

海拔对祁连山东段青海云杉林林下灌草多样性的影响

李转桃¹, 徐先英², 赵 鹏², 罗永忠^{1,①}

(1. 甘肃农业大学林学院, 甘肃 兰州 730070; 2. 甘肃省治沙研究所, 甘肃 兰州 730071)

摘要: 为揭示海拔对青海云杉(*Picea crassifolia* Kom.) 林林下植被多样性的影响, 以祁连山东段的青海云杉林为研究对象, 调查分析了 5 个海拔梯度下青海云杉林林下灌木层和草本层的物种组成及物种多样性特征。结果表明: 祁连山东段青海云杉林林下植物共有 79 种, 隶属于 24 科 50 属; 其中, 灌木植物有 19 种, 蔷薇科(Rosaceae) 种类最多; 草本植物有 60 种, 毛茛科(Ranunculaceae) 种类最多。重要值分析结果显示: 灌木层优势种为银露梅[*Dasiphora glabra* (G. Lodd.) Soják], 小叶金露梅[*D. parvifolia* (Fisch. ex Lehm.) Juz.], 金露梅[*D. fruticosa* (Linn.) Rydb.] 和山生柳(*Salix oritrepha* Schneid.), 草本层优势种主要为藁草(*Carex* spp.) 和珠芽蓼[*Bistorta vivipara* (Linn.) Gray]。青海云杉林林下灌木层的物种丰富度指数、Simpson 优势度指数和 Shannon-Wiener 多样性指数整体随海拔升高呈先升高后降低的趋势, 符合物种多样性垂直分布的“中间高度膨胀”理论; 灌木植物的物种丰富度指数和 Pielou 均匀度指数与海拔分别呈显著($P < 0.05$) 正相关和负相关, 而草本植物的各多样性指数与海拔均无显著($P > 0.05$) 相关性。Sørensen 相似性系数分析结果显示: 随海拔升高, 相邻海拔梯度林地间的相似性逐渐降低, 并且海拔梯度跨度越大, 林地间的相似性越低。综合分析表明: 祁连山东段青海云杉林林下灌木层物种多样性受海拔影响显著, 而草本层物种多样性受海拔影响不明显。

关键词: 青海云杉林; 海拔梯度; 物种多样性; 祁连山东段; 林下灌草

中图分类号: Q948.15; S791.189; S718.54 文献标志码: A 文章编号: 1674-7895(2023)06-0059-08
DOI: 10.3969/j.issn.1674-7895.2023.06.07

Effects of altitude on diversities of shrubs and herbs under *Picea crassifolia* forests in the eastern Qilian Mountains LI Zhuantao¹, XU Xianying², ZHAO Peng², LUO Yongzhong^{1,①} (1. College of Forestry, Gansu Agricultural University, Lanzhou 730070, China; 2. Gansu Desert Control Research Institute, Lanzhou 730071, China), *J. Plant Resour. & Environ.*, 2023, 32(6): 59–66

Abstract: To reveal the effects of altitude on diversity of vegetations under *Picea crassifolia* Kom. forests, *P. crassifolia* forests in the eastern Qilian Mountains were taken as research objects, and the species composition and species diversity characteristics of shrub and herb layers under *P. crassifolia* forests at 5 altitudinal gradients were investigated and analyzed. The results show that there are 79 species of understory plants in these *P. crassifolia* forests in the eastern Qilian Mountains, belonging to 50 genera of 24 families, in which, there are 19 species of shrub plants and Rosaceae species are the most, and there are 60 species of herb plants and Ranunculaceae species are the most. The importance value analysis result shows that the dominant species in shrub layer are *Dasiphora glabra* (G. Lodd.) Soják, *D. parvifolia* (Fisch. ex Lehm.) Juz., *D. fruticosa* (Linn.) Rydb., and *Salix oritrepha* Schneid., and the dominant species in herb layer are mainly *Carex* spp. and *Bistorta vivipara* (Linn.) Gray. The species richness index, Simpson dominance index, and Shannon-Wiener diversity index of shrub layer under *P. crassifolia* forests show a tendency to first increase and then decrease with the increase of altitude in general, which consistent with the ‘mid-elevation bulge’ theory in the vertical distribution of species

收稿日期: 2023-06-06

基金项目: 中华环保基金会青山守护公益专项(CEPFQS202169-21)

作者简介: 李转桃(1997—), 女, 甘肃会宁人, 硕士研究生, 主要从事水土保持与荒漠化防治研究。

①通信作者 E-mail: 493517987@qq.com

引用格式: 李转桃, 徐先英, 赵 鹏, 等. 海拔对祁连山东段青海云杉林林下灌草多样性的影响[J]. 植物资源与环境学报, 2023, 32(6): 59–66.

diversity; the species richness index and Pielou evenness index of shrub plants show significant ($P < 0.05$) positive and negative correlations with altitude, respectively, while there are no significant ($P > 0.05$) correlations between each diversity index of herb plants and altitude. The Sørensen similarity coefficient analysis result shows that with the increase of altitude, the similarity between forests at adjacent altitudinal gradients gradually decreases, and the greater the altitudinal gradient span, the less the similarity between forests. The comprehensive analysis shows that the species diversity of shrub layer under *P. crassifolia* forests in the eastern Qilian Mountains is significantly affected by altitude, while the species diversity of herb layer is not evidently affected.

