

基于气象因子的森林可燃物含水率预测

袁晓玉¹, 杨晓丹^{1*}, 王中玉²

1. 中国气象局公共气象服务中心, 北京 100081

2. 华北电力大学数理学院, 北京 102206

摘要 在分析影响森林可燃物含水率关键气象因子的基础上, 利用多元回归、分类与回归树(CART)等方法分别构建了云南松(阴坡)、云南松(阳坡)、华南松和侧柏4种不同林型的活、死可燃物含水率预测模型。结果表明: 多元回归模型对不同林型森林活、死可燃物含水率预测的平均相对误差介于5.90%~6.60%、20.1%~36.9%; CART模型在基于气象因子的森林可燃物含水率预测中适用, 其对活可燃物含水率预测的最优平均相对误差(5.38%~7.00%)明显低于死可燃物(22.88%~26.64%), 这与多元回归模型一致且精度普遍更高, 同时解决了多元回归模型无法预测云南松(阳坡)活可燃物含水率的问题。

关键词 气象因子; 森林可燃物; 含水率预测; 多元回归模型; 分类与回归树

森林作为面积和生物量最大、初级生产力最高的陆地生态系统, 储存了陆地上大约50%~60%的碳, 其保护和恢复对实现“碳达峰”与“碳中和”的目标具有战略意义^[1-3]。党的十八大以来, 以习近平同志为核心的党中央把生态文明建设作为统筹推进“五位一体”总体布局, 提出绿水青山就是金山银山的发展理念。在导致森林破坏的因素中, 森林火灾(简称林火)具有突发性强、破坏性大、处理救助困难等特点, 严重威胁着森林生态系统健康和人民生命财产安全^[4-5]。统计数据显示, 2018—2021年中国共发生林火6592起, 受害森林面积约4.28万公顷^[6]。随着生态保护要求和森林防火工作需求的

不断提升, 森林防火成为国家生态文明建设的重要组成部分, 对保护森林资源有举足轻重的作用。

林火的预测预报无疑是森林防火及其动态管理的关键措施之一, 受到了林业管理部门和林区人民的重视^[4,7]。从本质上看, 林火是森林可燃物燃烧的开放过程。根据“火源、火环境、森林可燃物”火三角原理, 森林可燃物是林火发生和蔓延的载体, 其性质是影响林火风险的重要因素, 但目前的林火预测预报通常单独依靠气象条件来划分森林火险气象等级, 进而判断林火风险大小, 这忽略了区域内不同林分和可燃物类型导致的火险空间分布异质性, 并可能引起区域预报方式与林业基层防火业

收稿日期: 2022-08-26; 修回日期: 2023-05-31

基金项目: 国家重点研发计划项目(2020YFC1511602)

作者简介: 袁晓玉, 高级工程师, 研究方向为专业气象预报方法, 电子信箱: yuanxy@cma.cn; 杨晓丹(通信作者), 正研级高级工程师, 研究方向为专业气象预报方法, 电子信箱: yangxd@cma.cn

引用格式: 袁晓玉, 杨晓丹, 王中玉. 基于气象因子的森林可燃物含水率预测[J]. 科技导报, 2023, 41(16): 124-135; doi: 10.3981/j.issn.1000-7857.2023.16.011

务脱钩^[8-9]。对于森林可燃物而言,含水率无疑是影响林火风险的重要性质,其大小决定着林火的发生和蔓延^[9-10]。因此,森林可燃物含水率的预测对于森林火险预报和林火精准预防极为重要^[11-13]。

