北京林业大学学报
JOURNAL OF BEIJING FORESTRY UNIVERSITY

基于凋落物分解速率的森林凋落叶载量动态预测

蔡志勇 孙龙 胡海清 赵南 孙家宝

Dynamic prediction of forest leaf litter load based on litter decomposition rate

Cai Zhiyong, Sun Long, Hu Haiqing, Zhao Nan, Sun Jiabao

引用本文:
蔡志勇, 孙龙, 胡海清, 赵南, 孙家宝. 基于凋落物分解速率的森林凋落叶载量动态预测[J]. 北京林业大学学报, 2025, 47(5):123–130. doi: 10.12171/j.1000–1522.20230183
Cai Zhiyong, Sun Long, Hu Haiqing, Zhao Nan, Sun Jiabao. Dynamic prediction of forest leaf litter load based on litter decomposition rate[J]. Journal of Beijing Forestry University, 2025, 47(5):123–130. doi: 10.12171/j.1000–1522.20230183

在线阅读 View online: https://doi.org/10.12171/j.1000–1522.20230183

您可能感兴趣的其他文章
Articles you may be interested in

油松和侧柏林地表可燃物负荷量及影响因素
Land surface fuel load and influencing factors of *Pinus tabuliformis* and *Platycladus orientalis* plantations
北京林业大学学报, 2021, 43(6): 33–40. https://doi.org/10.12171/j.1000–1522.20200364

红松人工林地表针叶可燃物燃烧$PM_{2.5}$排放影响因子
Influencing factors of $PM_{2.5}$ emissions under the surface needle combustible combustion of Korean pine plantations
北京林业大学学报, 2018, 40(6): 30–40. https://doi.org/10.13332/j.1000–1522.20170446

北京地区8种树种枯死可燃物含水率预测模型及变化规律
Prediction models and changing rules of dead fuel moisture content of 8 forest species in Beijing area
北京林业大学学报, 2020, 42(6): 80–90. https://doi.org/10.12171/j.1000–1522.20190370

疏伐对北京西山油松林可燃物特征及潜在火行为影响
Effects of thinning on fuel characteristics and potential fire behaviors of *Pinus tabuliformis* forest in Beijing West Mountain
北京林业大学学报, 2017, 39(5): 41–47. https://doi.org/10.13332/j.1000–1522.20160353

北京市十三陵林场油松林地表火行为模拟
Simulation of surface fire behavior of *Pinus tabuliformis* forest in Ming Tombs Forest Farm in Beijing
北京林业大学学报, 2018, 40(10): 95–101. https://doi.org/10.13332/j.1000–1522.20180249

多时相高分辨率遥感影像的森林可燃物分类和变化分析
Classification and change analysis of forest fuels by multi–temporal high resolution remote sensing images
北京林业大学学报, 2018, 40(12): 38–48. https://doi.org/10.13332/j.1000–1522.20180269

DOI:10.12171/j.1000−1522.20230183

基于凋落物分解速率的森林凋落叶载量动态预测

蔡志勇[1,2] 孙 龙[1] 胡海清[1] 赵 南[2] 孙家宝[2]
（1. 东北林业大学林学院，黑龙江 哈尔滨 150040；2. 黑龙江省森林保护研究所，黑龙江 哈尔滨 150081）

摘要:【目的】森林凋落叶作为森林易燃物的关键组成部分，直接影响森林火灾发生与蔓延风险。本文以大兴安岭白桦林为研究对象，从森林凋落叶产生与分解角度构建数学模型，预测未来森林凋落叶载量动态，为森林防火科学研究提供理论基础。**【方法】**基于 Olson 单指数分解方程，将地表现存凋落叶视为历年凋落叶分解残留量的累积，构建凋落叶分解方程组。采用数列求和、换元法、逐步搜索法等数学方法化简方程，求解凋落叶分解速率系数和分解周转期。在此基础上建立凋落叶载量预测模型，并通过野外样地调查获取实测数据验证模型精度。**【结果】**成功构建基于凋落物分解速率的凋落叶载量预测模型，模型验证显示：未来 2 年凋落叶载量预测值与实测载量相对误差范围为 0.05～0.26（平均误差 0.14），表明模型具有较好的预测准确性。**【结论】**模型预测揭示了大兴安岭林区凋落叶载量随时间变化呈现周期性消长规律，分解速率快的林分变化周期短，凋落叶载量维持较稳定状态；分解速率慢的林分变化周期长，凋落叶载量保持较长时间持续变化。本研究建立的模型可有效预测凋落叶载量动态变化，对量化森林可燃物负荷、评估区域火险等级具有重要应用价值。

关键词：凋落物分解；森林防火；森林可燃物；可燃物载量；载量模型
中图分类号：S762 **文献标志码：**A **文章编号：**1000−1522(2025)05−0123−08
引文格式：蔡志勇，孙龙，胡海清，等. 基于凋落物分解速率的森林凋落叶载量动态预测［J］. 北京林业大学学报，2025，47(5)：123−130. Cai Zhiyong, Sun Long, Hu Haiqing, et al. Dynamic prediction of forest leaf litter load based on litter decomposition rate［J］. Journal of Beijing Forestry University, 2025, 47(5): 123−130.