Key words: *Picea crassifolia* Kom. forest; altitudinal gradient; species diversity; eastern Qilian Mountains; shrub and herb under forest

林下植被为森林生态系统的重要组成部分,可反映生态系统稳定性及群落演替规律,对于维持物种多样性、涵养水源、保持森林生态系统功能稳定等方面具有十分重要的作用^[1-4]。一般而言,林下植被越丰富,森林生态系统稳定性越强,生态系统的结构和功能调节能力也越强,因此,丰富的林下植被有利于实现森林生态效益的提高及维持森林可持续经营。目前对于林下植被多样性的研究主要集中在海拔、坡向、土壤等环境因子^[5-7]及林分密度、林龄、平均胸径等林分因子^[8-10]上。不同研究区的森林物种组成和物种多样性因环境因子及林分因子变化而产生较大差异,因此,林下物种多样性指数也会有不同的变化趋势。

海拔作为综合性生态变量,集结了多种环境因子,包括土壤养分、光照条件和水热条件等;在森林生态系统中,海拔是影响林下物种组成和林下植被多样性的重要因子,随着海拔的变化,对植物群落影响最大的环境因子是温度,同时引起多种环境因子变化,致使局部微气候发生改变,进一步影响植物的生长,从而形成垂直海拔梯度上植物物种多样性的分布格局^[11-12]。多项研究证实海拔对植物物种组成及物种多样性有显著影响,董雪等^[13]以荒漠戈壁灌木群落为研究对象,分析其在海拔梯度上的分布规律,结果表明物种多样性随海拔升高呈先升后降的单峰分布格局;许涵等^[14]研究表明除了人为森林采伐干扰外,海拔梯度是影响天然林物种多样性的最重要因子。可见,沿着海拔梯度的植物群落变化规律一直是生态学研究的重要内容。

不同海拔地区不同地段的植物群落多样性研究因所选样地的区域及区域内坡向、坡度、土壤等条件不同,所得研究结果不尽相同,植物多样性随海拔上升,有的逐渐增加,有的逐渐减少,有的先增加后减

少,还有的无明显规律^[15-17]。张旭等^[18]对不同海拔森林样地的调查结果显示:随海拔升高,Marglef指数、Simpson优势度指数和Shannon-Wiener多样性指数在乔、灌层呈下降趋势,在草本层呈“U”型变化趋势;Pielou均匀度指数在乔木层呈下降趋势,在灌、草层变化不明显。王金兰等^[19]对祁连山东段不同海拔梯度杜鹃(*Rhododendron simsii* Planch.)灌丛的调查发现,灌丛灌木高度、密度和生物量均随海拔升高呈先增加后降低的单峰变化趋势。

祁连山位于青藏高原、蒙新高原和黄土高原的交会带,其地理位置特殊、海拔高,自然环境独特、水系分布广、植被丰富多样^[20]。青海云杉(*Picea crassifolia* Kom.)是祁连山林区的主要建群树种之一,青海云杉林是祁连山自然保护区的主要森林类型,占祁连山乔木林总面积的66.4%。现有研究多集中在植物群落的物种组成、物种多样性以及生物量与海拔梯度之间的相关关系,但关于祁连山青海云杉林林下植被多样性随海拔梯度变化的研究较少。鉴于此,本研究以祁连山东段的青海云杉林为研究对象,通过调查不同海拔梯度青海云杉林林下植被组成,分析海拔对青海云杉林林下植被多样性的影响,以期掌握青海云杉林的群落特征,并为进一步精细化林下植被多样性保护、提高森林生态效益及森林可持续经营提供理论支持。

1 研究区概况和研究方法

1.1 研究区概况

祁连山区处于西北干旱半干旱区腹地,自然环境复杂,具有面积大、地形高度差较大等特点,且该区域气候差异较大。本研究区位于祁连山东段的哈溪—祁连一大黄山地区,地理坐标为东经102°15′42.9″~

103°14′48.5″、北纬 37°22′13.4″~38°25′52.9″, 海拔范围为 2 595~3 095 m。该研究区属高寒半干旱气候区, 地势由西南向东北倾斜, 年均温 1.5 ℃, 年均降水量约 400 mm。研究区的主要植被种类有青海云杉、圆柏 (*Juniperus chinensis* Linn.)、红桦 (*Betula albosinensis* Burkill) 等。

1.2 研究方法

1.2.1 样地设置及植被调查 从祁连山东段的甘沙河(海拔约 2 595 m)开始设置样地, 均设置在研究区内立地条件基本相似的山地上。海拔每升高 100 m 设置 1 个样地(林地), 共 5 个林地, 调查并记录每个林地的海拔、坡向、坡度和土壤类型及乔木的平均胸径和平均树高, 具体情况见表 1。每个林地设置 3 个

面积 20 m×20 m 的乔木样方、5 个面积 5 m×5 m 的灌木样方和 5 个面积 1 m×1 m 的草本样方, 灌木样方和草本样方分别位于乔木样方的四角和中心。在 2022 年 8 月完成植被调查, 调查指标包括鉴定乔木样方中的乔木种类、灌木样方中的灌木种类和草本样方中的草本种类, 使用皮尺(精度 0.1 cm)测量乔木胸径, 使用测高仪(精度 0.1 和 0.5 m)测量乔木和灌木的高度, 使用卷尺(精度 0.1 cm)测量灌木的冠幅(分别测量东西向冠幅和南北向冠幅, 取平均值)及草本的高度和冠幅(分别测量东西向冠幅和南北向冠幅, 取平均值), 按照公式“灌木盖度=(东西向冠幅×南北向冠幅)/样地面积”计算灌木层盖度, 采用目测法估测草本层盖度。

表 1 祁连山东段青海云杉林各林地基本情况
Table 1 Basic information of each forest of *Picea crassifolia* Kom. forests in the eastern Qilian Mountains

