



刘军, 潘萍, 欧阳勋志, 等. 基于零膨胀模型和栅栏模型的赣南杉木林分枯损模型[J]. 江西农业大学学报, 2022, 44(6): 1428–1437.

LIU J, PAN P, OUYANG X Z, et al. Stand-level mortality model of *Cunninghamia lanceolata* forest in southern Jiangxi based on zero-inflated model and hurdle model[J]. Acta agriculturae universitatis Jiangxiensis, 2022, 44(6): 1428–1437.

基于零膨胀模型和栅栏模型的赣南杉木林分枯损模型

刘 军¹, 潘 萍^{1,2}, 欧阳勋志^{1,2*}, 臧 颢¹, 郭 杨², 游景晖²

(1. 鄱阳湖流域森林生态系统保护与修复国家林业和草原局重点实验室, 江西 南昌 330045; 2. 江西农业大学 林学院, 江西 南昌 330045)

摘要:【目的】分析林分的枯损情况, 构建林分水平枯损模型, 探讨树木死亡的影响因素, 为科学经营和有效管理提供参考依据。【方法】以江西省赣州市 2009 年森林资源二类调查中地类为纯林的 1973 块杉木样地为数据源, 将样地按 4:1 的比例随机划分成模拟数据(1 579 块)和验证数据(394 块), 分别用于模型的构建和验证。选取基于泊松分布和负二项分布形式的零膨胀模型和栅栏模型等 4 种模型, 以林分枯损株数为因变量, 以林分因子、立地因子和气候因子等 17 个环境因子为自变量, 构建杉木林分水平枯损模型。利用方差膨胀因子(VIF)排除各环境因子间相关性较大的因子; 采用赤池信息准则(AIC)、贝叶斯信息准则(BIC)和-2 倍对数似然函数值(-2logL)3 种评价指标分析比较各模型之间的拟合效果, 选用平均绝对误差(MAE)和均方根误差(RMSE)等比较其预测效果, 筛选出最优林分水平枯损模型。【结果】(1)除最暖月平均温度、最冷月平均温度和无霜期天数外, 其余 14 个环境因子间均不存在多重共线性(VIF<10)。(2)在模型的零部分, 各参数估计值均在 0.001 水平上显著, 海拔、林龄和株数密度是影响杉木林分枯损的重要因子; 在模型的离散部分, 各参数估计值均在 0.01 水平上显著, 且海拔和株数密度的参数估计值均为正值, 林龄均为负值, 说明林分枯损株数随海拔的升高和株数密度的增大而增加, 随林龄的增大而减少。(3)通过比较模型评价指标, 零膨胀负二项模型的 AIC 值(4 841.73)、BIC 值(4 890.01)和-2logL 值(4 823.73)均小于其他模型, 且其 MAE 值(39.429 3)和 RMSE 值(116.508 9)也均小于其他模型, 表明零膨胀负二项模型的拟合效果和预测效果最好, 其次为栅栏负二项模型、零膨胀泊松模型, 栅栏泊松模型最差。【结论】基于模型比较结果, 零膨胀负二项模型用于构建赣南杉木林分水平枯损模型最好。

关键词: 林分枯损; 杉木林; 零膨胀模型; 栅栏模型

中图分类号: S757 文献标志码: A 文章编号: 1000-2286(2022)06-1428-10

Stand-Level Mortality Model of *Cunninghamia lanceolata* Forest in Southern Jiangxi Based on Zero-Inflated Model and Hurdle Model

LIU Jun¹, PAN Ping^{1,2}, OUYANG Xunzhi^{1,2*}, ZANG Hao¹,
GUO Yang², YOU Jinghui²

收稿日期: 2022-06-10 修回日期: 2022-09-06

基金项目: 国家自然科学基金项目(31760207)

Project supported by the National Natural Science Foundation of China(31760207)

作者简介: 刘军, orcid.org/0000-0002-6802-3335, liujun0245@163.com; 欧阳勋志, 教授, 博士, 博士生导师, 主要从事森林资源管理与监测和森林生态研究, orcid.org/0000-0002-5290-4425, oyxz@jxau.edu.cn。

(1.Key Laboratory of National Forestry and Grassland Administration for the Protection and Restoration of Forest Ecosystem in Poyang Lake Basin, Nanchang 330045, China; 2.College of Forestry, Jiangxi Agricultural University, Nanchang 330045, China)

Abstract: [Objective] This study aims to analyze the situation of stand mortality, construct the stand-level mortality model, and discuss the influencing factors of tree mortality thus providing a reference basis for scientific management and effective management. [Method] 1973 sample plots of *Cunninghamia lanceolata* with pure forest in the forest resources inventory of Ganzhou City, Jiangxi Province in 2009 were selected as the data source. These sample plots were randomly divided into simulation data (1 579 plots) and validation data (394 plots) according to the ratio of 4:1 for model construction and verification, respectively. Four models such as the zero-inflated model and hurdle model based on Poisson distribution and negative binomial distribution forms were selected. The number of mortality trees in the stand was taken as the dependent variable, and a total of 17 environmental factors including stand factors, site factors and climatic factors were taken as independent variables to construct the stand-level mortality model of *Cunninghamia lanceolata* forest. The variance inflation factor (VIF) was used to exclude the factors with large correlation between environmental factors; the three model evaluation indexes of Akaike information criterion (AIC), Bayesian information criterion (BIC) and $-2\log$ -likelihood function value ($-2\log L$) were used to analyze and compare the fitting effect between each model, and the mean absolute error (MAE) and root mean square error (RMSE) were selected to compare the prediction effect, in order to select the optimal stand-level mortality model. [Result] (1) Except the mean temperature of the warmest month, the mean temperature of the coldest month and the number of frost-free days, there was no multicollinearity among the other 14 environmental factors ($VIF < 10$). (2) In the zero part of the model, the estimated values of each parameter were significant at the 0.001 level, indicating that altitude, stand age and density of trees were important factors affecting the stand-level mortality of *Cunninghamia lanceolata* forest; In the count part of the model, the estimated values of each parameter were significant at the 0.01 level, the estimated values of the parameters of altitude and density of trees were all positive values, and the stand age were all negative values. These values indicated that the number of stand-level mortality stems increased with the increase of altitude and the augment of density of trees, and reduced with the increase of stand age. (3) By comparing the model evaluation indexes, it was concluded that the AIC value (4 841.73), BIC value (4 890.01) and $-2\log L$ value (4 823.73) of the zero-inflated negative binomial model were smaller than other models, and its MAE value (39.429 3) and RMSE value (116.508 9) were also smaller than other models, indicating that the zero-inflated negative binomial model had the best fitting effect and prediction effect. The second were the hurdle negative binomial model and the zero-inflated Poisson model, and the hurdle Poisson model had the worst effect. [Conclusion] Based on the results of model comparison, the zero-inflated negative binomial model was the best to construct the stand-level mortality model of *Cunninghamia lanceolata* forest in southern Jiangxi.