Dynamic prediction of forest leaf litter load based on litter decomposition rate

Cai Zhiyong[1,2] Sun Long[1] Hu Haiqing[1] Zhao Nan[2] Sun Jiabao[2]
(1. College of Forestry, Northeast Forestry University, Harbin 150040, Heilongjiang, China;
2. Heilongjiang Forest Protection Research Institute, Harbin 150081, Heilongjiang, China)

Abstract:［**Objective**］Forest fallen leaves play a crucial role in the occurrence and development of forest fires as ignition and flammable materials. This article takes the *Betula platyphylla* forest in Daxing'an Mountains of northeastern China as an example to construct a mathematical model from the perspective of forest leaf litter generation and decomposition, predict the future dynamics of forest leaf litter load, and provide a theoretical basis for forest fire prevention scientific research.［**Method**］The forest floor litter was regarded as accumulation of residual amounts from decomposition of litter over years. Using the Olson single-exponential decomposition equation, a set of litter decomposition equations was constructed. Mathematical methods such as series summation, substitution, and stepwise search were applied to simplify the equations, and the litter decomposition rate coefficient and decomposition turnover period were solved. Subsequently, the litter decomposition rate coefficient and decomposition turnover period were used to

收稿日期: 2023−07−20 **修回日期:** 2025−01−21
基金项目: 国家自然科学基金项目（32071777），黑龙江省省属科研院所科研业务费项目（LKSB2025-2）。
第一作者: 蔡志勇，副研究员。主要研究方向：森林防火。Email: caizhiyong_a@sina.com 地址：150081 黑龙江省哈尔滨市南岗区哈平路 134 号黑龙江省森林保护研究所。
责任作者: 孙龙，博士，教授。主要研究方向：森林防火。Email: sunlong365@126.com 地址：150040 黑龙江省哈尔滨市香坊区和兴路 26 号东北林业大学林学院。
本刊网址: http://j.bjfu.edu.cn; http://journal.bjfu.edu.cn

derive a litter load prediction model. Model variable data were obtained through the establishment of survey sample site to verify the operability and accuracy of prediction model. [**Result**] A forest litter load prediction model based on litter decomposition rate was established, which predicted the litter load in survey sample plots for the next two years. The relative error between the predicted and measured litter loads ranged from 0.05 to 0.26, with an average error of 0.14. Overall, the model's predicted values were relatively consistent with the measured values. [**Conclusion**] Model predictions reveal that the litter load in the Daxing'an Mountains forest region follows periodic growth-decay cycles over time. Stands with higher decomposition rates exhibit shorter cycles and maintain more stable litter loads, whereas those with slower decomposition rates show prolonged cycles with persistent load fluctuations. The developed model effectively predicts litter load dynamics, providing critical support for quantifying forest fuel accumulation and assessing regional fire risk levels.

Key words: litter decomposition; prevention of forest fires; forest fuel; fuel load; load model

森林凋落叶是枯枝落叶主要组成部分，是森林火灾发生的引火物，也是驱动火灾蔓延发展的易燃物。其载量的大小是评估森林火灾风险、预测预报林火的关键指标[1]。在林火管理实践中，人们常采取计划烧除、定期清林等措施减少可燃物载量，预防森林火灾或降低林火强度[2]。定量研究森林凋落叶载量，对于森林防火有着十分重要的理论意义和现实价值。

现有森林可燃物载量估测研究方法大致可以总结为 3 类：实测法、林分因子估测法和遥感影像估测法。杨雪清等[3]介绍了采用实测法，调查全国森林可燃物载量分布情况；单延龙等[4]建立了不同时滞可燃物载量与林分因子的一元和多元线性回归模型；胡海清等[5]利用 TM 遥感影像波段值及 NDVI 等指标，建立塔河林区可燃物载量模型。这些方法各有利弊和不同的适用条件。实测法适用范围广，但需要投入大量人力和物力；利用林分因子建立的可燃物载量估测模型大都在样点尺度上做研究；遥感影像估测法应用尺度大，但存在乔木层遮挡影像信息问题。总体上，目前我国森林可燃物载量估算理论还不够成熟和完善，不能全面指导实践，有待进一步探索和补充。

本文从凋落物分解角度，提出一种凋落叶载量预测方法，将凋落叶载量视为历年凋落叶分解残留量的累积，运用 Olson 单指数分解模型原理构建方程组，求解凋落物分解速率和分解周转期，进而利用凋落物分解速率和分解周转期建立森林凋落叶载量预测模型。

白桦（*Betula platyphylla*）是大兴安岭阔叶树种的典型代表，分布广泛，且凋落叶分解周期相对较短，易于短期验证周期变化规律。因此，本文选择研究区域白桦林为例开展相关调查和试验，预测未来林下凋落叶载量动态变化，以验证预测方法的可操作性和预测模型准确性。

1 研究区域概况

黑龙江省大兴安岭地区（50°07′02″～53°33′42″N，121°10′53″～127°01′21″E），属寒温带大陆性季风气候。该区冬寒夏暖，昼夜温差较大，年平均气温−2.8 ℃，最低温度−52.3℃，无霜期 90～110 d，年平均降水量 746 mm。全区地形总势呈东北—西南走向，属浅山丘陵地带。北部、西部和中部高。平均海拔 573 m，最高海拔 1 528 m，最低海拔 180 m。山体浑圆，山坡和缓，坡度一般为 15°～30°。

