

## 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

李 波<sup>1,2,3</sup>, 赵 阳<sup>2,3</sup>, 齐 瑞<sup>2,3</sup>, 曹家豪<sup>2,3</sup>, 陈学龙<sup>2,3</sup>, 刘 婷<sup>2,3</sup>,  
高本强<sup>2,3</sup>, 单立山<sup>1\*</sup>

(1. 甘肃农业大学 林学院, 甘肃 兰州 730070; 2. 甘肃省白龙江林业管理局 林业科学研究所, 甘肃 兰州 730070;

3. 甘肃白龙江森林生态系统国家定位观测研究站, 甘肃 舟曲 746300)

**摘 要:**为揭示紫果云杉天然林群落草本植物对海拔梯度的响应,以甘肃洮河国家级自然保护区的紫果云杉天然林为对象,调查分析林下草本植物的物种组成及物种多样性。结果表明,1)洮河国家级自然保护区紫果云杉天然林群落下共有草本植物 57 种,隶属于 26 科 48 属,以菊科(Asteraceae)、毛茛科(Ranunculaceae)、玄参科(Scrophulariaceae)、禾本科(Poaceae)植物为主,且重要值均较大;2)林下草本植物的丰富度指数( $R$ )、Shannon-Wiener 多样性指数( $H$ )、Simpson 优势度指数( $D$ )以及 Pielou 均匀度指数( $J$ )均随海拔升高呈现先升高后降低的单峰曲线变化规律,并在海拔 2 915 m 处达到最大;3)不同海拔林下草本植物群落相似系数较低,且随海拔差异的增大,相似性系数逐渐减小,相邻海拔之间随着海拔的升高表现出不规律的变化;4)海拔与林下草本物种丰富度呈显著负相关关系( $P < 0.05$ ),与 Shannon-Wiener 多样性、Simpson 优势度、Pielou 均匀度均呈负相关关系。综合研究得出,洮河自然保护区天然紫果云杉林下,草本物种多样性受海拔影响显著。

**关键词:**甘肃洮河国家级自然保护区;紫果云杉;草本植物;物种多样性

**中图分类号:**S791.18

**文献标志码:**A

**文章编号:**1001-7461(2022)02-0043-08

## Effects of Altitude Gradient on Understory Herbdiversity of *Picea purpurea* Forest in the Taohe National Nature Reserve, Gansu Province

LI Bo<sup>1,2,3</sup>, ZHAO Yang<sup>2,3</sup>, QI Rui<sup>2,3</sup>, CAO Jia-hao<sup>2,3</sup>, CHEN Xue-long<sup>2,3</sup>, LIU Ting<sup>2,3</sup>,  
GAO Ben-qiang<sup>2,3</sup>, SHAN Li-shan<sup>1\*</sup>

(1. College of Forestry, Gansu Agricultural University, Lanzhou 730070, Gansu, China;

2. Research Institute of Forestry, Bailongjiang Forestry Administration, Lanzhou 730070, Gansu, China;

3. Gansu Bailongjiang National Forest Ecosystem Research Station, Zhouqu 746300, Gansu, China)

**Abstract:** In order to reveal the response of understory herbaceous plants to altitude gradient in natural *Picea purpurea* community occurring in Taohe National Nature Reserve of Gansu Province, the species composition and diversity of understory herbaceous layer were analyzed. The results showed that 1) there were 57 species of herbaceous plants in the natural community of *P. purpurea*, belonging to 48 genera, 26 families, and the main plants were Asteraceae, Ranunculaceae, Scrophulariaceae and Poaceae, with high importance values. 2) The species richness index, Shannon-Wiener diversity index, Simpson dominance index and Pielou evenness index of herb layer plants reached the maximum values at the altitude of 2 915 m. All indexes presented single peak curves that increased at first and then dropped down with the increase of altitude. 3) The similarity coefficient of understory herb layer community at different altitudes was lower. At

收稿日期:2021-03-01 修回日期:2021-08-31

基金项目:甘肃省 2020 年林业科技创新与国际合作项目(KJCX202001);甘肃省 2019 年林业科技创新与国际合作项目(KJCX201909)。

第一作者:李 波,工程师。研究方向:森林生态学。E-mail:314541046@qq.com

\* 通信作者:单立山,教授。研究方向:荒漠植物根系生态学。E-mail:shanls@gsau.edu.cn

the same time, the similarity coefficient decreased with the increase of altitude interval. 4) There was a significant negative correlation between altitude and herb species richness index ( $R$ ) ( $P < 0.05$ ), and a negative correlation between altitude and Shannon-Wiener diversity index ( $H$ ), Simpson dominance index ( $D$ ), Pielou evenness index ( $J$ ). These results indicated that diversity of herbaceous species was significantly affected by altitude in the natural forest of *P. purpurea* in Taohe Nature Reserve.

**Key words:** Gansu Taohe National Nature Reserve; *Picea purpurea*; herbaceous plant; species diversity

物种多样性是认识群落物种组成、结构与功能状态的基础<sup>[1-2]</sup>,同时也是研究生物多样性的基础<sup>[3]</sup>,一直是生态学中研究的热点。一个群落具有较高的物种多样性,被认为该群落具有较高的风险抵抗能力和较强的生态系统稳定性<sup>[4]</sup>。草本植物作为森林生态系统的重要组成部分,其物种数在整个群落丰富度中通常占据主导地位,并制约着营养物质循环、生境异质性等诸多生态过程<sup>[5]</sup>,对维持森林生态系统的稳定性有着重要作用<sup>[6]</sup>。海拔梯度综合了水分、温度、光照、土壤和人类活动等多因素变化,在众多因子梯度中,被认为是影响物种多样性的决定因素之一<sup>[7]</sup>。因此,研究海拔对草本植物多样性的影响,对了解植物资源的生态环境现状,认识群落生态特征和保护生物多样性具有重要意义。