Keywords: stand-level mortality; *Cunninghamia lanceolata* forest; zero-inflated model; hurdle model

【研究意义】枯损是森林动态变化过程中的一个重要表现,也是森林生长过程中不可或缺的组成部分,其受内在竞争、人为干扰以及气候变化等因素的综合影响,是森林演替、更新的重要内容^[1-2]。分析林分的枯损情况,探讨树木死亡的影响因素,有助于提升森林质量及生态效益,为造林、育林和护林等生产活动提供科学依据^[3]。【前人研究进展】由于枯损模型存在研究尺度间的差异性,因此可划分为单木水平和林分水平两类。当前,国内外诸多学者对于单木水平枯损模型已进行了较多研究^[4-5]。虽然单木水平枯损模型的预测结果比较精确,但是需要花费大量的时间、精力和财力对单木、林分和立地因子等进行较为全面的调查^[6],而通过分析林分枯损株数与林分因子、立地因子和气候因子等环境因子之间的关系构建林分水平枯损模型则可以较为有效地克服这一缺点^[7]。考虑到林分枯损株数为典型的计数数据,因此不少学者采用泊松模型、负二项模型、零膨胀模型和栅栏模型等计数模型对林分枯损进行了相关研

究,如张雄清等^[7]基于吉林省汪清林业局金沟岭林场的20块面积在0.077 5~0.25 hm²的长白落叶松(*Larix olgensis*)样地,得出栅栏负二项模型的拟合效果优于其他模型,其林分枯损与林龄和相对植距呈负相关,与林分断面积呈正相关。然而,目前大多研究都建立在较小范围尺度上,而基于较大区域尺度对林分枯损的研究还相对较少,且研究得出的较优林分水平枯损模型以及影响林分枯损的因素也不尽相同,这可能与树种的生物学特征及研究的尺度等因素有关。【本研究切入点】杉木(*Cunninghamia lanceolata*)是我国亚热带地区特有的优良用材树种。具有较喜光、不耐严寒与干旱等特点,在满足我国木材需求、维持生态安全和支持天然林保护等方面发挥着至关重要的作用^[8]。近年来,国内外不少学者对杉木的枯损影响因素展开了相关研究,如郎奎建等^[9]基于江西省16块0.05 hm²的杉木人工林构建枯损模型,得出林分枯损株数与林分密度和立地因子密切相关;Zhang等^[10]以江西、福建、广西和四川等省份建立的60块0.06 hm²样地为研究对象,构建逻辑回归模型,认为竞争、林龄和林分结构是导致杉木枯损的主要因素。然而,由于全球气候多变以及经营措施的不同,在不同区域导致杉木林林分枯损的主要影响因素可能存在差异。【拟解决的关键问题】为此,本研究以江西赣南(赣州市)为研究区,以地类为纯林的杉木样地为研究对象,选取零膨胀模型和栅栏模型,构建并筛选出最优林分水平枯损模型,并分析其影响因素,以为杉木林的有效经营管理提供参考依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

赣州市(24°29'~27°09' N, 113°54'~116°38' E)位于江西省南部,地处赣江上游,总面积3.9×10⁴ km², 占全省总面积的23.6%。地貌以山地和丘陵为主,土壤以地带性红壤、黄壤为主。气候属亚热带季风气候区,年均温为19.1~20.8℃,年均降水量为1 580 mm,无霜期288 d,年均日照时数1 636 h,森林覆盖率达76.2%,主要森林类型有针叶林、常绿阔叶林等^[11]。其中杉木林面积70.40万hm²,占有林地总面积的26.2%。

1.2 数据来源与处理

1.2.1 样地数据与处理 样地数据来源于赣州市2009年森林资源二类调查,样地面积为0.08 hm² (28.28 m×28.28 m),地理坐标以其西南角为准,对所有胸径≥5 cm的乔木进行每木检尺,并调查了坡向、坡度等立地因子及林龄、平均胸径等林分因子。参考《江西省森林资源二类调查操作细则(2009)》,基于样地数据库,剔除部分数据异常的样地,筛选出地类为纯林的杉木样地1 973块,其样地分布见图1。按4:1的比例随机划分为模拟样本(1 579块样地)和验证样本(394块样地),分别用于模型的构建和验证。通过筛选每木检尺库中检尺类型为枯立木(已枯死但未倒伏的林木)的林木得出各样地的枯损株数,其林分枯损株数频数统计见图2,由图2可知,本研究数据结构中含有大量的零值,即处于零膨胀状态,数据离散程度较大。

1.2.2 气候数据 利用ClimateAP v2.30软件^[12],通过输入样地的经纬度和海拔,获取各样地2000—2009年的各类气候因子数据,并对其求取年平均值。

