

濒危植物急尖长苞冷杉种群生命表分析

卢杰^{1,2}, 潘刚^{1,2}, 罗大庆^{1,2}, 郑维列^{1,2}, 郭其强^{1,2}, 秦元丽³

(1. 西藏农牧学院 高原生态研究所, 西藏 林芝 860000; 2. 西藏林芝高山森林生态系统国家野外科学观测研究站, 西藏 林芝 860000; 3. 广西林业科学研究院, 南宁 530001)

摘要: 急尖长苞冷杉是我国二级保护植物, 处于易危状态。在西藏色季拉山, 对急尖长苞冷杉种群全面调查的基础上, 以种群生命表及生存理论为基础, 编制色季拉山阳坡、阴坡及总体急尖长苞冷杉种群特定时间生命表, 分别绘制存活曲线、死亡率曲线、亏损率曲线, 以及积累死亡率函数、死亡密度函数和危险率函数曲线, 并分析种群动态变化。结果表明: 生长在阳坡、阴坡及总体的急尖长苞冷杉种群各龄级个体数量均随年龄增长呈直线下降趋势, 生境对种群的结构和动态有较大影响, 幼苗死亡率阴坡大于阳坡, 老龄个体死亡率阳坡大于阴坡; 生长在阳坡种群的存活曲线属 Deevey- II 型中的 B₃ 亚型, 生长在阴坡种群的存活曲线属 Deevey- III 型, 总体种群的存活曲线也属 Deevey- III 型; 三个生命表中引入的几个函数都能较好地说明了种群的结构和动态变化。研究结果可为该资源的管理及持续利用提供理论依据。

关键词: 种群; 生命表; 存活曲线; 急尖长苞冷杉

中图分类号: S718. 542; S791. 14

文献标识码: A

文章编号: 1005-3409(2010)05-0212-05

Analysis to the Life Table of Endangered Population *Abies Georgei*

LU Jie^{1,2}, PAN Gang^{1,2}, LUO Daqing^{1,2}, ZHENG Weilie^{1,2}, GUO Qiqiang^{1,2}, QIN Yuanli³

(1. Research Institute of Plateau Ecology, Tibet Agriculture and Animal Husbandry College, Linzhi, Tibet 860000, China; 2. National Forest Ecosystem Research Station in the Sejila Mountain of Tibet, Linzhi, Tibet 860000, China; 3. Research Institute of Forest in Guangxi, Nanning 530001, China)

Abstract: *Abies georgei* var. *smithii* is second class protected species and in approximately endangered states in our country. After a comprehensive investigation on *A. georgei* population that distributes in Sejila mountain of Tibet, the life table was worked out, life characteristics and population dynamics were analyzed. The results showed that the individual number of *A. georgei* were decreased straightly with age class increasing, the habitat affected on the population structure and dynamics of *A. georgei*, seedling mortality rate of *A. georgei* that distributes in shady slope was more than that of sunny slope, adult mortality rate was opposite, the survival curve of the sunny slope population trend to the B₃ subtype of Deevey- II, the survival curve of the shady slope and total population trend to the type of Deevey- III. The functions used in three life tables could well explain the structure and dynamics of *A. georgei* population. The research results provided the theoretical basis for management and sustainable utilization of *A. georgei*.

Key words: population; life table; survival curve; *Abies georgei*

生命表最先应用于人口学, 特别是人寿保险事业; 1947 年, Deevey 最先把人口生命表的概念和方法应用于动物生态学的研究; 1954 年, Morris 和 Miller 等人又把生命表技术应用于研究昆虫的自然种群; 1963 年, Miller 最先把生命表应用于植物种群的研究^[1-2]。由于生命表是研究种群数量动态的一个

重要手段, 因此在种群生态学的研究中应用越来越广泛, 我国 20 世纪 80 年代以来在植物种群生命表的编制与研究方面做了大量工作, 涉及到的研究对象中珍稀濒危物种较多, 如南方红豆杉 (*Taxus chinensis* var. *mairei*)、元宝山冷杉 (*Abies yuanbaoshanensis*)、裂叶沙参 (*Adenophora lobophylla*)、云南红豆

收稿日期: 2010-3-12

资助项目: 国家科技支撑计划重点项目 (2007BAC06B08); 西藏林芝高山森林生态系统国家野外科学观测研究 (2006-2010); 西藏农牧学院青年基金项目 (07986013)