紫果云杉(*Picea purpurea*)为喜阴湿、耐寒的常绿针叶乔木,源于丽江云杉(*P. likiangensis*)和青杆(*P. wilsonii*)的自然同倍体杂交,是我国特有树种,占据了青藏高原东北部高海拔的极端生境<sup>[8]</sup>,为黄河上游地区主要的建群树种,在涵养水源、防止水土流失、保育生物多样性方面发挥着无可替代的作用<sup>[9]</sup>。紫果云杉天然林下群落草本物种多样性高,因此草本植物多样性很大程度上决定着其生态系统多样性的高低<sup>[10]</sup>,同时,草本植物还能通过与乔木幼苗之间的资源竞争影响乔木种苗的存活、生长及发育等<sup>[11]</sup>。截至目前,关于紫果云杉的研究多存在于群落结构<sup>[12]</sup>、种群结构<sup>[9,13]</sup>及繁育<sup>[14-15]</sup>等方面,而有关紫果云杉群落草本植物物种多样性研究鲜见报道。为此,本研究以洮河国家级自然保护区的紫果云杉天然林为研究对象,通过调查各海拔梯度下草本植物的物种组成,分析林下草本植物物种多样性对海拔梯度的响应,为洮河国家级自然保护区紫果云杉天然林群落生物多样性的保护和可持续发展提供理论依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 研究区概况

洮河国家级自然保护区位于甘肃省南部,青藏高原的东北边缘,地理位置为  $102^{\circ}46'02''-103^{\circ}44'40''\text{E}$ ,  $34^{\circ}10'-34^{\circ}42'\text{N}$ 。2009 年晋升国家级自然保

护区,是森林生态系统类型自然保护区,主要保护对象为天然原始山地寒温性暗针叶林及珍稀野生动植物资源及其栖息地。保护区总体地势西南高,东北低,并由西南向东北倾斜。属于高原大陆性季风气候,年平均气温  $5.1\sim 5.8^{\circ}\text{C}$ ,年日照时数  $2\,186\sim 2\,364\text{ h}$ ,年均降水量  $581\sim 712\text{ mm}$ ,年均蒸发量  $1\,080\sim 1\,375\text{ mm}$ 。保护区植被属青藏高原植被区的森林草原地带,植被在各坡向分布不同,阴坡、半阴坡以云杉(*Picea asperata*)林、冷杉(*Abies fabri*)林、落叶松(*Larix komarovii*)林、油松(*Pinus tabulaeformis*)林等森林植被为主,阳坡以灌草植物为主。

### 1.2 样地调查方法

2020 年 6 月,在对洮河国家级自然保护区全面勘察的基础上,选择紫果云杉集中分布区域为研究区,按照紫果云杉天然分布海拔梯度在海拔  $2\,835$ 、 $2\,915$ 、 $2\,955$ 、 $3\,028$ 、 $3\,120\text{ m}$  处设置 5 块  $20\text{ m}\times 30\text{ m}$  的标准地,对标准地  $\text{DBH}>3\text{ cm}$  的林木进行每木检尺,记录海拔、经纬度、树高、冠幅及健康状况等基本情况。在标准地的四周及中心位置各设置 1 个  $1\text{ m}\times 1\text{ m}$  的草本样方,并开展草本植物群落调查工作,记录各草本样方的物种名称、高度、盖度、株(丛)数(密度)。样地概况见表 1。

### 1.3 分析方法

基于林下草本植物调查资料,计算样方中不同物种的相对频度(某个种在样方中出现的次数占样方中所有种出现的总数)、相对盖度(某个种的盖度占有所有种的总盖度)、相对多度(某个种个数占有所有种的总个数),依据以上指标计算各物种的重要值,并计算群落  $\alpha$  多样性指数和群落相似性系数<sup>[16]</sup>。

计算公式如下。

(1)重要值

$$I_v = (\text{相对多度} + \text{相对盖度} + \text{相对频度}) / 3$$

(2) $\alpha$ 多样性指数

丰富度指数( $R$ )

$$R = S \quad (1)$$

Shannon-Wiener 多样性指数( $H$ )

$$H = - \sum_{i=1}^S P_i \ln P_i \quad (2)$$

Simpson 优势度指数( $D$ )

$$D=1-\sum_{i=1}^s P_i^2 \tag{3}$$

Pielou 均匀度指数( $J$ )

$$J=H/\ln S \tag{4}$$

式中: $S$  为样方内的所有物种数; $P_i$  为种  $i$  的相对重要值。

(3)群落相似性系数:

$$q=\frac{c}{a+b-c} \tag{5}$$

式中: $q$  为群落相似性系数; $a$  和  $b$  分别代表 2 个群落的物种总数; $c$  代表 2 个样方共有的物种数。当  $0 < q \leq 0.25$  时,为极不相似; $0.25 < q \leq 0.5$  时,为中等不相似; $0.5 < q \leq 0.75$  时,为中等相似; $0.75 < q \leq 1$  时,为极相似<sup>[17]</sup>。

表 1 样地基本信息

Table 1 Basic information of the research sites

样地号	海拔/m	坡向	坡度/(°)	平均胸径/cm	平均高度/m	主要树种	干扰程度
1	2 835	NW	11	16.2	9.1	紫果云杉、秦岭柳	中度
2	2 915	NE	24	21.9	12.3	紫果云杉、红桦	轻度
3	2 955	NE	30	11.0	9.2	紫果云杉、祁连圆柏	轻度
4	3 028	NE	31	15.3	11.2	紫果云杉、岷江冷杉	轻微
5	3 120	NW	30	10.3	8.7	紫果云杉、祁连圆柏	轻微

1.4 数据处理

本研究使用 SPSS 19.0 进行单因素方差分析(one-way ANOVA)、多重比较(LSD)和 Pearson 相关性分析对数据进行统计分析,用 Origin 软件作图。

