

三江源东部祁连圆柏天然更新特征研究

井 赛¹, 张 静¹, 侯晓巍², 陈志林², 闫生义², 侯 琳^{1*}

(1. 西北农林科技大学 林学院, 陕西 杨陵 712100; 2. 国家林业和草原局 西北调查规划设计院, 陕西 西安 710048)

摘 要:天然更新是维持天然林可持续发展的的重要途径,祁连圆柏天然林集中分布于青海三江源地区,了解该林分天然更新状况及影响机制,对于维护三江源水生态安全具有重要的战略意义。本研究以三江源东部麦秀林场祁连圆柏天然林为对象,采用系统调查、室内分析、相关与通径分析相结合的方法,探讨了天然更新状况及影响林分天然更新的关键因子。结果表明:1)林分天然更新不良,平均更新密度为 220 株·hm⁻²,林下缺乏幼苗补充,更新幼树种群处于衰退状态;2)林龄、林分密度、平均树高、草本盖度、海拔对更新幼树密度的影响达到显著水平,其中林分密度起正向和负向促进作用;林龄、平均树高、草本盖度起间接阻碍作用;海拔起间接促进作用。3)林龄、林分密度、平均树高、海拔是影响更新幼树密度的主要因素。

关键词:祁连圆柏;更新幼树;林分特征;地形;三江源

中图分类号:S791.44 **文献标志码:**A **文章编号:**1001-7461(2021)03-0052-07

Natural Regeneration Characteristics of *Juniperus przewalskii* the Forest in the East of Three-River Resource Region

JING Sai¹, ZHANG Jing¹, HOU Xiao-wei², CHEN Zhi-lin², YAN Sheng-yi², HOU Lin^{1*}

(1. College of Forestry, Northwest A&F University, Yangling 712100, Shaanxi, China; 2. Northwest Surveying, Planning and Designing Institute of National Forestry and Grassland Administration, Xi'an 710048, Shaanxi, China)

Abstract: Natural regeneration is an important way to maintain sustainable development of natural forest. The natural forest of *Juniperus przewalskii* is mainly distributed in the Three-River Resource Region of Qinghai Province. It is of great strategic significance to investigate the natural regeneration and influence mechanism for maintaining the water ecological security of Three-River Resource Region. In this study, we investigated the natural regeneration and key influencing factors of *J. przewalskii* forest occurring in the Maixiu Forest Farm located in the east of Three-River Resource Region by using the combination of systematic investigation, laboratory analysis, correlation, and path analysis. The results showed that 1) the natural regeneration was poor, and the average density of the renewal saplings was 220 hm². There was lack of seedling supplement understory, and the population of the saplings was in a state of decline. 2) The effects of stand age, stand density, average height, herb coverage and altitude were significant, among them, the stand density had a direct and indirect positive influence, the stand age, average height and herb coverage presented indirect negative influence, while the altitude had an indirect positive influence. 3) The main factors affecting the density of the saplings were stand age, stand density, average height and elevation.

Key words: *Juniperus przewalskii*; sapling; stand characteristics; terrain; three-River Resource Region

天然更新是森林的基本动态过程,通过母树自身繁殖能力形成幼苗、幼树,促进森林资源的再生

收稿日期:2020-05-20 修回日期:2020-08-24
基金项目:青海省柏树资源研究子专题 IV(K4030218362)。
作者简介:井 赛。研究方向:森林生态。E-mail:17835422168@163.com
* 通信作者:侯 琳,副研究员,博士。研究方向:森林生态。E-mail:houlin_1969@nwsuaf.edu.cn

产,维持森林生态质量与物种多样性,对森林生态系统的健康与可持续起决定性作用^[1-3]。良好的天然更新能够实现生态系统结构与功能的优化,形成质量与稳定性高的森林^[4]。然而,天然林在更新过程中,地形因子、林分条件及人为干扰等因素却导致林分天然更新不良甚至出现更新障碍^[4-7]。探究林分天然更新及环境因素的影响机制,优化森林结构与功能,寻求合理的森林经营方式成为群落生态学领域研究的热点问题之一^[8-9]。迄今,国内外学者已对不同地区的多种林分天然更新及影响机制进行了大量探索^[10-16]。M. Luo *et al*^[10]研究表明北京地区人工侧柏林自我更新能力差,海拔、林分密度、灌木覆盖度、坡向与坡位等是影响更新的主要因素;F. Yu *et al*^[13]通过探究环境因素对秦岭松栎混交林幼树、幼苗再生的影响发现坡向与林分密度对再生的作用最大,在阴坡上种植密度适中的林分围护,并适当间伐密度较高的林分,可促进天然更新;还有研究证实地形与上层林木死亡率相互作用控制了落基山脉南部云冷杉林的再生^[12]。尽管研究众多,更新机制却因不同地区、林分与树种及不同环境因子各异,仍存在争议^[15]。当前还缺乏对三江源地区的天然林更新的认识,因此,有必要明晰三江源地区天然林更新机制。