海拔梯度/m Altitudinal gradient	林地 ¹⁾ Forest ¹⁾	坡向 Slope direction	坡度/(°) Slope	土壤类型 Soil type	平均胸径/cm Average diameter at breast height	平均树高/m Average tree height
(2 595, 2 695]	F1	东北 Northeast	28	森林灰褐土 Forest grey-brown soil	21.86	13.75
(2 695, 2 795]	F2	西南 Southwest	26	森林灰褐土 Forest grey-brown soil	20.18	13.11
(2 795, 2 895]	F3	西南 Southwest	32	森林灰褐土 Forest grey-brown soil	14.53	9.24
(2 895, 2 995]	F4	北 North	31	高山草甸土 Alpine meadow soil	15.70	9.98
(2 995, 3 095]	F5	西北 Northwest	32	高山草甸土 Alpine meadow soil	16.02	6.16

¹⁾ F1: 矮化圆柏-青海云杉混交林 Dwarf *Juniperus chinensis*-*Picea crassifolia* mixed forest; F2: 青海云杉纯林 *Picea crassifolia* pure forest; F3: 青海云杉-红桦混交林 *Picea crassifolia*-*Betula albosinensis* mixed forest; F4: 青海云杉-圆柏混交林 *Picea crassifolia*-*Juniperus chinensis* mixed forest; F5: 圆柏-青海云杉矮林 *Juniperus chinensis*-*Picea crassifolia* dwarf forest.

1.2.2 相关参数计算 参考卢训令等^[21]的方法分别计算乔木层、灌木层和草本层植物的重要值, 乔木植物重要值的计算公式为重要值=(相对多度+相对频度+相对显著度)/3; 灌木植物和草本植物重要值的计算公式为重要值=(相对高度+相对频度+相对盖度)/3; 同时参考卢训令等^[21]的方法计算物种丰富度指数(*S*)、Simpson 优势度指数(*D*)、Shannon-Wiener 多样性指数(*H'*)和 Pielou 均匀度指数(*J*)。通过 Sørensen 相似性系数分析不同海拔梯度林地间的相似性^[22]。

1.3 数据处理

使用 EXCEL 2019 软件进行数据处理; 使用 IBM SPSS Statistics 26.0 软件进行单因素方差分析(one-way ANOVA), 分析不同海拔梯度林下灌草的多样性指数差异, 并采用最小显著性差异(*LSD*)法进行显著性检验(*P*<0.05); 使用 IBM SPSS Statistics 26.0 软件进行 Pearson 相关性分析。

2 结果和分析

2.1 不同海拔梯度青海云杉林林下灌草物种特征分析

2.1.1 物种组成 调查结果(表 2)表明: 祁连山东段青海云杉林林下植物共有 79 种, 隶属于 24 科 50 属; 林下灌木植物共有 19 种, 隶属于 7 科 9 属, 其中蔷薇科(Rosaceae)种类最多, 有 7 种, 其次为杜鹃花科(Ericaceae), 有 4 种, 这 2 科种数之和占调查的灌木植物总种数的 57.9%; 林下草本植物共有 60 种, 隶属于 21 科 42 属, 其中毛茛科(Ranunculaceae)种类最多, 有 8 种, 其次为菊科(Asteraceae)、豆科(Fabaceae)和蔷薇科, 均有 6 种, 这 4 科种数之和占调查的草本植物总种数的 43.3%。

由表 2 还可见: 祁连山东段不同海拔梯度林地灌木植物的科数量相差不大, 海拔梯度(2 695, 2 795]

m 的灌木植物属数量最多,海拔梯度 (2 795, 2 895] m 的灌木植物种数最多,而海拔梯度 (2 995, 3 095] m 的灌木植物的科、属、种数量均最少;海拔梯度 (2 695, 2 795] m 的草本植物科、属、种数量均最多,而海拔梯度 (2 995, 3 095] m 的草本植物科、属、种数量均最少,且 2 个林地间数值相差较大。祁连山东段青海云杉林灌木和草本植物种数均随海拔升高呈现先增加后减少的趋势。

表 2 祁连山东段不同海拔梯度青海云杉林林下灌草的物种组成¹⁾
Table 2 Species composition of shrubs and herbs under *Picea crassifolia* Kom. forests at different altitudinal gradients in the eastern Qilian Mountains¹⁾

海拔梯度/m Altitudinal gradient	n_s			n_h		
	科 Family	属 Genus	种 Species	科 Family	属 Genus	种 Species
(2 595, 2 695]	3	4	5	16	23	26
(2 695, 2 795]	5	7	9	19	30	38
(2 795, 2 895]	5	6	12	14	25	31
(2 895, 2 995]	4	5	8	12	26	30
(2 995, 3 095]	3	4	4	9	11	12

¹⁾ n_s : 灌木数量 Number of shrub; n_h : 草本数量 Number of herb.

2.1.2 优势种分析 不同海拔梯度青海云杉林乔、灌、草层植物的重要值分析结果(表 3)显示:群落建群种主要是青海云杉、圆柏、红桦、山杨(*Populus davidiana* Dode)、秦柳(*Salix chingiana* Hao ex Fang et

Skvortsov),并且随海拔梯度变化发生更替。5 个海拔梯度林地灌木层的优势种由海拔从低到高分别为银露梅[*Dasiphora glabra* (G. Lodd.) Soják]、小叶金露梅[*D. parvifolia* (Fisch. ex Lehm.) Juz.]、山生柳(*Salix oritrepha* Schneid.)、银露梅、金露梅[*D. fruticosa* (Linn.) Rydb.];5 个海拔梯度林地草本层的优势种主要为藁草(*Carex* spp.)和珠芽蓼[*Bistorta vivipara* (Linn.) Gray]。

