

青海野生种子植物种的垂直分布

吴玉虎^{1,2} 冷振宁^{1,3} 李聪佳² 张泽林³ 庞哲^{1*}

(1. 中国科学院西北高原生物研究所, 西宁 810008; 2. 中国科学院大学资源与环境学院, 北京 100049; 3. 中国科学院大学生命科学学院, 北京 100049)

摘要 青海省地质、地貌的形成和自然生态系统的演化历史与整个青藏高原一脉相承。为了揭示青海省野生种子植物在垂直梯度上的分布规律, 并为探索其对垂直生态地理环境的适应机制提供基础数据, 该研究结合文献与馆藏标本数据, 对青海省 3 558 种植物的海拔分布模式进行了系统分析。结果表明: (1) 青海植物在沿海拔梯度的垂直维度上并非随机分布, 而是可以被划分为一定的“层”和“级”的序列。依据植物种出现的起始海拔和上限分布海拔及其延伸的垂直高度范围, 该研究首次建立了植物“层”“级”垂直分布系统。(2) 在横向以海拔下限 2 000 m 为基准的“层”序列与纵向以海拔上限 4 000 m 为基准的“级”序列交叉形成的十字型层级序列内, 青海植物垂直分布数量最多, 种类也最为集中。(3) 垂直分布范围宽的植物通常属于植物区系地理上的广布型种类; 垂直分布范围狭窄的植物, 则多为植物区系地理上的狭域分布种类。(4) 海拔 2 000~4 000 m 的垂直高度带是青海各种灌木最适宜、分布最为集中的逐级分布范围, 也是灌木类种群最为繁盛的栖息地带。(5) 从起始海拔 2 000 m 至 3 500 m 的 4 个层序列(B、C、D、E), 各自垂直向上延伸至海拔上限 5 000 m 的垂直地带范围(含 18 个层级单元), 是青海植物垂直分布最集中的区域, 即核心分布地带。(6) 属内阶梯型种间垂直替代分布现象显著, 是青海植物普遍且基本的生存策略之一。该研究不仅对全面认识高原植物的海拔分布特征和规律具有重要的参考价值, 同时对未来开展生物多样性保护、生物资源开发与利用、物种进化与适应研究具有指导意义。

关键词 青海省; 野生种子植物种; 垂直分布; 种间垂直替代

中图分类号: Q948 文献标志码: A doi: 10. 7525/j. issn. 1673-5102. 2025. 06. 004

Vertical Distribution of Wild Seed Plant Species from Qinghai, China

WU Yuhu^{1,2} LENG Zhenning^{1,3} LI Congjia² ZHANG Zelin³ PANG Zhe^{1*}

(1. Northwest Institute of Plateau Biology, Chinese Academy of Sciences, Xining 810008; 2. College of Resources and Environment, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049; 3. College of Life Sciences, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049)

Abstract The formation of Qinghai Province's geology and geomorphology and the evolution history of natural ecosystem are consistent with those of the whole Qinghai-Xizang Plateau. In order to reveal the distribution patterns of wild seed plants along vertical gradients in Qinghai Province and to provide fundamental data for exploring their adaptive mechanisms to vertical ecological and geographical environments, this study systematically analyzed the elevational distribution patterns of 3 558 plant species in Qinghai Province by integrating literature and herbarium specimen data. The analysis showed that: (1) Plants in Qinghai Province were not randomly distributed in the vertical dimension along the elevational gradient, but can be divided into certain “layer” and “grade” sequences. This was the Layer-Grade system of vertical distribution among plant species established in this paper for the first time. This division was based on the starting elevation of their respective occurrence and upper elevation and the range of vertical heights they extend. (2) Within the scope

基金项目: 青海省重大科技专项(2023-SF-A5); 国家重点研发计划项目(2024YFF0808702); 中国科学院-马普学会双边合作项目(HZXM20225001MI)。

第一作者简介: 吴玉虎(1951—), 男, 研究员, 主要从事植物系统分类和植物区系地理研究。

* 通信作者: E-mail: pangzhe@nwipb.cas.cn。

收稿日期: 2025年5月8日。

that by the layers 2 000 m and the grade 4 000 m intersect formation formed intersection sequence, it was the elevation range where plant species were most vertically distributed and most concentrated in Qinghai. (3) All plants with wide vertical height ranges were geographically widespread species; plants with narrow vertical height ranges usually had a narrow geographic distribution as well. (4) The vertical elevation zone of 2 000–4 000 m was the most suitable and most concentrated distribution range and the most prosperous habitat of all kinds of shrubs in Qinghai Province. (5) The range covered four layers (B, C, D, E) starting from an initial elevation of 2 000 m and extending to 3 500 m. Each of these layers extended vertically to an upper elevation of 5 000 m, encompassing 18 multi-grade units. This range represented the most concentrated vertical distribution of plants in Qinghai and can be described as the core zone. (6) Within the same genus, the obvious stepped vertical substitution distribution was one of common and basic survival strategies among plant species in Qinghai. This study had strong theoretical and practical significance and great reference significance for a comprehensive understanding of the elevation distribution characteristics and laws of plants on the plateau surface, and had good guiding value for biodiversity conservation, biological resources development and utilization, species evolution and adaptation in the future.

Key words Qinghai Province; wild seed plant species; vertical distribution; vertical substitution between species

植物区系地理研究是地理学与植物学交叉研究的重要领域,其中,植物垂直分布规律研究是该领域的重要研究方向之一。青海省地处我国西部腹地,位于青藏高原的东北部。在植物区系分区上,青海属于青藏高原植物亚区中的唐古特地区,并处于中亚东部荒漠地区与华北地区^[1]的交会过渡地带,因此,在区系界线划分中具有重要地位。高原高山的生态地理环境是青海植物生存的基础环境,且该区域植物具有明显的高原高山垂直分布特点。在研究青海植物区系水平分布格局(分布区类型)的同时,揭示植物在垂直方向上的分布规律,是青海植物地理研究的重要内容,尤其是在探讨植物种间替代现象、解析不同垂直带间植物生理生化过程和适应机理的差异及其成因等方面,开展相关研究更为迫切与重要。然而,截至目前,上述方向的研究报道仍较为匮乏。

地理学、气象学等领域长期观测与研究实践表明,在地球表面,海拔每升高 100 m,气温下降约 0.6 °C。这种规律性气温变化显著增加了植物向高海拔和更高海拔地区分布的难度,要求植物进化出相比在平原生境更强的抗逆能力。高原高山地带的植物通常已演化出适配极端环境的抗逆性或适应能力,且该能力的强弱与植物分布海拔存在关联。植物分布的海拔越高,抗逆能力也应越强。高山植物不仅需要适应生长季夜间可能出现的-10 °C的低温环境,确保繁殖器官在可能结冰的情况下不被冻伤,并且要在白天升温后迅速恢复生理活动^[2];同时,它们还必须仅在约 4 个月的生长季内完成一个生活周期,并耐受极端低温(如玛