三江源地处青藏高原东北部,素有“中华水塔”之美誉,是黄河、长江、澜沧江的源头^[17]。特殊的地理环境,孕育了独特的森林资源^[18]。祁连圆柏(*Juniperus przewalskii*)为中国特有种,因其耐寒、耐旱广泛分布于青海、甘肃,是三江源地区主要天然林类型之一,在水源涵养、保障水量和净化水质方面发挥重要作用^[19-20]。探究三江源祁连圆柏天然更新,对于该区水生态安全的维护具有重要意义。本研究以三江源东部核心地带麦秀林场的祁连圆柏天然林为对象,采用系统调查、室内分析、相关与通径分析相结合的方法,探讨了天然更新状况及影响更新的关键因子,以期为该地区天然林管理与经营提供参考。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

麦秀林场(34°44′—35°30′N,101°22′—102°07′E),地处青海黄南藏族自治州泽库县境内,属高原大陆性气候,年平均降水量 460 mm,年平均蒸发量 1 325.8 mm,年平均温度-2.4℃~2.8℃。该区海拔 2 800~4 428 m,土壤类型主要为石灰性灰褐土,土层较薄,土壤母质多为岩石,土体颜色以褐色、暗褐色为主。森林类型主要以祁连圆柏、青海云杉(*Picea crassifolia*)、紫果云杉(*P. purpurea*)、白桦

(*Betula platyphylla*)、山杨(*Populus davidiana*)林为主,其中祁连圆柏天然林面积为 2.15×10^3 hm²,占林场总面积的 48.6%,列居首位。其多分布于阳坡、半阳坡,林分层次结构简单,林下植被主要有金露梅(*Potentilla fruticosa*)、银露梅(*P. glabra*)、灰栒子(*Cotoneaster acutifolius*)、鲜黄小檗(*Berberis diaphana*)、刺红珠(*Berberis dictyophylla*)、大通翠雀花(*Delphinium pylzowii*)、珠芽蓼(*Polygonum viviparum*)、披碱草(*Elymus dahuricus*)、青藏苔草(*Carex moorcroftii*)、甘肃马先蒿(*Pedicularis cranolopha*)、贝加尔唐松草(*Thalictrum baicalense*)等。

表 1 样地基本信息

Table 1 Basic information of the plots							
样地 编号	海拔 /m	林龄 /a	林分密度 /(株·hm ⁻²)	坡向	坡位	坡度 /(°)	平均 树高/m
1	2 915	70	1 000	东南	上	37	7.05
2	2 915	73	825	东南	上	38	7.65
3	2 930	65	375	西	中	24	9.87
4	2 940	63	425	南	下	34	8.61
5	3 010	64	725	南	中	40	7.84
6	3 020	63	750	东南	下	31	7.39
7	3 025	66	700	南	中	26	7.03
8	3 025	64	800	南	中	26	9.19
9	3 070	64	750	西南	下	38	8.12
10	3 082	83	750	西南	上	37	7.86
11	3 100	70	650	南	上	43	8.95
12	3 100	90	900	东南	上	39	7.95
13	3 100	75	725	南	下	33	9.00
14	3 101	60	1 325	西南	下	35	7.90
15	3 102	75	1 150	西南	中	35	6.95
16	3 105	58	400	西南	中	37	11.08
17	3 113	100	875	南	坡	23	9.37
18	3 150	105	675	东南	中	39	8.86
19	3 150	40	775	南	中	40	4.75
20	3 150	59	925	南	中	40	4.30
21	3 175	72	1 325	西	下	35	10.13
22	3 190	75	975	南	中	26	11.60
23	3 278	86	1 700	西	上	23	9.14
24	3 300	77	825	东南	中	37	7.62
25	3 301	74	1 500	西	下	35	8.26
26	3 358	38	1 125	东南	上	40	9.98
27	3 358	38	1 300	东南	上	40	3.33
28	3 474	33	1 800	东南	下	32	1.82
29	3 500	30	1 650	西南	中	43	2.97
30	3 511	30	950	南	中	43	1.88
31	3 538	33	1 225	东南	上	32	1.84

1.2 样地设置与调查

2018 年 7—8 月,在全面踏查的基础上,根据海拔(2 800~3 800 m)与林分密度(300~1 800 株·hm⁻²),在麦秀林场设置 31 个祁连圆柏群落调查样

地,样地面积为 20 m×20 m。记录样地基本信息(经度、纬度、坡位、坡度、坡向),乔木需记录 DBH≥5 cm 树种的名称、高度、胸径、树高以及选取 2~3 株平均木,运用生长锥确定林龄(表 1)。每个群落调查样地内,按照对角线法在每块样地的中心与四角位置设置 5 个 5 m×5 m 和 5 个 1 m×1 m 灌木与草本调查样方。灌木样方中记录灌木的种类、数量、高度、盖度,同时记录样方内基径<5 cm 更新苗的数量、高度、基径;草本样方记录草本的种类、数量、平均高度、盖度。