2 结果与分析

2.1 紫果云杉天然林林下草本物种组成特征

2.1.1 物种组成 调查结果表明,洮河国家级自然保护区紫果云杉天然林林下共有草本植物 57 种,隶属于 26 科 48 属,其中菊科植物最多,为 11 种,其次毛茛科与玄参科各有 6 种,3 科之和占调查草本植物总种数的 38.3%。由图 1 可得,紫果云杉天然林林下草本植物物种数随海拔梯度的升高呈逐渐减少趋势,2 835 m 和 2 915 m 物种数最多,3 120 m 物种数最少,2 835 m 和 2 915 m 物种数是 3 120 m 的 1.8 倍。其中 2 835 m 有草本植物 21 科 33 属 34 种,以菊科、毛茛科物种最多,分别有 6、4 种,占该梯度物种数的 17.6%和 11.8%;2 915 m 有草本植物 22 科 30 属 34 种,菊科、毛茛科、玄参科物种数最多,各有 7、3、3 种,分别占比 20.6%、8.8%、8.8%;2 955 m 有草本植物 16 科 27 属 30 种,菊科、毛茛科物种数最多,各有 7、4 种,分别占比 23.3%、13.3%;3 028 m 有草本植物 16 科 26 属 29 种,菊科、毛茛科物种数最多,各有 6、4 种,分别占比 20.7%、13.8%;3 120 m 有草本植物 11 科 18 属 19 种,菊科物种数最多,有 5 种,占比 26.3%。分析得出:菊科植物在各海拔均占有较大比重,为草本植物的第 1 优势种,其次为毛茛科。

2.1.2 物种重要值分析 重要值是衡量物种在群落中重要性的指标,可综合评估物种在群落里的地位及作用<sup>[18]</sup>。从表 2 得出,不同海拔梯度草本植物

物种组成差异较大,海拔 2 835 m 主要优势种为早熟禾(*Poa annua*)、珠芽蓼(*Polygonum viviparum*)、凹头苋(*Amaranthus blitum*),重要值分别为 12.60、8.56、4.79;2 915 m 主要优势种为早熟禾、东方草莓(*Fragaria orientalis*)、高乌头(*Aconitum sinomontanum*),重要值分别为 15.83、9.57、6.79;2 955 m 主要优势种为早熟禾、总状橐吾(*Ligularia botryodes*)、革叶华蟹甲(*Sinacalia caroli*),重要值分别为 15.79、7.55、7.28;3 028 m 主要优势种为早熟禾、珠芽蓼、长柄唐松草(*Thalictrum przewalskii*),重要值分别为 27.51、5.01、4.47;3 120 m 主要优势种为早熟禾、凹头苋、东方草莓,重要值分别为 15.71、10.15、8.30。分析发现,5 个海拔梯度均出现的早熟禾、珠芽蓼、东方草莓、长柄唐松草、川赤芍(*Paeonia veitchii*)、草地风毛菊(*Saussurea amara*)、乳白香青(*Anaphalis lactea*)、高山露珠草(*Circaea alpina*)等 8 种植物为紫果云杉群落林下

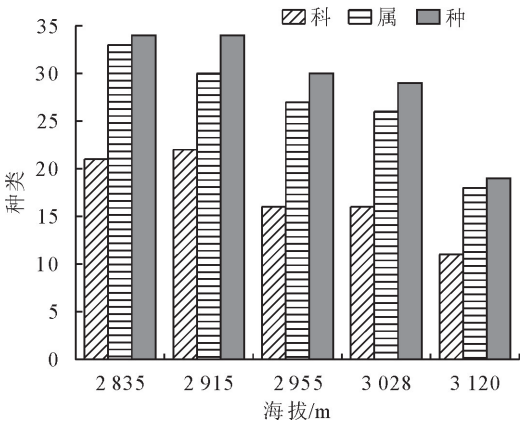


图 1 不同海拔紫果云杉天然林林下草本植物物种组成  
Fig. 1 Species composition of herbaceous plants under *Picea purpurea* natural forest at different altitudes

表 2 不同海拔紫果云杉天然林林下草本植物重要值  
Table 2 Important values of herbaceous plants under *P. purpurea* natural forest at different altitudes

