone (AMZ)	26	29.89	57	14.73	119	13.39
总计 Total	87		387		889	

表 3 兴隆山自然保护区各植被垂直带间的相似性系数

植被垂直带 Vegetation vertical zone	山地灌丛带 MSZ	亚高山针叶林带 SCFZ	亚高山矮林带 SDFZ	高山灌丛带 ASZ	高山草甸带 AMZ
草原带 SZ	0.222 (82)	0.145 (109)	0.037 (12)	0.021 (7)	0.006 (2)
山地灌丛带 MSZ		0.248 (181)	0.060 (22)	0.029 (11)	0.014 (5)
亚高山针叶林带 SCFZ			0.157 (108)	0.080 (59)	0.050 (37)
亚高山矮林带 SDFZ				0.402 (78)	0.164 (36)
高山灌丛带 ASZ					0.373 (69)

注:括号内数值是指两植被垂直带共有植物种数量。
Note: Values in brackets refer to the number of plant species shared by the two vertical zones of vegetation.

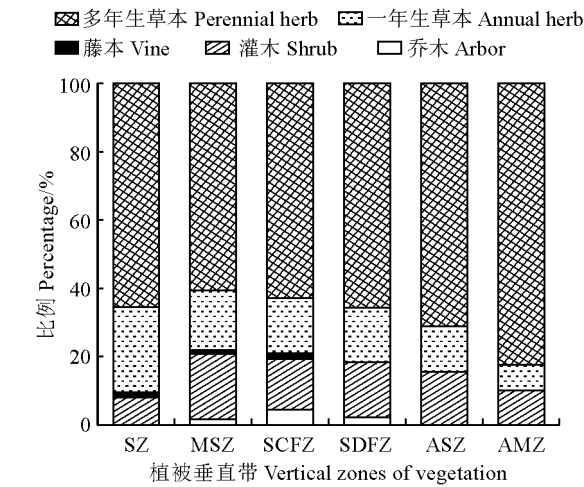


图 2 各植被垂直带不同生活型所占比例
Fig. 2 Proportion of different life types in each vegetation vertical zone

3.3 各植被垂直带的植物区系成分

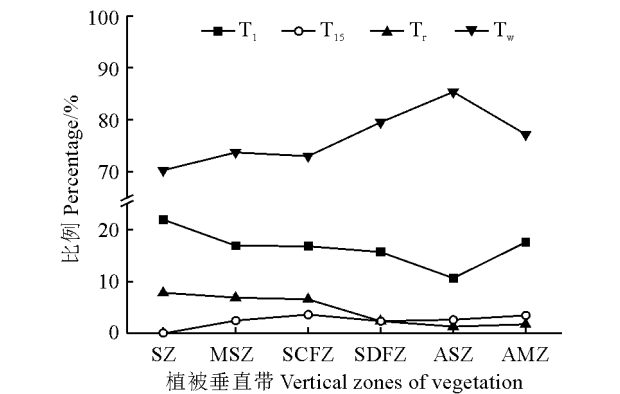
由图 3 可知,在属水平上,兴隆山自然保护区种子植物温带成分(T_w)在各植被垂直带中所占比例不低于 70%,远高于其他区系类型,且随植被带海拔升高整体呈逐渐增加的变化趋势,仅在高山草甸带出现小段下降;而热带成分(T_r)所占比例呈逐渐下降的变化趋势,仅在高山草甸带有略微上涨,各植被带占比低于 8%,这表明该保护区植物主要呈温带性质。

世界广布型(T_1)所占比例随着植被带海拔升高呈先降低后升高的变化趋势,在草原带达到峰值,占比为 21.88%。中国特有成分(T_{15})所占比例总体最低,且变化趋势较为平缓,仅在 2%~4% 范围内波动。