2.2 不同海拔梯度青海云杉林林下灌草植物多样性分析

2.2.1 林下灌草植物多样性特征分析 对不同海拔梯度下青海云杉林林下灌草层的物种丰富度指数(S)、Simpson 优势度指数(D)、Shannon-Wiener 多样性指数(H')、Pielou 均匀度指数(J)进行分析,结果见表 4。结果显示:同一海拔梯度林地草本层的 S 值、 D 值和 H' 值均高于灌木层,而 J 值均低于灌木层。灌木层的 S 值、 D 值、 H' 值整体随海拔升高呈先升高后降低的趋势,且海拔梯度 (2 795, 2 895] m 的 S 值显著 ($P<0.05$) 高于海拔梯度 (2 595, 2 695]、(2 695, 2 795] 和 (2 995, 3 095] m,海拔梯度 (2 795, 2 895] m 的 D 值极显著 ($P<0.01$) 高于海拔梯度 (2 595, 2 695]、(2 695, 2 795] 和 (2 995, 3 095] m,海拔梯度 (2 795, 2 895] m 的 H' 值极显著高于海拔梯度 (2 595, 2 695] m; J 值在 5 个海拔梯度林地间

表 3 祁连山东段不同海拔梯度青海云杉林乔、灌、草层植物的重要值(IV)
Table 3 Importance values (IV) of species of arbor, shrub, and herb layers under *Picea crassifolia* Kom. forests at different altitudinal gradients in the eastern Qilian Mountains

海拔梯度/m Altitudinal gradient	乔木层 Arbor layer		灌木层 Shrub layer		草本层 Herb layer	
	种类 Species	IV	种类 Species	IV	种类 Species	IV
(2 595, 2 695]	圆柏 <i>Juniperus chinensis</i>	0.576	银露梅 <i>Dasiphora glabra</i>	0.430	藁草 <i>Carex</i> spp.	0.278
	青海云杉 <i>Picea crassifolia</i>	0.390	唐古特瑞香 <i>Daphne tangutica</i>	0.206	珠芽蓼 <i>Bistorta vivipara</i>	0.224
	山杨 <i>Populus davidiana</i>	0.362	小叶金露梅 <i>Dasiphora parvifolia</i>	0.180	如意草 <i>Viola arcuata</i>	0.172
(2 695, 2 795]	青海云杉 <i>Picea crassifolia</i>	— ¹⁾	小叶金露梅 <i>Dasiphora parvifolia</i>	0.549	珠芽蓼 <i>Bistorta vivipara</i>	0.421
			唐古特瑞香 <i>Daphne tangutica</i>	0.358	藁草 <i>Carex</i> spp.	0.239
			高山绣线菊 <i>Spiraea alpina</i>	0.309	早熟禾 <i>Poa annua</i>	0.172
(2 795, 2 895]	青海云杉 <i>Picea crassifolia</i>	0.675	山生柳 <i>Salix oritrepha</i>	0.956	珠芽蓼 <i>Bistorta vivipara</i>	0.304
	红桦 <i>Betula albosinensis</i>	0.156	青海杜鹃 <i>Rhododendron qinghaiense</i>	0.664	藁草 <i>Carex</i> spp.	0.282
	秦柳 <i>Salix chingiana</i>	0.084	千里香杜鹃 <i>Rhododendron thymifolium</i>	0.292	东方草莓 <i>Fragaria orientalis</i>	0.094
(2 895, 2 995]	青海云杉 <i>Picea crassifolia</i>	0.759	银露梅 <i>Dasiphora glabra</i>	1.179	藁草 <i>Carex</i> spp.	0.224
	圆柏 <i>Juniperus chinensis</i>	0.142	金露梅 <i>Dasiphora fruticosa</i>	0.229	珠芽蓼 <i>Bistorta vivipara</i>	0.223
			日本小檗 <i>Berberis thunbergii</i>	0.202	如意草 <i>Viola arcuata</i>	0.140
(2 995, 3 095]	圆柏 <i>Juniperus chinensis</i>	0.693	金露梅 <i>Dasiphora fruticosa</i>	0.539	珠芽蓼 <i>Bistorta vivipara</i>	0.284
	青海云杉 <i>Picea crassifolia</i>	0.085	高山绣线菊 <i>Spiraea alpina</i>	0.496	火絨草 <i>Leontopodium leontopodioides</i>	0.256
	秦柳 <i>Salix chingiana</i>	0.072	鬼箭锦鸡儿 <i>Caragana jubata</i>	0.255	如意草 <i>Viola arcuata</i>	0.129

¹⁾ —: 无数据 No datum.

表 4 祁连山东段不同海拔梯度下青海云杉林林下灌草植物多样性分析¹⁾
Table 4 Diversity analysis of shrubs and herbs under *Picea crassifolia* Kom. forests at different altitudinal gradients in the eastern Qilian Mountains¹⁾

海拔梯度/m Altitudinal gradient	灌木层多样性指数 Diversity index of shrub layer				草本层多样性指数 Diversity index of herb layer			
	<i>S</i>	<i>D</i>	<i>H'</i>	<i>J</i>	<i>S</i>	<i>D</i>	<i>H'</i>	<i>J</i>
(2 595, 2 695]	3.00±0.50Ab	0.46±0.03Cd	0.60±0.02Bc	0.88±0.05Aa	18.50±4.95Aab	0.67±0.06Bc	1.63±0.07Bb	0.63±0.05ABc
(2 695, 2 795]	3.20±0.45Ab	0.60±0.08BCbc	0.92±0.21ABbc	0.85±0.17Aa	20.50±1.29Aa	0.81±0.06Aab	2.20±0.14Aa	0.69±0.06Bbc
(2 795, 2 895]	4.20±1.09Aa	0.76±0.04Aa	1.32±0.04Aa	0.92±0.09Aa	15.00±1.41ABb	0.84±0.04Aa	2.06±0.10Aa	0.83±0.01Aa
(2 895, 2 995]	3.60±0.55Aab	0.64±0.04ABb	1.11±0.37ABab	0.89±0.07Aa	18.33±0.58Aab	0.79±0.05ABab	2.12±0.06Aa	0.75±0.01ABab
(2 995, 3 095]	3.00±0.50Ab	0.54±0.04BCcd	1.20±0.14ABab	0.98±0.04Aa	9.50±2.12Bc	0.73±0.02ABbc	1.53±0.03Bb	0.82±0.05Aa