多县气象站记录的-48.1 °C)以安全越冬。除低温和生长季短暂外,高海拔地区还存在风强、气压低、空气透明度高、辐射冷却作用强烈、降水量少、蒸发量高、昼夜温差大及气温垂直变化剧烈^[2]等高原高山特有的极端生态因子,这些复合环境压力共同驱动植物形成适应性进化策略,并呈现出相应的进化结果。

若将“种的形成、演化、传播及传播方向和途径”视为植物区系研究的核心议题^[3],那么,基于海拔梯度的植物垂直分布研究,则构成了高原高山植物生态地理研究的重要发展方向。该研究方向可以揭示植物在高原高山环境中分布的起始海拔、最适海拔和高限海拔,明确植物在垂直方向上的分布幅度,解析不同植物类群适配的生态地理环境和类群替代规律,还可进一步阐明高原高山特化类群的形成起因、内在演化机制和外在表现形式,从而为人类认识自然规律、开展生物多样性保护和生态环境治理提供理论支撑。

为了解青海高原植物种的垂直分布现状、特点及规律(或称垂直自然分布式样),在笔者数十年从事青海植物区系地理研究的基础上^[4-9],本研究以青藏高原生物标本馆馆藏的 38 万余份植物标本标注的海拔范围为依据,并参考相关文献,首次对青海野生种子植物种进行了垂直分布梯度上“层”“级”的划分,并结合植物生活型,对各“层”“级”分布种类的生态属性、生态功能及其分布规律等开展系统分析与探讨。研究旨在从青海植物垂直分布格局的角度,补充完善青海乃至整个青藏高原植物亚区的区系研究资料,尝试构建“青藏

高原植物垂直分布层级划分系统”,为植物区系地理学提供新的研究方向,为后续植物垂直分布研究提供新的划分方法和分析思路,也为生物多样性保护、区域经济和生态环境可持续发展等提供青海植物区系的本底资料。

1 研究背景

青海省地质、地貌的形成历史和自然生态系统的演化历程与青藏高原整体具有高度连续性与一致性。该区域气候属于典型的高原大陆性气候,具有空气透明度高、辐射冷却作用强烈、降水量少、蒸发量高、气温垂直变化剧烈等特征。低海拔的东部和东北部的祁连山地气候温凉,而高海拔的南部山地和高原面则气候寒冷。据现有资料统计,青海共有野生种子植物 97 科、595 属、3 558 种^[9]。

生物种对每一个能够影响其生命过程的生态因子的耐受范围,称为生态幅^[10-11]。在研究植物自然分布格局时,以往研究多聚焦于植物在水平方向上的分布区类型及其性质、特点和生态意义,而在高原高山地带,因存在植物“垂直地带性分布”现象,还需进一步研究植物在垂直方向上的地带性分布格局及规律。在以垂直地带性为框架研究植物的生态幅时,除需考虑与海拔梯度关联的气压、空气透明度、强烈日照和紫外线辐射、强风、昼夜温差,以及极端低温(如玛多黄河沿水文站冬季记录的 $-51.3\text{ }^{\circ}\text{C}$)等系列生态因子的协同作用外,水热条件仍是影响植物垂直分布的首要因素。植物自身的水热适应属性直接决定了其在垂直方向上的分布海拔及垂直分布幅度。自然界中各相关生态因子的特性和指标,不仅塑造了不同水平地带性植被及其组成种类的生态属性和生物学特性,也通过“限制性选择”决定了以海拔划分的垂直分布“层”与“级”的基本性质。相应地,生物物种则通过“适应性选择”扩展其在水平和垂直维度上的时空分布范围。因此,本研究在以水热条件为核心的生态幅理论基础上,引入“垂直生态幅”概念,以系统描述和比较高原山地不同海拔“层”“级”的生态地理环境及其分布的植物类群。通常情况下,植物的生物学特性决定其生态幅,也界定其在垂直方向上所能达到的海拔范围,即“垂直生态幅”。如果不同海拔区间生态因子的特性指标限制并决定了植物的生态性质(即生物学特性适

应)和生态幅,则反之,植物的生态性质亦会界定其适宜分布的生态地理范围。同时,以海拔划分的垂直分布“层”“级”体系,应能反映其间分布植物的生态性质和垂直生态幅,应存在可辨识的规律性联系。

2 材料与方法

为了了解植物在垂直方向上的分布情况及规律,并为后续探索植物对垂直生态地理环境的适应机理及形成过程等积累基础资料,本研究结合相关文献和青藏高原生物标本馆藏标本的海拔标注信息,对已整理统计的青海野生种子植物的海拔数据开展了“层”“级”划分及结合植物生活型的统计分析。根据每个种在青海分布的最低海拔与最高海拔(范围为 1 650~6 000 m),本研究以 500 m 为一“层”和一“级”的梯度单元,将垂直分布范围划分为 A~I 的横向、纵向各 9 个梯度层级(表 1)。在此 9 横 9 纵的梯度表中,青海植物区系现知的 3 558 个(包括种下类群,下同)野生种子植物种^[12-14],被严格按照自然分布的海拔上、下限,划分为 45 个梯度层级。除最高海拔梯度 5 500~6 000 m 出现 4 个缺失层级外,其余 41 个层级已涵盖青海所有野生种子植物种。笔者认为,基于上述方法建立的野生植物垂直分布海拔梯度层级系统,不仅适用于青海野生植物,也可能适用于野生动物;其适用范围不仅限于青海,还可能拓展至整个青藏高原及以其为代表的其他高原高山区。

根据笔者的设定,植物垂直分布梯度表的“层”序列表征植物垂直分布的海拔范围,即垂直生态幅,表示植物分布在垂直方向上可延伸的高度范围。如表 1 中 A 层和 B 层植物的垂直延伸幅度分别可达 4 000 m 和 3 500 m,且能在这一范围内沿“层级”自然连续分布,独立于(不包含)其他层级。这意味着植物在多样的生态地理环境中具有更多适宜生境的选择机会,有利于种群的繁衍和扩张。相比之下,F 层和 G 层植物的垂直分布范围分别被限制在 2 000 m 和 1 500 m 以内,而 H 层植物的垂直分布范围仅限于 500 m。可供选择的垂直分布空间范围显著缩小,不利于种群的繁衍和扩张。加之,受恶劣甚至极端恶劣生态环境的限制,能够适应的植物种类及种群数量均较少,难以组建并形成植被群落,亦无法展现相应的景观效应和生态效应。梯度表中的“级”序列则表征植