物种	海拔/m					物种	海拔/m				
	2 835	2 915	2 955	3 028	3 120		2 835	2 915	2 955	3 028	3 120
早熟禾 <i>Poa annua</i>	12.60	15.83	15.79	27.51	15.71	紫花碎米荠 <i>Cardamine tangutorum</i>	1.47	1.45	2.51	1.02	
凹头苋 <i>Amaranthus blitum</i>	8.56	1.36	—	—	10.15	羌活 <i>Notopterygium incisum</i>	1.26	4.96	1.97	—	—
珠芽蓼 <i>Polygonum viviparum</i>	4.79	5.43	4.23	5.01	7.06	高山露珠草 <i>Circaea alpina</i>	1.01	1.38	2.19	2.03	5.77
黄芩 <i>Scutellaria baicalensis</i>	4.59	—	—	—	—	甘青老鹳草 <i>Geranium pylzowianum</i>	0.95	—	—	—	—
高原天名精 <i>Carpesium lipskyi</i>	4.50	—	—	2.76	—	蛛毛蟹甲草 <i>Parasene-cio roborowskii</i>	0.76	—	—	2.00	—
东方草莓 <i>Fragaria orientalis</i>	4.44	9.57	4.64	1.99	8.30	高乌头 <i>Aconitum sino-montanum</i>	—	6.79	2.78	—	—
扭旋马先蒿 <i>Pedicularis torta</i>	3.89	—	—	—	—	总状橐吾 <i>Ligularia botrycides</i>	—	2.79	7.55	2.22	—
小花草玉梅 <i>Anemone rivularis</i> var. <i>flore-minore</i>	3.41	—	—	3.42	—	美观马先蒿 <i>Pedicularis decora</i>	—	2.39	—	—	—
长柄唐松草 <i>Thalic-trum przewalskii</i>	3.28	3.69	3.65	4.47	4.14	过路黄 <i>Lysimachia christinae</i>	—	2.21	—	—	—
轮叶黄精 <i>Polygonatum verticillatum</i>	2.96	1.45	2.78	2.76	—	林猪殃殃 <i>Galium paradoxum</i>	—	2.06	5.32	3.87	—
甘青蒿 <i>Artemisia tangutica</i>	2.88	—	—	—	—	酢浆草 <i>Oxalis corniculata</i>	—	1.91	3.11	—	—
双花堇菜 <i>Viola biflora</i>	2.87	2.69	1.08	2.18	—	柔毛金腰 <i>Chrysosple-nium pilosum</i> var. <i>valdepilosum</i>	—	1.82	1.16	—	3.54
红直瓣牙菜 <i>Swertia erythrosticta</i>	2.86	1.67	2.01	—	2.78	柳兰 <i>Epilobium angus-tifolium</i>	—	1.71	—	—	—
草地风毛菊 <i>Saussurea amara</i>	2.85	3.74	1.12	4.04	3.25	囊瓣芹 <i>Pternopetalum davidii</i>	—	1.55	—	—	—
长籽柳叶菜 <i>Epilobium pyrricholophum</i>	2.64	3.37	—	1.02	5.41	单叶细辛 <i>Asarum himalaicum</i>	—	1.53	—	—	—
细毛拉拉藤 <i>Galium pusillosetosum</i>	2.40	1.72	1.21	1.40	—	少花冷水花 <i>Pilea pauciflora</i>	—	1.49	—	—	—
林生茜草 <i>Rubia sylvatica</i>	2.37	2.47	2.13	3.85	—	短唇马先蒿 <i>Pedicu-laris brevilabris</i>	—	1.10	—	—	—
川赤芍 <i>Paeonia veitchii</i>	2.21	2.10	2.35	2.82	2.50	四川婆婆纳 <i>Veronica szechuanica</i>	—	1.07	—	—	—
乳白香青 <i>Anaphalis lactea</i>	2.14	0.86	1.25	1.55	4.67	革叶华蟹甲 <i>Sinacalia caroli</i>	—	—	7.28	—	—
毛茛苳 <i>Draba eriopoda</i>	2.14	—	—	—	—	假升麻 <i>Aruncus sylvester</i>	—	—	5.45	2.85	3.08
掌叶橐吾 <i>Ligularia przewalskii</i>	2.13	2.61	—	—	4.41	大耳叶风毛菊 <i>Saussurea macrota</i>	—	—	2.96	2.49	3.48
秦艽 <i>Gentiana macrophylla</i>	1.82	—	—	—	—	肾叶金腰 <i>Chrysosple-nium griffithii</i>	—	—	2.81	—	—
莛子蕨 <i>Triosteum pin-natifidum</i>	1.82	2.26	—	2.51	—	硕大马先蒿 <i>Pedicularis ingens</i>	—	—	2.01	3.08	—
小微孔草 <i>Microula younghusbandii</i>	1.80	1.33	—	—	—	独活 <i>Heracleum hems-leyanum</i>	—	—	1.94	—	5.36
藓生马先蒿 <i>Pedicularis muscicola</i>	1.80	—	1.36	—	—	三脉紫菀 <i>Aster ageratoides</i>	—	—	1.70	—	—
疏花翠雀花 <i>Delphini-um sparsiflorum</i>	1.78	—	3.80	2.76	—	火绒草 <i>Leontopodium leontopodioides</i>	—	—	—	3.47	2.74
突脉金丝桃 <i>Hypericum przewalskii</i>	1.77	—	—	1.40	—	缬草 <i>Valeriana officinalis</i>	—	—	—	2.95	—
大果红景天 <i>Rhodiola macrocarpa</i>	1.67	1.66	1.88	1.56	4.27	梅花草 <i>Parnassia palustris</i>	—	—	—	—	3.38
椭圆叶花锚 <i>Halenia elliptica</i>	1.58	—	—	—	—	合计	100	100	100	100	100



草本植物的常见种,在这8个常见种中,优势度最大的为早熟禾,其次为东方草莓和珠芽蓼等。按科对草本植物重要值进行统计发现,菊科植物的重要值最大,在各海拔的重要值总和为86.4,其次为毛茛科,重要值总和为68,这与物种组成的分析结果一致。禾本科植物个体数量多,盖度大,其重要值总和为64,位居第3。

## 2.2 草本植物物种多样性分析

2.2.1 不同海拔紫果云杉天然林林下草本植物物种多样性特征 不同海拔紫果云杉天然林林下草本植物物种多样性指数见图2。由图2得出,紫果云杉天然林林下草本植物的物种丰富度指数( $R$ )、Shannon-Wiener 多样性指数( $H$ )、Simpson 生态优

势度指数( $D$ )、Pielou 均匀度指数( $J$ )均随海拔的升高呈先升高后降低的变化趋势,均在2955 m达到最大,分别为16.6、2.14、0.83、0.77,在3120 m最小,分别为11.2、1.74、0.74、0.72。方差分析显示,物种丰富度指数( $R$ )在海拔2835 m和2915 m差异不显著( $P>0.05$ ),但显著高于其他海拔梯度( $P<0.05$ ),2955、3028、3120 m之间彼此差异均不显著;Shannon-Wiener 多样性指数( $H$ )2835 m与2915 m差异不显著( $P>0.05$ ),显著高于2955、3028、3120 m( $P<0.05$ ),2835、2955、3028、3120 m之间彼此差异均不显著;Simpson 生态优势度指数( $D$ )、Pielou 均匀度指数( $J$ )各海拔之间均无显著差异。