预测可燃物含水率的方法主要有遥感估测法、平衡含水率法、气象要素回归法、以及过程模型法4种方法^[14]。这4种方法在预测可燃物含水率方面各有优点,其中遥感估测法是伴随着遥感技术的出现而发展出来的,比较适合在大尺度火险评价中使用,而在小尺度的火险评价中准确性不够,这是因为其中环节比较复杂^[15];和遥感估测法不同,平衡含水率法^[16]物理上相对可靠,在小尺度火险评价中比较适用,若研究对象描述精确,则含水率预测是准确的,但若运用到大尺度上,需要的工作量就会很大;气象要素回归法相对前两种比较简单,目前主要采用统计方法,但结论受研究地区和可燃物特殊性限制大,一些结合了平衡含水率的预测方法的效果比较不错^[17-18]。过程模型法则完全基于物理描述,在理论上具有潜力,但过程描述复杂,所以研究相对其他方法比较少^[19]。

本研究主要考虑森林可燃物含水率预测与气象因子之间的关系^[20]。利用多元回归、分类与回归树(CART)等方法构建可燃物含水率预测模型,探索机器学习方法建立可燃物含水率预测模型的可行性和优势,解决单一气象要素回归方法计算可燃物含水率受地区和可燃物特殊性的影响。

1 研究区域概况与方法

1.1 研究区域概况

研究区域位于云南省昆明市的元宝山林区(25.0986~25.1122 N, 102.8175~102.8342 E),属北纬低纬度高原山地季风气候区。据气象资料统计,昆明地区年均气温14.5℃,年降水量约1031 mm,全年无霜期在240 d以上,年均日照达2445.6 h。整体来看,良好的水热条件和充足的光照使研究区域内分布和繁衍着丰富的植物种,常见的乔木、灌木和草本植物就有40多种,例如乔木中的云南松(*Pinus yunnanensis*)、华山松(*Pinus armandii*)、侧柏

(*Platycladus orientalis*)等。

1.2 数据来源与处理

为系统分析不同林型森林可燃物含水率的预测指标和模型,本研究在刘金波的研究中获取了研究区域内云南松、华山松和侧柏林样地的死、活可燃物含水率数据,以及日平均气温、日平均相对湿度、日平均风速、日降雨量以及连续干旱天数等气象数据^[20]。同时,为了分析坡向对森林可燃物含水率及其预测的影响,云南松样地分阴坡、阳坡两组样例。其中,含水率数据通过采样测量干湿重并计算其差值占干重的比例得到,即

$$C_{i-j} = (W_w - W_d) / W_d \times 100\% \quad (1)$$

式中, C_{i-j} 为森林可燃物含水率, W_w 为样品湿重, W_d 为样品干重, i 为样地编号, $j=l, d$ 分别代表活可燃物与死可燃物。

气象数据通过HOBO便携式气象站自动监测获得。数据监测的时间段为2016年3月9日—6月16日(共计100 d),属于当地重点防火期^[20]。

根据研究目标,利用日平均气温 $T(^\circ\text{C})$ 、日平均相对湿度 $H(100\%)$ 、日平均风速 $W(\text{m/s})$ 和日降水量 $P(\text{mm})$ 等数据,处理得到前 f 日的平均气温 T_{-f} 、日平均相对湿度 H_{-f} 、日平均风速 W_{-f} 、日降水量 P_{-f} (其中 $f=1, 2, \dots, 9$)和包含当日在内的连续 s 日平均气温 T_s 、日平均相对湿度 H_s 、日平均风速 W_s 、日降水量 P_s (其中 $s=2, 3, \dots, 10$),以及连续干旱天数(day,记作 M)。因此,森林可燃物含水率与气象实测值被处理为91组样本数据,其中,71组用于模型构建,20组用于模型验证和效果评估。

1.3 研究方法

1.3.1 多元回归模型

在正态性检验的基础上,对森林可燃物含水率与气象数据进行Pearson或Spearman相关分析,通过分析决定系数 R^2 和显著性水平 p 值确定影响不同林型活、死可燃物含水率的关键气象因子。然后,采用多元回归的方法分别建立不同林型的活、死可燃物含水率预测模型。模型的一般形式如下:

$$C_{i-j} = b_0 + b_1x_1 + b_2x_2 + \dots + b_kx_k \quad (2)$$

式中, $b_0, b_1, b_2, \dots, b_k$ 为模型参数, x_1, x_2, \dots, x_k 为模型自变量,即关键气象因子, k 为关键气象因子数