表1 青海野生种子植物种垂直分布层级梯度统计表

Table 1 Layer and hierarchical gradient statistical table of vertical distribution of wild seed plant species from Qinghai

| 层级 Layer and grade | A级 A grade (2 000 m) | B级 B grade (2 500 m) | C级 C grade (3 000 m) | D级 D grade (3 500 m) | E级 E grade (4 000 m) | F级 F grade (4 500 m) | G级 G grade (5 000 m) | H级 H grade (5 500 m) | I级 I grade (6 000 m) | 植物种数合计 Total number of plant species |
|--|----------------------------|-------------------------------------|-------------------------------------|-------------------------------------|---|-------------------------------------|------------------------------------|-----------------------------------|-----------------------------------|--|
| H层 H layer | | | | | | | | 5 000~5 500 HH 2 | <i>5 000~6 000</i> <i>HI 0</i> | 2 |
| G层 G layer | | | | | | | 4 500~5 000 GG 49 | 4 500~5 500 GH 5 | 4 500~6 000 GI 1 | 55 |
| F层 F layer | | | | | | 4 000~4 500 FF 84 | 4 000~5 000 FG 85 | 4 000~5 500 FH 37 | 4 000~6 000 FI 4 | 210 |
| E层 E layer | | | | | 3 500~4 000 EE 150 | 3 500~4 500 EF 177 | 3 500~5 000 EG 108 | 3 500~5 500 EH 39 | 3 500~6 000 EI 4 | 478 |
| D层 D layer | | | | 3 000~3 500 DD 115 | 3 000~4 000 DE 187 | 3 000~4 500 DF 150 | 3 000~5 000 DG 133 | 3 000~5 500 DH 37 | 3 000~6 000 DI 2 | 624 |
| C层 C layer | | | 2 500~3 000 CC 166 | 2 500~3 500 CD 139 | 2 500~4 000 CE 157 | 2 500~4 500 CF 176 | 2 500~5 000 CG 119 | 2 500~5 500 CH 28 | 2 500~6 000 CI 4 | 789 |
| B层 B layer | | 2 000~2 500 BB 147 | 2 000~3 000 BC 194 | 2 000~3 500 BD 162 | 2 000~4 000 BE 230 | 2 000~4 500 BF 169 | 2 000~5 000 BG 69 | 2 000~5 500 BH 7 | 2 000~6 000 BI 0 | 978 |
| A层 A layer | 1 650~2 000 AA 29 | 1 650~2 500 AB 68 | 1 650~3 000 AC 115 | 1 650~3 500 AD 57 | 1 650~4 000 AE 97 | 1 650~4 500 AF 42 | 1 650~5 000 AG 13 | 1 650~5 500 AH 1 | <i>1 650~6 000</i> <i>AI 0</i> | 422 |
| 植物种数合计 Total number of plant species | 29 | 215 | 475 | 473 | 821 | 798 | 576 | 156 | 15 | 3 558 |

注:字体加粗表示青海植物集中分布的海拔范围;斜体表示青海植物缺失的层级。

Note: Bold indicated the elevational range where plants in Qinghai were densely distributed; italics indicated the elevational levels where Qinghai plants were absent.

物分布可抵达的绝对海拔,即无论植物生态习性差异、初始分布的生态地理环境优劣或垂直海拔高低,其最终均能延伸分布至海拔 5 500 m(表 1 中的 A、B、H 级)至 6 000 m(C、D、E、F、G 级)的高度,并因此具有相同或相似的能够适应海拔 5 500 或 6 000 m 地带极端生态地理环境的生物学特性及相应的抗逆能力。

梯度表中,横向梯度的每一“层”强调植物具有相同的起始海拔(分布下限),展现同层植物在从低到高的各级海拔的分布种类及其各自适应的垂直高度范围,即垂直生态幅。由此可明确,起始海拔越低的“层”,其关联的垂直海拔(表 1 中向右延伸)的“级”数越多;反之则越少。同时,可清晰识别各“级”内植物的适宜垂直分布空间范围,以及多数植物种的集中分布海拔范围。纵向梯度的每一“列”则强调植物所能达到的相同海拔上限,展现同一上限海拔下不同起始海拔的植物种类及

其“垂直生态幅”。同样可见,海拔上限越高,植物分布所关联的海拔上限的“层”数越多,反之亦反。在每个梯度层级(单元格)下方以大写字母标注,前一字母代表该梯度的“层”,后一字母代表“级”。需说明的是,本研究将青海植物的 556 个种下类型均按“种”级单元纳入分析。这一处理基于以下考量:植物的种下类群在分类系统中已被广泛接受为独立分类单元,并因其形态差异而具备与正种同等的独立地位,因此,在生态地理分布研究中也应视为具有独立生态选择与代表性的基本单元。

3 垂直分布的层级特征

为了全面了解青海植物的垂直分布情况,本研究对青海植物在垂直分布层级系统中所含种类进行了逐层、逐级的统计分析,并指出 20 个标志性极限分布所在的层级(表 2)。

表2 青海野生种子植物种垂直分布层级梯度系统

Table 2 Layer and hierarchical gradient system of vertical distribution of wild seed plant species from Qinghai

| 垂直层级序列及所含种数 Vertical hierarchical sequence and the number of species contained | 层级所在海拔范围 Elevation range of the layer and grade/m | 乔木 Tree | | 灌木 Shrub | | 草本 Herbaceous plant | | 备注 Remarks |
|---|---|-----------------------------|---|-----------------------------|---|-----------------------------|---|---------------------------|
| | | 物种数 Number of species | 占本层级比例 Percentage of this level/% | 物种数 Number of species | 占本层级比例 Percentage of this level/% | 物种数 Number of species | 占本层级比例 Percentage of this level/% | |
| A层 422 | 1 650-6 000 | 31 | 7.35 | 55 | 13.03 | 336 | 79.62 | 层乔木数量和比例之最 |
| AA 29 | 1 650-2 000 | 6 | 20.69 | 6 | 20.69 | 17 | 58.62 | 层级乔木比例之最;级灌木比例之最;层级垂直延伸最窄 |
| AB 68 | 1 650-2 500 | 9 | 13.24 | 12 | 17.65 | 47 | 69.12 | |
| AC 115 | 1 650-3 000 | 10 | 8.70 | 10 | 8.70 | 95 | 82.61 | |
| AD 57 | 1 650-3 500 | 1 | 1.75 | 10 | 17.54 | 46 | 80.70 | |
| AE 97 | 1 650-4 000 | 3 | 3.09 | 13 | 13.40 | 81 | 83.51 | |
| AF 42 | 1 650-4 500 | 2 | 4.76 | 4 | 9.52 | 36 | 85.71 | |
| AG 13 | 1 650-5 000 | 0 | 0 | 0 | 0 | 13 | 100 | |
| AH 1 | 1 650-5 500 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 100 | 青海垂直生态幅最宽 |
| AI 0 | 1 650-6 000 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | |
| B层 978 | 2 000-6 000 | 22 | 2.25 | 136 | 13.91 | 820 | 83.84 | 层种数之最;层灌木数和比例之最 |
| BB 147 | 2 000-2 500 | 3 | 2.04 | 20 | 13.61 | 124 | 84.35 | |
| BC 194 | 2 000-3 000 | 9 | 4.64 | 38 | 19.59 | 147 | 75.77 | |
| BD 162 | 2 000-3 500 | 2 | 1.23 | 15 | 9.26 | 145 | 89.51 | |
| BE 230 | 2 000-4 000 | 6 | 2.61 | 45 | 19.57 | 179 | 77.83 | 层级种数之最;级灌木数之最 |
| BF 169 | 2 000-4 500 | 2 | 1.18 | 12 | 7.10 | 155 | 91.72 | |
| BG 69 | 2 000-5 000 | 0 | 0 | 6 | 8.70 | 63 | 91.30 | |
| BH 7 | 2 000-5 500 | 0 | 0 | 0 | 0 | 7 | 100 | |
| BI 0 | 2 000-6 000 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | |
| C层 789 | 2 500-6 000 | 21 | 2.66 | 92 | 11.66 | 676 | 85.68 | 层灌木分布次多 |
| CC 166 | 2 500-3 000 | 13 | 7.83 | 31 | 18.67 | 122 | 73.49 | 级乔木数之最 |
| CD 139 | 2 500-3 500 | 1 | 0.72 | 21 | 15.11 | 117 | 84.17 | |
| CE 157 | 2 500-4 000 | 3 | 1.91 | 23 | 14.65 | 131 | 83.44 | |
| CF 176 | 2 500-4 500 | 4 | 2.27 | 12 | 6.82 | 160 | 90.91 | |
| CG 119 | 2 500-5 000 | 0 | 0 | 5 | 4.20 | 114 | 95.80 | |
| CH 28 | 2 500-5 500 | 0 | 0 | 0 | 0 | 28 | 100 | |
| CI 4 | 2 500-6 000 | 0 | 0 | 0 | 0 | 4 | 100 | |
| D层 624 | 3 000-6 000 | 7 | 1.12 | 46 | 7.37 | 571 | 91.51 | |
| DD 115 | 3 000-3 500 | 0 | 0 | 9 | 7.83 | 106 | 92.17 | |
| DE 187 | 3 000-4 000 | 7 | 3.74 | 22 | 11.76 | 158 | 84.49 | 冷杉集中起始出现 |
| DF 150 | 3 000-4 500 | 0 | 0 | 9 | 6.00 | 141 | 94.00 | |
| DG 133 | 3 000-5 000 | 0 | 0 | 5 | 3.76 | 128 | 96.24 | |
| DH 37 | 3 000-5 500 | 0 | 0 | 1 | 2.70 | 36 | 97.30 | |
| DI 2 | 3 000-6 000 | 0 | 0 | 0 | 0 | 2 | 100 | |