3.4 系统发育多样性及其结构

由表 4 可知,兴隆山自然保护区 6 个植被垂直

带中的系统发育多样性指数范围在 4 577.89~17 543.37 之间,随着植物丰富度的增加, PD 值也随之增大,通过线性回归模型可以得出保护区种子植物 PD 与 N_{taxa} 呈显著正相关性($R^2 = 0.985$, $P < 0.001$, $y = 22.952x + 2\,621.3$)。由于草原带和山地灌丛带 NRI 绝对值大于 1.96,表明两植被带的系统发育结构显著偏离零模型。亚高山针叶林带 $NRI = -1.017 < 0$,且 $Mpd. \text{ obs. } p = 0.965 > 0.95$,表明该植被带与零群落相比,系统发育结构呈显著发散;亚高山矮林带、高山灌丛带和高山草甸带的 NRI 分别为 1.832、1.617 和 1.587,均大于 0,且 $Mpd. \text{ obs. } p$ 分别为 0.008、0.028 和 0.021,均小于 0.05,则表明高海拔植被带($>2\,900\text{ m}$)的系统发育结构呈显著聚集。



T_1 表示世界广布型, T_{15} 表示中国特有成分, T_r 表示热带区系成分, T_w 表示温带区系成分。

图 3 属的区系地理成分沿植被带的垂直变化趋势
 T_1 is the world-wide type, T_{15} is the Chinese endemic component, T_r is the tropical component, and T_w is the temperate component.

Fig. 3 Vertical trends in the zonal geographic composition of genera along vegetation zones

表 4 各植被垂直带系统发育指数				
Table 4 Phylogenetic index of each vegetation vertical zone				
植被垂直带 Vegetation vertical zone	丰富度 N_{taxa}	系统发育多样性 PD	显著度 $Mpd. \text{ obs. } p$	净亲缘关系指数 NRI
草原带 Steppe zone(SZ)	200	7 279.66	0.001	3.018
山地灌丛带 Mountain scrub zone(MSZ)	251	9 364.37	0.001	2.494
亚高山针叶林带 Subalpine coniferous forest zone(SCFZ)	661	17 543.37	0.965	-1.017
亚高山矮林带 Subalpine dwarf forest zone(SDFZ)	137	5 975.11	0.008	1.832
高山灌丛带 Alpine scrub zone(ASZ)	135	5 484.47	0.028	1.617
高山草甸带 Alpine meadow zone(AMZ)	119	4 577.89	0.021	1.587

4 讨论

4.1 植物丰富度和相似性的垂直分布格局

兴隆山自然保护区种子植物丰富度沿植被垂直带海拔升高呈单峰分布格局,造成的原因:一是植被垂直带海拔梯度划分的不同,面积大小存在差异^[36];二可能是由于低海拔区域(1 800~2 200 m)干扰因素强烈,此外,虽热量充足但水分限制作用较强,相反高海拔区域(>2 900 m)热量是主要的限制因子,相比较而言,中低海拔区域(2 200~2 900 m)拥有着较好的水热生境组合,因此单峰分布格局符合水分-能量假说^[37-38];三是符合“中间膨胀理论”,各植被垂直带间存在着不同重叠的植物物种和分布范围,高低海拔间由于海拔跨度大,植物重叠范围较小,所以导致在亚高山针叶林带丰富度最高^[39-40]。综上所述,保护区植物丰富度呈单峰曲线是由于面积大小、干扰因素、水热条件限制和中间膨胀效应综合作用下所导致的结果。

本研究表明,在各植被垂直带间 Jaccard 相似性系数呈中等不相似和极不相似水平,这与陈思艺等^[41]对星斗山森林群落的研究结果一致,造成的原因可能是各植被带间坡度、坡向、水热条件和土壤类型等环境条件的差异,在一定程度上对植物物种间的交流产生了阻隔作用,因此导致各植被带间群落相似性较小^[41]。海拔高度越靠近的植被带间相似性系数越大,可能是由于海拔高度差影响植物本身的扩散和定居,从而引起各植被带的植物物种组成和群落结构发生适应环境的改变^[42]。