1.3 更新等级及更新苗基径与高度级的划分

更新等级参照森林资源规划设计调查技术规范(GB 26424-2010-T)^[21]中天然更新等级评价标准,依据更新苗的树高划分(表 2)。参照刘少充等^[14]的方法将更新苗划分为幼苗(基径<1 cm)和幼树(1 cm≤基径<5 cm)。更新层基径与高度级根据祁连圆柏天然林更新幼树实际生长状况,将更新苗基径划分为 1~1.5、1.5~2、2~2.5、2.5~3、3~3.5、3.5~4、4~4.5 cm 与 4.5~5 cm 8 个等级,高度分为 0~0.5、0.5~1、1~1.5、1.5~2、2~2.5、2.5~3、3~3.5、3.5~4、>4 m,共 9 个高度。

表 2 天然更新等级评价标准

Table 2 Grade evaluation criteria for natural regeneration			
(株·hm ⁻²)			
等级	幼苗等级/cm		
	<30	30—49	≥50
良好	≥5 000	≥3 000	≥2 500
中等	3 000~4 999	1 000~2 999	500~2 499
不良	<3 000	<1 000	<500

1.4 数据处理与分析

采用 Excel 2010 和 SPSS 22.0 对数据进行统计与分析。对坡位、坡向等定性变量进行数量化(表 3)。运用 Pearson 相关系数描述林分结构与地形因子对更新幼树密度的影响,之后通过通径分析确定主要影响因素、各因素直接与间接作用及相对贡献。做图采用 OriginPro 8。

表 3 立地因子数量化结果

Table 3 Quantitative results of site factors			
立地因子	数量化值		
	1	2	3
	坡位 坡向	上坡位 阳坡	中坡位 半阳坡

2 结果与分析

2.1 祁连圆柏群落垂直层次结构特征

野外群落调查共统计到植物 101 种,其中乔木

4 种,隶属于 4 科 4 属,灌木 10 种,隶属于 5 科 8 属,草本 87 种,隶属于 27 科 66 属,各层物种丰富度总体表现为草本>灌木>乔木(表 4)。乔木层树种组成单一,祁连圆柏为建群种,偶有青扦(*Picea wilsonii*)、白桦、山杨或云杉(*P. asperata*)为伴生种;灌木层物种稀少,林下灌木主要为金露梅、银露梅、灰栒子、窄叶鲜卑花(*Sibiraea angustata*)、绣线菊(*Spiraea salicifolia*)、刺红珠、鲜黄小檗、昌都锦鸡儿(*Caragana changduensis*)、高山柳(*Salix cupularis*)、唐古特忍冬(*Lonicera tangutica*),且在林地内零星分布;草本层物种较乔木与灌木丰富,优势草本为披针叶苔草(*C. lanceolata*)、青藏苔草(*C. moorcroftii*)、披碱草、美丽风毛菊(*Saussurea pulchra*)、长柱沙参(*Adenophora stenanthina*)、阿尔泰狗娃花(*Aster altaicus*)、黑柴胡(*Bupleurum smithii*)、长叶火绒草(*Leontopodium junpeianum*)、小花草玉梅(*Anemone rivularis* var. *floreminore*)、甘西鼠尾草(*Salvia przewalskii*)。总体来看,群落自上而下在垂直方向上形成乔木、灌木、草本 3 个层次,林分层次简单,群落中草本种类较灌木与乔木丰富,层间植物极少。

表 4 样地各层物种丰富度统计

Table 4 Species statistics of each layer of the plots						
生活型	科	属	种	物种丰富度		
				最大值	最小值	平均值±标准差
乔木	4	4	4	4.00	1.00	1.29±0.69
灌木	5	8	10	7.00	3.00	4.42±0.93
草本	27	66	87	35.00	14.00	22.52±4.93

2.2 林地天然更新

统计更新发现,林地内更新个体基径均>1 cm,基径<1 cm 的幼苗数量为 0,因此仅对 1 cm≤基径≤5 cm 的更新幼树进行分析。本次调查更新幼树密度平均为 220 株·hm⁻²,67.74%的样地更新不良,幼树密度<500 株·hm⁻²,25.81%样地甚至没有更新,仅有 2 个样地更新幼树密度>500 株·hm⁻²(图 1)。更新种群的径级、高度级结构也是指示更新现状与未来发展潜力的重要的因子。由图 2 可见,幼树高度级结构分散,各高度分布不均匀,多处于 0.5~2 m,随高度级增加,更新幼树比例逐渐下降,说明幼树更新数量在减小。基径平均为 3.25 cm,分布范围为 1.8~5.0 cm,基径<1 cm 的幼苗数量为 0,大基径级所占比例>低径级,更新种群径级结构近似倒金字塔型,表明林下缺乏幼苗补充,更新种群处于衰退状态。

2.3 环境因子对天然更新影响的相关性分析

更新幼树密度与林分密度、林龄、平均树高等林

分特征和海拔等地形因子的相关性分析结果表明(图 3、图 4)幼树密度随林龄、平均树高的增加而逐渐减小,相关性均达到极显著水平($P<0.01$);林分密度与幼树密度间呈极显著正相关关系;不同草本盖度间幼树密度差异显著($P<0.05$);林分郁闭度、灌木密度、灌木盖度的影响未达到显著水平($P>0.05$)。地形因子中仅海拔对更新幼树具有积极作用,且幼树密度在不同海拔间差异显著;坡度、坡向、坡位等因素与更新幼树密度间具有微弱正相关关系,但相关性未达到显著水平($P>0.05$)。