续表

| 垂直层级序列及所含种数 Vertical hierarchical sequence and the number of species contained | 层级所在海拔范围 Elevation range of the layer and grade/m | 乔木 Tree | | 灌木 Shrub | | 草本 Herbaceous plant | | 备注 Remarks |
|---|---|-----------------------------|---|-----------------------------|---|-----------------------------|---|---------------------|
| | | 物种数 Number of species | 占本层级比例 Percentage of this level/% | 物种数 Number of species | 占本层级比例 Percentage of this level/% | 物种数 Number of species | 占本层级比例 Percentage of this level/% | |
| | | E层 478 | 3 500~6 000 | 2 | 0.42 | 35 | 7.32 | |
| EE 150 | 3 500~4 000 | 1 | 0.67 | 21 | 14.00 | 128 | 85.33 | 落叶阔叶乔木分布海拔最高限 |
| EF 177 | 3 500~4 500 | 0 | 0 | 8 | 4.52 | 169 | 95.48 | |
| EG 108 | 3 500~5 000 | 1 | 0.93 | 4 | 3.70 | 103 | 95.37 | 乔木和常绿针叶乔木出现和分布海拔最高限 |
| EH 39 | 3 500~5 500 | 0 | 0 | 2 | 5.13 | 37 | 94.87 | |
| EI 4 | 3 500~6 000 | 0 | 0 | 0 | 0 | 4 | 100 | |
| F层 210 | 4 000~6 000 | 0 | 0 | 6 | 2.86 | 204 | 97.14 | |
| FF 84 | 4 000~4 500 | 0 | 0 | 4 | 4.76 | 80 | 95.24 | |
| FG 85 | 4 000~5 000 | 0 | 0 | 2 | 2.35 | 83 | 97.65 | 灌木分布海拔最高限 |
| FH 37 | 4 000~5 500 | 0 | 0 | 0 | 0 | 37 | 100 | |
| FI 4 | 4 000~6 000 | 0 | 0 | 0 | 0 | 4 | 100 | |
| G层 55 | 4 500~6 000 | 0 | 0 | 0 | 0 | 55 | 100 | |
| GG 49 | 4 500~5 000 | 0 | 0 | 0 | 0 | 49 | 100 | |
| GH 5 | 4 500~5 500 | 0 | 0 | 0 | 0 | 5 | 100 | |
| GI 1 | 4 500~6 000 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 100 | |
| H层 2 | 5 000~6 000 | 0 | 0 | 0 | 0 | 2 | 100 | |
| HH 2 | 5 000~5 500 | 0 | 0 | 0 | 0 | 2 | 100 | 青海植物分布海拔最高限 |
| HI 0 | 5 000~6 000 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | |
| I层 0 | 5 500~6 000 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | |
| II 0 | 5 500~6 000 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | |
| 合计(3 558种) | | 83 | 2.33 | 370 | 10.40 | 3 105 | 87.27 | 标志性极限分布20个 |

3.1 A层特征描述

A层为序列中“级”数最完整的序列,涵盖9个“级”,是青海植物“级”数最多的序列,也是覆盖青海植物垂直分布高度范围最广的类群。该层包含8个有效层级,共分布植物422种,占青海省3 558种植物总数的11.86%,表明该层各级所含种类普遍较少。A层是乔木和小乔木种类分布最多的层,共31种,占该层总种数的7.35%,反映出乔木类群在温性低海拔地区优势的生活型特点,印证了其在青海植物区系中的重要地位。

在A层居于最低级序列(1 650~2 000 m)的AA级分布有植物29种,占该层总种数的6.87%。其中,乔木和小乔木虽只有6种,但占比高达本层级总种数的20.69%(表2),为青海植物垂直分布

层级序列中乔木占比最高的海拔区间,再次印证了乔木类群在温性低海拔地区具有高比例优势的生活型特点,以及在青海植物区系中作为关键层级类型成分的重要地位。该层级代表性物种如茶条槭(*Acer ginnala*, 颜素珠 824)和青檀(*Pteroceltis tatarinowii*, 郭本兆 084)等,多是边缘分布的狭域垂直生态幅种类。同时,此海拔区间也可能是这些物种分布海拔上限区域,且是其在中国分布区的最西界。

分布种类最多的是海拔1 650~3 000 m的AC级共记录有115种,占该层总种数的27.25%。其中,乔木或小乔木类有10种,占本层级总种数的8.70%。分析表明,该层级多数种类在水平与垂直2个维度均表现出广域适应性和广泛分布特征,可

见垂直分布海拔范围较宽的植物通常也是广泛分布的种类,反之亦反。海拔1 650~5 500 m的AH级只有腺异蕊芥(*Dontostemon glandulosus*, 吴玉虎1631)1种可以纵跨垂直高度近4 000 m的8个级别,展现出广泛适应能力,可视为青海现知垂直生态幅最宽的植物。在连续极端生态因子胁迫下植物展现的全方位适应与生态适应韧性,在植物垂直分布相关研究中具有重要价值。通观本层序列,多数植物具有广泛适应能力,并且在辽阔的水平地带与宽幅垂直海拔范围内都与周围植物区系存在广泛联系。该层几乎包含了青海温性森林乔木类群的特征种、建群种、优势种和共建伴生种类群,成为乔木物种数量和比例最高的“层”,亦属于青海植物中垂直分布范围最广的类群,可定义为垂直宽生态幅种类。