4.2 不同生活型的垂直分布格局

本研究表明,不同生活型植物在各植被垂直带的变化趋势和峰值有所不同,这是由于各生活型植物对不同海拔生境条件的敏感性不同^[43]。灌木峰值低于乔木,这种不同生活型峰值在不同海拔的现象,在其他山地垂直分布格局研究中也有存在^[44],乔木呈“Λ”字形原因可能是低海拔水分限制和高海拔热量限制导致。一年生草本随植被带海拔升高呈单调递减的分布格局,这与刘彬等^[45]对新疆天山南坡种子植物的研究结果相符。多年生草本呈先降后升的变化趋势,造成的原因可能是随着海拔升高水热成分逐渐降低,绝大多数一年生草本不能适应寒冷、低温的生境,而多年生草本可以通过形成轴根、密生及根茎等复杂的生存策略来适应高寒、生长季节缩短的气候特点,如西藏点地梅(*Androsace mariae*)、珠芽蓼(*Bistorta vivipara*)等植物。

4.3 植物区系地理成分的垂直分布格局

植物分布区类型中属较科更能具体表明植物在历史进化过程中的分异状况和地理特征^[46]。本研究表明,在属级水平上温带成分所占比例占绝对优势,符合保护区温带半湿润的气候特征,并沿植被带海拔升高整体呈上升的变化趋势,这与冯建孟等^[47]研究结果一致,可能是由于温带区系成分植物具有耐低温、适宜在高海拔区域生存的适应性。王俊伟等^[48]对藏南布丹拉山南坡植物的研究得出,热带成分所占比例随海拔升高呈下降变化趋势,这与本研究结果相符,表明随着海拔升高热带成分受温度-热量的影响逐渐增加,热带成分必然减少;热带成分在山顶的高山草甸带有略微的上涨,这可能与高海拔极端恶劣的环境导致植物分化强烈的结果有关^[48]。综上所述,植物区系地理成分的垂直分布格局主要受当地气候特征和水热条件变化的共同影响。

4.4 系统发育结构的垂直分布格局

本研究表明,在中低海拔的亚高山针叶林带呈显著的发散结构,在高海拔区域(>2 900 m)的3个植被带中均呈显著的聚集结构,说明非随机格局在群落构建过程中起主要作用,中性理论预测系统发育结构的随机格局在兴隆山自然保护区并不适用,这与大多数研究^[49]一致,为探讨物种共存和植物的生态适应性提供了新的角度。生境过渡和竞争排斥是生态位理论中主要的两种作用机制,前者作用使物种适应性相似,表现为系统发育结构聚集,而后者使亲缘关系近的物种出现排斥现象不能共存,致使系统发育结构发散^[50]。兴隆山自然保护区在中低海拔表现出系统发育结构发散,可能是由于该区域存在以青杆为主的建群树种,裸子和被子植物的亲缘关系较远,并且该区域拥有着充足的自然资源和适宜的环境条件,物种间为竞争同一生存资源会使植物生态位逐渐分化,最终导致种间亲缘关系相对较远的植物共存^[51];而高海拔植被带系统发育结构聚集,表明生境过滤在群落构建中起决定性作用,由于高海拔资源条件有限,在强烈的生境异质性和生理胁迫压力驱使下导致该区域亲缘关系近的物种聚集^[52]。本研究从中低海拔至高海拔,系统发育结构由发散转变成聚集,这与 Kembel 等^[53]的研究结果类似,表明植物物种间竞争作用减弱的同时伴随着环境压力的增强^[54]。