大兴安岭地区森林资源丰富，有林地面积 646.36 万 hm^2，活立木蓄积 5.29 亿 m^3。该地区的自然植被类型属于泛北极植物区系欧亚森林植物亚区的寒温带针叶和落叶林类型。主要乔木树种有白桦（*Betula platyphylla*）、兴安落叶松（*Larix gmelinii*）、樟子松（*Pinus sylvestris* var. *mongolica*）、蒙古栎（*Quercus mongolica*）、山杨（*Populus davidiana*）等。由于干冷的气候条件以及林内枯枝落叶的长年累积导致可燃物数量增多等原因，该地区森林火灾频繁发生。据黑龙江省森林和草原火灾风险普查平台数据采集系统数据记录，大兴安岭林区在 1990—2020 年间发生一般森林火灾 792 起，较大森林火灾 123 起，重大森林火灾 11 起，特大森林火灾 10 起。

2 研究方法

2.1 数据来源

2021 年 10 月，在黑龙江省大兴安岭林区选择 20 处有代表性的白桦林，根据《森林可燃物标准样地调查技术规程》[6]布设调查样地。每处白桦林布设 1 块调查样地（25.82 m × 25.82 m），调查林分密度、林木平均胸径、郁闭度、林龄、海拔、坡向等枯落物载量影响因子（表 1）。另在样地内侧距每个角顶点

两边 3 m 处设置 4 个(1 m × 1 m)样方,采用完全收获法称量样方内凋落叶上层和下层可燃物鲜质量,取样带回实验室,在烘箱内 105 ℃ 恒温下持续烘干 72 h,测得可燃物载量。

为验证模型预测准确性,2023 年 10 月随机选择 7 块调查样地,在原样方正北方 3 m 处布设新样方,复测凋落叶载量。复测方法和原来保持一致。

2.2　试验方法

在森林防火行业把凋落物分为上下两层,上层是处于分解初期的易燃可燃物,下层是处于半分解状态的难燃可燃物(凋落叶上层和下层燃点、热值有显著差异),二者形态学可鉴别、可机械分离。其中凋落物上层是林火行业最为关注的可燃物,本文如无具体强调,所述凋落叶均指凋落叶上层。

为测定凋落叶分解残留率,在分解试验前采用氧弹式量热仪分别测定 20 块标准样地凋落叶上层和下层燃点及热值。将每块样地凋落叶上层样品分为两组:第一组样品用于测量分解后干质量;第二组样品用于检验分解后燃点及热值。每组样品分为 3 份称量初始干质量后分别装入网袋。2021 年 11 月,完成试验准备工作,将所有样品置于相同环境,使其同步分解。试验期间观察样品分解状态,于 2022 年 10 月,观察凋落叶形态已接近凋落叶下层。此后,每隔 15 d 测定一次第二组样品燃点及热值。

2.3　Olson 单指数分解模型

Olson 单指数分解模型又被称为一级动力学方程,20 世纪 20 年代由 Olson 等[7]提出。模型可以较好地拟合凋落物分解前期状况[8−9],使用广泛。

$$M_t = M_0 \mathrm{e}^{-kt} \tag{1}$$

式中:M_t为经过 t 年后的凋落物残留干质量(kg),M_0是初始干质量(kg),k 为分解速率系数,t 为时间(年)。

2.4　构建方程组

设当年输入单位面积凋落叶干质量为 p,年输入单位面积凋落叶干质量增量为Δp,则有

$$p+(p-\Delta p)\mathrm{e}^{-k}+(p-2\Delta p)\mathrm{e}^{-2k}+(p-3\Delta p)\mathrm{e}^{-3k}+\cdots+(p-t\Delta p)\mathrm{e}^{-tk}=w$$

式中:w 为现存凋落叶上层载量(kg)。

可变换为

表 1　大兴安岭白桦林调查样地信息

Tab. 1　Survey site information of *Betula platyphylla* forest in Daxing'an Mountains

样地编号	林龄/a	郁闭度	林分密度/(株·hm^{-2})	平均树高/m	平均胸径/cm	海拔/m	坡向	凋落叶上层载量/(t·hm^{-2})	凋落叶下层载量/(t·hm^{-2})
1	38	0.7	2 700	13.82	9.6	398	西	3.25	22.29
2	33	0.8	3 540	10.74	9.00	481	西南	3.92	14.33
3	37	0.8	2 565	10.92	9.40	482	南	3.52	12.87
4	36	0.7	2 415	9.00	7.60	451	东	2.55	7.63
5	38	0.7	1 560	13.47	12.5	682	西北	5.00	15.18
6	38	0.7	2 355	12.13	10.4	471	东	4.86	13.16
7	46	0.7	1 860	13.12	11.00	441	东	4.68	13.14
8	45	0.7	1 800	13.76	11.2	533	西南	5.75	8.40
9	36	0.7	2 790	11.79	9.00	503	北	5.51	47.60
10	55	0.5	1 110	16.53	17.1	579	东	8.56	22.78
11	26	0.7	2 985	10.58	7.40	493	东南	3.76	6.59
12	34	0.8	2 100	10.72	8.50	492	西	3.83	4.06
13	36	0.8	2 415	14.18	8.80	553	西南	4.26	15.77
14	35	0.8	2 910	8.70	7.30	501	东北	3.87	8.57
15	29	0.8	3 075	13.37	8.00	516	东南	5.25	20.03
16	36	0.8	2 715	11.05	8.70	426	东南	5.56	18.01
17	41	0.8	2 760	11.97	9.50	812	东南	7.19	6.73
18	47	0.6	1 185	14.78	13.80	780	北	7.66	31.47
19	42	0.7	1 365	11.76	10.20	469	东北	5.23	21.93
20	39	0.6	1 290	10.52	10.70	541	东北	5.58	17.93

$$p+(pe^{-k}+pe^{-2k}+pe^{-3k}+\cdots+pe^{-tk})-$$
$$(\Delta pe^{-k}+2\Delta pe^{-2k}+3\Delta pe^{-3k}\cdots+t\Delta pe^{-tk})=w$$