作者简介: 卢杰 (1973-), 男, 四川安岳人, 硕士, 讲师, 主要从事森林保护与森林生态教学与研究。E-mail: tibetlj@163.com

© 1994-2010 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

杉(*T. yunnanensis*)、长苞铁杉(*T. longibracteata*)、太白红杉(*Larix potaninii* var. *chinensis*)、脱皮榆(*Ulmus lamellöse*)、银杉(*Cathaya argyrophylla*)、桫欏(*Alsophila spinulosa*)、大花黄牡丹(*Paonia ludlowii*)等^[3-9]。这些研究不仅丰富了研究对象、揭示了种群的数量动态,而且也为物种种群生态学的进一步研究奠定了基础。目前对高原地区珍稀植物急尖长苞冷杉种群的生命表编制与研究基本未见报道。

急尖长苞冷杉(*Abies georgei* var. *smithii*)系松科(Pinaceae)冷杉亚科(Abietoideae)冷杉属(*Abies* L.)植物,为我国特有,主要分布于滇西北,川西南,藏东南的海拔 2 500~ 4 500 m 的高山地带,常与长苞冷杉(*A. georgei*)、川滇冷杉(*A. forrestii*)、中甸冷杉(*A. ferreana*)等树种混交成林,也有单独成林者^[10]。由于急尖长苞冷杉种群有减少趋势,并且其野生种群面临灭绝的机率较高,故已列入中国物种红色名录,处于易危状态,同时亦属国家二级保护植物^[11]。目前已有对该植物(群落)的生长状况、群落结构、物种多样性、水文特征、小气候特征、养分循环、死亡木及林隙更新等方面的研究^[12-16]。本文以种群生命表及生存分析理论为基础对该植物的种群统计进行初步探讨,统计分析其种群数量特征,为急尖长苞冷杉易危机制的探讨,资源的保护与管理以及人工造林奠定一定的基础。

1 研究区自然概况

研究区位于西藏林芝高山森林生态系统国家野外科学观测研究站所在的西藏色季拉山,为藏东南林区的腹心地带,也是自然环境极为特殊多样的地区。该区属较典型的亚高山温带半湿润气候区,冬温夏凉,干湿季分明。年平均气温- 0. 73℃,最高月(7月)平均气温 9. 23℃,最低月(1月)平均气温- 13. 98℃,极端最低气温- 31. 6℃,极端最高气温 24. 0℃。年均日照时数 1 150. 6 h,日照百分率 26. 1%,日照时数最高月为 12 月 151. 7 h,日照百分率为 40%。年均相对湿度 78. 83 %,年均降水量 1 134. 1 mm,蒸发量 544. 0 mm,占年均降水量的 48. 0%,6- 9 月为雨季,占全年降水的 75%~ 82%,其中 8 月降雨最多,平均为 294. 2 mm,占全年降水的 30%。土壤主要以山地棕壤和酸性棕壤为主,pH 值为 4~ 6,土层较厚,腐殖质化过程明显。该区地带

性植被属于亚热带植被,共有种子植物 1 091 种,隶属于 103 科 475 属,其中裸子植物 2 科 7 属 13 种,被子植物 101 科 468 属 1 078 种,包括热带分布类型 91 属,温带分布类型 309 属,特有分布 8 属,特有种的比例高达 12. 4%。研究区乔木层以急尖长苞冷杉占绝对优势,另有林芝云杉(*linzhi spruce*)、方枝柏(*Sabina saltuaria*)等,灌木层主要有西南花楸(*Sorbus rehderiana*)、柳叶忍冬(*Lonicera lanceolata*)、峨眉蔷薇(*Rosa omeiensis*)、紫玉盘杜鹃(*R. uvarifolium*)、冰川茶藨子(*Ribes glaciale*)等,盖度约 60%;草本主要有多穗蓼(*Polygonum polystachyum*)、杂色钟报春(*Primula alpicola*)、锡金柳叶菜(*Epilobium sikkimense*)、疏叶虎耳草(*Saxifraga substrigosa*)、卷叶黄精(*Polygonatum cirrhifolium*)等,盖度约 40%;林内苔藓层发达,盖度达 90%;另有层间植物长松萝(*Usnea longissima*)长于冷杉林冠。