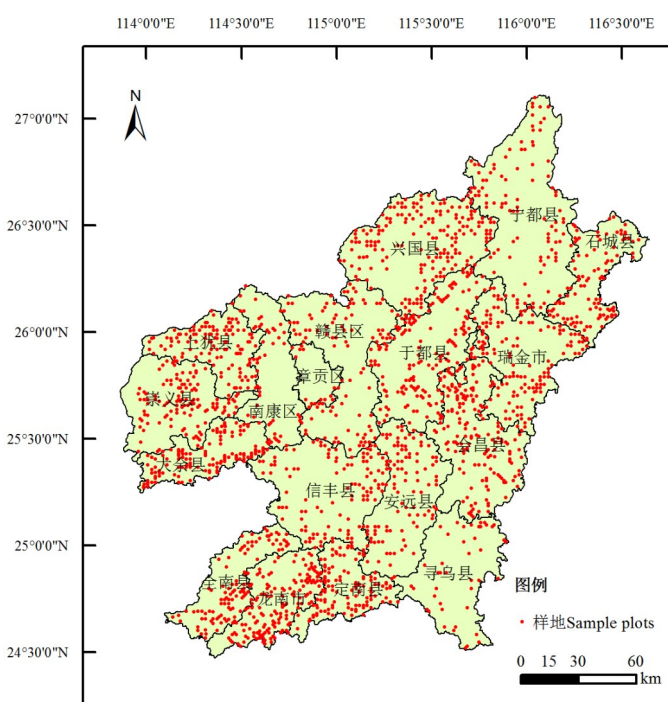


图1 研究区位置及样地分布

Fig.1 Location of the study area and sample plots distribution

1.3 研究方法

1.3.1 枯损影响因子选择 根据样地调查内容及参考相关文献[6,13],从林分、立地和气候等方面选择可能影响林分枯损的17个环境因子,其中林分因子包括林龄、平均树高、断面积和株数密度等4个因子;立地因子包括海拔、坡向、坡位、坡度、土层厚度和腐殖质层厚度等6个因子,且坡向、坡位等定性因子参考邵方丽等^[14]的方法将其赋值量化,即用1、2、3、4、5分别代表阴坡、半阴坡、半阳坡、阳坡和无坡向,用1、2、3、4、5、6、7分别代表山脊、上坡、中坡、下坡、山谷、平地 and 全坡;气候因子包括年平均温度、年平均降雨量、最暖月平均温度、最冷月平均温度、无霜期天数、前一年8月至当年7月的降雪量和夏季(6—8月)平均降雨量等7个因子。

1.3.2 林分水平枯损模型选择 本研究结合数据情况,选择零膨胀模型(Zero-inflated)和栅栏模型(Hurdle)构建林分水平枯损模型。

(1)零膨胀模型。零膨胀模型可以有效解决数据过度离散和零值过多等问题^[15-16],其数据结构中的所有零值既来源于Logit部分,也来源于截尾的泊松(Poisson)部分或负二项(NB)部分。模型主要由两部分组成:第一部分为逻辑斯蒂模型(Logit),第二部分为Poisson模型或NB模型。前者大多用于解释林分发生枯损的可能性(概率),即对应模型的零部分;后者主要用于预测林分枯损株数,即对应模型的离散部分。基于模型第二部分存在的形式差异,可分为零膨胀泊松模型(Zero-inflated-Poisson,ZIP)和零膨胀负二项模型(Zero-inflated-NB,ZINB)。其计算原理及方法详见文献[17]。

(2)栅栏模型。栅栏模型又称两部分模型,其优点及对应形式与零膨胀模型相似,但其数据结构中的所有零值只来源于Logit部分。模型主要由2个阶段构成:第一个阶段判断林分是否发生枯损,只有当林分发生枯损时,才会进入到第二个阶段;第二个阶段主要利用Poisson分布和NB分布预测林分枯损株数。同理,可分为栅栏泊松模型(Hurdle-Poisson,HP)和栅栏负二项模型(Hurdle-NB,HNB)。其计算原理及方法详见文献[18]。

1.3.3 模型评价 采用赤池信息准则(AIC)、贝叶斯信息准则(BIC)和-2倍对数似然函数值(-2logL)比较各模型的拟合效果,其值越小,表明模型的拟合效果越好。利用验证样本检验模型精度时,选择平均绝对误差(MAE)和均方根误差(RMSE),其值越小,表明模型的预测效果越好。

1.3.4 数据分析方法 数据的预处理在Excel 2016软件中进行。利用R 4.1.2软件完成模型的构建和验证,首先通过R 4.1.2的回归诊断程序包car中的VIF函数进行多重共线性诊断;其次采用caret包中的createDataPartition函数将数据拆分为训练样本及测试样本;然后利用pscl包中的zeroinfl和hurdle函数构建林分水平枯损模型;最后使用AIC函数、BIC函数和predict函数等进行模型评价。运用Origin 2019b软件进行相关图表的绘制。

2 结果与分析

2.1 多重共线性诊断

为提高模型模拟精度,对选取的17个可能影响林分枯损的环境因子,需尽可能地排除彼此间相关性较大的因子。本研究的筛选原则为,当1对因子间存在共线性时,只保留其中一个因子,优先保留有研究表明对林分枯损影响显著的因子,筛选后的诊断结果见图3。由图3可知,除最暖月平均温度、最冷月平均温度和无霜期天数外,其余14个环境因子间均不存在多重共线性($VIF < 10$),因此将其用于林分水平枯损模型的构建。具体环境因子统计见表1。