即

$$p\frac{e^{-k}(1-e^{-tk})}{1-e^{-k}}-\Delta p\frac{e^{-k}(1-e^{-tk})}{(1-e^{-k})^2}+\frac{t\Delta pe^{-(t+1)k}}{1-e^{-k}}=w-p$$

再变换为

$$(pe^{-tk}-t\Delta pe^{-tk}-w)e^{-2k}+(\Delta pe^{-tk}+t\Delta pe^{-tk}+$$
$$2w-p-pe^{-tk}-\Delta p)e^{-k}-w+p=0 \quad (2)$$

由(1)式可得:

$$\frac{M_t}{M_0}=e^{-kt}$$

设 $\frac{M_t}{M_0}=r$

即有

$$e^{-kt}=r \quad (3)$$

$$-k=\frac{\ln r}{t} \quad (4)$$

式中:r 为分解残留率。

当过去某年凋落叶分解残留率为 r 时,t 值恰好等于凋落叶上层分解周转期,即(3)式 t 值和(2)式 t 值相等、k 值相等,可列方程组

$$\begin{cases}(pe^{-tk}-t\Delta pe^{-tk}-w)e^{-2k}+(\Delta pe^{-tk}+t\Delta pe^{-tk}+\\ \quad 2w-p-pe^{-tk}-\Delta p)e^{-k}-w+p=0\\ e^{-kt}=r\\ -k=\frac{\ln r}{t}\end{cases}$$

2.5 方程参数计算

当年输入单位面积凋落叶干质量(p)由叶生物量生长方程求得。叶生物量生长方程的一般形式[10−11]为$y=aD^b$,y 为单株树叶现存量(kg/株),D 为林木胸径(cm),a、b 为系数。落叶树种当年输入单位面积凋落叶干质量(p)的一般形式为 $p=acD^b$,c 为林分密度。

对于白桦树种,有研究表明,对数转换线性回归模型拟合叶生物量效果更佳[12],本文选用(5)式估算当年凋落叶输入量。

$$\ln y=-5.971\ 1+2.587\ 1\ln D+\varepsilon \quad (5)$$

式中:ε为残差。

年输入单位面积凋落叶干质量增量(Δp)可由胸径连年增量方程计算出前一年林木胸径 D_{i-1},年输入单位面积凋落叶干质量增量的一般形式为 $\Delta p=ac(D^b-D_{i-1}{}^b)$。

分解残留率(r)由试验测定得出。分解残留率(r)为分解后干质量和初始干质量比值$\left(\frac{M_t}{M_0}\right)$,$r$ 为参量,相同树种 r 值相同。

在分解试验进行中,采用成对 T 检验法分别检验凋落叶上层和下层在分解过程中的燃点及热值差异。若凋落叶上层分解后的燃点、热值与下层无显著差异($P>0.05$)(见表 2、3),则可认为两者来自同一总体。随后测量第一组试验样品分解后干质量,其平均值为 11.4 g;结合试验前测定样品初始干质量平均值为 20.0 g,通过二者比值计算得白桦凋落叶分解残留率为 0.57。

方程中所需实测参数为林木落叶后现存凋落叶上层载量(w)、林木平均胸径(D),林分密度(c)。

2.6 方程求解

将(3)、(4)式代入(2)式,可得

$$(pr-t\Delta pr-w)e^{2\frac{\ln r}{t}}+(\Delta pr+t\Delta pr+$$
$$2w-p-pr-\Delta p)e^{\frac{\ln r}{t}}-w+p=0 \quad (6)$$

设 $x=e^{\frac{\ln r}{t}}$,方程可看成一元二次方程,t 是以 1 为步长正整数,即 $t=1,2,3,4,\cdots$,可采用逐步搜索法求解方程根,再将 t 值代入式(4)求出 k 值。

2.7 建立载量模型

由(6)式求得凋落叶分解速率系数(k)和上层分解周转期(t),建立未来第 n 年凋落叶载量模型。

第 n 年载量。当 $n=1$ 时,t 年前凋落叶变为($t+1$)年,超出凋落叶上层分解周转期,即该年份分解残留率小于r,不再计入方程,可列以下方程

$$w_1=p+\Delta p+[p+(p-\Delta p)e^{-k}+$$
$$(p-2\Delta p)e^{-2k}+\cdots+(p-(t-1)\Delta p)e^{-(t-1)k}]e^{-k}$$

表 2 燃点成对样品 T 检验

Tab. 2 Paired sample T-test for ignition point

平均值	标准偏差	标准误差平均值	下限	上限	t	自由度	Sig.(双尾)
1.286	2.498	0.944	−1.024	3.596	1.362	6	0.222