3.2 B层特征描述

B层起始海拔梯度(2 000~2 500 m)的BB层级有147种,其中,乔木或小乔木3种,占该层级的2.04%。该层级中多数种类为狭域分布类型,或在水平/垂直方向上具有边缘分布特征。

在海拔2 000~3 000 m的BC层级中分布有194种,占青海省植物总种数的5.45%和本层植物总种数19.84%,居于青海植物种分布各层级中的第2位,该层级内乔木、灌木、草本植物群落繁茂且共存。其中,乔木和小乔木共9种,占本层级总种数的4.64%。重要种类包括华山松(*Pinus armandii*, 吴玉虎28346),其在我国呈西北部边缘分布且在青海的分布海拔上限为2 600 m;油松(*Pinus tabulaeformis*, 吴玉虎2777),以贵德县东山林区3 000 m左右海拔为其在我国分布的最西界和海拔上限。这些类群都对研究黄土高原与青藏高原过渡带的植物区系地理具有重要意义。此外,青海怪柳(*Tamarix austromongolica* subsp. *qinghaiensis*, 吴玉虎28010)林是目前在中国乃至全球范围内已知唯一的野生怪柳乔木林。该青海特有地理亚种,在树高、胸径、树龄和分布海拔方面均创世界纪录,其以兼具乔木与小乔木生活型的小面积纯林形式存在,表明在海拔2 000~3 000 m这一垂直带范围内,存在具有重要生态地理学意义的乔木怪柳就地形成机制,值得深入研究。

海拔2 000~3 500 m的BD层级有162种,占本层级总种数的16.56%。除林缘和灌丛成分外,该层级包含较多荒漠旱生植物类群,反映出该层级

生态地理环境的多样性,既有旱生和超旱生种类,又有中生和湿中生类群。这一结果也揭示了同处该海拔范围的祁连山地和柴达木盆地在物种生态属性上的差异。

前文已述及的BE层级种类最为丰富,其中,在青海表现为乔木和小乔木生活型的物种共6种,占本层级总种数的2.61%,主要有青海云杉(*Picea crassifolia*, 吴玉虎3247)、白桦(*Betula platyphylla*, 吴玉虎2454)等。灌木有45种,是青海植物垂直分布中灌木种类数量最多的层级。

综合分析表明,B层灌木种类极为丰富,有136种,是青海植物所有垂直分布层中多样性最丰富的层。该海拔范围几乎涵盖了青海所有温性、寒温性乃至高寒性质的灌丛成分。因此,本研究认为,这一层序列可视为青海灌木分布的垂直核心层,或称作核心垂直高度带。此外,C层和A层系列也表现出相同或相似的灌木种类分布特征。

海拔2 000~5 000 m的BG层级共分布植物69种,占本层总种数的7.06%。该层无乔木分布,灌木有6种。本层级植物的特点是,几乎所有种类,除具较宽的垂直分布范围外,在青海广泛分布,但相较于同层其他5“级”的植物分布数量显著偏少,反映出随着海拔升高,生态地理环境异质性对物种分布的限制作用加剧。这一类型垂直向上跨越6个海拔级,生态地理环境从宜农耕地延伸至高山流石坡,植物类群由温性中生类型过渡为温凉性、寒温性,最终至高寒旱生类型。由此可见,该层级植物具有极强的生态适应能力与抗逆能力,这对研究层级建设和垂直带谱的种类组成,以及垂直宽生态幅植物的生存适应机制等都具有十分重要的意义。

位于B层植物分布最顶端的2 000~5 500 m的BH层级为连续跨越7个层级的垂直广域生态幅类型,也是B层中最宽、在青海次宽的垂直生态幅成分。这一层级不仅无乔木分布,灌木亦无法适应,仅有鸦跖花(*Oxygraphis glacialis*, 吴玉虎1063)、短穗兔耳草(*Lagotis brachystachya*, 吴玉虎478)等7种草本植物。这些物种不仅具有B层垂直地带范围内近乎全域的生存适应能力,同时还具备先锋植物的拓殖能力。本层序列所分布的植物种类具有明显的生态代表性,几乎包含了青海植物中从温性灌丛到高寒灌丛的大多数类群的特征种、建群种、优势种、伴生种、共建种及单优势种。

3.3 C层特征描述

以2 500 m为起始海拔的C层序列,全层分为7个垂直高度等级,共包含789种植物,占青海植物总种数的22.18%,物种数量居青海9个层序列的第2位。本层起始于青海水热条件较优的东部沟谷山地,以及接近荒漠旱生环境的柴达木盆地底部范围(2 675 m),分别向上级衔接至不同垂直高度层级及相应的植被带谱,延伸至青南高原植物的最高分布范围。值得注意的是,本层分布有92种灌木,是青海所有“层”序列中第2丰富的一层,占到本层植物总种数的11.66%。这一结果是由于本层的起始海拔恰为青海山地中生温性、荒漠旱生温性灌丛及林缘灌丛集中分布区,且向上连续延伸,一直衔接至高海拔区域的高寒灌丛。因此,C层与前述B层共同构成了青海绝大多数灌木植被类型集中分布的垂直高度范围。

海拔2 500~4 500 m的CF级有176种,占该层总种数的22.31%。乔木和小乔木有4种,占本层级总种数的2.27%。例如,红杉(*Larix potaninii*,张鸿昌009)为唐古特植物地区特有种,青海为其分布区的北缘,本层级上限亦是其垂直分布范围的上限。此外,还有大果圆柏(*Sabina tibetica*,吴玉虎6740)等,也都在青海达到其垂直分布的最高限。

海拔2 500~5 500 m的CH级具有更宽广的垂直高度范围,且生态因子的梯度变化更加强烈。有28种,占该层总种数的3.55%,均为多年生草本植物。这些物种均表现出对宽幅垂直生态因子剧烈变化的适应能力,兼具先锋植物的生态性质和功能。

海拔2 500~6 000 m的CI级有4种,占该层总种数的0.51%,均为多年生草本植物。作为跨越7个层级的垂直分布类型,该类群是垂直延伸分布范围最宽、生存能力最强的先锋植物,对开展宽生态幅高山植物生物学特性研究具有重要意义。

3.4 D层特征描述

以海拔3 000 m为分布下限的D层序列共划分为6个垂直高度等级,包含624种植物,占青海植物总种数的17.54%,物种数量排在青海9个层序列的第3位。该层自起始海拔向上衔接至不同海拔范围、垂直生态幅层级和相应的植被带谱,最终延伸至青海的植物最高分布界限。

海拔3 000~6 000 m的DI级仅记录有2种多年

生草本植物,分别为狭瓣虎耳草(*Saxifraga pseudohirculus*,吴玉虎1005)和车前状垂头菊(*Cremanthodium ellisii*,吴玉虎35324)。这2种植物连续跨越6个层级,分布至青海高原植物可达的6 000 m海拔极限地带,成为垂直分布范围最广的类型,可作为研究植物抗逆性生殖繁育机理、垂直宽生态幅生存适应机理等生物学特性的材料,具有较高的研究价值。

