

巨柏苗木天然更新的生境因子分析*

焦婉婷¹ 李永霞¹ 王昱熙² 杨小林¹ 代伟³(1. 西藏农牧学院资源与环境学院, 西藏 林芝 860000; 2. 中国电建集团成都勘测设计研究院有限公司, 四川 成都 611130;
3. 雅江清能生态环保(成都)有限公司, 四川 成都 610066)

摘要 为探讨巨柏 *Cupressus gigantea* 天然更新苗木生长的环境胁迫因子, 以及造成巨柏天然更新困难、幼苗保存率低下的原因, 研究选择朗县境内巨柏天然集中分布区3种地类的巨柏更新样地进行实地调查, 采用空间代替时间的方法, 统计了巨柏幼苗、幼树、成树株数等种群天然更新指标特征, 选取了地类、坡向、土壤质地、土壤紧实度、土壤温度、干扰强度等19个影响更新苗木生长的生境因子进行相关性分析。研究结果表明: 巨柏幼苗到成树建成的过程中保存率仅为1‰, 符合数学模型: $y = 153.52x^{-3.528}$ ($R^2 = 0.9661$); 巨柏苗木生长过程受到环境因子的强烈筛选, 与水线、阴坡、树冠遮荫 $\geq 50\%$ 、枯落物、石砾、沙壤、疏松、湿润、均温、轻微放牧干扰和较强放牧干扰因子呈正相关; 与坡地、阶地、阳坡、树冠遮荫 $< 50\%$ 、砂砾、结皮、干燥、极端温度呈负相关; 其中, 苗木生长与阴坡和砂砾土呈显著相关, 与疏松土壤呈极显著相关; 越冬时生境因子温度的极端变化, 是巨柏更新幼苗(1~5 a)生长过程中数量变化最剧烈的时期, 15 a后苗木抗逆性明显增强, 50%的幼树都可以顺利进入成树阶段。

关键词 巨柏; 幼苗; 幼树; 成树; 生境因子

中图分类号: Q948.12 **文献标志码:** A **文章编号:** 2096-2053 (2024) 03-0080-07

Analysis of Habitat Factors for the Growth of *Cupressus gigantea* SeedlingsJIAO Wanting¹ LI Yongxia¹ WANG Yuxi²
YANG Xiaolin¹ DAI Wei³(1. Resources & Environment College, Tibet Agriculture & Animal Husbandry University, Nyingchi, Tibet 860000, China;
2. China Electric Power Construction Corporation Chengdu Survey and Design Institute Co., Ltd., Chengdu, Sichuan 611130, China; 3. Yajiang Clean Energy Ecological and Environment (Chengdu) Co., Ltd, Chengdu, Sichuan 610066, China)

Abstract To explore the environmental stress factors for the growth of naturally regenerated *Cupressus gigantea* seedlings as well as the reasons for the difficulties in the natural regeneration of *C. gigantea* plants and its low percentage of seedling survival, the sample areas of *C. gigantea* regeneration of three land classifications in the areas where *C. gigantea* plants were naturally and concentratedly distributed in Lang county were selected in this study for field investigation, the method of space-for-time substitution was used to make statistics for the characteristic indexes of *C. gigantea* natural regeneration such as *C. gigantea* seedlings, saplings and survival rate, and meanwhile the correlation analysis was carried out on 19 habitat factors including land classification, aspect, soil texture, soil density, soil temperature and interference strength that affect the growth of regenerated *C. gigantea* seedlings. The results showed that the percentage of seedling survival from seedling to mature tree was only 1‰, which was consistent with the mathematical model: $y = 153.52x^{-3.528}$ ($R^2 = 0.9661$); the growth