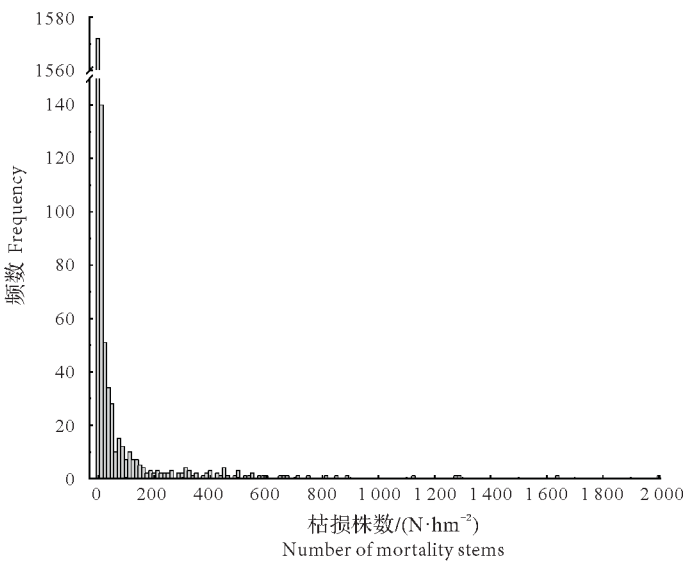
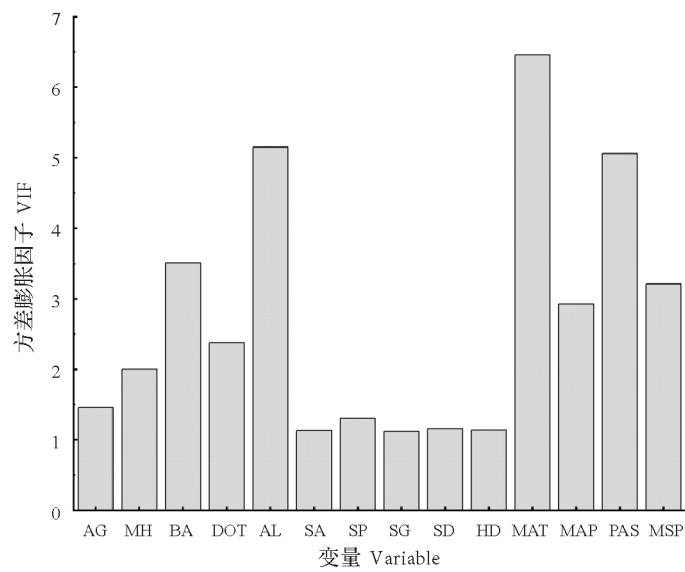


图2 林分枯损株数频数统计

Fig.2 Frequency statistics of the number of stand-level mortality stems



AG 为林龄;MH 为平均树高;BA 为断面积;DOT 为株数密度;AL 为海拔;SA 为坡向;SP 为坡位;SG 为坡度;SD 为土层厚度;HD 为腐殖质层厚度;MAT 为年平均温度;MAP 为年平均降雨量;PAS 为前一年 8 月至当年 7 月的降雪量;MSP 为夏季平均降雨量。

AG: Age; MH: Mean height; BA: Basal area; DOT: Density of trees; AL: Altitude; SA: Slope aspect; SP: Slope position; SG: Slope gradient; SD: Soil depth; HD: Humus depth; MAT: Mean annual temperature; MAP: Mean annual precipitation; PAS: Precipitation as snow between Aug. in previous year and Jul. in current year; MSP: Mean summer precipitation.

图 3 自变量多重共线性诊断

Fig.3 Multicollinearity diagnosis of independent variables

表 1 环境因子统计

Tab.1 Statistics of environmental factors

变量 Variable	最小值 Min.	最大值 Max.	平均值±标准误差 Mean ± Standard error
林龄/a(AG)	2	47	15±0.16
平均树高/m(MH)	2.0	19.5	7.0±0.06
断面积/(m ² ·hm ⁻²)(BA)	0.6	64.3	12.9±0.23
株数密度/(N·hm ⁻²)(DOT)	238	5 138	1 398±18.93
海拔/m(AL)	26	1 110	389±3.23
坡向(SA)		定性因子	
坡位(SP)		定性因子	
坡度/°(SG)	0	49	27±0.16
土层厚度/cm(SD)	5	130	78±0.32
腐殖质层厚度/cm(HD)	0	30	11±0.13
年平均温度/°C(MAT)	15.99	21.23	19.43±0.02
年平均降雨量/mm(MAP)	1 404.10	1 990.00	1 621.16±2.39
前一年 8 月至当年 7 月的降雪量/mm(PAS)	0.10	5.30	1.17±0.01
夏季平均降雨量/mm(MSP)	495.70	855.30	618.24±1.18

AG 为林龄;MH 为平均树高;BA 为断面积;DOT 为株数密度;AL 为海拔;SA 为坡向;SP 为坡位;SG 为坡度;SD 为土层厚度;HD 为腐殖质层厚度;MAT 为年平均温度;MAP 为年平均降雨量;PAS 为前一年 8 月至当年 7 月的降雪量;MSP 为夏季平均降雨量。

AG: Age; MH: Mean height; BA: Basal area; DOT: Density of trees; AL: Altitude; SA: Slope aspect; SP: Slope position; SG: Slope gradient; SD: Soil depth; HD: Humus depth; MAT: Mean annual temperature; MAP: Mean annual precipitation; PAS: Precipitation as snow between Aug. in previous year and Jul. in current year; MSP: Mean summer precipitation.