3.5 E层特征描述

以海拔3 500 m为分布下限的E层序列共分为5个垂直高度等级,包含478种植物,占青海植物总种数的13.43%,物种数量排在青海9个层序列第4位。

海拔3 500~4 000 m的EE级有150种,占该层总种数的31.38%。乔木有川杨(*Populus szechuanica*)^[15]1种,占该层级总种数的0.67%,是青海落叶阔叶乔木分布的海拔最高限,仅见于东部的循化地区,属于水平和垂直双地带性边缘分布种,反映出该种偏好高寒的高山分布型生态属性。灌木有21种,占该层级总种数的14.00%。如坚桦(*Betula chinensis*,王为义等396)和细穗高山桦(*Betula delavayi* var. *microstachya*)^[16]仅见于高原腹地的囊谦和玉树地区,属于地理边缘分布和海拔极限分布类群;藏南杜鹃(*Rhododendron principis*)^[17]、白毛杜鹃(*Rhododendron velleureum*)^[18]和果洛杜鹃(*Rhododendron gologense*)^[18]等的出现,表明该层是杜鹃花属植物又一垂直生态幅类群的起始分布海拔带。作为较前述海拔更高的层序列,该现象反映出杜鹃花属具有明显的阶梯型垂直替代分布规律和有效避免属内种群间竞争的生存策略。多年生草本有128种,占该层级总种数的85.33%,如班玛虎耳草(*Saxifraga banmaensis*,陈世龙3031)、西倾山黄耆(*Astragalus xiqingshanicus*,吴玉虎7571)、通天河岩黄芪(*Hedysarum gmelinii* var. *tongtianhense*,刘尚武2328)等,分别为高寒类型灌丛、高寒草甸乃至高山流石坡下缘等植被类型的组成成分。

海拔3 500~4 500 m的EF级有177种,占该层总种数的37.03%。无乔木分布,灌木有8种,占该层级总种数的4.52%。除通天锦鸡儿(*Caragana junatovii*,周立华110)、光亮杜鹃(*Rhododendron nitidulum*,果洛队536)等零散伴生分布外,亦有呈典型阶梯型分布的杜鹃出现。多年生草本有95种,

占该层级总种数的53.67%,如太白韭(*Allium pratense*, 吴玉虎 32381)、青海毛冠菊(*Nannoglottis ravidata*, 刘尚武 2321)、青海黄精(*Polygonatum qinghaiense*, 吴玉虎 1513B)等。

海拔3 500~5 000 m的EG级有108种,占该层级总种数的22.59%。如川西云杉(*Picea likiangensis* var. *rubescens*, 吴玉虎 26188),仅见于玉树、囊谦和班玛马可河林区,青南高原为其分布区北界。该种为本层级仅有的乔木种,也是青海常绿针叶乔木的最高海拔分布记录和海拔极限分布种类,占该层级总种数的0.93%。灌木有4种,占该层级总种数的3.70%,如毛喉杜鹃(*Rhododendron cephalanthum*, 杨永昌 945)、毛嘴杜鹃(*Rhododendron trichostomum*, 藏药队 1307)等。多年生草本有103种,占该层级总种数的95.37%,如梭砂贝母(*Fritillaria delavayi*, 吴玉虎 33346)、藏豆(*Stracheya tibetica*, 吴玉虎 32776)、青海玄参(*Scrophularia przewalskii*, 吴玉虎 8066)等。其中,华福花(*Sinadoxa corydalifolia*, 吴玉虎 17210)仅分布于青海和四川,首次发现于青南高原的囊谦县,为青藏高原就地分化起源的特有种属,也是青藏高原高山特化作用的典型结果,其分布使该层级在青海植物区系的生态地理研究中具有特殊的垂直生态幅意义。

海拔3 500到5 500 m的EH级仅有39种植物分布。灌木2种,以匍匐水柏枝(*Myricaria prostrata*, 吴玉虎 232)为该层序列中灌木的最高海拔分布记录,亦为青海垫状植物的典型代表和青藏高原特有垫状植被的特征种。多年生草本有37种,占该层级总种数的94.87%,如散布伴生的多刺绿绒蒿(*Meconopsis horridula*, 吴玉虎 488)、盘状合头菊(*Synalathium disciforme*, 果洛队 474)、水母雪兔子(*Saussurea medusa*, 吴玉虎 600)等,均为典型的高原高山植物。

从海拔3 500 m起连续跨越5个垂直阶梯,延伸至6 000 m的EI层级,是本层垂直分布范围最广的层级,有4种,如多年生草本粗糙黄堇(*Corydalis scaberula*, 吴玉虎 499)等,均为高山冰缘湿地和流石坡稀疏植被的组成成分,具有先锋植物特性和伴生、零散分布特征。

3.6 F层特征描述

以4 000 m为分布下限的F层序列分为4个垂直高度等级,包含210种植物,占青海植物总种数的5.90%,物种数量排在青海9个垂直层序列第6

位,且全层无乔木分布。

海拔4 000~4 500 m的FF级有84种,占该层总种数的40.00%。无乔木分布,是青海植物垂直分布层序列中首个无木本植物的层级,表明青海境内自海拔4 000 m起无乔木分布。灌木有青海杜鹃(*Rhododendron qinghaiense*, 郭本兆 8396)、囊谦杜鹃(*Rhododendron przewalskii* subsp. *yushuense*, 王生新 80-034)等4种。杜鹃花属植物占该层级灌木总种数的3/4,占绝对优势,其垂直阶梯型替代分布特征显著。多年生草本有80种,占该层级总种数的95.24%。

海拔4 000~6 000 m的FI级仅有4种,如西藏虎耳草(*Saxifraga tibetica*, 吴玉虎 1103)和金星虎耳草(*Saxifraga stella-aurea*, 黄荣福等 K-287)等。该层级中虎耳草属植物占比为3/4,为核心类群,这一组成结构决定了本层植物具有最宽垂直生态幅和分布范围,且为青海植物分布海拔最高的植物类群之一。F层植物特征和生态属性,均体现该层已经进入典型青藏高原高山植物垂直分布的最高海拔区间,为生态环境极端恶劣的生命脆弱带和植物生命力顽强地带。

3.7 G层特征描述

以海拔4 500 m为分布下限的G层序列分为3个垂直高度等级,共包含55种植物,占青海植物总种数的1.55%,无木本植物分布。海拔4 500~5 000 m的GG级,有49种,占该层总种数的89.09%,在本层占据绝对优势,是该层序列的核心成分,如藏北高原芥(*Christolea baiogoensis*, 黄荣福 K-661)、玉树雪兔子(*Saussurea yushuensis*, 刘尚武 2478)、扎曲棘豆(*Oxytropis zaquensis*, 吴玉虎 34227)等,几乎均为高山流石坡稀疏植被的先锋类群。为了适应极端生境,该类群在形态上普遍呈现矮化、垫状或多毛等特征,并在生理与生存策略方面形成相应的抗逆机制。海拔4 500~5 500 m的GH级有5种,均为多年生草本,如西藏扁芒菊(*Waldheimia glabra*, 青藏队 吴玉虎 4878)、小垂头菊(*Cremanthodium nanum*, 吴玉虎 22262)等,反映出菊科植物在该层级中的核心地位。在垂直跨度最大的GI级(4 500~6 000 m)中仅记录有1种多年生草本,为全缘兔耳草(*Lagotis integra*, 吴玉虎 25598)。该种不仅是青海分布海拔最高的植物之一,还是起始分布海拔次高的植物。作为典型的青藏高原高山植物,其在研究高山植物生物学特