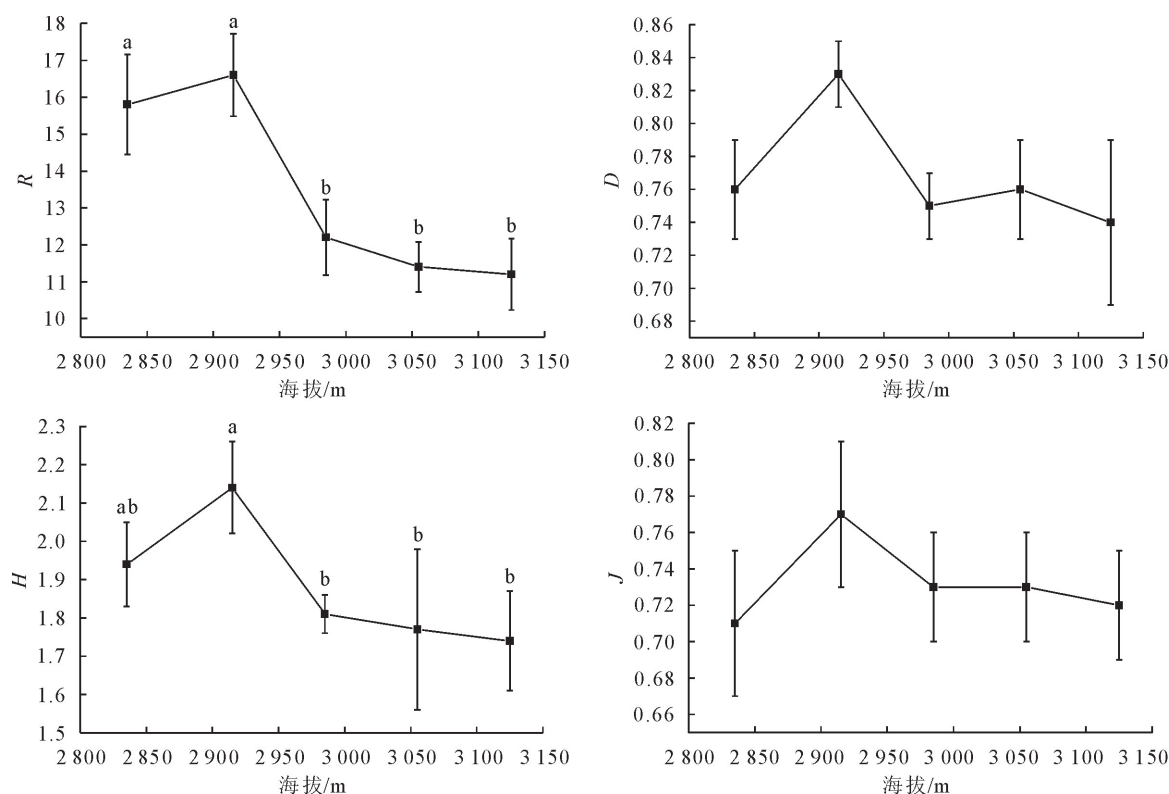


图2 不同海拔紫果云杉天然林林下草本植物多样性指数

Fig. 2 Species diversity index of herbaceous plants under *P. purpurea* natural forest at different altitudes

2.2.2 不同海拔紫果云杉天然林林下草本植物物种多样性指数的相关关系 不同海拔林下草本植物物种多样性指数的相关分析显示(表3),紫果云杉天然林海拔与 Shannon-Wiener 多样性指数( $H$ )、Simpson 生态优势度指数( $D$ )、Pielou 均匀度指数( $J$ )均呈负相关关系,与物种丰富度指数( $R$ )呈显著负相关关系( $P<0.05$ ),各指数之间均呈正相关或显著正相关关系。这也就表明,随海拔梯度的增加,紫果云杉天然林林下草本植物的抗干扰性、稳定性变弱,对环境条件的敏感性增强,草本植物群落的物种组成和多样性较易发生变化。

## 2.3 不同海拔紫果云杉天然林林下草本植物的相似性

不同海拔梯度紫果云杉天然林林下草本植物之间相似系数在0.293~0.513(表4),相似性总体较低。2955 m和3028 m物种合计39种,共有物种为20种,相似系数最大为0.513,2835 m和3120 m物种合计41种,仅有12种相同物种,相似系数最小为0.293。2955 m与3028 m相似系数 $>0.5$ ,表现为中等相似,其余海拔间相似系数均在0.25~0.5,表现为中等不相似。相邻海拔之间相似性系数均相对较大,不相邻海拔间随海拔差异的增

大,相似性系数呈减小趋势,相邻海拔之间相似性系数随着海拔的升高表现出不规律的变化。可见,随着海拔差异的增加,生境异质性逐渐增大,草本植物群落的物种种类变化越大。

表 3 不同海拔紫果云杉天然林林下草本植物物种多样性指数相关性分析

Table 3 Correlation analysis of species diversity index of herbaceous plants under *P. purpurea* natural forest at different altitudes

指数	海拔	R	H	D	J
海拔	1				
R	-0.884 *	1			
H	-0.729	0.944 *	1		
D	-0.469	0.762	0.927 *	1	
J	-0.114	0.453	0.708	0.898 *	1

注: \* 表示在 0.05 水平上显著相关(双侧)。

表 4 不同海拔紫果云杉天然林林下草本植物相似系数

Table 4 Similarity coefficient of herbaceous plants under *P. purpurea* natural forest at different altitudes

海拔/m	相似系数			
	2 835	2 915	2 955	3 028
2 915	0.447			
2 955	0.422	0.391		
3 028	0.340	0.370	0.513	
3 120	0.293	0.359	0.361	0.412