2.2 林分水平枯损模型的构建

经过模型参数的检验,剔除不显著的变量,得出零膨胀模型和栅栏模型的模拟结果见表2。由表2可知,在模型的零部分,各参数估计值均在0.001水平上显著,表明杉木林林分是否发生枯损主要与海拔、林龄和株数密度等3个因子显著相关,而与气候因子均没有显著影响。在模型的离散部分,海拔和林龄在ZINB模型和HNB模型上在0.01水平上显著,而在ZIP模型和HP模型上在0.001水平上显著;株数密度均在0.001水平上显著,表明株数密度对林分枯损的影响最大。海拔和株数密度的参数估计值均为正值,说明随海拔梯度的上升和株数密度的增大,林分枯损株数增加;而林龄的参数估计值均为负值,说明随林龄的增加,枯损株数减少。

零膨胀模型和栅栏模型的拟合效果见表3。由表3可知,ZIP模型和HP模型的AIC值(63 048.66)、BIC值(63 091.58)和-2logL值(63 032.66)相一致;而ZINB模型和HNB模型的值相近,但ZINB模型的AIC值(4 841.73)、BIC值(4 890.01)和-2logL值(4 823.73)均略小于HNB模型的AIC值(4 841.76)、BIC值(4 890.04)和-2logL值(4 823.76)。由此可见,ZINB模型的拟合效果最好,其次为HNB模型,ZIP模型和HP模型较差。

表2 林分水平枯损模型模拟结果
Tab.2 The simulation results of stand-level mortality model

模型类型	参数	M1	M2	M3	M4
Model type	Parameter				
零部分 Zero part	截距	9.530 2(0.882 5)***	9.387 9(0.900 5)***	-9.530 2(0.882 5)***	-9.530 2(0.882 5)***
	AL	-0.003 1(0.000 5)***	-0.003 1(0.000 5)***	0.003 1(0.000 5)***	0.003 1(0.000 5)***
	AG	-0.055 9(0.010 1)***	-0.059 1(0.010 4)***	0.055 9(0.010 1)***	0.055 9(0.010 1)***
	DOT	-0.825 6(0.119 8)***	-0.808 7(0.122 1)***	0.825 6(0.119 8)***	0.825 6(0.119 8)***
离散部分 Count part	截距	-0.951 5(0.084 6)***	-0.147 6(0.921 4)	-0.951 6(0.084 6)**	-0.161 2(0.921 7)
	AL	0.001 3(0.000 03)***	0.001 4(0.000 4)**	0.001 3(0.000 03)***	0.001 4(0.000 4)**
	AG	-0.026 4(0.000 8)***	-0.033 3(0.011 9)**	-0.026 4(0.000 8)***	-0.032 9(0.011 8)**
	DOT	0.747 2(0.011 2)***	0.646 0(0.127 6)***	0.747 2(0.011 2)***	0.647 1(0.127 6)***
	θ		0.576 1		0.576 1

M1为零膨胀泊松模型、M2为零膨胀负二项模型、M3为栅栏泊松模型、M4为栅栏负二项模型;估计值(标准误差);AL为海拔,AG为林龄,DOT为株数密度;*为 $P<0.05$,**为 $P<0.01$,***为 $P<0.001$ 。

M1 correspond to ZIP model,M2 correspond to ZINB model,M3 correspond to HP model and M4 correspond to HNB model; Estimation(Standard error);AL is Altitude,AG is Age,DOT is Density of trees;* is $P<0.05$,** is $P<0.01$,*** is $P<0.001$.

表3 林分水平枯损模型拟合效果
Tab.3 Fitting effect of stand-level mortality model

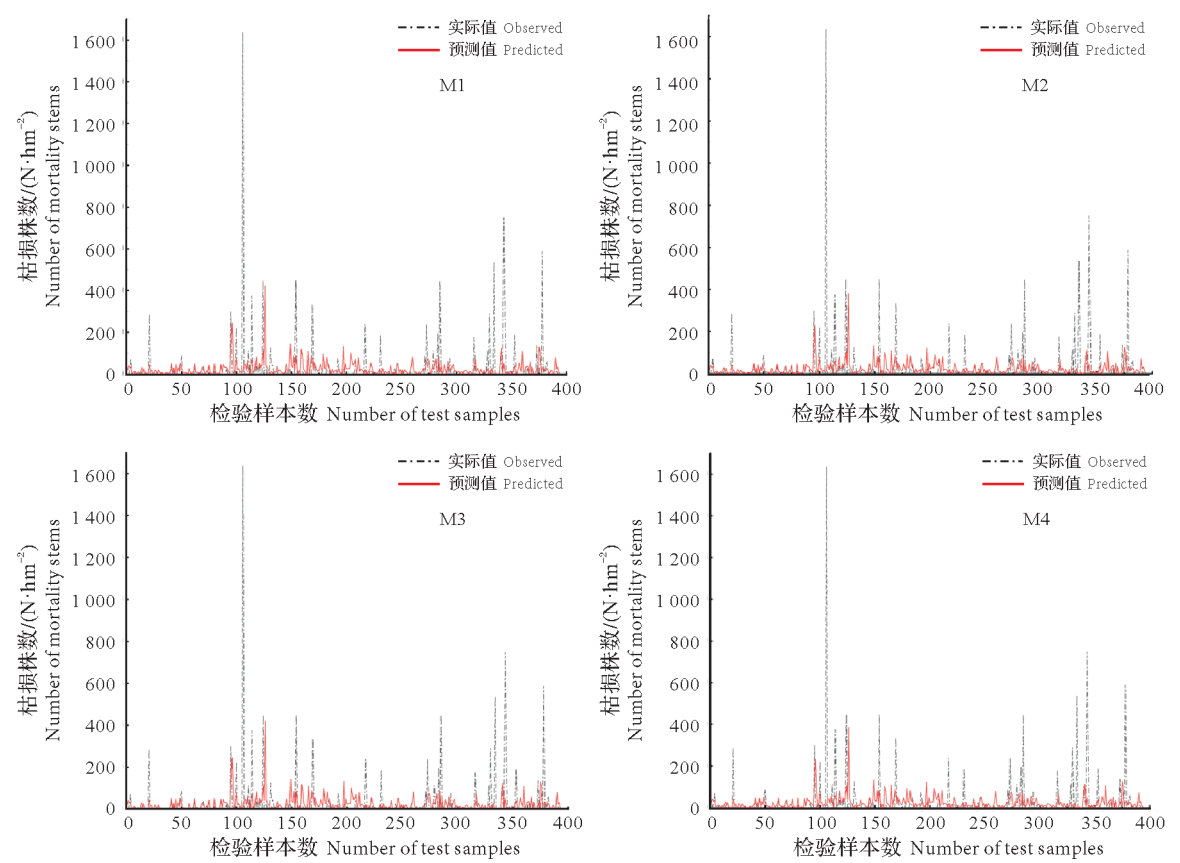
评价指标	M1	M2	M3	M4
Evaluation index				
赤池信息准则(AIC)	63 048.66	4 841.73	63 048.66	4 841.76
贝叶斯信息准则(BIC)	63 091.58	4 890.01	63 091.58	4 890.04
-2倍对数似然函数值(-2logL)	63 032.66	4 823.73	63 032.66	4 823.76