表 3 热值成对样品 T 检验

Tab. 3 Paired sample T-test for calorific value

平均值	标准偏差	标准误差平均值	下限	上限	t	自由度	Sig.(双尾)
291.286	1 478.339	558.759	−1 075.950	1 658.521	0.521	6	0.621

即

$$w_1 = p + \Delta p + we^{-k} - (p - t\Delta p)e^{-tk}$$

以此类推

$$w_2 = p + 2\Delta p + w_1e^{-k} - [p - (t-1)\Delta p]e^{-tk}$$
$$w_3 = p + 3\Delta p + w_2e^{-k} - [p - (t-2)\Delta p]e^{-tk}$$
$$\vdots$$

即第 n 年载量为

$$w_n = p + n\Delta p + w_{n-1}e^{-k} - [p - (t-n+1)\Delta p]e^{-tk} \quad (7)$$

式中:w_n为未来第 n 年凋落叶载量。

凋落叶载量年增长量。由(7)式可推导未来第 n 年凋落叶载量年增量

$$\Delta w_n = w_n - w_{n-1} = \Delta p + \Delta w_{n-1}e^{-k} - \Delta pe^{-tk} \quad (8)$$

式中:Δw_n为第 n 年凋落叶载量年增量,Δw_{n-1}为第($n-1$)年凋落叶年载量增量。

3　结果与分析

3.1　凋落叶载量预测

表 4 预测了未来 5 年大兴安岭白桦林调查样地凋落叶载量。由表 4 可知,调查样地现存凋落叶上层载量(w)在 2.55 ~ 8.56 t/hm^2 之间。凋落叶周转期(t)为 1 ~ 4 年,以 2 年或 3 年居多,说明大兴安岭白桦林当年的凋落叶多数在 2 年或 3 年时间便会分解为凋落叶下层,最短只要 1 年。凋落叶周转期(t)为 1 年调查样地,未来 5 年凋落叶载量先下降后上升,平均载量均小于现存载量。凋落叶周转期(t)为 2 年调查样地,其中 8、9 号样地未来 5 年凋落叶载量先下降后上升,平均载量小于现存载量,其他 4 块样地载量均有小幅上升。凋落叶周转期(t)为 3 年调查样地,其中 19 号样地未来 5 年凋落叶载量持续下降,其他 8 块样地载量均持续上升。只有 1 块调查样地凋落叶周转期(t)为 4 年,该样地未来 5 年凋落叶载量持续上升。

由图 1 可见,在未来 5 年间,周转期为 1 年调查样地凋落叶载量先下降后上升,呈现小幅波动。这是因为凋落叶分解周转期短,分解速率大,凋落叶分解快,未来凋落叶载量基本维持在初始载量上下小幅变化。随着周转期变大,凋落叶载量呈现持续性上升或下降趋势。其中除 19 号样地未来 5 年凋落叶

表 4　大兴安岭白桦林未来 5 年地表凋落叶载量估算

Tab. 4　Estimation of surface litter and leaf load of *B. platyphylla* forest in the Great Xing'an Mountains in the next 5 years

样地编号	w	c	D	p	t	k	n_1	n_2	n_3	n_4	n_5	N
1	3.25	2 700	9.6	2.40	1	0.56	3.08	3.03	3.05	3.11	3.20	3.09
2	3.92	3 540	9.0	2.66	1	0.56	3.60	3.48	3.48	3.53	3.63	3.54
3	3.52	2 565	9.4	2.16	1	0.56	3.10	2.92	2.86	2.87	2.93	2.94
4	2.55	2 415	7.6	1.17	2	0.28	2.58	2.65	2.72	2.81	2.91	2.73
5	5.00	1 560	12.5	2.74	2	0.28	5.18	5.36	5.55	5.73	5.92	5.55
6	4.86	2 355	10.4	2.57	2	0.28	5.03	5.21	5.40	5.59	5.79	5.40
7	4.68	1 860	11.0	2.35	2	0.28	4.76	4.87	5.00	5.14	5.29	5.01
8	5.75	1 800	11.2	2.38	2	0.28	5.59	5.51	5.49	5.52	5.59	5.54
9	5.51	2 790	9.0	2.09	2	0.28	5.30	5.19	5.16	5.18	5.25	5.22
10	8.56	1 110	17.1	4.39	2	0.28	8.61	8.71	8.84	8.99	9.15	8.86
11	3.76	2 985	7.4	1.35	3	0.19	3.94	4.12	4.31	4.51	4.71	4.32
12	3.83	2 100	8.5	1.36	3	0.19	3.97	4.12	4.27	4.44	4.61	4.28
13	4.26	2 415	8.8	1.71	3	0.19	4.53	4.78	5.04	5.29	5.54	5.04
14	3.87	2 910	7.3	1.27	3	0.19	3.98	4.11	4.25	4.41	4.57	4.26
15	5.25	3 075	8.0	1.70	3	0.19	5.36	5.50	5.66	5.83	6.02	5.67
16	5.56	2 715	8.7	1.87	3	0.19	5.70	5.85	6.03	6.21	6.41	6.04
17	7.19	2 760	9.5	2.38	3	0.19	7.32	7.47	7.65	7.86	8.08	7.68
18	7.66	1 185	13.8	2.69	3	0.19	7.76	7.89	8.04	8.20	8.37	8.05
19	5.23	1 365	10.2	1.42	3	0.19	4.70	4.33	4.08	3.92	3.83	4.17
20	5.58	1 290	10.7	1.52	4	0.14	5.72	5.88	6.04	6.22	6.40	6.05

