DOI: 10.5846/stxb201409291919

贾宏汝, 陈云, 张旭, 袁志良, 王海亮, 黄群策.小秦岭自然保护区秦岭冷杉死亡原因初探.生态学报,2016,36(7): - .
Jia H R, Chen Y, Zhang X, Yuan Z L, Wang H L, Huang Q C.Preliminary analysis of the cause of *Abies chensiensis* mortality in Xiaoqinling national nature reserve.Acta Ecologica Sinica,2016,36(7): - .

小秦岭自然保护区秦岭冷杉死亡原因初探

贾宏汝[1], 陈 云[2], 张 旭[3], 袁志良[3], 王海亮[4], 黄群策[1,*]

1 郑州大学离子束生物工程省重点实验室,郑州 450052

2 河南农业大学林学院,郑州 450002

3 河南农业大学生命科学学院,郑州 450002

4 河南小秦岭国家级自然保护区管理局,灵宝 472500

摘要:小秦岭国家级自然保护区濒危植物秦岭冷杉(*Abies chensiensis*)近几年出现了不明原因的衰败死亡现象,并有不断扩展的趋势,分析研究就地保护这一珍稀植物资源迫在眉睫。本研究在对小秦岭全部秦岭冷杉定位监测的基础上,通过对活树、死树分布和结构的对比分析,并采用相关分析、偏相关分析和结构等式模型(Structural Equation Models, SEM)结合环境因子,探讨了秦岭冷杉的生存状况和死亡原因。结果如下:(1)枯死树与活树分布基本相一致,活树个体中小树和大树相对较少,死亡个体主要为小树和中龄树;(2)秦岭冷杉的生长与海拔、坡度、土壤含水量和土壤温度呈显著的相关性;(3)SEM 分析结果显示,秦岭冷杉活树与土壤含水量和温度呈明显的正相关系,而死树却表现出负相关关系,枯死树与空间位置和地形表现出的负相关关系要明显大于活树。上述结果说明,秦岭冷杉幼苗和小树较少,更新能力差,秦岭冷杉的死亡不是个别现象和局部环境变化所造成的;秦岭冷杉的生长与海拔、坡度、土壤含水量和土壤温度关系密切;土壤含水量和温度对秦岭冷杉生长具有促进作用,是影响秦岭冷杉死亡和衰败的重要环境因素。在今后秦岭冷杉经营保护过程中要注意微环境的变化,减少人为因素对环境的干扰。

关键词:濒危植物;小秦岭;等结构模式方程;土壤;地形

Preliminary analysis of the cause of *Abies chensiensis* mortality in Xiaoqinling national nature reserve

JIA Hongru[1], CHEN Yun[2], ZHANG Xu[3], YUAN Zhiliang[3], WANG Hailiang[4], HUANG Qunce[1,*]

1 *Henan Provincial Key Laboratory of Ion Beam Bio-engineering, Zhengzhou University, Zhengzhou* 450052, *China*

2 *College of Forestry, Henan Agricultural University, Zhengzhou* 450002, *China*

3 *College of Life Sciences, Henan Agricultural University, Zhengzhou* 450002, *China*

4 *Administration Bureau of Xiaoqinling National Nature Reserve of Henan, Lingbao* 472500, *China*

Abstract: Species conservation, especially of endangered species, has become a major focus of the international ecology community. Global biodiversity is in decline, which is affecting ecosystem functioning, and efforts to protect and mitigate this decline are necessary. Within the last few years, the endangered plant species *Abies chensiensis* has experienced unexplained mortality in the Xiaoqinling national nature reserve. The analysis of potential causes of this mortality is necessary to avoid further loss of *A. chensiensis*. This study examines the condition of living trees to identify the cause of this widespread mortality and suggests a management plan for the protection and population recovery of *A. chensiensis*. Ecological communities are complex systems characterized by multiple interacting processes, and the growth and death of species is a complex process. Univariate statistical methods do not provide sufficient information to identify the requirements of ecological

基金项目:河南省科技攻关(132102110133); 河南省教育厅科学技术研究重点项目(14A180013)

收稿日期:2014-09-29; **修订日期**:2015-06-24

* 通讯作者 Corresponding author.E-mail: quncehuang@126.com

development. The structural equation model (SEM) is a multivariate statistical method that can solve complex problems and that is increasingly applied by ecologists to solve complex problems. SEMs provide a unique perspective in addressing scientific questions. A census of all living and dead *A. chensiensis* trees in Xiaoqinling was used for a comparative analysis. The distribution pattern and structure of living and dead trees, combined with correlation analysis, partial correlation analysis, and SEM was used to explore the conditions of live individuals and the cause of mortality. Dead trees had similar distribution patterns as living trees. The ratio of large and small trees was small for living *A. chensiensis*; dead trees were mostly young and middle-aged individuals. The distribution of *A. chensiensis* was significantly correlated with elevation, slope, soil moisture, and soil temperature. SEM analysis showed that the living individuals were significantly positively correlated with soil heterogeneity, while dead trees showed a negative correlation. There was a stronger negative correlation between dead trees and position and topography compared to living trees. These results suggest that the numbers of *A. chensiensis* seedlings and young trees are low and that the ability of the species to regenerate is poor. *Abies chensiensis* mortality is likely caused by local environmental changes, rather than by a single phenomenon, and the growth and regeneration of *A. chensiensis* is closely related to elevation, slope, and soil water content. To protect *A. chensiensis*, changes in the microenvironment must be minimized and human interference with the environment must be reduced. Heterogeneity of soil moisture and temperature promotes growth and is an important environmental factor that influences mortality. The observed mortality of *A. chensiensis* may be a result of human activity and gradual climate change that has affected precipitation, temperature, and other environmental factors.