2 研究方法

2.1 野外调查

2006 年 5- 9 月,在西藏林芝高山森林生态系统国家野外科学观测研究站所在的色季拉山阳坡和阴坡设置 30 m× 30 m 的样地 15 块,其中阳坡 7 块,阴坡 8 块,样地面积共计 13 500 m²。采用相邻格子法把每块样地分成 9 个 10 m× 10 m 的样方,在每样方内对急尖长苞冷杉进行每木检尺,调查记录急尖长苞冷杉高度、胸径(基径)、冠幅、枝下高、坐标等;同时在每个样方内采用对角线方法设置 5 个 2 m× 2 m 小样方,调查并记录灌木的种类、高度、胸径、盖度等,对角线方法设置 9 个 1 m× 1 m 小样方,调查记录草本植物的种类、高度、多度、盖度、急尖长苞冷杉幼苗更新情况等。另外调查记录样地的海拔、坡向、坡位、坡度、土壤、地被物等环境因子。

2.2 龄级确定

由于树木生长周期长,不可能追踪到所有个体的生长周期,因此只能通过现实不同年龄阶段的个体数量统计来推断种群时间上的动态过程,即在特定时间上观察种群内各个年龄组上的存活状况。由于测定每一种群个体年龄较困难,故采用空间代替时间的方法,根据急尖长苞冷杉生活史及调查数据的特点,对其龄级进行了划定(表 1)。

表 1 急尖长苞冷杉种群龄级划分

龄级	I (<i>H</i> < 100)	II (<i>H</i> > 100)	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII
指标 <i>D</i> /	2. 5	2. 5	2. 5~	12. 5~	22. 5~	32. 5~	42. 5~	52. 5~	62. 5~	72. 5~	82. 5~	≥92. 5
cm			12. 5	22. 5	32. 5	42. 5	52. 5	62. 5	72. 5	82. 5	92. 5	

注: *D*——胸径; *H*——树高。
© 1994-2010 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. <http://www.cnki.net>

把急尖长苞冷杉树高或胸径(基径)从小到大的顺序看作是时间顺序的关系,即以上各级对应的是各龄级,统计各龄级株数,编制种群生命表,进而分析其动态变化。

2.3 生命表编制

编制静态生命表首先要满足三个假设:一是种群的数量是静态的,即密度不变;二是年龄组合是稳定的,即种群的年龄结构与时间无关,各年龄的比例不变;三是个体的迁移是平衡的,即没有移出和移入的差数。特定时间生命表一般包含如下栏目: x ——单位时间年龄等级的中值; a_x ——在 x 龄级内现有个体数; l_x ——在 x 龄级开始时标准化的存活个体数(一般转换为1 000); d_x ——从 x 到 $x+1$ 龄级间隔期内标准化死亡个体数; q_x ——从 x 到 $x+1$ 龄级间隔期间死亡率; L_x ——从 x 到 $x+1$ 龄级间隔期间还存活的个体数; T_x ——从 x 龄级到超过 x 龄级的个体总数; e_x ——进入 x 龄级个体的生命期望寿命; K_x ——各年龄组致死力(损失度)。各项都是相互关联的,其关系如下: $l_x = a_x/a_0 \times 1000$; $d_x = l_x - l_{x+1}$; $q_x = d_x/l_x \times 100\%$; $L_x = (l_x + l_{x+1})/2$; $T_x = \sum_{x=\infty}^{\infty} L_x$; $e_x = T_x - L_x$; $K_x = \ln l_x - \ln l_{x+1}$ 。

为了进一步对急尖长苞冷杉种群进行生存分析,特引入生存分析中的4个函数项目于生命表栏目中,即生存函数 S_x 、积累死亡率函数 F_x 、死亡密度函数 f_x 、危险率函数 j_x ^[17-19]: $S_x = P_1 P_2 P_3 \dots P_x$ (P_x 为存活频率), $F_x = 1 - S_x$, $f_x = (S_{x-1} - S_x)/h_x = q_x S_{x-1}/h_x$ (h_x 为区间长度, q_x 为死亡频率), $j_x = f_x/S_x = 2q_x/[h_x(1 + p_x)]$ 。