量^[17]。

利用平均绝对误差 AAE、平均相对误差 ARE 等指标评估模型的预测效果。计算公式分别如下：

$$AAE = \frac{1}{N} \sum_{m=1}^N |C_m - \widehat{C}_m| \quad (3)$$

$$ARE = \frac{1}{N} \sum_{m=1}^N \frac{|C_m - \widehat{C}_m|}{C_m} \quad (4)$$

式中, N 为样本数量, C_m 和 \widehat{C}_m 分别为森林可燃物含水率的实测值和预测值。

1.3.2 分类与回归树模型

以各气象因子为自变量、森林可燃物含水率为因变量, 构建分类与回归树模型研究其影响路径并实现数据预测。在计算样本总体方差 $E(D)$ 的基础上, 通过计算回归误差(样本方差)下降值 E 对数据进行分割, 即每次选择使数据方差最小化的分裂指标和值。在每次分裂中, 分裂指标对总体方差下降值计算公式如下:

$$\begin{aligned} E &= E(D) - \frac{N_1}{N} E(D_1) - \frac{N_2}{N} E(D_2) \\ &= \frac{1}{N} \sum_{m=1}^N \left(C_m - \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N C_n \right)^2 \\ &\quad - \frac{N_1}{N} \left[\frac{1}{N_1} \sum_{m=1}^{N_1} \left(C_{1m} - \frac{1}{N_1} \sum_{n=1}^{N_1} C_{1n} \right)^2 \right] \\ &\quad - \frac{N_2}{N} \left[\frac{1}{N_2} \sum_{m=1}^{N_2} \left(C_{2m} - \frac{1}{N_2} \sum_{n=1}^{N_2} C_{2n} \right)^2 \right] \\ &= \frac{1}{N} \sum_{m=1}^N \left(C_m - \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N C_n \right)^2 \\ &\quad - \frac{1}{N} \sum_{m=1}^{N_1} \left(C_{1m} - \frac{1}{N_1} \sum_{n=1}^{N_1} C_{1n} \right)^2 \\ &\quad - \frac{1}{N} \sum_{m=1}^{N_2} \left(C_{2m} - \frac{1}{N_2} \sum_{n=1}^{N_2} C_{2n} \right)^2 \end{aligned} \quad (5)$$

式中, D 为节点集合, N 为样本量, C_m 、 C_n 是第 m 、 n 个样本的森林可燃物含水率, 下标 1 和 2 代表建模和预测子节点, 例如, $N=91$ 为样本总量, $N_1=71$ 和 $N_2=20$ 分别是建模和预测子节点的样本数^[21-22]。

为了防止统计分析过程中的过拟合行为, 所得回归树通过 cost-complexity prune 方法进行剪枝。该方法依赖于复杂性参数 α , 其计算公式如下:

$$\alpha = \frac{E(n) - E(n_i)}{|n_i| - 1} \quad (6)$$

式中, $E(n)$ 为节点 n 的误差率, $E(n_i)$ 为该节点子树的误差率, $|n_i|$ 为该节点子树的叶节点数量。

在剪枝过程中, α 逐渐降低, 剪枝从最后一层开始, 如果预测错误分类代价的变化小于树复杂度变化的 α 倍, 则子节点被修剪掉。每个自变量对结果的解释率计算如下:

$$PC_w = \frac{q_w}{\sum_{h=1}^k q_h} \quad (7)$$

式中, PC_w 为第 w 个自变量对因变量的解释率, q_w 为当第 w 个自变量为分裂点时样本总体方差下降值, k 是自变量个数。

CART 模型验证和效果分析除单次计算的平均相对误差 ARE 外, 还需要考虑 V 次分裂计算的总平均相对误差 TARE, 其计算方法是在式(4)基础上增加多次分裂计算的平均过程。即:

$$TARE = \frac{1}{V} \sum_{w=1}^M \left(\frac{1}{N_2} \sum_{m=1}^{N_2} \frac{|C_m - \widehat{C}_m|}{C_m} \right) \quad (8)$$