注:w为现存凋落叶上层载量(t/hm^2),c为林分密度(株/hm^2),D为平均胸径(cm),p为当年单位面积凋落叶输入量(t/hm^2),t为凋落叶周转期(年),k为凋落叶分解速率系数,n_i为未来第i年凋落叶上层载量(t/hm^2),N为未来5年凋落叶上层载量均值(t/hm^2)。

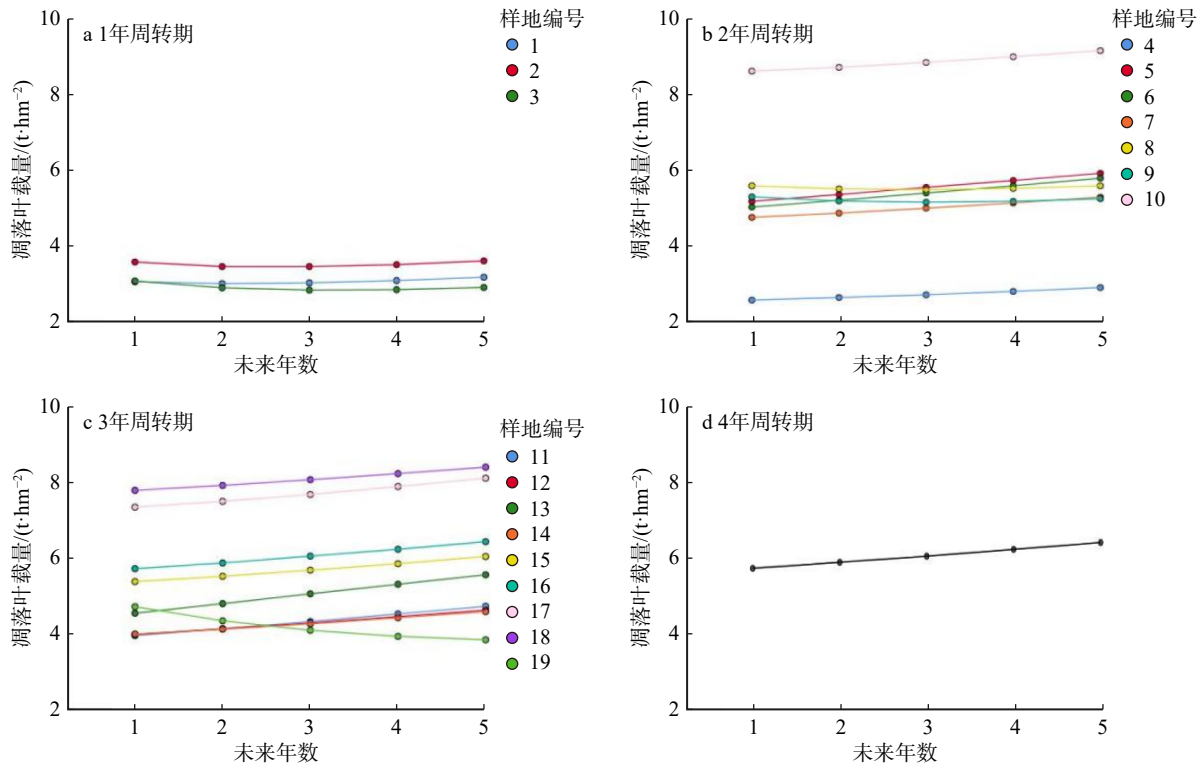


图 1 凋落叶载量预测散点图

Fig. 1 Scatter plot for predicting leaf litter load

载量持续下降外，其他样地凋落叶载量持续增长。由于周转期大分解速率相应小，凋落叶分解变缓慢，未来凋落叶载量将保持更长一段时间的积累或是当载量积累到达峰值后又将持续缓慢下降。

本文仅展示了未来 5 年凋落叶载量预测结果，根据预测模型(7)函数性质，当凋落叶载量到达峰值后即会反向发展。分解速率大，凋落叶载量变化周期短；分解速率小，凋落叶载量变化周期长。当凋落叶年分解量小于输入量时，凋落叶载量会持续增长；当年分解量大于输入量时凋落叶载量会发生负增长。

3.2 模型验证

通过实测调查样地凋落叶载量验证预测模型的准确性，结果表明，实测载量和预测值相对误差在 0.05 ~ 0.26 之间，平均误差 0.14，模型预测值和实测值总体较为吻合，凋落叶载量预测残差项(图 2)。