3 结果与分析

3.1 生命表数据的处理与编制

由于静态生命表是用同一时期收集到的种群所有个体的径阶编制而成,反映了多个世代重叠的年龄动态历程中的一个特定时间,而不是对同生种群的全部生活史的追踪,故在生命表中会出现死亡率为负值的情况。对此, Wreten 等认为,生命表分析中产生的一些负值情况与数学假设不符,但仍提供了有用的生态学记录,即表明种群并非静止不动,而是在迅速发展或衰落之中,江洪为此在云杉种群生命表编制过程中采用了匀滑技术^[20]。本研究也采用此方法进行处理,对生长在阳坡、阴坡及总体急尖长苞冷杉种群调查数据匀滑修正后得 a_x^* ,再根据静态生命表的编制方法和生存理论编制出阳坡、阴坡及总体种群特定时间的生命表和生存分析函数值表,并做出相应的存活曲线图、死亡率曲线、亏损率曲线、生存函数、积累死亡率函数、死亡密度函数和危险率函数曲线(图1-3)。

3.2 存活曲线

存活曲线是借助于存活个体数量来描述特定年龄死亡率,它是通过把特定年龄组的个体数量相对作图而得到的。其绘制方法有两种,一是以存活量 l_x 对年龄作图;另一种方法是以存活量的对数值 $\ln l_x$ 为纵坐标,以年龄为横坐标作图。本文以存活量的对数值为纵坐标,以年龄为横坐标分别绘制生长在阳坡、阴坡和总体急尖长苞冷杉种群的存活曲线(图1)。Deevey把存活曲线分为三种类型:I型(又称A型)是凸曲线,属于该型的种群绝大多数个体均能实现其平均生理寿命,早期死亡率较低,但当活到平均生理年龄时,短期内将全部死亡;II型(又称B型)是直线,属于该型的种群各个年龄的死亡率基本相同;III型(又称C型)是凹曲线,属于该型的种群幼体死亡率高,一旦存活到一定年龄,死亡率降低而稳定,只有极少数个体能活到生理寿命。Odum又将II型(B型)分为三个亚型,一是 B_2 亚型,即标准的对角直线型,种群各个年龄的死亡率基本相同,另两个是 B_1 亚型和 B_3 亚型,即曲线围绕对角线波动,其中, B_1 亚型种群的各时期成活量相差较大, B_3 亚型种群幼年期的死亡率较高,而成年以后的死亡率则降低^[21]。根据以上的划分类型,由图1可知,本研究中生长在阳坡急尖长苞冷杉种群的存活曲线应属于II型中的 B_3 亚型,生长在阴坡和总体的急尖长苞冷杉种群的存活曲线属于C型。不同存活曲线反映了急尖长苞冷杉种群的数量动态的变化趋势及结构特征,从表2和图1可以看出,生长在阳坡、阴坡及总体急尖长苞冷杉幼体(I龄)存活量较高,也即幼体储备量大,II龄后存活数量迅速下降,生长在阳坡、阴坡和总体分别下降了79.12%, 92.20%, 88.90%, II龄存活数量也下降较快,相对II龄存活数量下降分别为68.35%, 56.41%, 62.12%,以后各龄级趋于稳定,但阳坡的VI和VII龄存活数量下降不明显。

经采用 Hett 与 Loucks 的检验估算方法进行统计拟合,阳坡种群两模型方程为: $y = 601.31e^{-0.485x}$ ($R^2 = 0.925$)、 $y = 1209.5x^{-2.312}$ ($R^2 = 0.924$),由于指数模型的 R^2 值大于幂函数模型的 R^2 值,于是认为,阳坡种群的存活曲线更趋于 Deevey II型,结合图1与 Odum 把 Deevey II型的细划分情况,判定为 Deevey II型中的 B_3 亚型;阴坡种群两模型方程为: $Y = 281.62e^{-0.477x}$ ($R^2 = 0.8742$)、 $Y = 680.21x^{-2.389}$ ($R^2 = 0.9656$),总体种群两模型方程为: $Y = 381.75e^{-0.491x}$ ($R^2 = 0.9056$)、 $Y = 858.43x^{-2.404}$ ($R^2 = 0.9526$),经过对不同种群不同模型的 R^2 值比较,认为生长在阴坡种群和总体种群的存活曲线均趋于 Deevey II型。