Key Words: endangered plant; Xiaoqinling; Structural Equation Models; soil; topography

随着人口增加,经济活动不断加剧,生物多样性正急剧下降,生态系统更是遭到了严重破坏,大量物种已经灭绝或处于灭绝的边缘[1-2]。目前,物种保护特别是濒危物种保护成了国际社会关注的热点。

秦岭冷杉(*Abies chensiensis*)是松科冷杉属常绿乔木,为我国特有珍稀濒危植物,主要分布于秦巴山地[3]。秦岭冷杉树干通直,木质松软,富含冷杉胶,是非常优良的用材和林化产品资源树种[4]。秦岭冷杉喜气候温凉湿润,通常生于山沟溪旁或阴坡,天然更新较差,加上过度采伐,分布面积日益缩小,现多为零散分布。秦岭冷杉的濒危状态已经引起不少学者的关注[5-6]。

秦岭冷杉死亡的现象在分布地陕西秦岭,神农架等都有报道[7-9],特别是河南省鲁山县石人山,秦岭冷杉出现大量死亡,死亡数量目前已达 200 多株[10]。小秦岭国家级自然保护区主峰高 2413.8 m,为河南最高峰,生物资源丰富,区系成分复杂。小秦岭区域的秦岭冷杉群落是河南省保存较好的野生秦岭冷杉群落。可经过多年的跟踪调查,近 3—4 年小秦岭区域的秦岭冷杉也出现了不明原因的衰败死亡现象,并有不断扩展的趋势。为避免秦岭冷杉死亡现象的进一步扩大,分析研究就地保护这一珍稀植物资源迫在眉睫。

许多学者针对秦岭冷杉已经开展了一些非常有意义的研究。朱秀红等在石人山研究了秦岭冷杉群落特征并进行了群落分类[10];李为民等描述了秦岭山地秦岭冷杉的群落结构特征[3];张文辉等探讨了秦岭冷杉的地理分布和生物生态学特征[4]。这些研究结果有助于人们了解秦岭冷杉的群落结构特征。还有许多学者针对秦岭冷杉的结实特性[8-9]、幼苗扦插[11]和种子萌发[7,12]开展大量研究,在秦岭冷杉幼苗扦插、引种保护和培育等方面起到了指导作用。然而在秦岭冷杉生长状况不良并不断死亡原因研究方面并没有进展。是什么因素造成了秦岭冷杉的死亡? 这方面一直没有相关报道。

自然生态系统是多个相互作用的过程组成的,物种的生长和死亡过程也是复杂的[13-14]。随着研究的深入,单变量统计方法已经不能完全满足生态学发展的需要,因为它无法提供所研究内容的完整信息[15]。结构等式模型作为一种多变量的统计方法应运而生,为此类复杂问题的解决提供了一个合适的途径,近几年逐步为生态学家所应用,成为解决生态学中复杂问题的重要手段,对相关科学问题的解决提供了独特视角[16-18]。

土壤含水率、土壤温度和土壤电导率是土壤理化性质的重要指标,可以影响到植物根系对矿质元素的吸

收以及呼吸速率等生理过程[19];不同坡度的土壤养分含量以及不同海拔高度温度和降水等环境因素都存在很大差异[20-22];而秦岭冷杉的垂直分布跨越很大的海拔范围,受海拔影响明显[8,20]。定量分析这些环境因子对秦岭冷杉生长的影响对了解其种群更新和死亡具有很大意义。

本研究在对小秦岭全部秦岭冷杉定位监测的基础上,通过对活树、死树分布和结构的对比分析,并采用相关分析和现代统计分析方法(structural equation model, SEM)结合环境因子,探讨了秦岭冷杉的生存状况和死亡原因,研究结果对于全面了解小秦岭地区秦岭冷杉生存现状和死亡原因具有重要意义,同时对秦岭冷杉的扦插繁殖、引种育苗等具有参考价值。

1　研究区概况

河南小秦岭国家级自然保护区,位于豫陕两省交界的灵宝市西部、小秦岭北麓;地理坐标为北纬 34°23′—34°31′,东经 110°23′—110°44′;保护区东西长 31 km,南北宽 12 km,总面积 15160 hm^2,其主峰老鸦岔高达 2413.8m,为河南省境内最高峰。本区地处暖温带向亚热带的过渡区,为暖温带大陆性季风型半干旱气候,四季分明。年平均气温依不同的海拔,变化在 5.5—14.2℃之间,极端最低气温为-17.0℃,极端最高气温为 42.7℃;年均降水量在 506—719.2 mm。

2　研究方法

2.1　数据调查

通过设置样方的方法只能调查到部分秦岭冷杉。为实现对小秦岭地区全部秦岭冷杉的监测, 2014 年 6 月,由保护区工作人员带领,在对保护区全面踏查的基础上,对保护区所有的秦岭冷杉进行实地调查,包括秦岭冷杉活树个体和枯死树个体。采用 GPS 对每棵秦岭冷杉定位,长期监测,建立冷杉档案。对每棵树挂牌标记,记录树干 1.3 m 处胸径(DBH),树高低于 1.3 m 的秦岭冷杉测量其树干 DBH 最大处,并采用激光测高仪测量树高。调查过程中为降低人为观测影响造成的差异,参考树木健康性的评价定级[23],由同一人记录秦岭冷杉生长生境,分良好、一般和枯死评价秦岭冷杉个体存活状态。同时采用 GPS 记录每棵秦岭冷杉经纬度和海拔,地质罗盘来测量坡向和坡度。在树基不同方向 1 m 范围内选取三个点,采用土壤三参数速测仪测定了土壤表层土(0—10 cm)的土壤温度、土壤含水量和土壤电导率。

同时,为了解秦岭冷杉群落的概况,从海拔 2000 m 开始(秦岭冷杉主要生长于海拔 2000 m 以上),选择秦岭冷杉群落设置样方,共 16 个 20 m ×20 m 样地。样方采用 GPS 定位,记录其经纬度、海拔、坡度、坡向,及胸径≥1 cm 乔木种类、数量、胸径、树高和冠幅。