5 结论

通过对兴隆山自然保护区种子植物的研究表

明:按最新的分类系统划分,保护区种子植物隶属于 87 科 387 属 889 种,植物科、属、种丰富度均呈单峰分布格局;各植被带间群落相似性系数呈中等不相似和极不相似水平,海拔越靠近的植被带间相似性系数越高;不同生活型植物所占比例的垂直变化趋势存在差异,木本植物所占比例沿植被垂直带海拔升高呈先升后降的变化趋势,而草本植物呈相反的变化格局。在属级水平上,温带成分在各植被垂直

带占绝对优势,所占比例随着植被垂直带海拔升高整体呈上升的变化趋势,而热带成分所占比例呈相反的变化趋势。各植被垂直带中系统发育结构呈非随机分布,沿植被带海拔升高由发散转变为聚集,这了解兴隆山自然保护区物种共存和群落构建机制具有重要意义。本研究尚未与土壤、水热条件和微生物等具体环境因子相结合,有待通过研究深入探讨种子植物多样性垂直分布格局的形成机制。

参考文献:

[1] 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 J M, WANG X P, XU C D, *et al.* Altitudinal patterns of plant species diversity and community structure on Yulong mountains, Yunnan, China[J]. *Journal of Mountain Science*, 2006, **24**(1): 110-116.

[2] TITO R, VASCONCELOS H L, FEELEY K J. Mountain ecosystems as natural laboratories for climate change experiments [J]. *Frontiers in Forests and Global Change*, 2020, **3**: 38.

[3] LOMOLINO M V. Elevation gradients of species-density: Historical and prospective views[J]. *Global Ecology and Biogeography*, 2001, **10**(1): 3-13.

[4] 袁 业,孙国龙,苑美燕,等. 塞罕坝植物物种丰富度海拔分布格局[J]. 安徽农业大学学报, 2017, **44**(3): 496-501.
YUAN Y, SUN G L, YUAN M Y, *et al.* Distributional patterns of plant species richness along an elevational gradient in Saihanba[J]. *Journal of Anhui Agricultural University*, 2017, **44**(3): 496-501.

[5] 屈月雷,令志强,王 晨,等. 云南省石葵河不同海拔梯度的植物多样性分析[J]. 广东农业科学, 2018, **45**(9): 79-83.
QU Y L, LING Z Q, WANG C, *et al.* Plant diversity analysis of different altitudinal gradients in Shikuihe River, Yunnan Province[J]. *Guangdong Agricultural Sciences*, 2018, **45**(9): 79-83.

[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] 岳 明,张林静,党高弟,等. 佛坪自然保护区植物群落物种多样性与海拔梯度的关系[J]. 地理科学, 2002, **22**(3): 349-354.
YUE M, ZHANG L J, DANG G D, *et al.* The relationships of higher plants diversity and elevation gradient in Foping National Reserve[J]. *Scientia Geographica Sinica*, 2002, **22**(3): 349-354.

[8] HOOPER D U, VITOUSEK P M. The effects of plant composition and diversity on ecosystem processes [J]. *Science*, 1997, **277**(5 330): 1 302-1 305.

[9] 何 斌,李 青,陈群利,等. 黔西北黄杉群落物种多样性的

海拔梯度格局[J]. 生态环境学报, 2021, **30**(6): 1 111-1 120.
HE B, LI Q, CHEN Q L, *et al.* Altitudinal pattern of species diversity of *Pseudotsuga sinensis* community in northwestern Guizhou, China[J]. *Ecology and Environmental Sciences*, 2021, **30**(6): 1 111-1 120.

[10] 沈泽昊,方精云,刘增力,等. 贡嘎山东坡植被垂直带谱的物种多样性格局分析[J]. 植物生态学报, 2001, **25**(6): 721-732.
SHEN Z H, FANG J Y, LIU Z L, *et al.* Patterns of biodiversity along the vertical vegetation spectrum of the east aspect of Gongga Mountain[J]. *Acta Phytocologica Sinica*, 2001, **25**(6): 721-732.