式中, N_2 为模型验证的样本量, C_m 和 \widehat{C}_m 的意义与式(4)中相同。

2 森林可燃物含水率的气象因子回归模型

2.1 森林可燃物含水率与气象因子的相关性分析

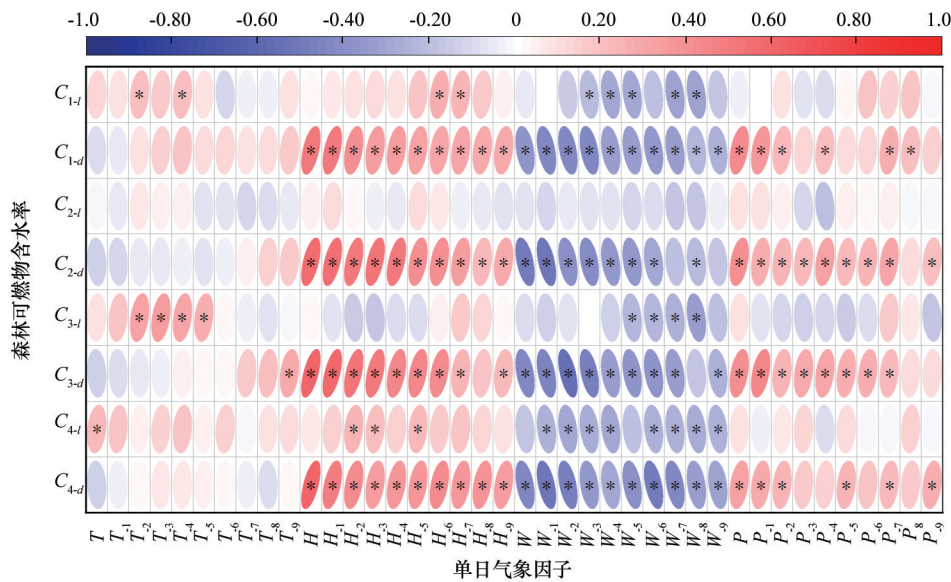
森林可燃物含水率与气象因子之间的关系是其预测的重要基础。已有研究表明, 温度、相对湿度、降水、风速等气象因子对森林可燃物含水率均有一定的影响^[23], 但由于不同林型植被的性质不同、植被本身的自适应性、气象因子影响的时滞性等问题, 如何利用这些气象因子处理出合理的气象指标并进而用于森林可燃物含水率的预测, 仍需要开展进一步研究^[24]。本研究通过相关性分析, 研究不同林型的森林可燃物死、活可燃物含水率与单日气象指标、多日平均气象指标之间的关系, 以确定更适合于森林可燃物含水率预测的气象指标。

根据 1.3 中所述的样本数据量,采用 Kolmogorov-Smirnov 检验对相关数据进行正态性检验,并进而确定相关性分析的方法。结果表明,各林型的森林活可燃物含水率均符合正态分布,而死可燃物均不符合正态分布;原始气象数据均不符合正态分布,仅处理后的部分多日平均相对湿度和风速符合正态分布。因此,采用 Spearman 相关系数进行森林可燃物含水率与气象因子之间的相关性分析。

2.1.1 单日气象因子

不同林型的死、活可燃物含水率与单日气象因子的相关性分析结果如图 1 所示。结果显示,除 T_9 与华山松林死可燃物含水率之间显著相关外,气温对各林型的死可燃物含水率均无显著影响。尽管

华山松林死可燃物含水率与 T_9 之间呈现了显著相关性 ($p < 0.01$),但综合考虑其较低的决定系数 $R^2 = 0.280$ 和较远的时间距离,加之其余时间、气温无显著影响,将此相关性不作为气温对死可燃物含水率影响的关键因子。对于活可燃物含水率而言,气温对华山松(阳坡)无显著影响,而对云南松(阴坡)、华山松、侧柏林呈现了不同程度的影响。具体为, T_2 和 T_4 对云南松(阴坡)、 T 对侧柏林有较弱的显著影响 ($p < 0.05$), $T_2 \sim T_4$ 对华山松林有显著影响。这说明森林植被的含水率特性对气温的变化有一定的响应,并且云南松和华山松林的响应存在一定的时滞,侧柏林时滞效应不明显,这一点仍需要进一步的研究来论证。