2.2　数据处理

本研究采用 Spearman 相关分析分别探讨活树和死树与环境因子之间的相关性。活树和死树可能同时受到多个环境因素的影响,因此同时采用偏相关分析,在剔除其他环境因子影响的条件下,研究了活树和死树与某一环境因子的相关程度。环境因子由海拔、坡度、坡向、土壤温度、土壤含水量和土壤电导率组成。土壤温度、土壤含水量和土壤电导率采用的是三个点的平均值。坡向用 0°—360°表示(0°表示正北方向、90°为正东方向、180°为正南方向、270°表示正西方向),分析时经过正弦转化。在分析过程中对环境数据进行了标准化处理。

结构等式模型(SEM)所能解决问题的范围和能力比主成分分析、聚类分析等传统多变量统计方法增大和提高了许多,其侧重于确证性检验,更加灵活,能够同时分析多个变量间的因果关系及强度大小[16]。SEM 主要可以处理观察变量、隐变量、综合变量和误差变量四类变量,观察变量指在观察或试验过程中能够直接测量的变量,在图示中用方框来代表;隐变量指无法从观察或实验中直接测量到的变量,用圆形表示;综合变量指多个显变量或隐变量的总体影响,以圆形表示;误差变量指数据分析过程中无法通过预测变量所解释的那部分效应,即残差项,误差变量不带任何边框。在 SEM 图形框架中,因果关系用(→)表示,箭头起点表示预测

变量,箭头所指方向为响应变量。SEM 方法主要分为三步:首先基于现有的知识对因果关系进行假定,建立“先验模型”;其次根据实验获得的数据对先验模型进行拟合;最后,对路径进行修改,得到最终模型[24-25]。

模型的基本假设有:(1)秦岭冷杉的生长受土壤环境的影响,并且活树主要为正相关关系,而枯死树以负相关关系为主;(2)空间位置和地形不但可以影响到土壤含水率、土壤温度和土壤电导率,还可以影响到秦岭冷杉的生长。基于 SEM 模型,分别分析了土壤(土壤含水率、土壤温度和土壤电导率)、坡度、海拔与活树和死树生长状况的关系。其中树体个体大小的观察变量为 DBH 和树高。分析前为使变量符合正态分布,所有变量进行了 log 转换。同时使用卡方统计、拟合优度指数和本特勒-波内特指数来评价模型拟合的优劣。SEM 分析过程中,三个评价指标可以通过参数“fit.indices=c("GFI", "RMSEA", "NFI")得到。

本研究所有分析和绘图均在统计学软件 R 2.15.3(R Development Core Team, http://www.Rproject.org)中进行,其中偏相关分析通过‘ggm’数据包实现,SEM 分析通过 sem 包进行,SEM 图形由内置的 Graphviz 生成[26]。

3 结果与分析

3.1 秦岭冷杉的分布、胸径结构以及群落特征

对秦岭冷杉普查结果如表 1 所示,表 2 为秦岭冷杉分布范围。在小秦岭自然保护区,秦岭冷杉有 232 棵,其中活树仅剩 158 棵,枯死树有 74 棵,枯死树占秦岭冷杉总个体数的 31.9%。从多年监测和死亡状态上判断枯死树的死亡时间段为近 3—4 年。枯死树的针叶已全部凋落,生长状态一般的秦岭冷杉生长势也有所减弱,针叶不同程度的出现枯黄,并且结实量较少。图 1 为秦岭冷杉活树和枯死树分布图,从图中可看出,枯死树并没有大片呈聚集分布,而是与活树分布基本相一致的,这说明秦岭冷杉的死亡原因不是局部原因造成的。对秦岭冷杉全面普查过程中,很难发现幼苗,个体数极其少。从图 2 可看出,活树的胸径主要集中在 10 cm 到 35 cm,树高主要集中在 5 m 到 10 m,也就是说,小树和大树相对较少。枯死树的个体主要集中在胸径 0 cm 到 30 cm 和树高为 0 m 到 10 m。

表 1 秦岭冷杉生长状况和环境因子概况

Table 1 The profiles of *Abies chensiensis Van* growth conditions and environmental factors

生长状况 Growth status	值 Value	环境条件 Environmental Conditions							
		胸径 DBH/cm	树高 Tree height/m	海拔 Elevation/m	坡度 Slope/°	坡向 Aspect/°	土壤含水/%vol	土壤温度 Soil temperature/℃	土壤电导率 Soil water content/μ.S.cm^{-1}
活树	最小值	3.50	1.10	2292	10.00	−0.93	15.30	10.50	193.30
(158 棵)	中间值	23.15	7.80	2377	30.00	0.09	21.37	12.75	562.30
Live trees	平均值	23.41	7.96	2367	30.92	0.25	22.03	12.97	580.90
	最大值	49.60	19.20	2412	80.00	0.96	40.03	17.97	1299.7
死树	最小值.	3.00	1.60	2290	0.00	−0.93	14.80	11.67	397.30
(74 棵)	中间值	19.20	5.70	2368	28.00	0.00	20.93	13.07	572.00
Dead tree	平均值	19.88	5.94	2363	27.90	0.21	21.73	13.45	602.50
	最大值	43.10	10.30	2407	60.00	0.96	29.40	17.80	818.30

表 2 秦岭冷杉空间分布范围

Table 2 The spatial distribution range of *Abies chensiensis Van*

生长状况 Growth status	西北角 Northwest		东北角 Northeast corner		西南角 Southwest corner		东南角 Southeastern corner	
	经度/° Longitude	纬度/° Latitude	经度/° Longitude	纬度/° Latitude	经度/° Longitude	纬度/° Latitude	经度/° Longitude	纬度/° Latitude
活树 Live trees	110.4759	34.4225	110.4791	34.4230	110.4783	34.4184	110.4791	34.4178
死树 Dead tree	110.4761	34.4223	110.4788	34.4224	110.4774	34.4220	110.4789	34.4184