[11] 郝占庆,于德永,杨晓明,等. 长白山北坡植物群落 α 多样性及其随海拔梯度的变化[J]. 应用生态学报, 2002, **13**(7): 785-789.
HAO Z Q, YU D Y, YANG X M, *et al.* α diversity of communities and their variety along altitude gradient on northern slope of Changbai Mountain[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2002, **13**(7): 785-789.

[12] 王国宏. 祁连山北坡中段植物群落多样性的垂直分布格局[J]. 生物多样性, 2002, **10**(1): 7-14.
WANG G H. Species diversity of plant communities along an altitudinal gradient in the middle section of northern slopes of Qilian Mountains, Zhangye, Gansu, China [J]. *Chinese Biodiversity*, 2002, **10**(1): 7-14.

[13] 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 Y, KANG M Y, JIANG Y, *et al.* Altitudinal pattern of species diversity in woody plant communities of Mountain Helan, northwestern China[J]. *Journal of Plant Ecology*, 2008, **32**(3): 574-581.

[14] 陶继新,魏 强. 兴隆山自然保护区野生植物资源的利用与保护[J]. 中国农业信息, 2016(10): 36-37.
TAO J X, WEI Q. Utilization and protection of wild plant resources in Xinglong Mountain Nature Reserve[J]. *China Agricultural Information*, 2016(10): 36-37.

[15] 袁可萱,郭川江,梁 勇,等. 甘肃兴隆山中草药资源调查研究[J]. 甘肃农业, 2021(4): 45-49.
YUAN K X, GUO C J, LIANG Y, *et al.* Investigation and study on Chinese herbal medicine resources in Xinglong Moun-

tain, Gansu Province[J]. *Gansu Agriculture*, 2021(4): 45-49.

[16] 韩 春. 兴隆山森林生态系统土壤保育及水源涵养功能研究[D]. 兰州: 兰州大学, 2020.

[17] 向晓媚, 刘 冰, 谭 璐, 等. 湖南省德夯风景名胜区种子植物区系研究[J]. 西北植物学报, 2022, **42**(6): 1 051-1 063.

XIANG X M, LIU B, TAN L, *et al.* Study on the flora of seed plants in Dehang Scenic Spot, Hunan Province[J]. *Acta Botanica Boreali-Occidentalia Sinica*, 2022, **42**(6): 1 051-1 063.

[18] 魏 强, 凌 雷, 王多锋, 等. 不同海拔甘肃兴隆山主要森林群落的土壤理化性质[J]. 西北林学院学报, 2019, **34**(4): 26-35.

WEI Q, LING L, WANG D F, *et al.* Soil physicochemical properties of three main forest communities at different altitudes in Xinglong Mountain of Gansu Province[J]. *Journal of Northwest Forestry University*, 2019, **34**(4): 26-35.

[19] 王香亭. 甘肃兴隆山国家级自然保护区资源本底调查研究[M]. 兰州: 甘肃民族出版社, 1996: 1-177.

[20] 王春玲, 裴应泰, 张 珊. 产自兴隆山自然保护区且以该地区命名的植物资源[J]. 林业科技通讯, 2019(2): 73-75.

WANG C L, PEI Y T, ZHANG S. Plant resources from Xinglong Mountain Nature Reserve and named after the area[J]. *Forest Science and Technology*, 2019(2): 73-75.

[21] 祁 军. 兴隆山保护区资源本底调查遗漏植物物种[J]. 甘肃林业科技, 2013, **38**(3): 18-19.

QI J. Omissions plant species in resources background investigation of Xinglongshan National Nature Reserve[J]. *Journal of Gansu Forestry Science and Technology*, 2013, **38**(3): 18-19.

[22] 裴应泰, 潘世成. 兴隆山自然保护区资源本底调查新增植物资源——锦葵科、豆科[J]. 甘肃林业科技, 2016, **41**(1): 10-11.