表 2 急尖长苞冷杉种群静态生命表

种群	龄级	a_x	a_x^*	l_x	$\ln l_x$	d_x	q_x	L_x	T_x	e_x	K_x
阳坡	I	1166	1166	1000	6.9078	782	0.7820	609	971	0.9710	1.5233
	II	254	254	218	5.3845	149	0.6835	144	362	1.6606	1.1504
	III	103	78	69	4.2341	15	0.2174	62	218	3.1594	0.2451
	IV	39	63	54	3.9890	12	0.2222	48	156	2.8889	0.2513
	V	34	49	42	3.7377	13	0.3095	36	108	2.5714	0.3704
	VI	43	34	29	3.3673	13	0.4483	23	72	2.4828	0.5947
	VII	24	19	16	2.7726	1	0.0625	16	49	3.0625	0.0645
	VIII	22	17	15	2.7081	4	0.2667	13	33	2.2000	0.3102
	IX	11	13	11	2.3979	3	0.2727	10	20	1.8182	0.3185
	X	6	9	8	2.0794	4	0.5000	6	10	1.2500	0.6931
	XI	4	5	4	1.3863	3	0.7500	3	4	1.0000	1.3863
	XII	2	1	1	0.0000	1	1.0000	1	1	1.0000	
阴坡	I	3825	3825	1000	6.9078	922	0.9220	539	690	0.6900	2.5510
	II	299	299	78	4.3567	44	0.5641	56	151	1.9359	0.8303
	III	164	129	34	3.5264	10	0.2941	29	95	2.7941	0.3483
	IV	52	92	24	3.1781	10	0.4167	19	66	2.7500	0.5390
	V	60	55	14	2.6391	2	0.1429	13	47	3.3571	0.1542
	VI	46	46	12	2.4849	4	0.3333	10	34	2.8333	0.4055
	VII	35	31	8	2.0794	1	0.1250	8	24	3.0000	0.1335
	VIII	21	26	7	1.9459	2	0.2857	6	16	2.2857	0.3365
	IX	23	21	5	1.6094	2	0.4000	4	10	2.0000	0.5108
	X	10	10	3	1.0986	1	0.3333	3	6	2.0000	0.4055
	XI	5	5	2	0.6931	1	0.5000	2	3	1.5000	0.6931
	XII	1	1	1	0.0000	1	1.0000	1	1	1.0000	
总体	I	4991	4991	1000	6.9078	889	0.8890	556	758	0.7580	2.1982
	II	553	553	111	4.7095	69	0.6216	77	202	1.8198	0.9719
	III	267	210	42	3.7377	12	0.2857	36	125	2.9762	0.3365
	IV	91	151	30	3.4012	11	0.3667	25	89	2.9667	0.4568
	V	94	92	19	2.9444	1	0.0526	19	64	3.3684	0.0541
	VI	89	88	18	2.8904	6	0.3333	15	45	2.500	0.4055
	VII	59	59	12	2.4849	3	0.2500	11	30	2.500	0.2877
	VIII	43	43	9	2.1972	2	0.2222	8	19	2.1111	0.2513
	IX	34	34	7	1.9459	4	0.5714	5	11	1.5714	0.8473
	X	16	16	3	1.0986	1	0.3333	3	6	2.0000	0.4055
	XI	9	9	2	0.6931	1	0.5000	2	3	1.5000	0.6931
	XII	3	3	1	0.0000	1	1.0000	1	1	1.0000	