从秦岭冷杉群落调查中可以看出,秦岭冷杉多数个体立地条件优越,群落的森林环境主要由秦岭冷杉决定,表 3 为秦岭冷杉样地概况。近几年的气象条件变化可能影响秦岭冷杉的生长,小秦岭自然保护区近三年的大气温度、大气湿度、太阳辐射和降雨量资料结果如图 3 所示。

表 3　秦岭冷杉样地概况

Table 3　A profile of *Abies chensiensis* plots

样地编号 Plots number	物种多度 Species abundance	物种丰富度 Species richness	科丰富度 Family richness	海拔 Elevation/m	坡度 Slope/°	坡向 Aspect/°	纬度 Latitude/°	经度 Longitude/°
1	160	45	26	2020	30	0	34.4272	110.4794
2	124	30	18	2075	20	180	34.4267	110.4800
3	71	28	18	2080	32	45	34.4264	110.4797
4	60	35	24	2120	20	315	34.4253	110.4803
5	71	19	15	2186	35	0	34.4242	110.4803
6	148	40	24	2220	30	225	34.4233	110.4803
7	74	29	20	2284	30	180	34.4231	110.4792
8	113	36	23	2303	15	0	34.4214	110.4758
9	135	34	19	2315	35	315	34.4225	110.4775
10	104	25	16	2324	35	0	34.4225	110.4786
11	146	37	18	2339	35	315	34.4222	110.4778
12	141	44	25	2350	40	225	34.4219	110.4783
13	181	37	17	2358	25	0	34.4219	110.4786
14	72	18	13	2378	25	0	34.4214	110.4783
15	98	32	17	2400	25	0	34.4208	110.4786
16	143	20	11	2413	25	315	34.4189	110.4789

3.2　相关和偏相关分析

Spearman 相关分析结果如表 4 所示,活树与海拔、土壤含水量和土壤温度表现出显著正相关或负相关,死树与海拔、坡度和土壤温度表现出显著负相关。由于 6 个环境因子之间可能存在一定的相互影响,因此偏相关分析更能说明 6 种因子的真实影响。结果表明(表 5),活树、死树与海拔和土壤温度都表现出显著相关,死树与坡度和土壤电导率都表现出显著的负相关作用。

3.3　SEM

根据基本假设建立初始模型(图 4),依据各变量之间的路径系数和修正指数,对初始模型进行修正,2 个最终模型见图 4,图中路径系数为标准化过后的。拟合优度指数、近似误差均方根和本特勒-波内特指数均显示各模型是可以接受的(表 6)。各变量之间的路径系数和显著度见表 7。活树模型中,模型可以解释秦岭冷杉个体大小变异的 31.68%,死树模型中,模型可以解释个体大小变异的 64.99%。SEM 分析结果与相关和偏相关分析结果是相一致的,并且 SEM 模型可以更好地拟合出各变量间直接、间接的相互作用,有助于更好地认识秦岭冷杉与土壤、地形之间复杂关系。图 4 中 2 个最终模型结果显示,秦岭冷杉活树与土壤环境(土壤含水量和土壤温度)呈明显的正相关系,而死树却表现出负相关关系,这与文章的假设是相一致的。另外值得注意的是,枯死树和活树与空间位置和地形都表现出负相关作用,枯死树与空间位置和地形的路径系数分别为