PEI Y T, PAN S C. The newly added species of Malvaceae and Leguminosae on resources baseline survey in Xinglong Mountain National Nature Reserve[J]. *Journal of Gansu Forestry Science and Technology*, 2016, **41**(1): 10-11.

[23] LI L, LUO Y, YANG C X, *et al.* *Aquilegia yangii* (Ranunculaceae), a new species from Western China[J]. *Phytotaxa*, 2018, **348**(4): 289.

[24] 杨 韬, 宁艳梅, 晋 玲. 甘肃省兰科 1 新记录属——冷兰属[J]. 西北植物学报, 2017, **37**(4): 812-814.

YANG T, NING Y M, JIN L. *Frigidorchis*, a newly recorded genus of Orchidaceae from Gansu Province[J]. *Acta Botanica Boreali-Occidentalia Sinica*, 2017, **37**(4): 812-814.

[25] 周芸芸, 赵敏杰, 李熙萌, 等. 大坂山不同海拔高寒植被物种多样性研究[J]. 安徽农业科学, 2011, **39**(13): 8 028-8 030.

ZHOU Y Y, ZHAO M J, LI X M, *et al.* Study on species diversity of alpine vegetation with different altitudes in Daban Mountain[J]. *Journal of Anhui Agricultural Sciences*, 2011, **39**(13): 8 028-8 030.

[26] 王 蕾. 乌鲁木齐野生种子植物多样性及其分布格局[D]. 乌鲁木齐: 新疆农业大学, 2012.

[27] 李德铎. 中国维管植物科属志[M]. 北京: 科学出版社, 2020: 159-2 294.

[28] 谷文乾, 杨欣欣, 张淑钧, 等. 青藏高原东南部察隅河流域种子植物区系研究[J]. 西北植物学报, 2022, **42**(10): 1 749-1 759.

GU W Q, YANG X X, ZHANG S J, *et al.* Study on the flora of seed plants in Zayü River Basin, southeast Qinghai-Tibet Plateau[J]. *Acta Botanica Boreali-Occidentalia Sinica*, 2022, **42**(10): 1 749-1 759.

[29] JIN Y, QIAN H. V. PhyloMaker: An R package that can generate very large phylogenies for vascular plants[J]. *Ecography*, 2019, **42**(8): 1 353-1 359.

[30] 卢孟孟, 黄小翠, 慈秀芹, 等. 沿海拔梯度变化的哀牢山亚热带森林群落系统发育结构[J]. 生物多样性, 2014, **22**(4): 438-449.

LU M M, HUANG X C, CI X Q, *et al.* Phylogenetic community structure of subtropical forests along elevational gradients in Ailao Mountains of southwest China[J]. *Biodiversity Science*, 2014, **22**(4): 438-449.

[31] SWENSON N G, ENQUIST B J, THOMPSON J, *et al.* The influence of spatial and size scale on phylogenetic relatedness in tropical forest communities[J]. *Ecology*, 2007, **88**(7): 1 770-1 780.

[32] GOTELLI N J. Null model analysis of species co-occurrence patterns[J]. *Ecology*, 2000, **81**(9): 2 606-2 621.

[33] 姜晓燕, 梁林峰, 毕润成, 等. 山西霍山植物群落谱系结构的格局[J]. 西北植物学报, 2016, **36**(12): 2 505-2 512.

JIANG X Y, LIANG L F, BI R C, *et al.* Spatial pattern of phylogenetic structure of plant community in Shanxi Huoshan Mountain[J]. *Acta Botanica Boreali-Occidentalia Sinica*, 2016, **36**(12): 2 505-2 512.

[34] 王雷宏, 杨俊仙, 曹翠萍, 茂兰国家自然保护区喀斯特森林系统发育结构[J]. 山地学报, 2020, **38**(2): 201-209.

WANG L H, YANG J X, CAO C P. Phylogenetic structure of Karst forest in Maolan National Nature Reserve, Guizhou Province, China[J]. *Mountain Research*, 2020, **38**(2): 201-209.