¹⁾ *S*: 物种丰富度指数 Species richness index; *D*: Simpson 优势度指数 Simpson dominance index; *H'*: Shannon-Wiener 多样性指数 Shannon-Wiener diversity index; *J*: Pielou 均匀度指数 Pielou evenness index. 同列中不同大写和小写字母分别表示在不同海拔梯度林地间差异极显著 ($P<0.01$) 和显著 ($P<0.05$) Different uppercases and lowercases in the same column indicate the extremely significant ($P<0.01$) and significant ($P<0.05$) differences between forests at different altitudinal gradients, respectively.

无显著 ($P>0.05$) 差异。草本层的 *D* 值随海拔升高呈先增高后降低的趋势,且海拔梯度(2 795, 2 895] m 的 *D* 值分别极显著和显著高于海拔梯度(2 595, 2 695] 和(2 995, 3 095] m;5 个海拔梯度林地中,海拔梯度(2 695, 2 795] m 的 *S* 值和 *H'* 值最高,海拔梯度(2 795, 2 895] m 的 *J* 值最高。

2.2.2 林下灌草植物多样性指数及海拔间的相关关系分析 林下灌木植物多样性指数及海拔间的相关性分析结果(表 5)显示:灌木层的 *D* 值、*H'* 值、*J* 值与海拔呈负相关,*S* 值与海拔呈正相关,且 *S* 值和 *J* 值与海拔间的相关性达显著水平;林下灌木层的各多样性指数间无显著相关性。

林下草本植物多样性指数及海拔间的相关性分析结果(表 6)显示:草本层的 *S* 值与海拔呈负相关,*D* 值、*H'* 值、*J* 值与海拔呈正相关,但均未达显著水平;*S* 值与 *D* 值、*H'* 值呈显著负相关,*H'* 值与 *J* 值呈显著正相关。

表 5 祁连山东段青海云杉林林下灌木植物多样性指数及海拔间的相关性分析¹⁾
Table 5 Correlation analysis of diversity indexes of shrubs under *Picea crassifolia* Kom. forest and altitude in the eastern Qilian Mountains¹⁾

指标 Index	相关系数 Correlation coefficient				
	Alt	<i>S</i>	<i>D</i>	<i>H'</i>	<i>J</i>
Alt	1.000				
<i>S</i>	0.895 *	1.000			
<i>D</i>	-0.174	-0.098	1.000		
<i>H'</i>	-0.280	-0.136	0.983	1.000	
<i>J</i>	-0.886 *	-0.852	0.451	0.495	1.000

¹⁾ Alt: 海拔 Altitude; *S*: 物种丰富度指数 Species richness index; *D*: Simpson 优势度指数 Simpson dominance index; *H'*: Shannon-Wiener 多样性指数 Shannon-Wiener diversity index; *J*: Pielou 均匀度指数 Pielou evenness index. *: $P<0.05$.

表 6 祁连山东段青海云杉林林下草本植物多样性指数及海拔间的相关性分析¹⁾
Table 6 Correlation analysis of diversity indexes of herbs under *Picea crassifolia* Kom. forest and altitude in the eastern Qilian Mountains¹⁾

指标 Index	相关系数 Correlation coefficient				
	Alt	<i>S</i>	<i>D</i>	<i>H'</i>	<i>J</i>
Alt	1.000				
<i>S</i>	-0.385	1.000			
<i>D</i>	0.316	-0.905 *	1.000		
<i>H'</i>	0.298	-0.896 *	0.999	1.000	
<i>J</i>	0.378	-0.983	0.962	0.957 *	1.000

¹⁾ Alt: 海拔 Altitude; *S*: 物种丰富度指数 Species richness index; *D*: Simpson 优势度指数 Simpson dominance index; *H'*: Shannon-Wiener 多样性指数 Shannon-Wiener diversity index; *J*: Pielou 均匀度指数 Pielou evenness index. *: $P<0.05$.

2.3 不同海拔梯度青海云杉林间的 Sørensen 相似性系数分析

通过调查不同海拔梯度青海云杉林林下共有或各自拥有的灌草植物,得到不同青海云杉林林下灌草植物的 Sørensen 相似性系数,结果见表 7。海拔梯度(2 695, 2 795] m 与(2 595, 2 695] m 林地灌草植物合计 64 种,共有植物 21 种,相似程度最高,Sørensen 相似性系数达 0.615;海拔梯度(2 795, 2 895] m 与(2 695, 2 795]、(2 595, 2 695] m 林地间的 Sørensen 相似性系数较高,分别为 0.588 和 0.580;海拔梯度(2 995, 3 095] m 与其他 4 个海拔梯度林地间的相似性均较低,尤其是与海拔梯度(2 595, 2 695] m 林地间,仅有 5 种共有植物,Sørensen 相似性系数仅为 0.213。随海拔升高,相邻海拔梯度林地间的相似性逐渐降低,以海拔梯度(2 595, 2 695] m 与(2 695, 2 795] m 间的相似性最高,海拔梯度(2 895, 2 995] m 与(2 995, 3 095] m 间的相似性最低。

表7 祁连山东段不同海拔梯度青海云杉林间的 Sørensen 相似性系数¹⁾Table 7 Sørensen similarity coefficients between *Picea crassifolia* Kom. forests at different altitudinal gradients in the eastern Qilian Mountains¹⁾

海拔梯度 Altitudinal gradient	不同海拔梯度林地间的 Sørensen 相似性系数 Sørensen similarity coefficient between forests at different altitudinal gradients				
	I	II	III	IV	V
I	1.000				
II	0.615	1.000			
III	0.580	0.588	1.000		
IV	0.541	0.533	0.469	1.000	
V	0.213	0.286	0.305	0.370	1.000

¹⁾ I: (2 595, 2 695] m; II: (2 695, 2 795] m; III: (2 795, 2 895] m; IV: (2 895, 2 995] m; V: (2 995, 3 095] m.