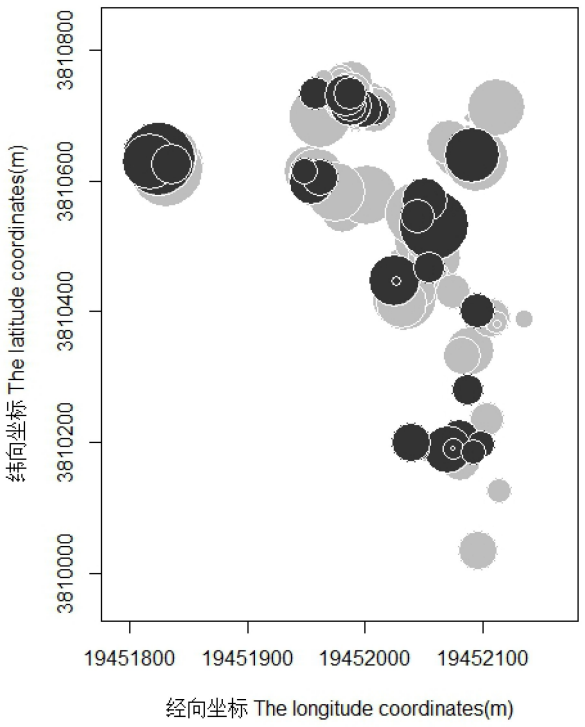

图 1　秦岭冷杉空间分布图

Fig. 1　*Abies chensiensis* space distribution

图中经纬度为高斯坐标,圆代表胸径大小,灰色代表活树,黑色代表死树

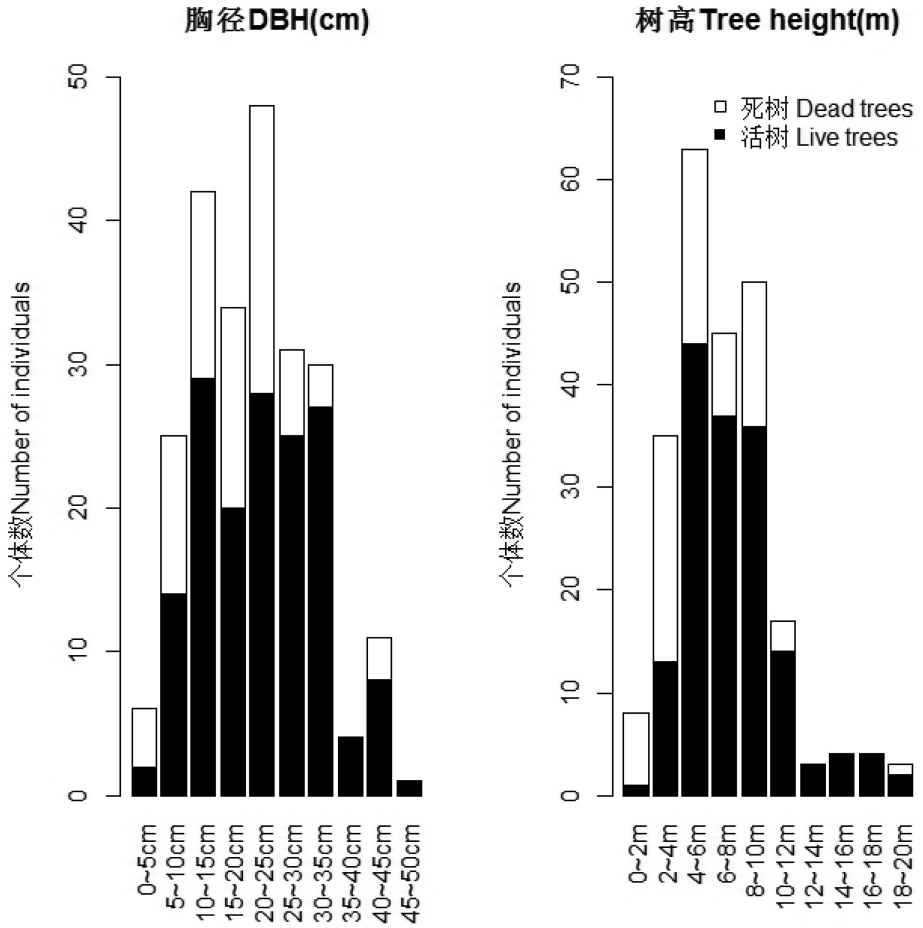

图 2 秦岭冷杉活树、死树胸径和树高直方图

Fig. 2 The distribution structure of DBH and height of*Abies chensiensis* of living and dead trees

-0.9479 和-0.7510,而活树分别为-0.0980 和-0.712。

表 4 秦岭冷杉活树、死树与环境因子的 Spearman 相关性

Table 4 Spearman correlation between growth status and environmental factors

生长状况 Growth status	变量 Variables	海拔 Elevation/m	坡度 Slope/°	坡向 Aspect/°	土壤电导率 Soil water content/ μ.S.cm^{-1}	土壤含水量 Soil water content/ %vol	土壤温度 Soil temperature/ ℃
活树	胸径	-0.226**	0.051	0.140	0.113	0.166*	0.310**
Live trees	树高	-0.419**	0.126	0.127	0.141	0.268**	0.383**
死树	胸径	-0.227*	-0.567**	0.179	-0.260	0.135	-0.362*
Dead tree	树高	-0.395**	-0.414**	0.128	-0.291	0.220	-0.397**

* $P<0.05$; ** $P<0.01$

表 5 秦岭冷杉活树、死树与环境因子的偏相关分析

Table 5 Partial correlation between growth status and environmental factors

生长状况 Growth status	变量 Variables	海拔 Elevation/m	坡度 Slope/°	坡向 Aspect/°	土壤电导率 Soil water content/ μ.S.cm^{-1}	土壤含水量 Soil water content/ %vol	土壤温度 Soil temperature/ ℃
活树	胸径	-0.244**	0.009	0.194*	0.037	0.191*	0.206**
Live trees	树高	-0.439**	-0.035	0.159*	0.049	0.322**	0.259**
死树	胸径	0.165*	-0.569**	0.072	-0.206**	-0.045	-0.362**
Dead tree 树高	-0.168*	-0.326**	0.096	-0.200**	0.069	-0.310**	