[35] 柴永福, 许金石, 刘鸿雁, 等. 华北地区主要灌丛群落物种组成及系统发育结构特征[J]. 植物生态学报, 2019, **43**(9): 793-805.

CHAI Y F, XU J S, LIU H Y, *et al.* Species composition and phylogenetic structure of major shrublands in North China[J]. *Chinese Journal of Plant Ecology*, 2019, **43**(9): 793-805.

[36] 王 清, 廖学圆, 刘守江, 等. 峨眉山种子植物的垂直分布研究[J]. 安徽林业科技, 2018, **44**(3): 7-12.

WANG Q, LIAO X Y, LIU S J, *et al.* Study on the altitudinal distribution of seed plants in Mount Emei[J]. *Anhui Forestry Science and Technology*, 2018, **44**(3): 7-12.

[37] 曾 敏, 马永红, 沈文涛, 等. 卧龙国家级自然保护区种子植物区系垂直分布格局[J]. 西华师范大学学报(自然科学版), 2021, **42**(2): 110-115.

ZENG M, MA Y H, SHEN W T, *et al.* Vertical distribution pattern of seed plants florain Wolong National Nature Reserve[J]. *Journal of China West Normal University*

- (Natural Sciences), 2021, **42**(2): 110-115.
- [38] 布买丽娅木·吐如汗, 刘 彬, 艾克拜尔·依米提. 库车种子植物区系垂直分布格局分析[J]. 广西植物, 2017, **37**(4): 453-460.
- TURGAN B, LIU B, YIMIT A. Analysis on vertical distribution pattern of flora of seed plants in Kuche[J]. *Guihaia*, 2017, **37**(4): 453-460.
- [39] 冯建孟, 王襄平, 李 晶, 等. 面积和中间膨胀效应对丽江地区种子植物物种丰富度垂直分布格局的影响[J]. 生物多样性, 2006, **14**(2): 107-113.
- FENG J M, WANG X P, LI J, *et al.* Effects of area and mid-domain effect on altitudinal pattern of seed plants richness in Lijiang, Yunnan, China[J]. *Biodiversity Science*, 2006, **14**(2): 107-113.
- [40] ROBERT K, COLWELL. The mid-domain effect: Geometric constraints on the geography of species richness [J]. *Trends in Ecology & Evolution*, 2000, **15**(2): 70-76.
- [41] 陈思艺, 艾训儒, 姚 兰, 等. 星斗山花板溪流域森林群落物种组成及多样性垂直分异[J]. 湖北民族学院学报(自然科学版), 2018, **36**(1): 6-11.
- CHEN S Y, AI X R, YAO L, *et al.* Vertical differentiation of species composition and biodiversity in the forest community of Huaban Basin in Xingdou Mountain[J]. *Journal of Hubei University for Nationalities* (Natural Science Edition), 2018, **36**(1): 6-11.
- [42] 王 褚, 王世伟, 潘存德, 等. 天山北坡中部天山云杉林植物多样性沿海拔变化特征[J]. 新疆农业大学学报, 2021, **44**(3): 172-178.
- WANG C, WANG S W, PAN C D, *et al.* Variation characteristics of plant diversity along altitude in *Picea schrenkiana* forest in the central part of the northern slope of Tianshan Mountains[J]. *Journal of Xinjiang Agricultural University*, 2021, **44**(3): 172-178.
- [43] 王志恒, 陈安平, 朴世龙, 等. 高黎贡山种子植物物种丰富度沿海拔梯度的变化[J]. 生物多样性, 2004, **12**(1): 82-88.
- WANG Z H, CHEN A P, PIAO S L, *et al.* Pattern of species richness along an altitudinal gradient on Gaoligong Mountains, Southwest China [J]. *Chinese Biodiversity*, 2004, **12**(1): 82-88.
- [44] BHATTARAI K R, VETAAS O R. Variation in plant species richness of different life forms along a subtropical elevation gradient in the Himalayas, east Nepal[J]. *Global Ecology and Biogeography*, 2003, **12**(4): 327-340.