M1为零膨胀泊松模型、M2为零膨胀负二项模型、M3为栅栏泊松模型、M4为栅栏负二项模型。

M1 correspond to ZIP model,M2 correspond to ZINB model,M3 correspond to HP model and M4 correspond to HNB model.

2.3 模型验证

用验证样本进行模型验证,即使用394个样本进行模型拟合计算得出零膨胀模型和栅栏模型的林分枯损株数,并与验证样本实际发生的林分枯损株数进行比较,结果见图4。由图4可以看出,ZIP模型、ZINB模型、HP模型和HNB模型的差别不是十分明显。



M1 为零膨胀泊松模型,M2 为零膨胀负二项模型,M3 为栅栏泊松模型,M4 为栅栏负二项模型。
M1 correspond to ZIP model,M2 correspond to ZINB model,M3 correspond to HP model and M4 correspond to HNB model.

图4 零膨胀模型和栅栏模型的预测值与实际值

Fig.4 Predicted value of zero-inflated model and Hurdle model vs.observed value

进一步采用平均绝对误差(MAE)和均方根误差(RMSE)等 2 个指标量化比较 4 个模型的预测效果,结果见表 4。由表 4 可知,ZINB 模型的 MAE 值(39.429 3)和 RMSE 值(116.508 9)依次小于 HNB 模型的 MAE 值(39.440 4)和 RMSE 值(116.531 5)、ZIP 模型的 MAE 值(39.584 0)和 RMSE 值(116.950 7)及 HP 模型的 MAE 值(39.584 0)和 RMSE 值(116.950 8),说明 ZINB 模型的预测效果优于其他模型,这也和前面的模型拟合效果相一致。综合分析,本研究得出的最佳模拟模型为零膨胀负二项模型,其模型形式及概率分布形式如下。

模型形式:

$$\ln \mu = -0.1476 + 0.001\,4AL - 0.033\,3AG + 0.646\,0DOT$$

(1)

概率分布形式:

$$p = \frac{1}{1 + \exp(-(9.387\,9 - 0.003\,1AL - 0.059\,1AG - 0.808\,7DOT))}$$
$$\theta = 0.576\,1$$

(2)

式(1)、(2)中:AL为海拔,AG为林龄,DOT为株数密度。

表 4 林分水平枯损模型预测效果

Tab.4 Prediction effect of stand-level mortality model

评价指标 Evaluation index	M1	M2	M3	M4
平均绝对误差(MAE)	39.584 0	39.429 3	39.584 0	39.440 4
均方根误差(RMSE)	116.950 7	116.508 9	116.950 8	116.531 5

M1 为零膨胀泊松模型,M2 为零膨胀负二项模型,M3 为栅栏泊松模型,M4 为栅栏负二项模型。

M1 correspond to ZIP model,M2 correspond to ZINB model,M3 correspond to HP model and M4 correspond to HNB model.

3 讨论

3.1 林分枯损影响因子

本研究发现,海拔、林龄和株数密度是影响杉木林林分枯损的重要因子。林分因子中,林龄和株数密度对杉木林林分枯损具有显著影响。随林龄的增加,枯损株数减少,这与Caspersen^[19]基于密歇根州森林资源清查数据得出的研究结果一致,而与王涛等^[20]通过对黑龙江省江山娇实验林场的48块样地进行研究,得出的林分年龄大体与杂种落叶松(*Larix gmelinii*)人工幼龄林林分枯损株数呈正相关的结果相反,这可能是因为本研究的杉木林多为人工林,随造林年限的增长,抚育间伐等经营措施使得林分内竞争减小而促使枯损株数减少。反之,在造林初期时,由于株数密度较大,使得林木对于光照、水分等的竞争加剧而导致枯损株数增加,与Zhao等^[21]的研究结果相似。

立地因子中,海拔对林分枯损具有重要影响。这可能是因为杉木在生长过程中,较喜光、喜温暖湿润的气候,随海拔梯度的上升,温度逐渐降低,不适宜杉木的生长,这与张凌宇等^[22]的研究结果一致。但也有学者得出与本研究不一致的结果,如Radeliffe等^[23]通过对俄亥俄州东南部的82块0.05 hm²固定样地进行研究,得出北美红栎(*Quercus rubra*)的枯损与坡位、土层厚度有关;郭韦韦^[24]的研究表明,林下腐殖质层厚度与色木槭(*Acer pictum*)幼树枯损显著相关,红松(*Pinus koraiensis*)幼树的枯损则主要受坡度的影响。然而在本研究中,除海拔外,其他立地因子在模型中均不显著,这可能是因为杉木人工造林时多从木材生产考虑而选择在立地条件较好的地块,因此在本研究所使用的1 973块样地中,有70%左右的样地坡位为中下坡,80%以上的样地坡度介于16°~35°,2/3左右的样地土层厚度大于80 cm,2/3左右的样地腐殖质层厚度大于10 cm,样地在坡位、坡度、土层厚度和腐殖质层厚度之间差异不大而导致的,其难以体现在对枯损的影响上,这与李春明等^[6]利用吉林省295块蒙古栎(*Quercus mongolica*)样地数据得出的结果相类似。