* 基金项目: 雅江清能生态环保(成都)有限公司科技项目(CD2C202201), 西藏高原林业生态工程重点实验室资助。

第一作者: 焦婉婷(2001—), 女, 在读硕士, 研究方向为森林培育, E-mail: 1697302584@qq.com。

通信作者: 杨小林(1971—), 男, 教授, 主要从事森林培育及生物多样性保护研究, E-mail: 382965037@qq.com。

process of *C. gigantea* seedlings was strongly affected by environmental factors, showing a positive correlation with the factors such as waterline, shady slope, canopy shading $\geq 50\%$, litter, gravel, sandy soil, loose, moist, uniform temperature, slight disturbance and strong disturbance factors; and it was negatively correlated with sloping land, terrace, sunny slope, canopy shading $< 50\%$, gravel, crust, dryness and extreme temperature, and among them, the growth of seedlings was significantly correlated with shady slope, gravel soil and free soil; the extreme change of habitat factor temperature during overwintering was the most drastic period during the growth of regenerated *C. gigantea* seedlings (1–5 a). The seedling resistance was significantly enhanced after 15 years, and 50% of the young trees could successfully grow into mature trees.

Key words *Cupressus gigantea*; seedlings; young trees; mature trees; habitat factors

天然更新苗木生长包括幼苗、幼树直至成树建成等过程,生长过程往往受到生境因子的胁迫。幼苗作为天然更新过程中最敏感的阶段,其定居和数量动态变化对群落的稳定和植被更新有着至关重要的意义。幼苗是森林天然更新的基础,因具有脆弱和敏感的特征,也是天然更新的“瓶颈”^[1],其性状反映了幼苗的质量和生长状况,并与幼苗的抗逆性和存活能力密切相关^[2]。幼苗阶段作为林木更新的早期阶段,其苗木的生长发育相对于林木的其他阶段更易受生境因子的胁迫^[3]。气候和地形、坡度等因素通过影响物种的分布、发育和天然更新进而影响物种的繁衍;地形、土壤、地表覆盖物等生境偏好也是影响幼苗生长阶段更新的关键机制^[4]。合适的生境条件利于幼苗的生长发育,不适的生境条件容易导致天然更新的失败^[5–6]。

巨柏 *Cupressus gigantea* 是藏东南雅鲁藏布江流域特有的国家一级濒危保护植物,仅分布于雅鲁藏布江流域西藏林芝的朗县,米林的沿江河谷地段,其中朗县的甲格乡以西沿水线分布的巨柏较多;在雅鲁藏布江支流尼洋河下游的巴宜区一带也有少量分布^[7–8],分布区极其狭窄,近几年受到学术界的关注^[9–13,17–18]。目前巨柏天然更新差,幼苗保存率低,后备资源匮乏,其限制巨柏苗木定居的天然更新机制有待深入研究。开展巨柏苗木生长生境因子研究,探讨巨柏天然更新机制,为巨柏群落的保护修复与可持续经营提供科学依据,对于巨柏资源保护和维持生态平衡具有重要意义。

1 研究地概况与研究方法

1.1 研究地概况

本研究位于巨柏天然分布区朗县境内,地理位置 $29^{\circ}04'78'' \sim 29^{\circ}05'25''N$, $93^{\circ}10'29'' \sim 93^{\circ}34'87''E$,地处喜马拉雅山北麓,雅鲁藏布江中下游,地表起伏较大,属于高原丘陵地貌类型;北部、中部地势

较高,南部地势低,谷地和坡地较多^[10];平均海拔 3 100 m,年均温 $8.9^{\circ}C$,大于 $5.0^{\circ}C$ 年积温 3 118 $^{\circ}C$,年降水量 412.6 mm,蒸发量 2 682 mm,年日照时数 2 230.2 h,无霜期 150 d。天然巨柏林下伴生植物主要有砂生槐 *Sophora moorcroftiana*、小叶栒子 *Cotoneaster microphyllus*、西南野丁香 *Leptodermis purdomii*、卷柏 *Selaginella tamariscina*、小叶香茶菜 *Isodon parvifolius*、猪殃殃 *Galium spurium*、茎直黄芪 *Astragalus strictus* 等^[18]。本研究选择了不同的地类进行研究,包括坡地、阶地和水线(表 1)。通过对不同地类中巨柏苗木生长的研究,旨在揭示巨柏苗木生长的主要影响生境因子。