性及其适应机理等方面具有重要科学价值。

3.8 H层特征描述

以 5 000 m 为分布下限的 H 层序列分为 2 个垂直高度等级,共包含 2 种植物,均分布于 5 000~5 500 m 的 HH 级。该层级为青海植物种起始分布海拔最高的顶部层级,同时也是青海垂直分布范围最狭窄的层级之一,其种类应属青藏高原东北部高原高山特化环境中就地衍生分化的特有成分,代表物种为唐古拉点地梅(*Androsace tanggula-lashanensis*, 吴玉虎 015)。

从青海植物垂直分布的整体格局来看,从起始海拔 2 000 m 的 B 层向上至起始海拔 3 500 m 的 E 层的 4 个层序列各自向上扩展到上限海拔 5 000 m 的层级范围内,是青海植物种最集中的垂直分布区间。该区间共有 18 个层级,占有所有层级的 43.90%,所含 2 748 种,占青海省野生种子植物种的 77.23%;而另外 23 个层级占全部层级的 56.10%,已超过半数,但它们所含植物仅有 810 种,只占青海省总种数的 22.77%。由此可见,前者是青海植物垂直分布最集中的海拔范围,即核心分布地带,也是青海植物种垂直分布的最佳范围。

青海省位于青藏高原东北部,其植物区系经历了严酷的自然选择和历史进化过程^[19]。从表 1 中的横、纵双向梯度层级来看,青海植物种的分布,以起始海拔在 2 000 m 的横向“层”序列和海拔上限止于 4 000 m 的纵向“级”序列之间的种类最为丰富(表 1 中加粗黑体部分)。尽管该区域仅有横向 7 级和纵向 5 层,却分别有 978 种(占青海省的 27.49%)和 821 种(占青海省的 23.07%)。在二者形成的十字型交会处的 BE 层级,横向衔接海拔下限 2 000 m 的“层”系列,纵向衔接海拔上限 4 000 m 的“级”系列,是青海植物种类垂直分布数量最多的海拔层级,有 230 种,占到 B 层各级植物总种数的 23.52% 和 E 级各层总种数的 28.01%。此外,青海省植物物种数排名第 2 的 BC 级(194 种)和排名第 3 的 DE 级(187 种)也分布于该十字型交叉序列附近,可见十字型序列层级是青海植物种类垂直分布最集中的海拔范围。

综上所述,青海低海拔地带因水热条件优越,通常拥有更多的种类。这些起始分布于低海拔的植物不仅具有广泛的水平地带分布能力,也能在垂直梯度上向更高海拔延伸,形成更宽的垂直分布范围。

4 垂直“级”序列分析

从青海植物垂直分布梯度表中的“级”序列来看,最低海拔 1 650 m 向上延伸到海拔上限 2 000 m,构成了第 1 个垂直梯级——A 级(垂直跨度 350 m)。该级仅分布有 29 种植物,仅占青海省 3 558 种野生种子植物的 0.82%,占比极低。虽然这里的自然气候和地理条件相对优越,但能够适应这一狭窄垂直高度范围的植物十分有限。海拔上限为 2 500 m 的 B 级序列分布有 215 种,占青海省总种数的 6.04%。尽管第 2 级序列垂直高度仅 850 m,所分布的物种数量却超过第 1 个垂直梯级的 6 倍,可见除边缘分布种等特殊情况下,垂直高度范围的狭窄是影响低海拔起始区域植物物种丰富度的关键因素。海拔上限为 3 000 m 的 C 级序列有 475 种植物,占青海省总种数的 13.35%。作为青海植物垂直分布梯度表中的第 3 个级序列,所含植物种类明显增加,其中 BC 层级以 194 种的最高物种数凸显出海拔 2 000~3 000 m 是该级序列植物的最适宜垂直分布范围。海拔上限为 3 500 m 的 D 级序列有 473 种,占青海省总种数的 13.29%。尽管比上一级增加了 500 m 高度,分布种数仍少于前者,但这并不影响该级序列所含植物与上一级具有同样适宜沟谷山地分布的特点。海拔上限为 4 000 m 的 E 级序列分布有 821 种植物,占青海省总种数的 23.07%,为青海植物垂直分布梯度表中分布种数最多的一级序列。这反映出青海植物对海拔 4 000 m 以下、涵盖 5 层 5 级序列的生态地理环境具有广泛适应性。因此,海拔 2 000~4 000 m 可视为青海植物分布种类最丰富的垂直带,即核心分布地带。海拔上限为 4 500 m 的 F 级序列分布有 798 种,占青海省总种数的 22.43%,仅次于 E 级核心分布地带,并与之具有相似的种类分布特点。海拔上限为 5 000 m 的 G 级序列有 576 种,占青海省总种数的 16.19%,位居第 3。尽管本级序列相对于上 2 级的级序列层数有所增加,种数却是较核心分布地带显著递减,这主要归因于植物生存环境的渐次恶劣。海拔上限为 5 500 m 的 H 级序列有 156 种,占青海省总种数的 4.38%。植物种数量急剧减少,表明该级生境已极为严酷。最高海拔上限为 6 000 m 的 I 级序列只有 15 种,仅占青海省总种数的 0.42%,为物种数量最少的一级,也是青海植物生存可抵达的最高海拔,这主要是由于该区域生态地理环境极度恶劣所致。G、H、I 3 级所

处的极端环境,应是研究高原高山植物适应机理的天然实验室。

上述分析表明,就植物的垂直“层级”替代而言,“级”序列和“层”序列一致,均表现为各层级间物种的集体相互替代。就植物垂直分布格局而言,青海高原野生植物最适分布海拔上限为4 000 m,其次是4 500 m,其后依次为5 000、3 000、3 500 m,再次为2 500、5 500 m,最次的2个是2 000 m和6 000 m,这一分布模式与层序列一致,均为中间大两头小的橄榄型分布模式。

5 垂直分布特点

分布于低海拔且垂直分布范围较窄(如AA、BB、CC等)的青海植物,多处于其地理分布区边缘或垂直分布海拔极限,其中还有可能包含部分新近发现的就地分化物种,且后者中常见青海或青藏高原特有种。处于垂直范围较宽或最宽的植物,则为广域分布及(或)经多途径传播而来的种类。起始高度越高的层所含种类的分布区通常越窄。例如,分布于AG层级的植物对应拉丁文已补充,分别为:独行菜(*Lepidium apetalum*, 吴玉虎3166)、臭蒿(*Artemisia hedinii*, 吴玉虎227)、西伯利亚蓼(*Polygonum sibiricum*, 吴玉虎2201)、弯茎还阳参(*Crepis flexuosa*, 吴玉虎524)等,都是广布型种类,同时也是垂直方向上的宽域分布种。其余处于中段的较宽垂直高度范围内的植物,则多为青海与周围邻近区系共有分布的种类,甚至是广泛分布于青藏高原的高山种类。