### 3 结论与讨论

通过对甘肃洮河国家级自然保护区海拔 2 835 ~3 120 m 范围内的紫果云杉天然林林下草本植物物种组成及多样性变化的研究发现,共有草本植物 57 种,隶属于 26 科 48 属,且随海拔升高,物种数量总体呈逐渐减少趋势。在海拔 2 835 m 和 2 915 m 处,均有草本 34 种,随着海拔的升高物种数量下降至 3 028 m 处的 30 种再到 3 120 m 处的 19 种。相关性分析也证实了海拔与物种丰富度指数呈显著负相关关系。研究表明,海拔变化会引起的温度和降水等气象因子的变化,是导致群落物种组成和多样性发生变化的主要原因<sup>[19]</sup>,低海拔地区水热、养分等环境条件相对较好,因此有利于更多物种的定居和生长,如甘青老鹳草(*Geranium pyzowianum*)、蛛毛蟹甲草(*Parasenecio roborowskii*)等重要值较小的偶见种或弱势种仅在低海拔存在。但随着海拔逐渐升高,水热条件下降,林下养分的竞争加剧,少数物种会在竞争被淘汰,造成高海拔物种数目减少。

研究区紫果云杉林天然林下共有草本植物 57 种,其中菊科、禾本科、毛茛科和玄参科的重要值在各海拔梯度下均居前 5,说明这 4 科是构成紫果云杉天然林林下草本植物的优势科,这与克拉玛依胡

杨林<sup>[20]</sup>和草海国家级自然保护区草本植物<sup>[21]</sup>的研究结果一致,研究表明,这 4 科均为世界广布科,其包含物种数量多,且多具有极强的适应性,对环境适应范围极广,因此,即便在高海拔仍能大量生存。优势种不仅能直接影响群落结构,还能客观体现其发展趋势<sup>[22]</sup>,因每个样地所处海拔梯度不同,草本植物的优势种也不尽相同,但早熟禾、东方草莓、珠芽蓼、长柄唐松草、川赤芍、草地风毛菊、高山露珠草和乳白香青在各海拔均有出现,表明这些物种在紫果云杉林下环境中具有较强适应力,早熟禾在各梯度的重要值均大于 12,远高于东方草莓(5.51)、珠芽蓼(4.94)和长柄唐松草(4.46),说明早熟禾是紫果云杉天然林林下草本植物的优势种或建群种,东方草莓、珠芽蓼和长柄唐松草的重要值相差不大,为常见种。

物种多样性受海拔、纬度和水分梯度等多种环境因子综合作用影响,其中海拔梯度为主要影响因素<sup>[23-24]</sup>。众多研究者对青藏高原物种多样性沿海拔梯度的变化做了研究,认为青藏高原物种多样性随着海拔的升高先升高后降低<sup>[25-27]</sup>。洮河国家级自然保护区地处青藏高原的东北边缘,本研究发现,紫果云杉天然林林下草本植物物种丰富度(R)、物种多样性指数(H)、生态优势度指数(D)均随海拔的升高呈现先升高后降低的单峰曲线,符合这一普遍规律。物种多样性指数呈单峰曲线的原因,有研究者认为,低海拔地区人为干扰强度较大,破坏严重,是造成其物种多样性较低的主要原因<sup>[28]</sup>,但也有研究认为,环境因子及物种生活型对环境适应性的差异,是造成多样性呈单峰曲线的主要因素<sup>[29-30]</sup>。本研究认为,物种多样性是由干扰、环境因子及物种竞争力的综合作用决定的,与刘哲等<sup>[27]</sup>的研究观点一致,环境因子和人为干扰的共同作用,是物种多样性呈单峰变化曲线的主要因素。虽然低海拔地区(2 835 m)具有相对较好的水热、养分等环境条件,有利于较多物种生存定居,物种多样性较大,但在本研究区,低海拔地带由于放牧、采药等人类干扰的存在,常造成某些适应性弱的偶见种消失,如林猪殃殃(*Galium paradoxum*)等,从而导致低海拔地区的物种多样性降低。当海拔上升到一定高度时(2 915 m),水热、养分等环境条件与低海拔差异不大,但人为干扰减轻,适应性较弱的偶见种得以良好保存,物种丰富度升高。随海拔的进一步升高,气候、环境条件差异增大,水热、养分条件的逐渐降低导致不适应高海拔环境条件的草本植物消失,物种多样性降低。因此,草本植物物种多样性出现单峰曲线变化规律。

群落相似性系数不仅反映了群落之间的异质

性,还体现了群落所处环境条件的异质性<sup>[31]</sup>,本研究中,随着海拔差异的增大,群落相似性总体均呈逐渐低趋势,但相邻海拔之间随着海拔差异的增大,相似性表现出不规律的变化,如2 955 m与3 028 m相似性最大,本研究认为,2 955 m和3 028 m处于中高海拔,区域内经过海拔梯度等综合因子的筛选,定居并生长的物种群落已相对稳定,且受到的干扰较小,因此群落更替不明显,当海拔高度上升到3 120 m时,海拔高度进一步升高引起了水热条件的较大的变化,生境异质性差异增大,且3 120 m仅有草本19种,因此与其相邻层3 028 m的群落相似性降低。此外,群落相似性系数的大小,还反映物种多样性的更换速率<sup>[22]</sup>。在2 835、2 915 m和2 955 m,由于低海拔带物种多样性较高,加上人为干扰,群落稳定性低,因此群落物种更替速率快,而在海拔2 955 m以上,植物以适应了高海拔环境的物种为主,且物种均匀度指数( $J$ )在海拔2 955 m已趋于平稳,说明在海拔2 955 m以上,群落物种分布均匀,替代速率低,群落结构相对稳定,因此,相邻海拔的群落相似性系数相对较大。

甘肃南部地区森林资源丰富,洮河国家级自然保护区成立后,林区的各种资源得到了一定的保护。本研究表明,物种多样性的变化主要是受海拔差异引起的水热条件的综合影响,而在本研究区低海拔地带,由于人为干扰的存在,如柏木等被盗伐,放牧等,林下物种多样性一直受到威胁,且草本中药用植物较多,因此采(挖)药等活动一直存在,破坏了林地环境,此外,甘南山区冬季寒冷漫长,极端温度低,这均影响到林区物种多样性的保护和恢复,因此,保护措施还需进一步加强。