1.2 研究方法

1.2.1 研究样地设置 在巨柏天然分布区,根据巨柏的分布特点,选择水线、坡地、阶地 3 种地类,每个地类各设置 1 个 $200\text{ m} \times 10\text{ m}$ (长 $\times$ 宽)的样带,每个样带内随机设 1 个 $10\text{ m} \times 10\text{ m}$ 的成树样方,在成树样方内平分设置 4 个 $5\text{ m} \times 5\text{ m}$ 的幼树样方,在每个幼树样方内随机设置 1 个 $1\text{ m} \times 1\text{ m}$ 的幼苗样方,每地类设置 3 个重复,共设置 81 个固定样方。按照空间代替时间的方法确定幼苗向成树生长变化的过程,计算单位面积的幼苗、幼树和成树的株数及密度。为调查巨柏幼苗对干湿季节水分变化及不同季节极端温度变化的适应情况,本研究选择于 2020 年 3 月—2021 年 3 月,分 5 期(3 月、6 月、9 月、12 月、翌年 3 月)进行调查,每期分别记录固定样方巨柏幼苗、幼树、成树株数指标,计算幼苗、幼树保存率。

1.2.2 巨柏苗木划分标准 在自然环境中由于生境严酷,导致巨柏幼苗生长缓慢,普遍存在苗龄偏高、苗高偏低现象,根据经验结合巨柏生长特性按照巨柏苗木年龄和苗高进行了幼苗、幼树的划分,见表 2。

表 1 巨柏生境地类特征^[13]

Tab. 1 Characteristics of land classification of *Cupressus gigantea*

编号 Number	地类 Land class	海拔/m Altitude	地类特征 Land class feature
1	水线	3 000~3 020	土壤稀少，细腻；植被稀少，覆盖率约 5%；夏季水资源丰富，水位线及以上河岸位置水流冲蚀，受水流量影响导致石砾堆积，石砾直径大部分 10 cm 左右。
2	阶地	3 000~3 040	沙壤土为主，土壤结构良好，容重小，质地轻、疏松，通气性良好，水热比较协调；砂石堆积，地势平坦，砾石成层，草灌植被较丰富，盖度 40% 左右。
3	坡地	>3 040	分布于峡谷两侧，坡度一般在 30°~50° 之间，土质坡积物为主，少部分沉积，沙砾土，多碎石砂砾，植被相对丰富，盖度 45% 左右。

表 2 巨柏苗木划分标准^[14]

Tab. 2 Classification criteria of *Cupressus gigantea* seedlings

项目 Indicators project		幼苗 Seedling	幼树 Young tree	成树 Mature tree
苗龄/a	Seedling age	1~5	6~20	21~25
苗高/cm	Seedling height	≤10	>10≤100	>100

1.2.3 生境因子选择与调查 本实验根据巨柏天然分布区立地条件和巨柏分布特点，将选择的对巨柏苗木生长起到决定性作用的生境因子分为 3 类：（1）环境因子：地类、坡向、树冠遮荫；（2）土壤因子：地表覆盖物、质地、紧实度、湿度、温度；（3）干扰因子：放牧强度，共 19 个指标，

每个指标按照专家打分法进行赋值^[15-16]，见表 3。因试验区的气候条件一致，故未考虑气候因子。在不同的生境因子下，分别调查巨柏幼苗、幼树和成树的数量，最终计算出单位面积的巨柏苗木的数量（苗木密度），巨柏苗木密度用单位面积苗木的数量表示（株/m²）。