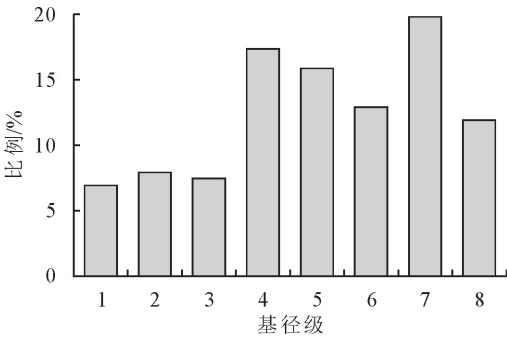


图 2 幼树的径级和高度级结构

Fig. 2 Diameter structure and height structure of sapling

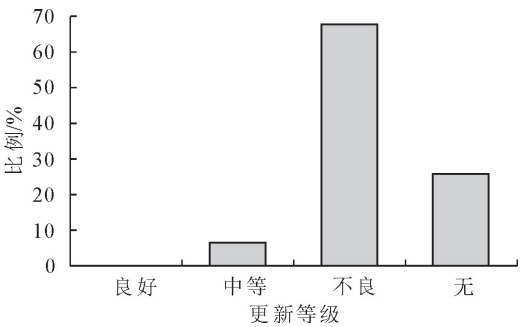


图 1 天然更新等级分布

Fig. 1 Grade distribution of natural regeneration

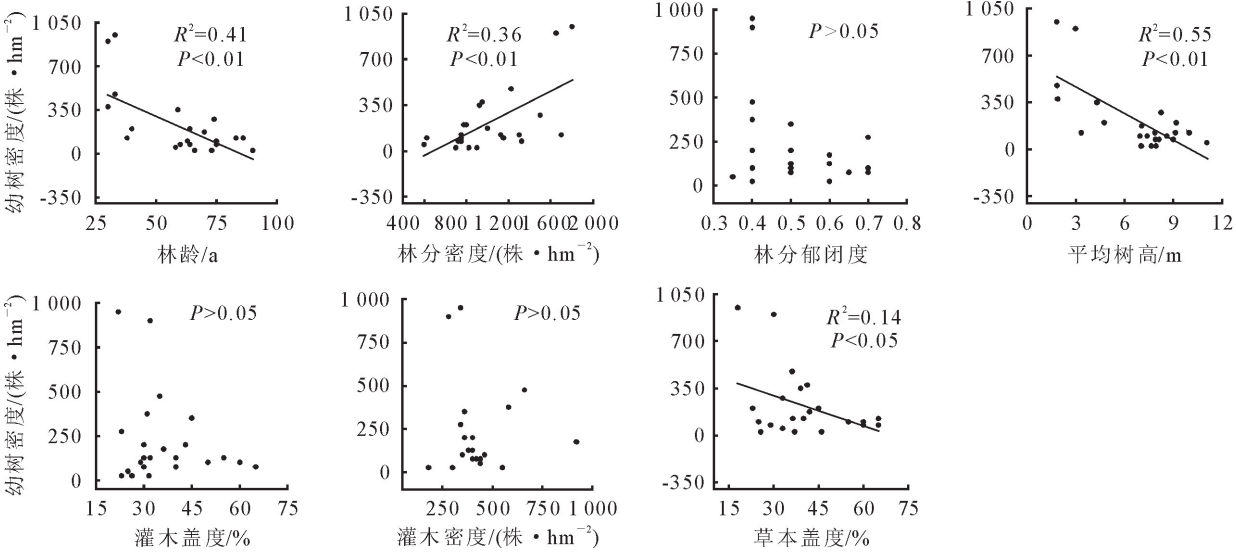
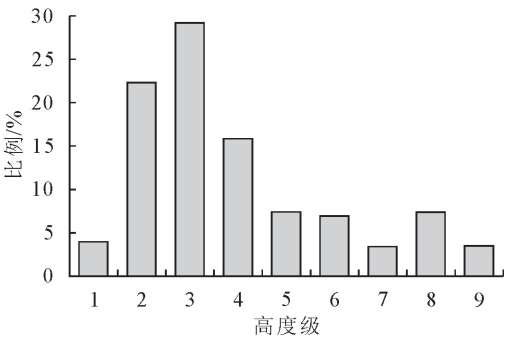