## 参考文献:

- [1] 么旭阳.地形和土壤与长白山阔叶红松林功能多样性的关系[D].北京:北京林业大学,2014.
- [2] 申文辉.蝟木群落结构特征及其种群遗传多样性研究[D].长沙:中南林业科技大学,2018.
- [3] 汪殿蓓,暨淑仪,陈飞鹏.植物群落物种多样性研究综述[J].生态学杂志,2001,20(4):55-60.  
WANG D P,JI S Y,CHEN F P. A review on the species diversity of plant community[J]. Chinese Journal of Ecology,2001,20(4):55-60. (in Chinese)
- [4] 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.  
ZHU Y J,YANG X H,SHI Z J,et al. The influence of stand factors on herb in Zhangbei poplar plantations[J]. Chinese Journal of Ecology,2018,37(10):2869-2879. (in Chinese)
- [5] 刘贵峰,刘玉平,额尔德木图,等.罕山自然保护区4种典型天然次生林林下草本植物物种多样性[J].西北林学院学报,2021,36(2):31-37.  
LIU G F,LIU Y P,Eerdemutu,et al. Species diversity of understory herbaceous plants in four typical natural secondary forests in Hanshan Nature Reserve[J]. Journal of Northwest Forestry University,2021,36(2):31-37. (in Chinese)
- [6] 龚艳宾,郭建斌,赵秀海,等.吉林蛟河天然阔叶红松林草本植物多样性及其与土壤因子的关系[J].浙江农林大学学报,2016,33(4):620-628.  
GONG Y B,GUO J B,ZHAO X H,et al. Herbaceous species diversity as related to soil factors in a Korean pine broadleaved forest of Jiaohe,Jilin Province[J]. Journal of Zhejiang A&F University,2016,33(4):620-628. (in Chinese)
- [7] 郝建锋,王德艺,李艳,等.海拔高度对江油地区杉木人工林群落结构和物种多样性的影响[J].西北植物学报,2014,34(12):2544-2552.  
HAO J F,WANG D Y,LI Y,et al. Effect of altitude on structure and species diversity of *Cunninghamia lanceolata* plantation in Jiangyou district,Sichuan Province[J]. Acta Botanica Boreali-Occidentalia Sinica,2014,34(12):2544-2552. (in Chinese)
- [8] 王婧如,王明浩,张晓玮,等.同倍体杂交物种紫果云杉的生态位分化及其未来潜在分布区预测[J].林业科学,2018,54(6):63-72.  
WANG J R,WANG M H,ZHANG X W,et al. The ecological divergence and projection of future potential distribution of homoploid hybrid species *Picea purpurea*[J]. Scientia Silvae Sinicae,2018,54(6):63-72. (in Chinese)
- [9] 赵阳,齐瑞,焦健,等.尕斯库勒盆地紫果云杉种群结构与动态特征[J].生态学报,2018,38(20):7447-7457.  
ZHAO Y,QI R,JIAO J,et al. The population structure and dynamic characteristics of *Picea purpurea* at the Gahai-zecha area[J]. Acta Ecologica Sinica,1995,15(3):268-277. (in Chinese)
- [10] REY B,JOSE M. Patterns of diversity in the strata of boreal montane forest in British Columbia[J]. Journal of Vegetation Science,1995,6(1):95-98.
- [11] 张涵丹,康希睿,邵文豪,等.不同类型杉木人工林林下草本植物多样性特征[J].生态学报,2021,41(6):2118-2128.  
ZHANG H D,KANG X R,SHAO W H,et al. Characteristics of herbaceous plant biodiversity in *Cunninghamia lanceolata* plantations with different community structures[J]. Acta Ecologica Sinica,2021,41(6):2118-2128. (in Chinese)
- [12] 刘鑫,包维楷.青藏高原东部近林线紫果云杉原始林的群落结构与物种组成[J].生物多样性,2011,19(1):34-40,134-136.  
LIU X,BAO W K. Community structure and vascular plant species composition of primary *Picea purpurea* forest near timberline in the Eastern Tibetan Plateau[J]. Biodiversity Science,2011,19(1):34-40,134-136. (in Chinese)
- [13] 赵阳,刘锦乾,陈学龙,等.洮河上游紫果云杉种群结构特征[J].植物生态报,2020,44(3):266-276.  
ZHAO Y,LIU J Q,CHEN X L,et al. Population structure characteristics of *Picea purpurea* in the upstream of Taohe River[J]. Chinese Journal of Plant Ecology,2020,44(3):266-276. (in Chinese)