表 3 巨柏苗木生长生境因子

Tab. 3 Growth habitat factors of *Cupressus gigantea* seedlings

生境因子 Growth habitat factors	分类 1 Category 1	分类 2 Category 2	编号 Number	赋值 Assignment	备注 Notes
环境因子 Environmental factor	地类	坡地	S1	1	
		阶地	S2	1	
		水线	S3	3	
	坡向	阳坡	S4	1	
		阴坡	S5	2	
土壤因子 Soil factor	树冠遮荫	<50%	S6	1	
		≥50%	S7	2	
	地表覆盖物	枯落物	S8	1	
		石砾等	S9	3	
		质地	S10	1	
	紧实度	砂砾	S11	3	
		沙壤	S12	1	土壤表面结皮紧实
		疏松	S13	3	土壤表面疏松
	湿度	干燥	S14	1	土壤含水量<10%
		湿润	S15	3	土壤含水量≥10%
干扰 Interference	温度	均温	S16	1	年平均温度
		极端温度	S17	3	极端最高、最低温度
	干扰强度	轻微	S18	1	季节性放牧
		较强	S19	3	常年放牧

1.3 数据处理

更新保存率用单位面积巨柏幼苗、成树数量（密度）进行计算：

更新保存率% = 1 - (幼苗 - 成树) / 幼苗 × 100%

使用 Excel、SPSS 分别进行调查数据的处理、相关性分析。

2 结果与分析

2.1 巨柏更新幼苗数量

巨柏幼苗数量和保存率见表 4。

由表 4 可知，3 种地类中，巨柏幼苗保存率：水线>坡地>阶地，其中水线地类能为巨柏生长提供充足的水分条件，巨柏幼苗在水线保存率最高达到 37.23%。

2.2 巨柏幼树建成

不同苗龄巨柏更新数量统计结果见表 5。

表 5 可以看出巨柏幼苗在天然更新时的幼苗消失数量依次是：2~3 a 生长时期>4~5 a 生长时期>6~10 a 生长时期>11~15 a 生长时期>16~20 a 生长时期>21~25 a 生长时期。

表 4 巨柏幼苗数量、保存率、死亡率统计

Tab. 4 Statistics of the number, preservation rate and mortality rate of *Cupressus gigantea* seedlings

编号 Number	样方 地类 Quadrat land type	样方立地 Quadrat site	幼苗数量/株 Number of seedlings/plant					幼苗死 亡率/% Seedling mortality	平均死 亡率/% Average mortality rate	幼苗保 存率/% Seedling retention rate	平均保 存率/% Average retention rate
			I 期	II 期	III 期	IV 期	V 期				
			2020-3	2020-6	2020-9	2020-12	2021-3				
1	阶地 Terrace	沙壤土，干燥	55	53	49	28	20	63.6		36.4	
2		Sandy loam, dry	28	25	22	10	6	78.6	71.83	21.4	28.17
3			30	29	27	16	8	73.3		26.7	
4	水线 Water line	石砾堆，遮荫 ≥50%，湿润	28	24	22	14	12	57.1		42.9	
		Gravel pile, shade ≥50%, wet									
5		石砾堆，遮荫 <50%，湿润	15	14	10	6	4	73.3	62.77	26.7	37.23
		Gravel pile, shade <50%, wet									
6		石砾堆，遮荫 ≥50%，湿润	38	37	32	21	16	57.9		42.1	
		Gravel pile, shade ≥50%, wet									
7	坡地 Slopingland	砂砾土，干燥， 阳坡	129	126	109	72	28	78.3		21.7	
		Sandy soil, dry, sunny slope									
8		砂砾土，干燥， 阴坡	142	135	108	70	65	54.2	65.13	45.8	34.87
		Sandy soil, dry, shady slope									
9		人工林，砂砾土， 干燥	89	82	81	47	33	62.9		37.1	
		Plantation, sandy soil, dry									
平均 Average			61.56	58.33	51.11	31.56	21.33	66.58		33.42	