综上所述,青海物种的垂直分布可以总结为以下特点:

(1)青海植物在垂直维度上并非随机分布,而是可以被划分为一定的“层”和“级”序列,即本文所建立的植物种间垂直分布的“层”“级”系统。

(2)横向衔接海拔下限2 000 m的“层”系列和纵向衔接海拔上限4 000 m的“级”系列交叉形成的十字型序列层级,是青海植物垂直分布数量最多和种类最为集中的海拔范围。

(3)垂直分布高度范围宽的植物均为植物区系地理上的广布型种类;垂直分布高度范围狭窄的植物,通常是地理上的狭域分布类型。高海拔层级段以青藏高原特有的高山种类为主。

(4)海拔2 000~4 000 m为青海各种灌木最适宜、最为集中的逐级分布范围,同时也是灌木类种

群最繁盛的栖息地带。

(5)从起始海拔2 000 m到3 500 m的4个层序列各自垂直向上延伸高度到上限海拔5 000 m的垂直带范围,是青海植物垂直分布最集中的海拔范围。

(6)分析表明,明显的属内阶梯型种间垂直替代分布是青海植物普遍存在的基本生存策略。

参 考 文 献

- [1] 中国科学院《中国自然地理》编辑委员会. 中国自然地理:植物地理上册[M]. 北京:科学出版社,1983:1-125. Editorial Board of China's Physical Geography, Chinese Academy of Sciences. China's physical geography: plant geography: Part 1 [M]. Beijing: Science Press, 1983: 1-125.
- [2] 吴玉虎,梅丽娟. 黄河源区植物资源及其环境[M]. 西宁:青海人民出版社,2001:1-196. WU Y H, MEI L J. The plant resources in source area of Yellow River and its environment [M]. Xining: Qinghai People's Publishing House, 2001: 1-196.
- [3] 武素功,杨永平,费勇. 青藏高原高寒地区种子植物区系的研究[J]. 云南植物研究,1995,17(3):233-250. WU S G, YANG Y P, FEI Y. On the flora of the alpine region in the Qinghai-Xizang (Tibet) Plateau [J]. Acta Botanica Yunnanica, 1995, 17(3): 233-250.
- [4] 吴玉虎,庞哲,李聪佳,等. 青海种子植物区系研究[J]. 广西植物,2024,44(8):1524-1539. WU Y H, PANG Z, LI C J, et al. Study on the seed plant flora of Qinghai Province, China [J]. Guihaia, 2024, 44(8): 1524-1539.
- [5] 吴玉虎,史惠兰. 柴达木盆地及其毗邻山地植物区系研究[J]. 西北植物学报,2018,38(8):1542-1552. WU Y H, SHI H L. The seed plant flora of the Qaidam Basin and its contiguous mountainous region in Qinghai Province [J]. Acta Botanica Boreali-Occidentalia Sinica, 2018, 38(8): 1542-1552.
- [6] 吴玉虎. 澜沧江源区种子植物区系研究[J]. 植物科学学报,2009,27(3):277-289. WU Y H. Floristic study on the source area of Lancangjiang (Mekong River), China [J]. Plant Science Journal, 2009, 27(3): 277-289.
- [7] 吴玉虎. 青海种子植物特有种及其生态地理分布[J]. 云南植物研究,2006,28(4):327-336. WU Y H. The endemic species of seed plants and their eco-geographic distribution in Qinghai [J]. Acta Botanica Yunnanica, 2006, 28(4): 327-336.
- [8] 吴玉虎. 长江源区植物区系研究[J]. 西北植物学报,

- 2000, 20(6):1086-1101.
- WU Y H. The floristic characteristics in the source area of Changjiang (Yangtze) River [J]. *Acta Botanica Boreali-Occidentalia Sinica*, 2000, 20(6):1086-1101.
- [9] 吴玉虎. 青海植物检索表[M]. 西宁:青海民族出版社, 2018:1-376.
- WU Y H. *Claves Plantarum Qinghaiensis*[M]. Xining: Qinghai Minzu Publishing House, 2018:1-376.
- [10] EROFEEVA E A. Plant hormesis and Shelford's tolerance law curve [J]. *Journal of Forestry Research*, 2021, 32:1789-1802.
- [11] SEXTON J P, MCINTYRE P J, ANGERT A L, *et al.* Evolution and ecology of species range limits [J]. *Annual Review of Ecology, Evolution, and Systematics*, 2009, 40: 415-436.
- [12] 李德铎, 陈之端, 王红, 等. 中国维管植物科属词典[M]. 北京:科学出版社, 2018.
- LI D Z, CHEN Z D, WANG H, *et al.* A dictionary of the families and genera of Chinese vascular plants [M]. Beijing: Science Press, 2018.
- [13] 吴玉虎. 青海植物名录[M]. 西宁:青海人民出版社, 1998:1-396.
- WU Y H. *Index florae Qinghaiensis*[M]. Xining: Qinghai People's Publishing House, 1998:1-396.
- [14] 侯宽昭. 中国种子植物科属词典[M]. 北京:科学出版社, 1982:1-527.
- HOU K Z. A dictionary of the families and genera of Chinese seed plants [M]. Beijing: Science Press, 1982:1-527.
- [15] 中国科学院西北高原生物研究所. 青海植物志:第1卷[M]. 西宁:青海人民出版社, 1997:75.
- Northwest Institute of Plateau Biology, Chinese Academy of Sciences. *Flora Qinghaiica: Vol.1* [M]. Xining: Qinghai People's Publishing House, 1997:75.
- [16] 中国科学院中国植物志编辑委员会. 中国植物志:第21卷[M]. 北京:科学出版社, 1979:134.
- Editorial Committee of the Flora of China, Chinese Academy of Sciences. *Flora of China: Vol.21* [M]. Beijing: Science Press, 1979:134.
- [17] 青海木本植物志编委会. 青海木本植物志[M]. 西宁:青海人民出版社, 1987:520.
- Editorial Committee of the Flora of Woody Plants in Qinghai. *Flora of woody plants in Qinghai* [M]. Xining: Qinghai People's Publishing House, 1987:520.
- [18] WU Z Y, RAVEN P H, HONG D Y. *Flora of China: Vol 14: Melastomataceae through Violaceae* [M]. Beijing: Science Press, 2005:260-455.
- [19] 吴征镒, 周浙昆, 孙航, 等. 种子植物分布区类型及其起源和分化[M]. 昆明:云南科技出版社, 2006:146-451.
- WU Z Y, ZHOU Z K, SUN H, *et al.* The areal-types of seed plants and their origin and differentiation [M]. Kunming: Yunnan Science and Technology Press, 2006:146-451.