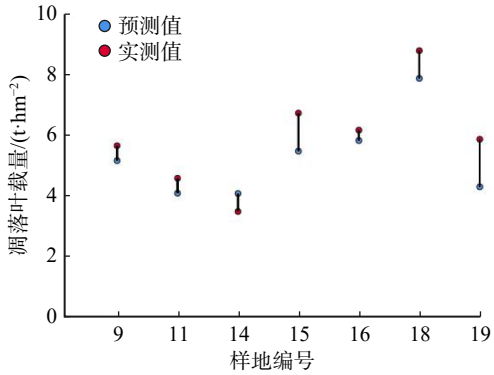


图 2 凋落叶载量预测残差图

Fig. 2 Residual diagram for predicting leaf litter load

4 讨 论

凋落物分解是生态学研究的热点，近年来，针对不同研究目的、精度等需要，国内外发展出多种凋落物分解研究方法，主要可概括为以下 4 种：野外分解袋法[13]、实验室模拟分解法[14]、现量估算法[15]和综合平衡法[16]。其中，野外分解袋法最接近自然分解状态、准确性较高被广泛使用，但这种方法耗时费力(一般需要 1 ~ 3 年)。为了获得凋落叶分解速率和分解周转期，本文提出一种通过构建的凋落物分解方程组，计算凋落物分解速率的研究方法。该方法和刘增文[16]提出的综合平衡法思路相似，但模型更简洁，所需变量容易获取，易于实际操作。

本文试验测得白桦凋落叶分解残留率为 0.57，较为接近半分解(分解 50%)。这和郭忠玲等[17]研究长白山白桦林调查样地凋落叶半分解；张峭等[18]研究寒温带地区非生长季白桦凋落物分解 11 个月质量损失 42.37% 试验结果较为相近。即便如此，本项试验方法仍然有待改进，以获得更为准确的凋落叶分解残留率，提高模型预测的准确性。

以往同类森林可燃物载量预测研究，多采用统计学方法建立以平均胸径、平均树高等林分因子为自变量的一元回归或多元回归模型。如高宝嘉等[19]和刘晓东等[20]分别建立的可燃物载量与林分因子一

元线性回归估测模型；单延龙等[4]建立的可燃物载量与林分因子多元回归估测模型等。这类研究实质更关注凋落物产量对可燃物载量的影响，本文实质更关注的是凋落物分解对可燃物载量的影响。另外，本研究和以往模型适用条件也不同。有研究表明凋落物载量除受林分因子影响外，还受坡度、坡向、坡位、海拔等立地条件等因素影响，由于林分因子、立地条件之间存在自相关，无法将全部影响因子列入回归模型[21]。因此，回归方法一般需要限定立地条件。本文预测模型建立在计算凋落物分解速率基础上，可燃物所处立地条件、气候条件等载量影响因子均表现在凋落物分解速率的不同，因此，不再受立地条件影响。

凋落物现存量是凋落物生产和分解综合作用的产物，其载量的大小是凋落物产量和分解速率共同决定的。笔者认为凋落物分解速率是影响凋落物载量的最终因素。正如热带雨林地区，年枯枝落叶量高达 30 t/hm^2，由于凋落物分解速度快，仍然没有大的积累量[22]。同样，小尺度上凋落物分解速率不同对载量的影响也不容忽视。从本文调查样地表 4 中不难发现，部分调查样地年单位面积凋落叶输入量较大，凋落叶现存载量却小于年输入量较小的调查样地。说明即便凋落叶产量高，如果分解速率很快，大量的凋落叶会被快速分解，最终凋落叶载量未必一定大。

5　结论及展望

本文基于凋落物分解建立了森林可燃物载量预测模型，为森林可燃物载量研究提供新思路。模型预测揭示了大兴安岭林区凋落叶载量随时间变化呈现周期性消长规律，分解速率快的林分变化周期短，凋落叶载量呈小幅波动，总体维持较稳定状态；分解速率慢的林分变化周期长，凋落叶载量保持较长时间持续性变化。

在开展可燃物清理、计划烧除森林防火工作时，应充分考虑凋落物载量未来变化趋势，重点关注凋落物载量持续增长的林分，使森林防火可燃物管理工作更加科学高效。

本文只研究了枯枝落叶层凋落叶载量，还不能完整描述枯枝落叶层总体载量。未来需要通过测定不同树种枯枝分解残留率或根据凋落叶所占细小可燃物组分比例，进一步估算枯枝落叶层总载量。

参　考　文　献

[1] 孙龙, 鲁佳宇, 魏书精, 等. 森林可燃物载量估测方法研究进展 [J]. 森林工程, 2013, 29(2): 26−37.
Sun L, Lu J Y, Wei S J, et al. Research progress of forest fuel load estimation methods[J]. Forest Engineering, 2013, 29(2): 26−37.

[2] 胡海清. 林火生态与管理 [M]. 北京: 中国林业出版社, 2018: 37−39.
Hu H Q. Fire ecology and management [M]. Beijing: China Forestry Publishing House, 2018: 37−39.

[3] 杨雪清, 孙志超, 柴政, 等. 全国森林可燃物载量样地调查与预估方法探讨 [J]. 林业资源管理, 2022(6): 1−6.
Yang X Q, Sun Z C, Chai Z, et al. Research on the plot survey and load estimation of national forest fuels[J]. Forest Resources Management, 2022(6): 1−6.

[4] 单延龙, 舒立福, 李长江. 森林可燃物参数与林分特征关系 [J]. 自然灾害学报, 2004, 13(6): 70−75.
Shan Y L, Shu L F, Li C J. A relation between forest combustible parameters and stand characteristics[J]. Journal of Natural Disasters, 2004, 13(6): 70−75.

[5] 胡海清, 魏云敏. 利用 TM 遥感影像和林分因子估测森林可燃物载量 [J]. 东北林业大学学报, 2007, 35(6): 18−20.
Hu H Q, Wei Y M. Estimation of forest fuel load using TM remote sensing images and forest partitioning factors[J]. Journal of Northeast Forestry University, 2007, 35(6): 18−20.