对巨柏天然更新整个过程进行研究，巨柏苗木保存率符合数学模型（图 1）。

y = 153.52x^{-3.528} (R² = 0.966 1)

由表 6、图 1 可知，巨柏从幼苗到幼树建成的

整个天然更新过程，幼苗密度不断减小，幼苗保存率仅为 1‰。保存率低下是造成巨柏天然更新困难的主要原因，幼苗生长过程中受到不同的环境胁迫。

表 5 不同苗龄巨柏数量统计 株/m²

Tab. 5 Quantity statistics of *Cupressus gigantea* at different seedling ages plant /m²

指标 Indicators	幼苗/a Seedling			幼树/a Young tree			成树/a Mature tree
	1	2~3	4~5	6~10	11~15	16~20	21~25
密度 Density	94.40	23.80	2.88	1.68	0.80	0.20	0.10

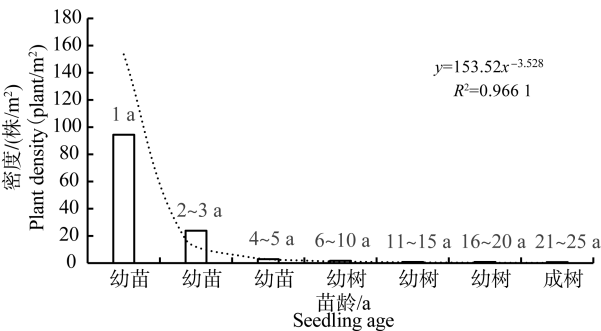


图 1 不同苗龄巨柏数量模型
Fig. 1 Quantity model of *Cupressus gigantea* at different seedling ages

2.3 巨柏苗木生长与生境因子相关性分析

19 个影响因子与苗木密度构成 20×20 的矩阵数据，进行相关性分析，结果见表 6。

表 6 所示，巨柏苗木生长与 19 个生境指标因子存在一定的相关性，苗木生长影响因子：水线、阴坡、树冠遮荫≥50%、地表覆盖枯落物、地表覆盖砾石、沙壤土质地、土壤疏松、土壤湿润、均温、干扰强度与巨柏苗木生长呈现正相关；坡地、阶地、阳坡、树冠遮荫<50%、砂砾土、土壤结皮、土壤干燥、极端温度与巨柏苗木生长呈现负相关。其中，巨柏苗木生长与阴坡、砂砾土、疏松土壤呈显著相关。巨柏苗木生长受水分、光照、坡向、土壤性质影响最大。

3 讨论与结论

对于巨柏苗木生长整体过程而言，幼苗、幼树的数量是更新的关键，是种群发展的基础，对于种群的未来发展具有决定性作用^[19-21]，在以往的研究中，更多学者关注幼树以及成树，对于幼树建成的过程研究较少，本研究采取空间代替时间的方法实地调查了巨柏苗木生长从幼苗生长到成树的生长过程，其方法适用巨柏天然更新幼树建成过程。

苗木幼年期是植物整个生活史对生境因子变化最敏感的阶段，生境因子的细微不良变化都会对幼苗的生存造成威胁，极易受到环境筛选的淘汰^[22]。不同地类中，水线地类含水量高，能为巨