此外,不少研究表明,气候因子与林分枯损状况有关。如Kim等^[25]基于韩国国家森林资源清查数据,利用MSN曲线构建林分水平枯损模型,认为针叶林的枯损株数随最冷月平均温度的升高有增加的趋势;Zhang等^[10]得出杉木人工林的枯损株数随年平均温度的升高而减少。但本研究中,气候因子对杉木林林分枯损的影响均不显著,可能是由于本研究区杉木分布区的主要气候因子间的差异较小,也有可能是由于海拔等地形因子折射出了一部分气候因子的影响,如Wu等^[26]认为地形因子之间的差异会间接影响森林环境中光照和降水等气候因子的分布情况,进而影响林分的生长和枯损状况。

3.2 模型模拟效果

本研究表明,杉木林林分水平枯损模型的拟合效果和预测效果均以ZINB模型最好,其次为HNB模型、ZIP模型,HP模型最差。在模型的拟合效果上,李春明等^[6]和Li等^[27]也得到了与本研究相同的结果,而张雄清等^[7]利用汪清林业局金沟岭林场的长白落叶松林分数据,得出HNB模型的拟合效果最好。在模型的预测效果上,与郭韦韦^[24]对冷杉(*Abies fabri*)幼树枯损的研究结果一致,但也有学者得出不同的结果,如Crecente-Campo等^[28]基于西班牙巴斯克地区的森林资源清查数据,结果表明ZIP模型在预测枯立木株数上效果最好。这些研究所得的最佳林分枯损模型存在一定差异,这可能是受研究的对象、区域、尺度以及环境因子等因素的影响^[29]。

4 结论

本研究以江西赣南的杉木林为研究对象,以林分枯损株数为因变量,以林分因子、立地因子和气候因子等14个环境因子为自变量,构建杉木林林分水平枯损模型,探讨影响林分枯损的主要因素。结果表明,杉木林林分水平枯损模型的拟合效果和预测效果均以ZINB模型最好,其次为HNB模型、ZIP模型,HP模型最差;海拔、林龄和株数密度是影响杉木林林分枯损的重要因子,而气候因子对其没有显著影响。在今后的研究中,有待进一步考虑预估期间林木采伐、土壤理化性质和病虫害、人为干扰等因素展开更为深入的分析,以预测林分枯损株数变化的动态过程。

致谢:亚洲开发银行CCF(气候变化基金)项目、江西赠款项目(0229-PRC)和江西省林业科技创新专项(创新专项[2021]33号)同时对本研究给予了资助,谨致谢意!

参考文献 References:

- [1] ANDEREGG W R L, FLINT A, HUANG C, et al. Tree mortality predicted from drought-induced vascular damage[J]. *Nature geoscience*, 2015, 8(5): 367-371.
- [2] HEMBER R A, KURZ W A, COOPS N C. Relationships between individual-tree mortality and water-balance variables indicate positive trends in water stress-induced tree mortality across North America[J]. *Global change biology*, 2017, 23(4): 1691-1710.
- [3] 王利伟, 李步杭, 叶吉, 等. 长白山阔叶红松林树木短期死亡动态[J]. *生物多样性*, 2011, 19(2): 260-270.
WANG L W, LI B H, YE J, et al. Dynamics of short-term tree mortality in broad-leaved Korean pine (*Pinus koraiensis*) mixed forest in the Changbai Mountains[J]. *Biodiversity science*, 2011, 19(2): 260-270.
- [4] QIU S, XU M, LI R Q, et al. Climatic information improves statistical individual-tree mortality models for three key species of Sichuan Province, China[J]. *Annals of forest science*, 2015, 72(4): 443-455.
- [5] SALAS-ELJATIB C, WEISKITTEL A R. On studying the patterns of individual-based tree mortality in natural forests: a modelling analysis[J]. *Forest ecology and management*, 2020, 475: 118369.
- [6] 李春明, 赵丽芳, 李利学. 基于混合效应模型和零膨胀模型方法的蒙古栎林分水平枯损模型[J]. *林业科学*, 2019, 55(11): 27-36.
LI C M, ZHAO L F, LI L X. Modeling stand-level mortality of mongolian oak (*Quercus mongolica*) based on mixed effect model and zero-inflated model methods[J]. *Scientia silvae Sinicae*, 2019, 55(11): 27-36.
- [7] 张雄清, 雷渊才, 雷相东, 等. 基于计数模型方法的林分枯损研究[J]. *林业科学*, 2012, 48(8): 54-61.
ZHANG X Q, LEI Y C, LEI X D, et al. Predicting stand-level mortality with count data models[J]. *Scientia silvae Sinicae*, 2012, 48(8): 54-61.
- [8] 吴建强, 王懿祥, 杨一, 等. 干扰树间伐对杉木人工林林分生长和林分结构的影响[J]. *应用生态学报*, 2015, 26(2): 340-348.
WU J Q, WANG Y X, YANG Y, et al. Effects of crop tree release on stand growth and stand structure of *Cunninghamia lanceolata* plantation[J]. *Chinese journal of applied ecology*, 2015, 26(2): 340-348.
- [9] 郎奎建, 胡光, 郝锦莹, 等. 人工林枯损动态模型及其规律分析[J]. *东北林业大学学报*, 1996, 24(3): 66-73.
LANG K J, HU G, HAO J Y, et al. The study on mortality dynamic model and its regularity of plantation[J]. *Journal of Northeast forestry university*, 1996, 24(3): 66-73.
- [10] ZHANG X Q, WANG Z, CHHIN S, et al. Relative contributions of competition, stand structure, age, and climate factors to tree mortality of Chinese fir plantations: Long-term spacing trials in Southern China[J]. *Forest ecology and management*, 2020, 465: 118103.
- [11] 潘萍, 韩天一, 欧阳勋志, 等. 飞播马尾松林碳密度分配特征及其影响因素[J]. *应用生态学报*, 2017, 28(12): 3841-3847.
PAN P, HAN T Y, OUYANG X Z, et al. Carbon density distribution characteristics and influencing factors in aerially seeded *Pinus massoniana* plantations[J]. *Chinese journal of applied ecology*, 2017, 28(12): 3841-3847.
- [12] WANG T L, WANG G Y, INNES J L, et al. ClimateAP: an application for dynamic local downscaling of historical and future climate data in Asia Pacific[J]. *Frontiers of agricultural science and engineering*, 2017, 4(4): 448-458.
- [13] LU L L, WANG H C, CHHIN S, et al. A bayesian model averaging approach for modelling tree mortality in relation to site, competition and climatic factors for Chinese fir plantations[J]. *Forest ecology and management*, 2019, 440: 169-177.
- [14] 邵方丽, 余新晓, 郑江坤, 等. 北京山区防护林优势树种分布与环境的关系[J]. *生态学报*, 2012, 32(19): 6092-6099.
SHAO F L, YU X X, ZHENG J K, et al. Relationships between dominant arbor species distribution and environmental factors of shelter forests in the Beijing mountain area[J]. *Acta ecologica Sinica*, 2012, 32(19): 6092-6099.
- [15] 李春明, 李利学. 基于零膨胀模型及混合效应模型相结合的蒙古栎林林木进界模拟研究[J]. *北京林业大学学报*, 2020, 42(6): 59-67.
LI C M, LI L X. Simulating study on tree recruitment of *Quercus mongolica* based on zero-inflated model and mixed effect model methods[J]. *Journal of Beijing forestry university*, 2012, 32(19): 6092-6099.
- [16] 肖云丹, 纪平. 基于贝叶斯-零膨胀负二项模型的森林火灾发生预测研究[J]. *中南林业科技大学学报*, 2021, 41(5): 49-56.
XIAO Y D, JI P. Predicting forest fire occurrence based on zero-inflated negative binomial model using Bayesian method[J].