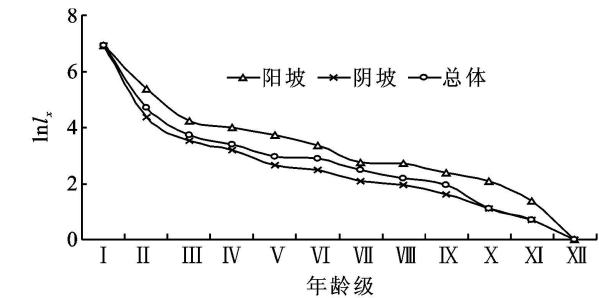


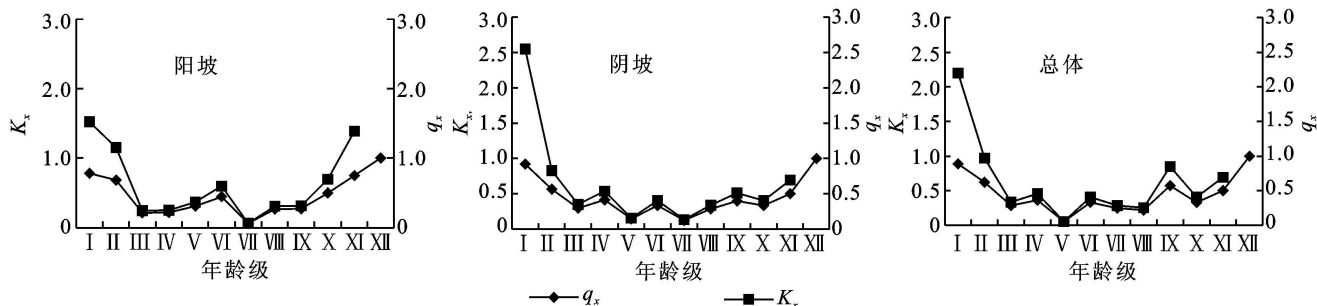
图 1 急尖长苞冷杉种群存活曲线

3.3 死亡率和亏损率曲线

死亡率和亏损率曲线图反映了生长在阳坡、阴坡及总体的急尖长苞冷杉种群死亡率与亏损率的动态变化情况,随龄级增大,死亡率与亏损率变化趋势保持一致(图 2)。结合表 2 可以看出,急尖长苞冷杉幼苗(I 龄)的储备量较大,死亡率最高,在生长到幼树(II 龄)这一过程中,死亡量达到最高峰,仅有 8%~20% 的幼苗成活进入以后的阶段,中间动态变化趋于平衡,到后期基本达到生理寿命,死亡率也较高。出

现幼苗死亡率高,主要是由于林下地被物特别是苔藓层特别厚,一般在 20 cm 以上,最厚达 50 cm,种子在地被层发芽,从地被层中吸取营养,随着幼苗的生长,需要的养分越来越多,而根又很难穿过地被层扎进土壤,加之激烈的植株间竞争,自疏与他疏作用增加,个体间的分化现象严重,故导致大部分幼苗死亡。

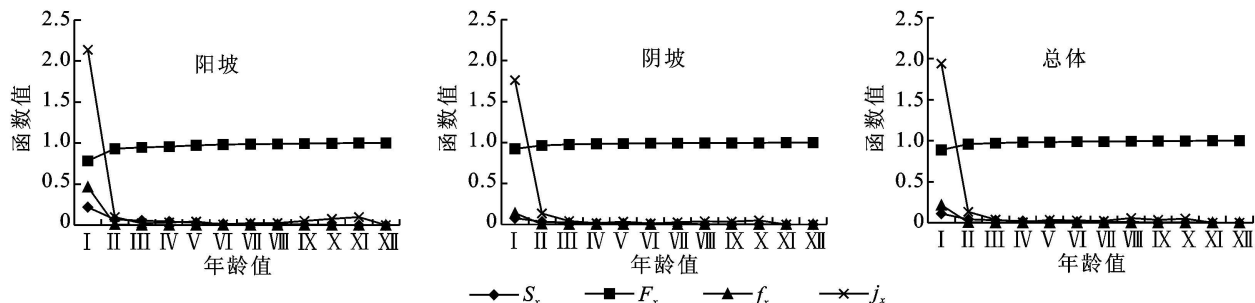
结合表 2,生长在阳坡和阴坡急尖长苞冷杉种群各龄级个体数量随年龄增长呈直线下降趋势。但生境对急尖长苞冷杉种群的结构和动态有较大影响,种群在 I 龄级期间,生长在阴坡的个体数量大于阳坡;从 I 龄级到 II 龄级,生长在阴坡的种群死亡率大于阳坡。说明急尖长苞冷杉在幼苗期间喜耐阴生境,随着个体年龄增加,对光照的需求不断增加,但由于上层乔木的遮光,导致种群大量减少;到 II 龄级,急尖长苞冷杉高度增加,能够接受一定光照,死亡量大幅度下降。此后种群随年龄增加基本呈直线下降趋势,到 XI 龄级,老龄个体也急剧减少,其中阳坡死亡率大于阴坡。

图 2 急尖长苞冷杉种群死亡率(q_x)和亏损率(K_x)曲线

3.4 生存函数曲线

生存函数曲线表明, 生长在阳坡、阴坡和总体的急尖长苞冷杉种群的生存函数值、死亡密度函数值和

危险率函数值随龄级增大呈单调下降, I 龄到 II 龄下降最快, 以后各龄动态变化趋于平衡; 积累死亡率函数值随龄级增大为单调上升, I 龄到 II 龄上升最快, 以后各龄动态变化趋于平衡(图 3)。