* $P<0.05$; ** $P<0.01$

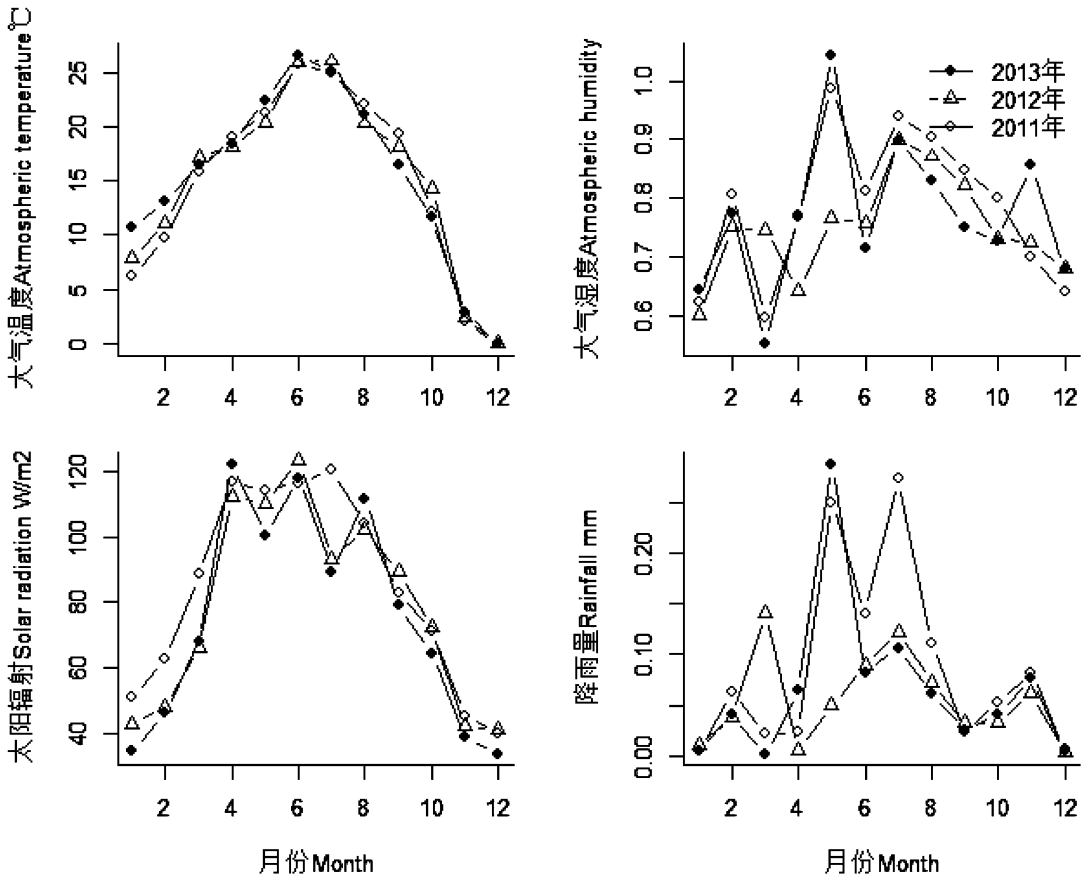

图 3　小秦岭自然保护区近三年气象条件变化

Fig. 3　The variation of meteorological condition in recent years in Xiaoqinling national nature reserve

表 6　SEM 拟合评价指标

Table 6　Evaluation index of the SEM fitting

模型 Models	生长状况 Growth status	拟合优度指数 Goodness-of-fit index	近似误差均方根 RMSEA index	本特勒-波内特指数 Bentler-Bonett index
参考范围 Reference range		>0.900	<0.200	>0.900
模型 1 Model 1	活树	0.995	0.116	0.983
模型 2 Model 2	死树	0.986	0.144	0.986

表 7　各变量间的路径系数

Table 7　Unstadardized and standardized coefficients are shown for each pathway

生长状况 Growth status	路径 Pathway	非标准化系数 Unstandardized coefficient	标准化系数 Standardized coefficient	*P* 值 *P* value
活树 Live trees	位置 → 个体大小	−0.1473	−0.1218	<0.01
	位置 → 土壤异质性	−0.0365	−0.0364	<0.01
	地形 → 个体大小	−0.1121	−0.0926	<0.01
	地形 → 土壤异质性	−0.0621	−0.0619	0.1460
	土壤异质性 → 个体大小	0.6414	0.5315	0.0482
死树 Dead tree	位置 → 个体大小	−0.9529	−0.5638	<0.01
	位置 → 土壤异质性	0.0289	0.0287	0.2170
	地形 → 个体大小	−0.8841	−0.5230	<0.01
	地形 → 土壤异质性	−0.1189	−0.1180	0.1642
	土壤异质性 → 个体大小	−0.4889	−0.2914	<0.01

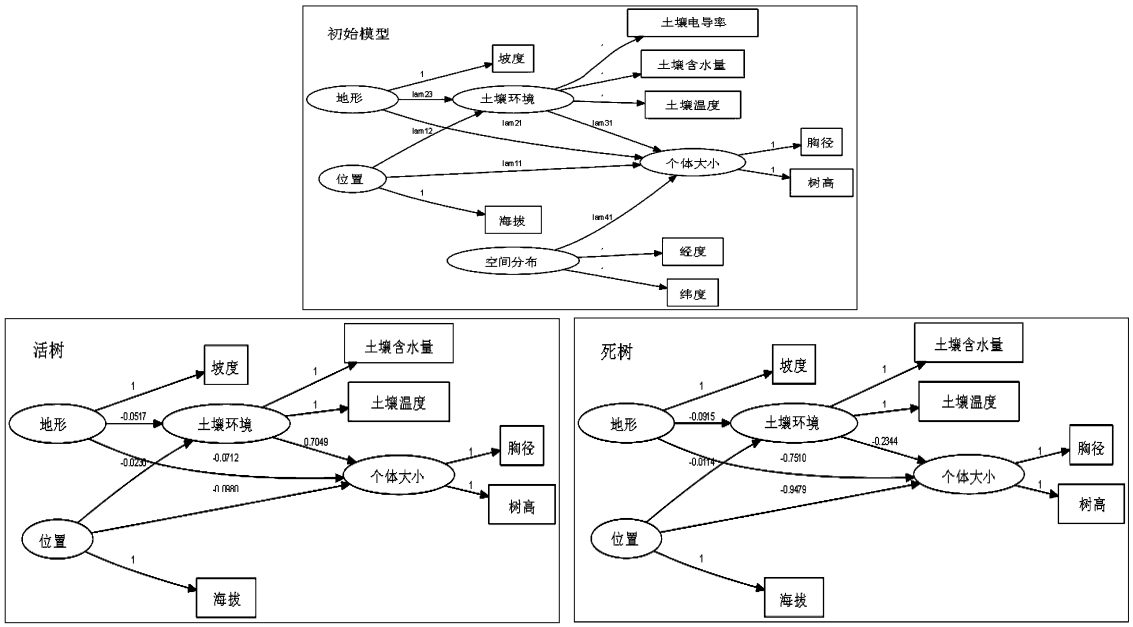

图 4 基于 SEM 建立的各变量间相互关系修正后的最终模型

Fig. 4 The final models of the relationship among variables based on SEM

Topography:地形, Position:位置, Slope:坡度, Soil. Environment:土壤环境, Elevation:海拔, Soil. Water. Content:土壤含水量, Soil. Temperature:土壤温度, Spatial.Distribution:空间分布, Longitude:经度, Latitude :纬度, Soil.Electric.Conductivity:土壤电导率,Individual.Size:个体大小, DBH:胸径, Tree.Hight:树高