柏苗木生长提供适宜水分条件，而阶地和坡地相对来说比较干旱，巨柏苗木生长受到水分条件的限制；阴坡日照时长短，受到紫外线辐射强度弱，阳坡日照时长长、光照强烈，会影响植物的次生代谢和抗氧化系统，一定程度抑制了巨柏幼苗的生长，幼苗死亡率高^[23]；在有充足树冠遮荫的条件下，地表温度低，水分的蒸发较少为巨柏种子萌发、为苗木生长提供良好的生境条件，但在遮荫不足的生境条件下巨柏种子和幼苗都会受到阳光的灼伤，影响巨柏的保存率；枯落物为巨柏种子的收集、萌发提供良好条件，减少地表水分的蒸发，保持土壤温度的均衡，同时枯落物经过微生物的缓慢分解、矿化作用将其有机体中的养分反馈到土壤中，为巨柏苗木生长提供充足养分^[24]，有助于幼苗的建植和存活；砾石覆盖在雨季时能收集大量水分，同时起到保湿和防止水分蒸发的作用；砂砾土养分含量少、保水保肥能力差、温度变化快，遇到高温时，温度迅速上升，对种子和幼苗的灼伤伤害大；沙壤土土质疏松、透气性好，但土壤的保水保肥能力强，与砂砾土相比沙壤土壤质地更有利于巨柏的苗木生长，对巨柏苗木的生长起一定的促进作用；土壤温度的极端变化会减弱土壤微生物活性，导致凋落物分解、土壤养分分解效率下降，巨柏幼苗生长得不到充足的养分^[25]，导致幼苗长势弱，抵抗低下；而均衡的土壤温度则可以为巨柏的种子萌发、幼苗生长提供良好的外部条件；适度的人为干扰如：人工松土、破土、人工抚育等在一定程度上能够改善土壤结构和幼苗的生长环境，但随着干扰强度的增强对巨柏苗木生长的促进作用减弱。

巨柏苗木生长从幼苗到建成成树过程受到生境的强烈筛选，巨柏幼苗到幼树建成的整个过程幼苗保存率仅为 1%。不同的地类中，水线地类幼苗的保存率较阶地、坡地地类高，沿江水线为巨柏幼苗的更新保证了水分条件，有地表覆盖，对巨柏种子接纳，保证了更新的基础；土壤质地和结构为巨柏种子的入土萌发创造了条件，土壤温

表 6 巨柏苗木生长与生境因子相关性分析
Tab. 6 Correlation analysis between the seedling growth and habitat factors of *Cupressus gigantea*

因子 Factor	S0	S1	S2	S3	S4	S5	S6	S7	S8	S9	S10	S11	S12	S13	S14	S15	S16	S17	S18	S19
S0	1																			
S1	-0.456	1																		
S2	-0.364	0.359	1																	
S3	0.365	0.520	-0.081	1																
S4	-0.473	0.223	0.150	-0.608	1															
S5	0.928*	-0.441	-0.568	0.494	-0.675	1														
S6	-0.701	0.426	-0.012	-0.437	0.890*	-0.744	1													
S7	0.508	-0.996**	-0.324	-0.501	-0.220	0.466	-0.456	1												
S8	0.518	0.212	-0.530	0.399	0.194	0.463	0.157	-0.181	1											
S9	0.397	0.571	0.329	0.835	-0.327	0.315	-0.378	-0.513	0.398	1										
S10	-0.959*	0.662	0.432	-0.225	0.568	-0.938*	0.773	-0.697	-0.323	-0.177	1									
S11	0.029	0.772	-0.243	0.723	0.054	0.111	0.271	-0.766	0.719	0.599	0.187	1								
S12	-0.127	-0.295	-0.688	0.023	-0.419	0.223	-0.077	0.221	-0.179	-0.527	-0.074	-0.050	1							
S13	0.961*	-0.454	-0.336	0.474	-0.698	0.964**	-0.855	0.495	0.347	0.416	-0.960*	-0.012	0.027	1						
S14	-0.204	-0.227	-0.580	-0.600	0.684	-0.203	0.712	0.193	0.342	-0.691	0.169	0.010	0.258	-0.382	1					
S15	0.851	-0.536	-0.607	0.425	-0.754	0.977**	-0.776	0.546	0.306	0.168	-0.919*	-0.009	0.393	0.927*	-0.195	1				
S16	0.374	-0.961**	-0.290	-0.688	0.048	0.281	-0.217	0.964**	-0.147	-0.630	-0.547	-0.777	0.125	0.303	0.388	0.345	1			
S17	-0.263	-0.695	0.139	-0.911*	0.239	-0.333	0.080	0.672	-0.660	-0.816	0.049	-0.932*	0.123	-0.272	0.309	-0.209	0.764	1		
S18	0.598	0.428	-0.122	0.898*	-0.382	0.594	-0.374	-0.382	0.609	0.896*	-0.393	0.744	-0.260	0.593	-0.432	0.452	-0.511	-0.919*	1	
S19	0.459	-0.961**	-0.287	-0.627	0.008	0.352	-0.281	0.972**	-0.096	-0.551	-0.616	-0.750	0.078	0.384	0.338	0.403	0.995**	0.711	-0.430	1