图 3 急尖长苞冷杉种群生存函数(S_x)、积累死亡率函数(F_x)、死亡密度函数(f_x)和危险率函数(j_x)曲线

4 结论与讨论

对生长在色季拉山阳坡、阴坡及总体的急尖长苞冷杉种群生命表分析表明, 三者各龄级个体数量随年龄增长均呈直线下降趋势, 生境对种群的结构和动态有较大影响, 种群死亡最高峰期均出现在 II 龄级阶段。通过作存活曲线图和采用 Hett 与 Loucks 的检验估算方法判定存活曲线类型为: 生长在阳坡种群的存活曲线属 Deevey II 型中的 B_3 亚型, 生长在阴坡种群的存活曲线属 Deevey III 型, 总体种群的存活曲线也属 Deevey III 型。

在许多植物种群生命表分析中, 引入生命表栏目中的 4 个生存函数都能很好说明种群的结构和动态变化, 如木荷 (*Schima superba*)、长苞铁杉 (*T. longibracteata*) 等^[6, 22]。本研究中, 4 个生存函数同样很好地说明了急尖长苞冷杉种群的结构和动态变化, 生存函数曲线表明, 生长阳坡、阴坡及总体急尖长苞冷杉种群均具有前期变化幅度大、后期变化幅度小的特点, 这与种群的存活曲线、死亡率曲线和亏损率曲线分析结果基本一致。

本研究中, 阴坡和阳坡二者不同生境对急尖长苞冷杉种群结构和动态有较大影响, 如阴坡种群密度 ($6\ 307$ 株/ hm^2) 远大于阳坡种群密度 ($2\ 711$ 株/ hm^2), 特别是幼苗 (I 龄级) 储备量差异较大, 阴坡幼

苗密度为 $5\ 313$ 株/ hm^2 , 而阳坡为 $1\ 851$ 株/ hm^2 , 这主要是阴坡的水分等条件较好, 有利于种子萌发生长; 另外种群从 I 龄级到 II 龄级过渡中, 死亡率阴坡大于阳坡, 这主要是阴坡地被层厚以及自疏与他疏作用导致幼树死亡。

参考文献:

- [1] 李俊清. 森林生态学[M]. 北京: 高等教育出版社, 2006.
- [2] 尚玉昌. 普通生态学[M]. 2 版. 北京: 北京大学出版社, 2006: 98-127.
- [3] 李先琨, 向悟生, 唐润琴. 濒危植物元宝冷杉种群生命表分析[J]. 热带亚热带植物学报, 2002, 10(1): 9-14.
- [4] Zhang W H, Zu Y G. Study on population life table and survivorship curves of *adenophora lobophylla*, an endangered species, compared with *A. potaninii*, a wide spread species[J]. Acta Phytocologica Sinica, 1999, 23(1): 76-86.
- [5] 苏建荣, 张志钧, 邓疆. 云南红豆杉种群结构与生命表分析[J]. 林业科学研究, 2005, 18(6): 651-656.
- [6] 吴承祯, 洪伟, 谢金寿, 等. 珍稀濒危植物长苞铁杉种群生命表分析[J]. 应用生态学报. 2000, 11(3): 333-336.
- [7] 茹文明, 张桂萍, 毕润成, 等. 濒危植物脱皮榆种群结构与分布格局研究[J]. 应用与环境生物学报, 2007, 13(1): 14-17.
- [8] 宋萍, 洪伟, 吴承祯, 等. 珍稀濒危植物桫欏种群结构与动态研究[J]. 应用生态学报, 2005, 16(3): 413-418.

(下转第 221 页)

为潜蚀作用的进一步研究提供了理论基础。应该指出的是, 渗流潜蚀作用发生的环境往往复杂, 其环境的多样性反映了各种形式的渗流潜蚀作用起始过程的多样性, 从而决定了渗流潜蚀作用具有继发性、动态性和复杂性等特征, 这一事实也表明了对于渗流潜蚀作用发生临界条件的判断应就其具体受力情况来具体分析, 而建立一个普遍适用的渗流潜蚀发生模型则是不现实的。

参考文献:

[1] Von Richthofen F. Führer Forschungsreisende. Aüßer-
tung zu Beobachtungen über Gegensände der physischr-
en Geographie and Geologie[M]. Berlin: Oppeenheim,
1886: 308 310.

[2] Van Zyl D, Harr M E. Seepage erosion analyses of struc-
tures[C]. Proc., 10th Int. Conf. On Soil Mech. And
Found. Engrg., Sweden: Stockholm, 1981: 530- 509.