3 讨论和结论

3.1 海拔对青海云杉林林下灌草植物组成的影响

物种组成结构是植物群落的重要特征,随海拔变化,林下植被的物种组成、分布结构等都会因海拔形成的各种变量因子产生明显的区别^[23-25]。张入匀等^[26]的研究结果表明:物种多样性的分布格局与环境条件紧密相关,不同区域沿海拔梯度的物种多样性变化趋势存在一定差异;冯哲等^[27]通过研究木本植物幼苗的组成及数量随海拔的变化发现,不同海拔梯度的物种组成及群落结构明显不同;陈水飞等^[28]对武夷山国家公园不同海拔梯度植物群落的物种组成研究表明:不同类型植物群落随海拔升高,样地内植物科、属、种的数量总体呈减少的趋势。本研究,蔷薇科植物种数在5个海拔梯度林地灌木层中均最多,是每个林地的重要组成部分,说明蔷薇科植物在5个海拔梯度都具有较强的适应性;其中,除海拔梯度(2 995, 3 095] m外,蔷薇科的小叶金露梅在各林地类型中均有分布,并在海拔梯度(2 695, 2 795] m属于灌木层的优势种,说明小叶金露梅对高海拔的适应能力较强,是本调查区域的适生种和自然生长最广的灌木树种。5个海拔梯度林地的草本层植物较灌木层丰富,其中毛茛科的草本植物种类最多,菊科、豆科和蔷薇科次之,但这4科种数之和在草本植物总种数中占比不足一半。因生境条件不同,蝶形花科(Papilionaceae)、杜鹃花科、虎耳草科(Saxifragaceae)、苦苣苔科(Gesneriaceae)、木贼科(Equisetaceae)、茜草科(Rubiaceae)、瑞香科(Thymelaeaceae)、荨麻科(Urticaceae)、罂粟科

(Papaveraceae)、鸢尾科(Iridaceae)均只有1种,表明群落调查中的草本植物基本为伴生种或偶见种,物种分布随机,没有形成明显的竞争关系。蓼科(Polygonaceae)有掌叶大黄(*Rheum palmatum* Linn.)、珠芽蓼、线叶篇蓄(*Polygonum paronychioides* C. A. Mey. ex Hohen.)3种,其中珠芽蓼在5个海拔梯度林地中皆有分布且重要值均较大;此外,莎草科(Cyperaceae)的薹草在4个海拔梯度林地中均出现且重要值均较大;因此珠芽蓼和薹草为5个海拔梯度林地草本植物的优势种。本研究还发现,不管是低海拔的矮化圆柏-青海云杉混交林,还是高海拔的青海云杉-圆柏混交林和圆柏-青海云杉矮林,堇菜科(Violaceae)的如意草(*Viola arcuata* Blume)均占据一席之地,表明如意草可以适应不同海拔梯度的林下生态环境,成为该研究区域不同海拔梯度下的重要组成部分。

3.2 海拔对青海云杉林林下灌草植物多样性的影响

由于调查样地的总体海拔范围不够大,因此没有形成直观的植被垂直带谱,在不同海拔梯度上植被的结构和组成差异也较大,其中,个体多度和所选样地的生境条件是差异形成的重要因子^[29],因此不同林地类型的灌木层和草本层植物多样性指数存在一定差异^[30]。杨壹等^[31]通过对贺兰山不同海拔典型植被的多样性研究表明:不同海拔区域植物多样性总体存在显著($P < 0.05$)差异且具有明显的垂直分布格局。另有多项研究表明:灌木层和草本层的物种丰富度指数、Pielou 均匀度指数、Simpson 优势度指数和 Shannon-Wiener 多样性指数随着海拔增加呈单峰变化趋势,符合物种多样性垂直分布的“中间高度膨胀”理论^[32-34]。本研究灌木层的物种丰富度指数、Simpson 优势度指数和 Shannon-Wiener 多样性指数及草本层的 Simpson 优势度指数对海拔的响应结果也与之一致,呈现先升高后降低的变化趋势。本研究中物种多样性在草本层间的差异较小,而在灌木层间的差异显著,总体上灌木层的多样性指数低于草本层,且不同林地灌草层之间的多样性指数差异较明显;灌木层物种多样性受海拔影响较大,草本层物种多样性则受影响较小,这可能是由于海拔升高会导致温度降低,不利于灌木植物的生长发育,而草本层种类多为耐寒植物,适应能力强,因此其多样性指数变化较小,这与杨志汝等^[35]对秦岭太白山巴山冷杉(*Abies fargesii* Franch.)天然林群落物种多样性的研