- Journal of central south university of forestry & technology, 2021, 41(5): 49-56.
- [17] 秦凯伦, 郭福涛, 邸雪颖, 等. 大兴安岭塔河地区林火发生的优势预测模型选择[J]. 应用生态学报, 2014, 25(3): 731-737.
- QIN K L, GUO F T, DI X Y, et al. Selection of advantage prediction model for forest fire occurrence in Tahe, Daxing'an Mountain[J]. Chinese journal of applied ecology, 2014, 25(3): 731-737.
- [18] 雷渊才, 张雄清. 长白落叶松林分进界模型的研究[J]. 林业科学研究, 2013, 26(5): 554-561.
- LEI Y C, ZHANG X Q. Tree recruitment model of *Larix olgensis*[J]. Forest research, 2013, 26(5): 554-561.
- [19] CASPERSEN J P. Variation in stand mortality related to successional composition [J]. Forest ecology and management, 2004, 200(1/3): 149-160.
- [20] 王涛, 董利虎, 李凤日. 杂种落叶松人工幼龄林林分枯损规律及枯损模型[J]. 东北林业大学学报, 2017, 45(5): 39-43.
- WANG T, DONG L H, LI F R. Mortality of stand trees for hybrid larch young plantation in Heilongjiang[J]. Journal of North-east forestry university, 2017, 45(5): 39-43.
- [21] ZHAO D H, BORDERS B, WANG M L, et al. Modeling mortality of second-rotation loblolly pine plantations in the Piedmont/ Upper Coastal Plain and Lower Coastal Plain of the southern United States [J]. Forest ecology and management, 2007, 252(1/3): 132-143.
- [22] 张凌宇, 刘兆刚, 董灵波. 运用地理加权泊松模型估测天然次生林枯损量分布[J]. 东北林业大学学报, 2018, 46(1): 45-51.
- ZHANG L Y, LIU Z G, DONG L B. Distribution of natural secondary forest mortality by geographically weighted Poisson model[J]. Journal of northeast forestry university, 2018, 46(1): 45-51.
- [23] RADCLIFFE D C, HIX D M, MATTHEWS S N. Predisposing factors' effects on mortality of oak (*Quercus*) and hickory (*Carya*) species in mature forests undergoing mesophication in Appalachian Ohio [J]. Forest ecosystems, 2021, 8(1): 1-14.
- [24] 郭韦韦. 长白山云冷杉针阔混交林天然更新的优化结构和数量标准研究[D]. 北京: 北京林业大学, 2017.
- GUO W W. Structure optimization and quantitative standard of natural regeneration in a spruce-fir mixed broadleaf-conifer forest in Changbai Mountains [D]. Beijing: Beijing Forestry University, 2017.
- [25] KIM M, LEE W, CHOI G, et al. Modeling stand-level mortality based on maximum stem number and seasonal temperature [J]. Forest ecology and management, 2017, 386: 37-50.
- [26] WU H, FRANKLIN S B, LIU J M, et al. Relative importance of density dependence and topography on tree mortality in a subtropical mountain forest [J]. Forest ecology and management, 2017, 384: 169-179.
- [27] LI Y, Kang X G, Zhang Q, et al. Modelling tree mortality across diameter classes using mixed-effects zero-inflated models [J]. Journal of forestry research, 2020, 31(1): 131-140.
- [28] CRECENTE-CAMPO F, PASALODOS-TATO M, ALBERDI I, et al. Assessing and modelling the status and dynamics of deadwood through national forest inventory data in Spain [J]. Forest ecology and management, 2016, 360: 297-310.
- [29] 张洁, 赵浩彦, 张民侠, 等. 广义线性模型在林火发生预报中的应用[J]. 林业工程学报, 2017, 2(1): 135-142.
- ZHANG J, ZHAO H Y, ZHANG M X, et al. Research on generalized linear models applied to forest fire forecast [J]. Journal of forestry engineering, 2017, 2(1): 135-142.