图 3 林分因子与更新幼树密度的相关性

Fig. 3 Relationships between stand characteristics and the density of sapling

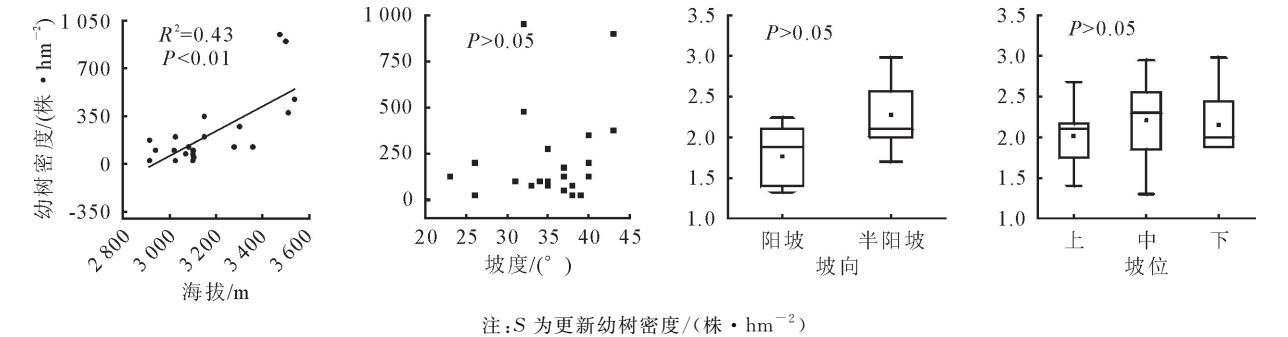
2.4 环境因素对天然更新影响的途径分析

由相关分析可知,林龄、林分密度、平均树高、草本盖度与海拔对幼树密度具有显著影响。为进一步探讨这 5 个生态因子的直接以间接作用及各因子的相对重要性,基于多元线性回归进行途径分析。分析之前,对响应变量更新幼树密度进行正态检验,结果不符合正态分布,因此对其进行以 10 为底的对数转换,转换后符合正态分布。结果表明(表 5):林分密度的直接途径系数最大为-0.288,且通过其他生态因子产生的间接影响也较大,说明它对天然更新

具有强烈的直接与间接作用。其次是林龄的直接效应为-0.230,其间接途径系数为-0.474,大于直接途径系数,说明林龄主要间接作用于更新。海拔与平均树高的直接途径系数分别为 0.182、-0.189,间接途径系数分别为 0.584、-0.574,可见二者也主要间接作用于天然更新。草本盖度的间接途径系数较大,为-0.456,然而其直接影响效应远低于其他因素,因而与幼树密度间表现为较低的相关性。途径分析决定系数的大小定量反应了各因素影响程度的大小,其绝对值越大,表明该因子作用越强。各

影响因子决定系数排序见表 6,林龄、林分密度、平均树高、海拔的决定系数相近,草本盖度决定系数远

小于这 4 个因子。可见,林龄、林分密度、平均树高与海拔是主要影响因子。



注:S 为更新幼树密度/(株·hm⁻²)

图 4 地形因子与更新幼树密度的相关性

Fig. 4 Relationships between terrain factors and the density of sapling

表 5 环境因子对更新幼树密度的通径分析

Table 5 Path analysis of environmental factors on the density of the saplings

环境变量	与 lgS 的相关系数	直接 通路系数	间接通路系数					总和
			X1	X2	X3	X4	X5	
X1	-0.701	-0.230	—	-0.078	-0.282	0.031	-0.142	-0.471
X2	0.554	0.288	0.141	—	0.062	-0.043	0.106	0.266
X3	-0.763	-0.189	-0.158	-0.284	—	0.022	-0.154	-0.574
X4	-0.382	0.074	-0.114	-0.169	-0.098	—	-0.075	-0.456
X5	0.766	0.182	0.266	0.168	0.180	-0.030	—	0.584

注:X1 代表林龄;X2 代表林分密度;X3 代表平均树高;X4 代表草本盖度;X5 代表海拔;S 代表更新幼树密度。

表 6 各环境变量的决定系数的绝对值

Table 6 Absolute values of determination coefficients of each variable

变量	X1	X2	X3	X4	X5
决定系数	0.270	0.236	0.253	0.062	0.246
排序	1	4	2	5	3

3 结论与讨论

3.1 结论

祁连圆柏天然林更新不良,不具有持续更新能力。林下更新幼苗数量为 0,更新幼树密度平均为 220 株·hm⁻²,6.45%样地更新密度>500 株·hm⁻²,67.74%样地幼树密度<500 株·hm⁻²,25.81%样地没有更新,更新幼树种群处于衰退状态。

天然更新受林分与地形因素的影响。林分密度、平均树高、草本盖度、海拔与林龄对更新幼树密度具有显著影响。其中林分密度对更新幼树密度具有直接与间接促进作用;林龄、平均树高、草本盖度起间接阻碍作用;海拔主要起间接促进作用。

3.2 讨论

3.2.1 祁连圆柏天然林更新特征 根据森林资源规划设计调查技术规范(GB 26424-2010-T)^[21]中天然更新等级评价标准,当更新苗高度≥50 cm 时,更新密度处于 500~2 499 株·hm⁻²,天然更新等级为中等;更新密度<500 株·hm⁻²,天然更新等级为不良(表 2)。本研究中祁连圆柏更新密度平均为