注：S0 单位面积巨柏幼苗密度。S1-19 指标编依次为坡地、阶地、水线、阳坡、阴坡、遮荫<50%、遮荫≥50%、枯落物、石砾等、砂砾、沙壤、结皮、疏松、干燥、湿润、均温、极端温度、轻度干扰、较强干扰。* 在 0.05 级别（双尾），相关性显著。** 在 0.01 级别（双尾），相关性极显著。

Note: The density of S0 seedlings per unit area of giant cypress. S1-19 Indicators are listed in the following order: sloping land, terrace, water line, sunny slope, shady slope, tree canopy shading <50%, tree canopy shading ≥50%, litter, gravel, sand, loam, crust, loose, dry, wet, average temperature, extreme temperature, minor disturbance, moderate disturbance. * At level 0.05 (two-tailed), the correlation was significant. ** At level 0.01 (double tail), the correlation is very significant.

度和树冠的遮荫为种子萌发和幼苗生长提供外部条件,适度的干扰为幼苗的生长提供保障;地表结皮阻止种子的入土,砂砾质土壤在高温、干旱、极端温度及光照较强的环境中,会灼伤种子和幼苗,造成幼苗存活率下降,导致巨柏更新的后备资源匮乏,致使巨柏更新困难。虽然不利的生境影响着巨柏幼苗的生长,但还是具有一定的更新能力,反映了巨柏具有较强的抗逆能力。

巨柏幼苗到幼树建成的整个过程幼苗保存率仅为1%,符合 $y=153.52x^{-3.528}$ ($R^2=0.9661$) 数学模型。在巨柏天然分布集中的3个地类中,巨柏幼苗水线地类中更新保存率最高。在调查中初期巨柏幼苗(1~5 a)密度大、数量多,越冬时生境因子极端变化,巨柏幼苗数量锐减随后趋于稳定,是巨柏苗木生长过程中数量变化最剧烈的时期;15 a后幼树抗逆性明显增强,更新苗木处于稳定生长的状态,50%的幼树都可以顺利进入成树阶段。

巨柏苗木生长过程包括幼苗、幼树、成树多个阶段,各阶段苗木生长均受到不同强度生境因子的胁迫,本文中筛选了19个影响因子进行分析,然而海拔、伴生树种、风力、土壤pH值、土壤微生物对巨柏苗木生长和存活率的影响还有待进一步探究。