- [45] 刘 彬, 布买丽娅木·吐如汗, 艾比拜姆·克热木, 等. 新疆天山南坡中段种子植物区系垂直分布格局分析[J]. 植物科学学报, 2018, **36**(2): 191-202.
- LIU B, TURGAN B, KEREMU A, *et al.* Vertical distribution patterns of the seed plant flora in the middle section on the southern slopes of the Tianshan Mountains in Xinjiang, China[J]. *Plant Science Journal*, 2018, **36**(2): 191-202.
- [46] 曹晓栋, 杨 波, 黄 梅, 等. 贵州省宽阔水国家级自然保护区草本植物区系及物种多样性研究[J]. 西北植物学报, 2021, **41**(9): 1 559-1 569.
- CAO X D, YANG B, HUANG M, *et al.* Flora and species diversity of herbaceous plants in Kuankuoshui National Nature Reserve of Guizhou[J]. *Acta Botanica Boreali-Occidentalia Sinica*, 2021, **41**(9): 1 559-1 569.
- [47] 冯建孟, 徐成东. 云南药山自然保护区种子植物区系的垂直分布格局[J]. 武汉植物学研究, 2008, **26**(3): 271-275.
- FENG J M, XU C D. Altitudinal patterns of seed plants floristic composition in Mountain Yao Nature Reserve, Yunnan Province, China[J]. *Journal of Wuhan Botanical Research*, 2008, **26**(3): 271-275.
- [48] 王俊伟, 明升平, 杨 坤, 等. 藏南布丹拉山南坡种子植物区系海拔格局分析[J]. 广西植物, 2022, **42**(3): 384-393.
- WANG J W, MING S P, YANG K, *et al.* Analysis of elevation pattern of seed flora on the south slope of Budanla Mountain in southern Tibet, China[J]. *Guihaia*, 2022, **42**(3): 384-393.
- [49] VAMOSI S M, HEARD S B, VAMOSI J C, *et al.* Emerging patterns in the comparative analysis of phylogenetic community structure[J]. *Molecular Ecology*, 2009, **18**(4): 572-592.
- [50] 牛红玉, 王峥嵘, 练璐瑜, 等. 群落构建研究的新进展: 进化和生态相结合的群落谱系结构研究[J]. 生物多样性, 2011, **19**(3): 275-283.
- NIU H Y, WANG Z F, LIAN J Y, *et al.* New progress in community assembly: Community phylogenetic structure combining evolution and ecology[J]. *Biodiversity Science*, 2011, **19**(3): 275-283.
- [51] 何艳华, 闫 明, 张钦弟, 等. 五鹿山国家级自然保护区物种多样性海拔格局[J]. 生态学报, 2013, **33**(8): 2 452-2 462.
- HE Y H, YAN M, ZHANG Q D, *et al.* Altitudinal pattern of plant species diversity in the Wulu Mountain Nature Reserve, Shanxi, China[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2013, **33**(8): 2 452-2 462.
- [52] LAI J S, MI X C, REN H B, *et al.* Species-habitat associations change in a subtropical forest of China[J]. *Journal of Vegetation Science*, 2009, **20**(3): 415-423.
- [53] KEMBEL S W, HUBBELL S P. The phylogenetic structure of a neotropical forest tree community[J]. *Ecology*, 2006, **87**: 86-99.
- [54] 刘 巍, 曹 伟. 长白山植物群落谱系结构及环境因子对其的影响[J]. 干旱区资源与环境, 2013, **27**(5): 63-68.
- LIU W, CAO W. Phylogenetic structure and influence of environmental factors on phylogenetic structure of plant community in Changbai Mountains[J]. *Journal of Arid Land Resources and Environment*, 2013, **27**(5): 63-68.