220 株·hm⁻²,多数样地幼树密度<500 株·hm⁻²,表明祁连圆柏天然林更新不良。林分垂直层次结构影响着林下光照、营养等资源的分配。研究表明,垂直分层丰富的林分比结构单一的林分光照分布异质性更大,同时林下光照更强^[5],祁连圆柏天然林大都为天然纯林,乔木层树种单一,灌木稀少,林下草本种类较乔木与灌木层丰富,垂直结构简单,不能充分利用各种营养与空间资源,抵御自然灾害能力不足,生态系统脆弱,导致幼苗补充不足与天然更新困难^[15,22]。本研究还发现更新幼树种群处于衰退状态,祁连圆柏天然林不具有持续更新能力。这可能归因于母树种群密度小,种源缺乏,加之林下草本种类较乔木与灌木丰富,与种子竞争资源而使林下缺乏幼苗补充。另外,麦秀林场寒冷干旱的气候条件与牧民的乱砍滥伐、放牧干扰等活动造成更新幼树成活率低^[22],更新苗的死亡率大于产生率,因而幼树种群呈现衰退状态。

3.2.2 环境因素对天然更新的影响 林分因子是影响林分生长与结构的重要因素,同时在调节森林基本动态过程(天然更新)方面发挥关键作用^[7]。本研究中林分密度对更新幼树密度具有直接与间接正效应,与 F. Yu *et al*^[13]、康冰等^[6]研究结果一致。试验所调查样地林分密度分布于 400~1 800 株·hm⁻² 范围,即使是最大值的林分密度也适中,林分密度由低密度增加至中等密度,一方面林下光照强

度减小,土壤温度、湿度、水分等生态因子较适宜,对更新幼树产生间接影响,另一方面种源增加,为更新提供了有力的保障,促进天然更新。林分密度促进祁连圆柏天然更新,但整体来看还是偏低,且生长于青藏高原高寒区域,寒冷干旱的气候造成母本健康状况差,不利于更新,因此,未来应加强母树的健康管理。随林龄的增加,幼树个体数量不断减少,与前人研究结果不一致^[16,23]。产生差异原因是本研究更新幼树种群径级结构近似倒金字塔型,幼树种群低龄级个体所占比例多于高龄级个体,年龄结构属衰退型,因而,随林龄的增加,幼树密度减少。此外,平均树高对祁连圆柏天然更新也有显著影响,研究区各个样地树高分布比较平均,分层不明显,随树高增加,其会截获幼树生长所需光照,到达下层光照减少^[5],从而阻碍了更新,对幼树密度产生间接抑制作用。因此,对树冠茂盛的母树,可进行修枝处理,减少光照截获量,改善林内光照、通风条件,促进天然更新。

研究表明,草本盖度与更新幼树密度表现为负相关关系,灌木与幼树密度的相关性不显著。一些研究证实,过密的林下植被与幼苗、幼树竞争养分与空间等资源,阻碍更新^[24];还有研究发现林下灌木、草本层会阻挡阳光直射,为某些受光抑制的针叶幼苗的生长提供隐蔽条件^[10]。本研究灌木对幼树密度影响未达到显著水平,这是因为各样地中灌木稀少,高度相较于更新幼树偏低。草本盖度对幼树密度具有间接负效应,祁连圆柏群落中草本种类较乔木、灌木丰富,阻碍种子与土壤接触,与幼苗、种子竞争资源产生竞争排斥作用,占据幼苗的潜在生态位,而种子与幼苗阶段是幼树形成必经阶段,因而对幼树密度产生抑制作用。在天然林管理过程中,应除去过密的草类,采取松土保墒措施,减少种子萌发障碍,改善幼苗幼树生长发育的条件。

立地条件对降雨与太阳辐射具有再分配作用,影响生境的微气候条件、土壤厚度以及土壤水分,也是影响制约天然更新的重要因素之一。研究发现海拔的升高导致温度、降水等气象因子降低,且高海拔地区空气稀薄,太阳辐射与紫外线较强,其对于幼苗生长发育是不利的,因而高海拔地区更新困难^[4]。然而本研究海拔对更新幼树密度的作用主要表现出间接正效应,这可能是因为一方面试验所调查的样地,海拔升高,林分密度增大,避免了阳光直射,减少水分蒸发,部分缓和了低温与高辐射带来的不利于发育的影响;另一方面高海拔地区放牧频率低,不易遭受践踏等干扰。因此对于低海拔区域可适当进行围栏封育、禁止放牧措施,减少人为干扰,保护林内环境,保障天然更新的顺利进行。相关性分析发现,

更新幼树密度不受坡位、坡度与坡向的影响,与黄萍等^[7]的结果不一致。研究所调查的祁连圆柏天然林多位于石质山,土层薄,土壤贫瘠,不同坡位间土壤含水量、灌木层覆盖度变化不明显,加之样地大都位于阳坡,半阳坡,坡度多为 30°~40°的陡坡,光照强度、日照时数差异较小,因而坡位、坡度、坡向并未对更新幼树特征产生显著影响。

整体而言,三江源东部麦秀林场祁连圆柏天然更新现状较差,不具有持续更新能力,环境因素已不能满足更新的需求,因此在加强林分管理的同时,还应采取修枝、除草、松土保墒、围栏禁牧等人工辅助措施促进天然更新。后续应结合祁连圆柏群落结构、种群动态及空间格局、林地土壤肥力研究,采取合理的经营与管理措施,不断优化林分结构,促进天然更新,以期形成健康、稳定、可持续的森林生态系统。

参考文献:

[1] KHAINE I, WOO S Y, KWAK M, *et al.* Factors affecting natural regeneration of tropical forests across a precipitation gradient in Myanmar[J]. *Forests*, 2018, 9: 143.