[6] 国家林业和草原局. 森林可燃物标准样地调查技术规程: FXPC/LC F-01[S]. 北京: 国务院第一次全国自然灾害综合风险普查领导小组办公室, 2021.
National Forestry and Grassland Administration. Technical specifications for forest fuel standard sampling site investigation: FXPC/LC F-01[S]. Beijing: Office of the Leading Group for the First National Comprehensive Natural Disaster Risk Census of the State Council, 2021.

[7] Olson J S. Energy storage and the balance of producers and decomposition in ecosystems[J]. Ecology, 1963, 44: 332−337.

[8] Aber J D. Mcclaugherty C A. Predicting long-term patterns of mass loss nitrogen dynamics and soil organic matter formation from initial fine litter chemistry in temperature forest ecosystems[J]. Canadian Journal of Botany, 1990, 68: 2201−2208.

[9] Moorhead D L, Reynolds J F. A general model of litter decomposition in the northern Chihuahuan Desert[J]. Ecological Modelling, 1991, 59(4): 197−219.

[10] 曾伟生. 3 种异速生长方程对生物量建模的对比分析 [J]. 中南林业调查规划, 2014, 33(1): 1−3.
Zeng W S. Comparison of three allometric equations for biomass modeling[J]. Central South Forest Inventory and Planning, 2014, 33(1): 1−3.

[11] 曾伟生. 全国立木生物量方程建模方法研究 [D]. 北京: 中国林业科学研究院, 2011.
Zeng W S. Methodology on modeling of single-tree biomass equations for national biomass estimation in China[D]. Beijing: Chinese Academy of Forestry, 2011.

[12] 董利虎. 东北林区主要树种及林分类型生物量模型研究 [D]. 哈尔滨: 东北林业大学, 2015.
Dong L H. Developing individual and stand-level biomass equations in northeast China forest area[D]. Harbin: Northeast Forestry University, 2015.

[13] Singh K P, Singh P K, Tripathi S K. Litter fall, litter decomposition and nutrient release patterns in four native tree species raised on coal mine spoil[J]. Biology and Fertility of Soils, 1999, 29: 371−378.

[14] Latterini F, Dyderski M K, Horodecki P, et al. The effects of forest operations and silvicultural treatments on litter decompositionrate: a meta-analysis[J]. Current Forestry Reports, 2023, 9(4): 276−290.

[15] Berg B, Lönn M. Long-term effects of climate and litter chemistry on rates and stable fractions of decomposing Scots pine and Norway spruce needle litter: a synthesis[J]. Forests, 2022, 13(1): 125.

[16] 刘增文. 森林生态系统中枯落物分解速率研究方法 [J]. 生态学报, 2002, 22(6): 954−956.
Liu Z W. Research method of litter decay rate in forest ecosystems[J]. Acta Ecologica Sinica, 2002, 22(6): 954−956.

[17] 郭忠玲, 郑金萍, 马元丹, 等. 长白山各植被带主要树种凋落物分解速率及模型模拟的试验研究 [J]. 生态学报, 2006, 26(4): 1037−1046.
Guo Z L, Zheng J P, Ma Y D, et al. Reseaches on litterfall decomposition rates and model simulating of main species in various forest vegetations of Changbai Mountains[J]. Acta Ecologica Sinica, 2006, 26(4): 1037−1046.

[18] 张峭, 满秀玲, 刘思琪, 等. 寒温带地区非生长季典型森林群落凋落物分解及其养分释放 [J]. 北京林业大学学报, 2022, 44(3): 66−74.
Zhang D, Man X L, Liu S Q, et al. Litter decomposition and nutrient release of typical forest communities in non-growing season in cold temperate zone[J]. Journal of Beijing Forestry University, 2022, 44(3): 66−74.

[19] 高宝嘉, 张桂娟, 周国娜, 等. 承德县人工针叶林地表枯死可燃物参数估测及潜在地表火行为评价 [J]. 林业科学, 2009, 45(10): 163−167.
Gao B J, Zhang G J, Zhou G N , et al. Estimation to dead surface combustible parameters and evaluation of potential surface fire behavior of artificial coniferous forests in Chengde County [J]. Scientia Silvae Sinicae, 2009, 45(10): 163−167.

[20] 刘晓东, 王军, 张东升, 等. 大兴安岭地区兴安落叶松林可燃物模型的研究 [J]. 森林防火, 1995(3): 8−9.
Liu X D, Wang J, Zhang D S, et al. A study on the combustible model of Xing'an larch forest in the Greater Khingan Range Area[J]. Forest Fire Prevention, 1995(3): 8−9.

[21] 周志权. 辽东 3 种主要林型地被可燃物载量的研究 [J]. 东北林业大学学报, 2000, 28(1): 32−34.
Zhou Z Q. Loading capacity of fuels of ground cover for three majo forest types in eastern Liaoning[J]. Journal of Northeast Forestry University, 2000, 28(1): 32−34.

[22] 薛建辉. 森林生态学 [M]. 北京: 中国林业出版社, 2006: 209.
Xue J H. Forest ecology [M]. Beijing: China Forestry Publishing House, 2006: 209.

（责任编辑 范 娟
责任编委 刘晓东）