[3] Lane E W. Security from underseepage: Masonary dams
on earth foundations[J]. Trans. Am. Soc. Civ. Eng.,
1935: 1235- 1272.

[4] Terzaghi K. Der Grundbruch an Stauwerken und seine
Verhuetung[J]. Die Wasserkraft, 1922, 17: 445 449.

[5] Khilar K C, Folger H S, Gray D H. Model for piping-
plugging in earthen structures[J]. J. Geotech. Eng.,
1985, 111(7): 833 846.

[6] Parker G G. Piping, a geomorphic agent in landform de-
velopment of the drylands[J]. IAHS Publ., 1963, 65:
103- 113.

[7] Parker G G, Jenne E A. Structural failure of western
hig ways[J]. Highway Research Record, 1967, 203: 57
76.

[8] Gilman K, Newson M D. Soil Pipes and Pipeflow: A
Hydrological Study in Upland Wales[M]. Geobooks,
Norwich, 1980.

[9] Jones J A A. The Nature of Soil Piping: a Review of
Research[M]. BGRG Research Monograph Series No.
3. Norwich: Geo Books, 1981.

[10] Harvey A. The role of piping in the development of
badlands and gully systems in south east Spain[C]//
Bryan R B, Yair A. Badland Geomorphology and Pip-
ing. Geobooks, Norwich, 1982: 317 335.

[11] 李喜安. 黄土暗穴的成因及其公路工程灾害效应研究
[D]. 西安: 长安大学, 2004.

[12] 刘忠玉, 乐金朝, 苗天德. 无粘性土中管涌的毛管模型
及其应用[J]. 岩石力学与工程学报, 2004, 23 (22) :
3871- 3876.

[13] 李广信, 周晓杰. 土的渗透破坏及其工程问题[J]. 工程
勘察, 2004(5): 10- 14.

[14] 李喜安, 彭建兵, 郑书彦. 湿陷性黄土地区土壤洞穴侵
蚀模式研究[J]. 水土保持研究, 2005, 12 (6): 25- 27,
97.

(上接第 216 页)

[9] 杨小林, 王秋菊, 兰小中, 等. 濒危植物大花黄牡丹
(*Paeonialudlowii*) 种群数量动态[J]. 生态学报, 2007, 27
(3): 1242- 1247.

[10] 樊金拴. 中国冷杉林[M]. 北京: 中国林业出版社, 2007:
169- 172.

[11] 汪松, 解焱. 中国物种红色名录(第一卷: 红色名录)
[M]. 北京: 高等教育出版社, 2004.

[12] 朱登强, 王军辉, 张守攻, 等. 西藏色季拉山西坡急尖长
苞冷杉林物种多样性及群落结构的垂直分布格局[J].
西北林学院学报, 2008, 23(5): 1- 6.

[13] 茹广欣, 朱登强, 王军辉, 等. 西藏色季拉山急尖长苞冷
杉林地的物种多样性与土壤养分特征[J]. 河南农业大
学学报, 2008, 42(5): 511- 515.

[14] 辛学兵, 王景升, 翟明普. 西藏色季拉山冷杉林生态系
统养分的淋溶输出研究[J]. 林业科学研究, 2004, 17
(1): 6- 11.

[15] 杨小林, 崔国发, 任青山, 等. 西藏色季拉山林线植物群
落多样性格局及林线的稳定性[J]. 北京林业大学学
报, 2008, 30(1): 14- 20.

[16] 罗大庆, 郭泉水, 黄界, 等. 西藏色季拉原始冷杉林死亡
木特征研究[J]. 生态学报, 2004, 24(3): 635- 639.

[17] 冯士雍. 生存分析 I [J]. 数学的实践与认识, 1982(3) :
72- 80.

[18] 冯士雍. 生存分析 II [J]. 数学的实践与认识, 1982(4) :
64- 74.

[19] 冯士雍. 生存分析 III [J]. 数学的实践与认识, 1983(1) :
70- 76.

[20] 江洪. 云杉种群生态学[M]. 北京: 中国林业出版社,
1992: 8- 40.

[21] 戈峰. 现代生态学[M]. 北京: 科学出版社, 2002.

[22] 胡喜生, 洪伟, 吴承祯, 等. 木荷天然种群生命表分析
[J]. 广西植物, 2007, 27(3): 469- 474.