[2] 魏玉龙, 李嘉悦, 温晶, 等. 基于林缘效应对兴安落叶松天然更新及分布格局的研究[J]. *西北林学院学报*, 2019, 34(3): 15-20.

WEI Y L, LI J Y, WEN J, *et al.* Natural regeneration and distribution pattern of *Larix gmelini* based on forest edge effect [J]. *Journal of Northwest Forestry University*, 2019, 34(3): 15-20. (in Chinese)

[3] GARDNER C J, BICKNELL J E, BALDWIN-CANTELO W, *et al.* Quantifying the impacts of defaunation on natural forest regeneration in a global meta-analysis[J]. *Nature Communications*, 2019, 10(1): 4590.

[4] 张希彪, 上官周平, 王金成, 等. 子午岭人工油松林群落更新特征及影响因子[J]. *山地学报*, 2014, 32(5): 561-567.

ZHANG X B, SHANGGUAN Z P, WAN J C, *et al.* The regeneration characteristics and affecting factors of *Pinus tabulaeformis* artificial forests of ziwu mountains, China[J]. *Journal of Mountain Science*, 2014, 32(5): 561-567. (in Chinese)

[5] 欧芷阳, 庞世龙, 谭长强, 等. 林分结构对桂西南蚬木种群天然更新的影响[J]. *应用生态学报*, 2017, 28(10): 3181-3188.

OU Z Y, PANG S L, TAN C Q, *et al.* Effects of structure on natural regeneration of *Excentrodendron hsienmu* population in southwest Guansi, China[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2017, 28(10): 3181-3188. (in Chinese)

[6] 康冰, 王得祥, 崔宏安, 等. 秦岭山地油松群落更新特征及影响因子[J]. *应用生态学报*, 2011, 22(7): 1659-1667.

[7] 黄萍, 刘艳红. 北京松山油松林林分结构和地形对幼苗更新的影响[J]. *生态学杂志*, 2018, 37(4): 1003-1009.

HUANG P, LIU Y H. Effects of stand structure and terrain factors on seedling regeneration of *Pinus tabulaeformis* forest in the Songshan national nature reserve, Beijing[J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2018, 37(4): 1003-1009. (in Chinese)

[8] 邓磊, 张文辉, 何景峰, 等. 不同采伐强度对辽东栎林幼苗更新

的影响[J]. 西北林学院学报, 2011, 26(2): 160-166.

DENG L, ZHANG W H, HE J F, *et al.* Effects of different cutting intensities on seedling regeneration of *Quercus liaotungensis*[J]. Journal of Northwest Forestry University, 2011, 26(2): 160-166. (in Chinese)

[9] 姚杰, 闫琰, 张春雨, 等. 吉林蛟河针阔混交林乔木幼苗组成与月际动态[J]. 植物生态学报, 2015, 39(7): 717-725.

YAO J, YAN Y, ZHANG C Y, *et al.* Composition and monthly dynamics of tree seedlings in a coniferous and broad-leaved mixed forest in Jiaohe, Jilin Province, China[J]. Acta Phytocologica Sinica, 2015, 39(7): 717-725. (in Chinese)

[10] LUO M, ZHENG X, DU Y. Natural regeneration of an artificial platycladus orientalis stand in Beijing[J]. Nature Environment and Pollution Technology, 2017, 16(1): 287-293.

[11] MONTEIRO-HENRIQUES T, FERNANDES P M. Regeneration of native forest species in mainland Portugal; identifying main drivers[J]. Forests, 2018, 9: 11.

[12] REDMOND M D, KELSEY K C. Topography and overstory mortality interact to control tree regeneration in spruce-fir forests of the southern Rocky Mountains[J]. Forest Ecology and Management, 2018, 427: 106-113.

[13] YU F, WANG D X, SHI X X, *et al.* Effects of environmental factors on tree seedling regeneration in a pine-oak mixed forest in the Qinling Mountains, China[J]. Journal of Mountain Science, 2013, 10(5): 845-853.

[14] 刘少冲, 陈立新, 段文标, 等. 影响不同林型天然红松混交林林隙更新的土壤特征因子[J]. 生态学报, 2017, 37(12): 4072-4083.

LIU S C, CHEN L X, DUAN W B, *et al.* Effects of soil characteristics on forest gap regeneration in different types of natural *Pinus koraiensis* mixed forest[J]. Acta Ecologica Sinica, 2017, 37(12): 4072-4083. (in Chinese)

[15] 张志东, 毛培利, 刘玉虹, 等. 林分结构对烟台黑松海岸防护林天然更新的影响[J]. 生态学报, 2010, 30(8): 2205-2211.