参考文献

- [1] JONES C C, DEL MORAL R. Effects of microsite conditions on seedling establishment on the foreland of Coleman Glacier, Washington[J]. *Journal of Vegetation Science*, 2005, 16(3): 293-300.
- [2] BALEKOGLU S, CALISKAN S, DIRIK H. Effects of geo-climatic factors on the variability in *Pinus* cone, seed, and seedling traits in Turkey native habitats[J]. *Ecological Processes*, 2020, 9(1): 55-59.
- [3] MARQUIS B, DUVAL P, BERGERON Y, et al. Height growth stagnation of planted spruce in boreal mixed-woods: importance of landscape, microsite, and growing-season frosts[J]. *Forest Ecology and Management*, 2021, 479(1): 118-125.
- [4] 刘何. 浙江天童常绿阔叶林幼苗的更新机制[D]. 上海: 华东师范大学, 2016.
- [5] FEKEDULEGN D, HICKS R R, COLBERT J J. Influence of topographic aspect, precipitation and drought on radial growth of four major tree species in an Appalachian watershed[J]. *Forest Ecology and Management*, 2003, 177(1): 409-425.
- [6] GRAUMLICH L J. Response of tree growth to climatic variation in the mixed conifer and deciduous forests of the upper Great Lakes region[J]. *Canadian Journal of Forest Research*, 1993, 23(2): 133-143.
- [7] 尹金迁, 赵垦田. 青藏高原巨柏的研究进展与展望[J]. *林业与环境科学*, 2019, 35(2): 116-122.
- [8] 吴兴, 赵南先, 段代祥, 等. 西藏特有珍稀植物巨柏的研究进展与展望[J]. *福建林业科技*, 2005(3): 160-164.
- [9] 姚慧芳, 王超, 卢杰, 等. 藏东南朗县砂生槐空间格局及其种内关联性[J]. *高原农业*, 2021, 5(3): 226-231+324.
- [10] 张国强, 罗大庆, 王景升. 西藏濒危植物巨柏的生物学与生态学特性研究[J]. *林业科技*, 2006(2): 1-5.
- [11] 何涛. 西藏林芝地区亚高山落叶阔叶灌丛分布与物种多样性研究[J]. *绿色科技*, 2014(4): 26-30.
- [12] 李瑛萍, 杨小林, 赵垦田, 等. 藏东南巨柏单木生长特性及其模型研究[J]. *高原农业*, 2020, 4(3): 269-276.
- [13] 边喜丽, 杨小林, 李永霞, 等. 藏东南巨柏根系结构特征与环境因子研究[J]. *四川大学学报(自然科学版)*, 2018, 55(4): 848-852.
- [14] 李永霞. 珍稀濒危树种巨柏天然更新研究[D]. 拉萨: 西藏大学, 2023.
- [15] 罗薇羽. 基于低碳生态理念的武汉市主城区居住区绿地评价研究[D]. 武汉: 华中农业大学, 2014.
- [16] 范琳, 唐浩文, 路秋玲. 年保玉则-玛可河片区自然保护区保护成效评估[J/OL]. *林业科技通讯*, 1-5[2024-05-07]. <https://doi.org/10.13456/j.cnki.lykt.2024.04.01.0001>.
- [17] 杨小林, 李智华, 左有璐, 等. 巨柏树轮径向生长对气候变化的响应[J]. *高原农业*, 2023, 7(3): 233-242.
- [18] 李智华, 杨小林, 杨雯婧, 等. 巨柏胸径(d1.3<1m)和树龄的关系研究[J]. *高原农业*, 2023, 7(3): 273-277.
- [19] 李宁, 白冰, 鲁长虎. 植物种群更新限制: 从种子生产到幼树建成[J]. *生态学报*, 2011, 31(21): 6624-6632.
- [20] 罗梅, 郑小贤. 北京十三陵林场人工侧柏林天然更新研究[J]. *西北农林科技大学学报(自然科学版)*, 2012, 40(12): 73-78.
- [21] 农友, 卢立华, 孙冬婧, 等. 岩溶石山降香黄檀人工林的天然更新[J]. *中南林业科技大学学报*, 2017, 37(3): 63-68.
- [22] 林国江. 江西武夷山南方铁杉幼苗、幼树更新及其影响因子分析[D]. 南昌: 江西农业大学, 2018.
- [23] 李勇, 王世锋, 陈天禄, 等. 青藏高原太阳紫外线辐射及其生物学效应研究现状[J]. *科学技术与工程*, 2022, 22(4): 1321-1328.
- [24] 李威, 肖明敏, 杨鹏, 等. 青海云杉次生林苔藓枯落物养分含量和储量研究[J]. *现代园艺*, 2022, 45(13): 48-50.
- [25] 陈志刚. 油松苗木生长的影响因素分析[J]. *安徽农学通报*, 2014, 20(22): 105, 150.