4 结论与讨论

从秦岭冷杉普查结果可以发现,秦岭冷杉不仅死亡个体数量大,而且活树中很大一部分长势减弱,生长状况一般。从活树和死树分布来看,枯死树分布并没有呈聚集或成片分布,而是与活树分布是相一致的,这说明秦岭冷杉的死亡不是个别现象和局部环境变化所造成的。从秦岭冷杉活树个体的胸径和树高可以看出,幼苗和小树较少,更新能力差,这和许多有关秦岭冷杉种子和结实的研究结果是相一致,和结实率、种子的繁殖特征和鼠类啮食等因素存在一定关系[3, 8-9]。秦岭冷杉的生长状况和发展趋势不容乐观。

通过秦岭冷杉群落调查发现,秦岭冷杉多数个体立地条件优越,因此不存在因物种竞争而导致物种群体死亡的可能。并且近三年的大气温度、大气湿度、太阳辐射和降水量没有异常变化,也没有发生大规模的自然灾害,因此,气象条件并不是造成秦岭冷杉生长势减弱和死亡的限制性因子。这就很可能与环境因素变化或者人类干扰有关。

从以上分析可以看出,小秦岭地区秦岭冷杉死亡很大可能与环境因素的变化存在关系。张文辉等在研究中也表明环境因素在秦岭冷杉种群生殖过程中发挥了作用[4]。本研究相关和偏相关分析结果表明秦岭冷杉的生长与海拔、坡度、土壤含水量和土壤温度关系密切。秦岭冷杉的垂直分布跨越很大的海拔范围,不同海拔高度温度和降水等环境因素存在很大差异[20]。孙玉玲等在陕西秦岭地区研究表明秦岭冷杉球果和种子在不同海拔高度特征存在显著差异[8]。因此秦岭冷杉的生长受海拔影响比较大。不同坡度的土壤养分和含水量存在很大差异,缓坡养分含量相对于陡坡更丰富[21-22],而土壤含水量可以直接影响到秦岭冷杉的生长。并且秦岭冷杉自身对环境因素变化敏感,因此与海拔、坡度、土壤含水量和土壤温度等环境因素关系明显。同时本实验中测定的环境因子可以作为秦岭冷杉就地保护和引种育苗参考指标。

环境因素显著影响着秦岭冷杉的生长,那么,活树和枯死树与周围环境因素的关系有何差异呢? 是哪种环境因子造成了秦岭冷杉的死亡? SEM 分析结果进一步表明,活树与土壤含水量和温度呈强烈的正相关系,说明土壤含水量和温度对秦岭冷杉生长具有促进作用,而枯死树却表现出负相关作用。王婷等在同区域的伏

牛山嵩县研究表明该区域随着 5、6 月份气温升高,蒸发作用增强,容易造成土壤水分亏缺,从而限制了华山松的生长[27],而秦岭冷杉和华山松都属于松科植物。同时王铭等在研究中表明土壤温度是影响土壤呼吸作用的主要因素[28]。结合秦岭冷杉活树生长势减弱以及枯死树的死亡状态,秦岭冷杉的死亡可能与土壤含水量有着密切的关系,因为多年来小秦岭地区大规模的采矿可能造成地下水位下降,加之秦岭冷杉为浅根性物种,从而导致水分成为秦岭冷杉生长的限制性因素。因此,土壤含水量和温度是影响秦岭冷杉的重要环境因素,很有可能是造成秦岭冷杉死亡的一个关键因素。

同时,SEM 分析显示枯死树和活树都与海拔和坡度表现出的负相关作用,并且枯死树表现出的负相关作用要明显大于活树。海拔和坡度一定程度上反映了该地点的湿度、温度等微环境条件[29],可能是人类活动范围、活动强度和大范围内气候变化逐渐的影响了小秦岭地区降水、温度等环境的变化,从而造成秦岭冷杉逐渐不适应该海拔地段、坡度范围的微环境,从而导致死亡以及活树中部分个体长势减弱。因此秦岭冷杉枯死树和活树都不程度的与海拔和坡度表现出负相关作用,这也进一步证明了两个最终模型的合理性。在今后秦岭冷杉经营保护过程中要注意微环境的变化,减少人为因素对环境的干扰。

影响秦岭冷杉死亡的原因是复杂的而且是一个逐渐的过程。从全国大范围来看,秦岭冷杉死亡的现象在分布地陕西秦岭,神农架等都有报道,特别是河南省鲁山县石人山。这可能与秦岭冷杉分布的地区存在一定关系。秦岭冷杉主要分布于亚热带和暖温带过渡区[4],生态过渡区植物群落对全球气候变化反应敏感[30],加之人类干扰,从而造成了在秦岭冷杉分布地区都不同程度的出现死亡和生长势减弱现象,这与 SEM 分析结果也是相一致的。

本研究在小秦岭自然保护区秦岭冷杉普查的基础上,通过对活树、死树分布、胸径和树高的对比分析,并采用相关分析和现代统计分析方法(SEM)结合地形和土壤等环境因子,探讨了秦岭冷杉的生存状况和死亡原因,研究结果对于全面了解小秦岭地区秦岭冷杉生存现状和死亡原因具有重要意义,同时对秦岭冷杉的扦插繁殖、引种育苗等具有参考价值。当然,本研究还有很大的不足之处,所调查的数据没能考虑秦岭冷杉的生理指标等,并且环境因子只能解释秦岭冷杉生长的部分原因,今后研究中应考虑更多的环境因子,比如土壤理化性质和腐殖质等。同时有必要结合石人山、伏牛山、秦岭等地秦岭冷杉的生长状况,在大尺度内研究秦岭冷杉的死亡原因,为秦岭冷杉的保护和种群恢复提供理论和技术上的支持。

致谢:河南农业大学生命科学学院汪东亚、张也、董贤茹等在野外调查工作中给予了帮助,河南小秦岭自然保护区为本研究的野外工作提供了便利条件,小秦岭自然保护区气象站提供了气象数据,在此一并表示感谢!