- [14] 王桔红,张勇,崔现亮,等.不同海拔梯度糙皮桦和紫果云杉种子的萌发变异[J].生态学报,2009,28(4):589-594.  
WANG J H,ZHANG Y,CUI X L,*et al.* Variations of *Betula utilis* and *Picea purpurea* seed germination at different altitudes[J]. Chinese Journal of Ecology, 2009, 28(4): 589-594. (in Chinese)
- [15] YAN M,ZHANG H J,LI J Z,*et al.* Breeding technique of *Picea purpurea* in high latitude area of Gannan Tibetan autonomous prefecture[J]. Journal of Gansu Forestry Science and Technology, 2015, 40(1): 42-46. (in Chinese)
- [16] 滕玉凤,马力,占玉芳,等.金塔沙漠人工林植物物种多样性研究[J].西北林学院学报,2021,36(2):68-74.  
TENG Y F,MA L,ZHAN Y F,*et al.* Vegetation species diversity of artificial forest in Jinta desert[J]. Journal of Northwest Forestry University, 2021, 36(2): 68-74. (in Chinese)
- [17] 沈蕊,张建利,何彪,等.元江流域干热河谷草地植物群落结构特征与相似性分析[J].生态环境学报,2010,19(12):2821-2825.  
SHEN R,ZHANG J L,HE B,*et al.* The structure characteristic and analysis on similarity of grassland community in dry-hot valley of Yuanjiang river[J]. Ecology and Environmental Sciences, 2010, 19(12): 2821-2825. (in Chinese)
- [18] 张孟仁,苏晓迪,张学献,等.黄连木群落的生物多样性与天然更新[J].森林与环境学报,2020,40(6):597-604.  
ZHANG M R,SU X D,ZHANG X X,*et al.* Biodiversity and natural regeneration of *Pistacia chinensis* communities in the South Taihang Mountains[J]. Journal of Forest and Environment, 2020, 40(6): 597-604. (in Chinese)
- [19] 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.  
DONG X,LI Y H,XIN Z M,*et al.* Patterns of altitudinal distribution of species diversity of desert Gobi shrub communities in West Hexi Corridor of China[J]. Scientia Silvae Sinicae, 2021, 57(2): 168-178. (in Chinese)
- [20] 吴瑞航,叶尔江·拜克吐尔汗,努尔塔依·铁利汗,等.克拉玛依市乌尔禾区胡杨林下草本层物种多样性研究[J].中国城市林业,2019,17(4):7-11.  
WU R H,Yeerjiang Baiketuerham,Nuertayi Tielihan,*et al.* Species diversity of understory herb layer of *Populus euphratica* forest in urho district of Karamay City, Xinjiang[J]. Journal of Chinese Urban Forestry, 2019, 17(4): 7-11. (in Chinese)
- [21] 何斌,李青,薛晓辉,等.草海国家级自然保护区森林群落结构及物种多样性研究[J].福建农业学报,2019,34(11):1332-1341.  
HE B,LI Q,XUE X H,*et al.* Composition and diversity of forests at Caohai National Nature Reserve[J]. Fujian Journal of Agricultural Sciences, 2019, 34(11): 1332-1341. (in Chinese)
- [22] 达良俊,杨永川,宋永昌.浙江天童国家森林公园常绿阔叶林主要组成种的种群结构及更新类型[J].植物生态学报,2004(3):376-384.  
DA L J,YANG Y C,SONG Y C. Population structure and regeneration types of dominant species in an evergreen broad-leaved forest in Tiantong National Forest Park, Zhejiang Province, Eastern China[J]. Chinese Journal of Plant Ecology, 2004(3): 376-384. (in Chinese)
- [23] 金慧,赵莹,赵伟,等.长白山牛皮杜鹃群落物种多样性的海拔梯度变化及相似性[J].生态学报,2015,35(1):125-133.  
JIN H,ZHAO Y,ZHAO W,*et al.* Elevational changes in species diversity and similarity analysis of a *Rhododendron chrysanthum* community on Changbai Mountain[J]. Acta Ecologica Sinica, 2015, 35(1): 125-133. (in Chinese)
- [24] 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):2452-2462.  
HE Y H,YAN M,ZHANG Q D,*et al.* Altitudinal pattern of plant species diversity in the Wulu Mountain Nature Reserve[J]. Acta Ecologica Sinica, 2013, 33(8): 2452-2462. (in Chinese)
- [25] 王长庭,王启基,龙瑞军,等.高寒草甸群落植物多样性和初级生产力沿海拔梯度变化的研究[J].植物生态学报,2004(2):240-245.  
WANG C T,WANG Q J,LONG R J,*et al.* Changes in plant species diversity and productivity along an elevation gradient in an alpine meadow[J]. Chinese Journal of Plant Ecology, 2004(2): 240-245. (in Chinese)
- [26] 段敏杰,高清竹,郭亚奇,等.藏北高寒草地植物群落物种多样性沿海拔梯度的分布格局[J].草业科学,2011,28(10):1845-1850.  
DUAN M J,GAO Q Z,GUO Y Q,*et al.* Species diversity distribution pattern of alpine grassland communities along an altitudinal gradient in the Northern Tibet[J]. Pratacultural Science, 2011, 28(10): 1845-1850. (in Chinese)
- [27] 刘哲,李奇,陈懂懂,等.青藏高原高寒草甸物种多样性的海拔梯度分布格局及对地上生物量的影响[J].生物多样性,2015,23(4):451-462.  
LIU Z,LI Q,CHEN D D,*et al.* Patterns of plant species diversity along an altitudinal gradient and its effect on above-ground biomass in alpine meadows in Qinghai-Tibet Plateau[J]. Biodiversity Science, 2015, 23(4): 451-462. (in Chinese)
- [28] DA SILVA FKG,LOPES S D,LOPEZ LCS,*et al.* Patterns of species richness and conservation in the Caatinga along elevational gradients in a semiarid ecosystem[J]. Journal of Arid Environments, 2014, 110: 47-52.
- [29] OHSAWA M. Latitudinal comparison of altitudinal changes in forest structure, leaf-type, and species richness in humid monsoon Asia[J]. Vegetatio, 1995, 121: 3-10.
- [30] DORJI T,MOE S R,KLEIN J A,*et al.* Plant species richness, evenness, and composition along environment algradients in an alpine meadow grazing ecosystem in central Tibet, China[J]. Arctic Antarctic and Alpine Research, 2014, 46: 308-326.
- [31] 何芳兰,金红喜,郭春秀,等.民勤绿洲边缘人工梭梭(*Haloxylon ammodendron*)林衰败过程中植被组成动态及群落相似性[J].中国沙漠,2017,37(6):1135-1141.  
HE F L,JIN H X,GUO C X,*et al.* Vegetation composition and community similarity of *Haloxylon ammodendron* plantations at different degree of degradation on the edge of the Minqin oasis[J]. Journal of Desert Research, 2015, 23(4): 451-462. (in Chinese)