究结果一致。草本层植物物种多样性表现为海拔梯度(2 695, 2 795] m 的物种丰富度指数和 Shannon-Wiener 多样性指数高于其他海拔梯度,海拔梯度(2 795, 2 895] m 的 Simpson 优势度指数和 Pielou 均匀度指数高于其他海拔梯度,且 Simpson 优势度指数随海拔升高呈先升高后降低的趋势;不同海拔梯度灌木层的 Pielou 均匀度指数没有显著差异,但草本层差异较大,由于乔木树种及一些高大的灌木形成的林冠层较高,灌木层植物可获得足够的生存资源(如降水、光照等),故其 Pielou 均匀度指数差异不大,但林冠对林下草本植物产生遮蔽作用,林内光照强度减弱且林冠会截留部分降水,因此草本植物间存在种间竞争,草本层植物多样性会相应降低,导致草本层在不同海拔梯度的 Pielou 均匀度指数产生差异;另一方面,不同草本层植物种类对生存空间有不同的需求,如光照、水分、土壤等,生存空间不同导致 Pielou 均匀度指数差异较大。本研究中,不同海拔梯度林地间 Sørensen 相似性系数随海拔升高逐渐降低,原因是随海拔升高,林地生境会发生很大改变,青海云杉林林下灌草植物对生境条件更加敏感,物种的稳定性、抗干扰能力降低,从而导致各林地的植物种类较容易发生变化。

3.3 结论

祁连山东段青海云杉林林下灌草植物物种组成丰富,共有 24 科 50 属 79 种,灌木层物种多样性受海拔影响显著,草本层物种多样性受海拔影响不明显,灌木层的物种丰富度指数、Simpson 优势度指数和 Shannon-Wiener 多样性指数整体随海拔升高呈单峰变化趋势,符合物种多样性垂直分布的“中间高度膨胀”理论。随着海拔升高,相邻海拔梯度林地间的相似性逐渐降低,以海拔梯度(2 595, 2 695] m 与(2 695, 2 795] m 林地间的相似性最高,海拔梯度(2 895, 2 995] m 与(2 995, 3 095] m 林地间的相似性最低。海拔梯度作为综合性生态变量,集结了很多不同的环境因子(如土壤腐殖质含量、水分条件、温度等),因此,在今后的工作中可在环境因子方面进行深入研究。

参考文献:

- [1] 周永奇. 杉木生态公益林林分结构与林下植被多样性研究:以福寿林场为例[D]. 长沙:中南林业科技大学, 2014: 6-9.
- [2] 赖承义, 左舒翟, 任引. 不同生态修复措施和环境因素对亚热带红壤区针叶纯林坡面水土保持功能的影响[J]. 生态学报, 2021, 41(12): 4913-4922.
- [3] SU X P, WANG M H, HUANG Z Q, et al. Forest understorey vegetation: colonization and the availability and heterogeneity of resources[J]. *Forests*, 2019, 10: 944.
- [4] WAGNER S, FISCHER H, HUTH F. Canopy effects on vegetation caused by harvesting and regeneration treatments[J]. *European Journal of Forest Research*, 2011, 130: 17-40.
- [5] 李婷婷, 唐永彬, 周润惠, 等. 云顶山不同人工林林下植物多样性及其与土壤理化性质的关系[J]. 生态学报, 2021, 41(3): 1168-1177.
- [6] 张博文, 秦娟, 任忠明, 等. 坡向对北亚热带区马尾松纯林及不同针阔混交林型林下植物多样性的影响[J]. 生态环境学报, 2022, 31(6): 1091-1100.
- [7] 李梦佳, 何中声, 江蓝, 等. 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[J]. 生态学报, 2021, 41(3): 1148-1157.
- [8] 崔宁洁, 陈小红, 刘洋, 等. 不同林龄马尾松人工林林下灌木和草本多样性[J]. 生态学报, 2014, 34(15): 4313-4323.
- [9] 舒韦维, 卢立华, 李华, 等. 林分密度对杉木人工林林下植被和土壤性质的影响[J]. 生态学报, 2021, 41(11): 4521-4530.
- [10] 朱媛君, 杨晓晖, 时忠杰, 等. 林分因子对张北杨树人工林林下草本层物种多样性的影响[J]. 生态学杂志, 2018, 37(10): 2869-2879.
- [11] 邓清月, 张晓龙, 牛俊杰, 等. 晋西北饮马池山植物群落物种多样性沿海拔梯度的变化[J]. 生态环境学报, 2019, 28(5): 865-872.
- [12] 何远政, 黄文达, 赵昕, 等. 气候变化对植物多样性的影响研究综述[J]. 中国沙漠, 2021, 41(1): 59-66.
- [13] 董雪, 李永华, 辛智鸣, 等. 河西走廊西段荒漠戈壁灌木群落物种多样性的海拔格局[J]. 林业科学, 2021, 57(2): 168-178.
- [14] 许涵, 李意德, 骆士寿, 等. 海南尖峰岭不同热带雨林类型与物种多样性变化关联的环境因子[J]. 植物生态学报, 2013, 37(1): 26-36.
- [15] 王德君, 韩国君, 高智辉, 等. 甘肃莲花山植物群落物种多样性对海拔梯度的响应[J]. 西北林学院学报, 2020, 35(6): 96-102.
- [16] 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.
- [17] 姜祖扬, 覃业辉, 刘季, 等. 海拔和林分密度对热带雨林林下植物多样性的影响[J]. 生态学杂志, 2023, 42(5): 1049-1055.
- [18] 张旭, 涂阳新, 刘延惠, 等. 雷公山森林群落植物多样性对海拔高度的响应[J]. 贵州林业科技, 2022, 50(4): 44-49, 27.
- [19] 王金兰, 曹文侠, 张德罡, 等. 东祁连山高寒杜鹃灌丛群落结构和物种多样性对海拔梯度的响应[J]. 草原与草坪, 2019, 39(5): 1-9.
- [20] 刘佳茹, 赵军, 沈思民, 等. 基于 SRP 概念模型的祁连山区生态脆弱性评价[J]. 干旱区地理, 2020, 43(6): 1573-