参考文献(References):

[1] 何友均, 李忠, 崔国发, 魏文超, 冯宗炜. 濒危物种保护方法研究进展. 生态学报, 2004, 24(2): 338-346.

[2] 余中元, 李波, 张新时. 社会生态系统及脆弱性驱动机制分析. 生态学报, 2014, 34(7): 1870-1879.

[3] 李为民, 李思锋, 黎斌. 秦岭山地濒危植物秦岭冷杉群落结构特征研究. 陕西林业科技, 2012, (5): 1-6.

[4] 张文辉, 许晓波, 周建云, 孙玉玲, 谢宗强. 濒危植物秦岭冷杉地理分布和生物生态学特性研究. 生物多样性, 2004, 12(4): 419-426.

[5] Zhan T, Zhang Q W, Wang X, Tang S Q. Development and characterization of sixteen microsatellite primers in*Abies chensiensis* and *A. fargesii* (Pinaceae). Conservation Genetics Resources, 2014, 6(1): 79-81.

[6] Wang X, Zhang Q W, Liufu Y Q, Lu Y B, Zhan T, Tang S Q. Comparative analysis of genetic diversity and population genetic structure in*Abies chensiensis* and *Abies fargesii* inferred from microsatellite markers. Biochemical Systematics and Ecology, 2014, 55: 351-357.

[7] 赖江山, 李庆梅, 谢宗强. 濒危植物秦岭冷杉种子萌发特性的研究. 植物生态学报, 2003, 27(5): 661-666.

[8] 孙玉玲, 李庆梅, 谢宗强. 濒危植物秦岭冷杉结实特性的研究. 植物生态学报, 2005, 29(2): 251-257.

[9] 孙玉玲, 李庆梅, 杨敬元, 谢宗强. 秦岭冷杉球果与种子的形态变异. 生态学报, 2005, 25(1): 176-181.

[10] 朱秀红, 刘光武, 茹广欣, 杜尧东, 陈晨. 濒危植物秦岭冷杉群落数量特征及其动态. 生态学杂志, 2007, 26(12): 1942-1946.

[11] 杨燕萍, 杨亚萍. 濒危植物秦岭冷杉补光育苗技术研究. 中国野生植物资源, 2012, 31(4): 76-77.

[12] 杨开宝, 孙宝胜, 郭智慧, 常利平. 不同化学处理对秦岭冷杉种子发芽率的影响. 西北农业学报, 2010, 19(12): 118-121.

[13] Clark J S. Models for Ecological Data: An Introduction. Princeton: Princeton University Press, 2007.

[14] Miao S L, Carstenn S, Nungesser M. Real World Ecology: Large-Scale and Long-Term Case Studies and Methods. New York: Springer-Verlag, 2009.

[15] Yuan Z Q, Antonio Gazol, Wang X G, Xing D L, Lin F, Bai X J, Zhao Y Q, Li B H, Hao Z Q. What happens below the canopy? Direct and indirect influences of the dominant species on forest vertical layers. Oikos, 2012, 121(7): 1145-1153.

[16] Grace J B. Structural Equation Modeling and Natural Systems. Cambridge: Cambridge University Press, 2006.

[17] Lamb E G., Kembel S W, Cahill J F Jr. Shoot, but not root, competition reduces community diversity in experimental mesocosms. Journal of Ecology, 2009, 97(1): 155-163.

[18] Shipley B, Lechowicz M J, Wright I, Reich P B. Fundamental trade-offs generating the worldwide leaf economics spectrum. Ecology, 2006, 87(3): 535-541.

[19] Rhoades J D, Shouse P J, Alves W J, Manteghi N A, Lesch S M. Determining soil salinity from soil electrical conductivity using different models and estimates.Soil Science Society of America Journal, 54(1): 46-54.

[20] Lieberman D, Lieberman M, Peralta R., Hartshorn G S. Tropical forest structure and composition on a large-scale altitudinal gradient in Costa Rica. Journal of Ecology, 1996, 84(2): 137-152.

[21] Zak D R, Hairston A, Grigal D F. Topographic influences on nitrogen cycling within an upland pin oak ecosystem. Forest Science, 1991, 37(1): 45-53.

[22] Enoki T, Kawaguchi H, Iwatsubo G. Nutrient-uptake and nutrient-use efficiency of *Pinus thunbergii* Parl, along a topographical gradient of soil nutrient availability. Ecological Research, 1997, 12(2): 191-199.

[23] 任德智, 刘悦翠. 区域森林资源健康评价指标体系研究. 西北林学院学报, 2007, 22(2): 194-199.

[24] Fornell C. A Second Generation of Multivariate Analysis: Volumes I. and II. New York: Praeger, 1982.

[25] Larson D L, Grace J B. Temporal dynamics of leafy spurge (*Euphorbia esula*) and two species of flea beetles (*Aphthona spp.*) used as biological control agents. Biological Control, 2004, 29(2): 207-214.

[26] Fox J. TEACHER´S CORNER: structural equation modeling with the sem package in R. Structural Equation Modeling: : A Multidisciplinary Journal, 2006, 13(3): 465-486.

[27] 王婷, 沈连峰, 叶永忠, 高海强, 徐萌. 伏牛山华山松径向生长对气候变化的响应. 河南科学, 2010, 28(12): 1549-1551.

[28] 王铭, 刘兴土, 张继涛, 李秀军, 王国栋, 鲁新蕊, 李晓宇. 松嫩平原西部草甸草原5种典型植物群落土壤呼吸的时空动态. 植物生态学报, 2014, 38(4): 396-404.

[29] 杨昕, 汤国安, 王春, 邓凤东. 基于 DEM 的山区气温地形修正模型——以陕西省耀县为例. 地理科学, 2007, 27(4): 525-530.

[30] 周晓峰, 王晓春, 韩士杰, 邹春静. 长白山岳桦苔原过渡带动态与气候变化. 地学前缘, 2002, 9(1): 227-231.