[16] 陈启民, 罗青红, 宁虎森, 等. 古尔班通古特沙漠南缘不同林龄人工梭梭林主林层和更新层特征[J]. 应用生态学报, 2017, 28(3): 739-747.

CHEN Q M, LUO Q H, NING H S, *et al.* Characteristics of main layer and regeneration layer of *Haloxylon ammodendron* plantations at different ages on the southern edge of the Gurbantunggut desert, northwest China[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2017, 28(3): 739-747. (in Chinese)

[17] SUN Q L, LI B L, ZHOU C H, *et al.* A systematic review of research studies on the estimation of net primary productivity in the Three-River Headwater Region, China[J]. Journal of Geographical Sciences, 2017, 27(2): 161-182.

[18] 董旭. 青海省森林资源评价[J]. 安徽农业科学, 2009, 37(12): 5727-5728, 5751.

[19] 王礼先, 张志强. 森林植被变化的水文生态效应研究进展[J]. 世界林业研究, 1998(6): 15-24.

[20] 施立新, 余新晓, 马钦彦. 国内外森林与水质研究综述[J]. 生态学杂志, 2000, 19(3): 52-56.

[21] 国家林业局调查规划设计院. 森林资源规划设计调查技术规程: GB/T 26424-2010 [M]. 北京: 中国标准出版社, 2010.

[22] 杨玲, 康永祥, 李小军, 等. 黄帝陵古柏群林下天然更新研究[J]. 西北林学院学报, 2015, 30(1): 82-86.

YANG L, KANG Y X, LI X J, *et al.* Natural regeneration of the ancient *Platycladus orientalis* in the mausoleum of the Yellow Emperor[J]. Journal of Northwest Forestry University, 2015, 30(1): 82-86. (in Chinese)

[23] 罗梅, 郑小贤. 金沟岭林场落叶松人工林天然更新动态研究[J]. 中南林业科技大学学报, 2016, 36(9): 7-11.

LUO M, ZHEN X X. Dynamic study of naural regeneration of *Larix olgensis* plantation in Jingouling forest farm[J]. Journal of Central South University of Forestry and Technology, 2016, 36(9): 7-11. (in Chinese)

[24] DUCLOS V, BOUDREAU S, CHAPMAN C A. Shrub cover influence on seedling growth and survival following logging of a tropical forest[J]. Biotropica, 2013, 45(4): 419-426.

(上接第 51 页)

[38] YAN J, ZHANG D, ZHOU G, *et al.* Soil respiration associated with forest succession in subtropical forests in Dinghushan Biosphere Reserve[J]. Soil Biology and Biochemistry, 2009, 41(5): 991-999.

[39] 张维伟, 薛文艳, 杨斌, 等. 桥山栎林群落结构特征与物种多样性相关关系分析[J]. 生态学报, 2019, 39(11): 3991-4001.

ZHANG W W, XUE W Y, YANG B, *et al.* Analysis of the relationship between the structural characteristics of the forest community of Bridge Mountain and species diversity[J]. Ecology, 2019, 39(11): 3991-4001. (in Chinese)

[40] 解婷婷, 苏培玺, 周紫鹃, 等. 荒漠绿洲过渡带沙拐枣种群结构及动态特征[J]. 生态学报, 2014, 34(15): 4272-4279.

[41] 安静, 吴玲, 王海娟, 等. 不同干扰程度下沙生植物异翅独尾草的种群结构与动态特征[J]. 生态学报, 2017, 37(6): 2023-2032.

[42] 张婕, 上官铁梁, 段毅豪, 等. 灵空山辽东栎种群年龄结构与动态[J]. 应用生态学报, 2014, 25(11): 3125-3130.

ZHANG J, SHANGGUAN T L, DUAN Y H, *et al.* Age structure and dynamics of *Quercus wutaishanica* population in Lingkong Mountain of Shanxi Province, China [J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2014, 25(11): 3125-3130. (in Chinese)

[43] 秦运芝, 张佳鑫, 刘检明, 等. 湖南八大公山 25 hm² 常绿落叶阔叶混交林动态监测样地群落组成与空间结构[J]. 生物多样性, 2018, 26(9): 1016-1022.

QIN Y Z, ZHANG J X, LIU J M, *et al.* Community composition and spatial structure in the Badagongshan 25 hm² forest dynamics Plot in Hunan Province[J]. Biodiversity Science, 2018, 26(9): 1016-1022. (in Chinese)

[44] 宋庆丰, 王兵, 牛香, 等. 江西大岗山低海拔常绿阔叶林物种组成与群落结构特征[J]. 生态学杂志, 2020, 39(2): 384-393.

SONG Q F, WANG B, NIU X, *et al.* The characteristic of species composition and community structure of low-aititude ever-green broad-leaved forest in Dagang Mountain, Jiangxi Province[J]. Chinese Journal of Ecology, 2020, 39(2): 384-393. (in Chinese)