- 1582.
- [21] 卢训令, 丁圣彦, 游莉, 等. 伏牛山自然保护区森林冠层结构对林下植被特征的影响[J]. 生态学报, 2013, 33(15): 4715-4723.
- [22] 李波, 赵阳, 齐瑞, 等. 海拔梯度对甘肃洮河国家级自然保护区紫果云杉林下草本植物多样性的影响[J]. 西北林学院学报, 2022, 37(2): 43-50.
- [23] YANG M Y, LU Z, FAN Z Y, et al. Distribution of non-native plant species along elevation gradients in a protected area in the eastern Himalayas, China[J]. Alpine Botany, 2018, 128: 169-178.
- [24] AI Y Y, LIU Q, HU H X, et al. Terrestrial and epiphytic orchids exhibit different diversity and distribution patterns along an elevation gradient of Mt. Victoria, Myanmar[J]. Global Ecology and Conservation, 2023, 42: e02408.
- [25] SHARMA N, KALA C P. Patterns in plant species diversity along the altitudinal gradient in Dhauladhar mountain range of the North-West Himalaya in India[J]. Trees, Forests and People, 2022, 7: 100196.
- [26] 张入匀, 李艳朋, 倪云龙, 等. 鼎湖山亚热带常绿阔叶林叶功能性状沿群落垂直层次的种内变异[J]. 生物多样性, 2019, 27(12): 1279-1290.
- [27] 冯哲, 乌俊杰, 于小莉, 等. 云南苍山西坡森林木本植物幼苗组成的海拔梯度格局及其年际动态[J]. 西部林业科学, 2023, 52(4): 161-167.
- [28] 陈水飞, 徐辉, 林文俊, 等. 武夷山国家公园植物群落物种多样性沿海拔梯度的变化分析[J]. 植物资源与环境学报, 2023, 32(1): 1-9.
- [29] 周华坤, 李珊, 孙建, 等. 三江源区高寒草甸植物群落与土壤理化性质沿海拔梯度的变化特征[J]. 草地学报, 2023, 31(6): 1735-1743.
- [30] 云慧雅, 毕华兴, 焦振寰, 等. 晋西黄土区不同林分类型和密度条件下林下灌草组成及多样性特征[J]. 浙江农林大学学报, 2023, 40(3): 569-578.
- [31] 杨壹, 邱开阳, 李静尧, 等. 贺兰山东坡典型植物群落多样性垂直分布特征与土壤因子的关系[J]. 生态学报, 2023, 43(12): 4995-5004.
- [32] 丛明旸, 李永坤, 阳文静, 等. 镜泊湖世界地质公园火山口地下森林苔藓植物多样性[J]. 植物研究, 2023, 43(3): 361-369.
- [33] 吴红宝, 水宏伟, 胡国铮, 等. 海拔对藏北高寒草地物种多样性和生物量的影响[J]. 生态环境学报, 2019, 28(6): 1071-1079.
- [34] 仝玉琴, 王军利, 韩振江. 秦岭中段锐齿槲栎天然次生林群落的物种多样性研究[J]. 西北农林科技大学学报(自然科学版), 2019, 47(2): 69-78.
- [35] 杨志汝, 张建鹏. 秦岭太白山巴山冷杉天然林群落物种多样性[J]. 西北林学院学报, 2023, 38(2): 140-146.

(责任编辑: 吴蕊夷)

《植物资源与环境学报》征稿简则

1. 《植物资源与环境学报》是江苏省中国科学院植物研究所和江苏省植物学会联合主办的学术期刊, 1992年创刊, 国内外公开发行人。系全国中文核心期刊、中国科技核心期刊和CSCD核心期刊。连续荣获多届“江苏省优秀期刊”奖; 1997年荣获“全国优秀科技期刊三等奖”和华东地区优秀期刊奖; 2001年入选“中国期刊方阵”; 2002年和2004年入选“江苏省期刊方阵”; 2013年荣获“首届江苏省新闻出版政府奖·报刊奖”及江苏省精品科技期刊项目; 2015年荣获“第六届江苏省科技期刊金马奖·精品期刊奖”; 2015年至2023年均荣获江苏省精品科技期刊项目; 2021年还荣获“第三届江苏省新闻出版政府奖·期刊奖提名奖”。本刊是BA(预评)、CAB、BCI、JST、中国生物学文摘、中国环境科学文摘、中国科学引文数据库、万方数据——数字化期刊群、中国学术期刊(光盘版)、超星期刊域出版平台和中文科技期刊数据库等国内外著名刊库的来源期刊。主要刊登植物资源的考察、开发、利用和物种保护, 自然保护区与植物园的建设和管理, 植物在保护和美化生态环境中的作用, 环境对植物的影响以及与植物资源和植物环境有关学科领域的原始研究论文、研究简报和综述等, 不登译稿。
2. 主要读者对象为植物学、生态学、自然地理学以及农、林、园艺、医药、食品、轻工、自然保护和环境保护等领域的科研、教学、技术人员及决策者。
3. 来稿要求:
 - 1) 文稿应论点明确, 数据可靠, 文字精炼, 做到齐、清、定。
 - 2) 来稿请使用规范汉字, 标点符号使用准确, 连字号和范围号及减号、键号须分清。
 - 3) 论文书写顺序为: 题目, 作者姓名, 作者单位, 所在地区及邮政编码, 中文摘要, 关键词(6个以内), 英文摘要(包括英文题目、作者姓名、单位、地区及邮编、摘要内容、关键词等, 英文摘要内容一般与中文摘要一致), 正文, 参考文献。

(下转第79页 Continued on page 79)