注: *表示显著性水平为 $p < 0.05$; 红色代表正相关,蓝色代表负相关,颜色越深相关性越大

图1 不同林型森林可燃物含水率与单日气象因子的相关性分析

与气温不同,多数的单日相对湿度、风速和降水量对各林型森林死可燃物含水率有较显著的影响。对于各样地不同的林型,所有的相对湿度数据均与死可燃物含水率呈现了显著相关 ($p < 0.01$); 1 周内的单日风速 ($W_1 \sim W_6$) 也有显著影响 ($p < 0.01$), 其余单日风速 ($W_7 \sim W_9$) 则各林型有所不同; 当日 (P) 和前 1 日 (P_1) 的降水量显著影响死可燃物含水率 ($p < 0.01$), 前 2 日 (P_2) 也有一定影响, 而其余时间的单日降水规律不一致, 显著、弱显著和无影响

交叉出现。这表明,对于丧失活性和自适应性的死可燃物而言,相对湿度、风速和降水量等气象因子能够直接且显著地影响其水分含量,这与前人研究结果一致^[20,24-26]。

对于活可燃物含水率,单日相对湿度有显著影响的较少,仅 H_6 和 H_7 对云南松(阴坡)、 H_2 、 H_3 和 H_5 对侧柏林有一定的影响; 单日风速对森林活可燃物含水率多呈现带有时滞效应的影响,与云南松(阴坡)、华山松和侧柏林相关单日风速分别分布在

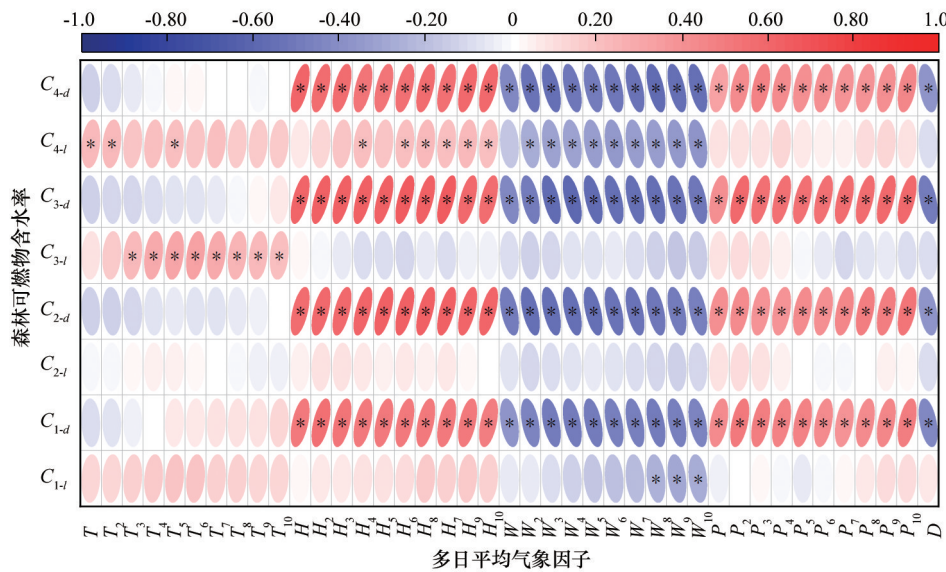
前3~8日、前5~8日和前1~8日;单日降水量对各林型森林活可燃物含水率均无显著影响。

综上所述,单日气象因子对各林型森林活可燃物含水率的影响规律不明显且不一致,对死可燃物含水率的影响规律较为明显,但多表现为连续多日都有影响。因此,进一步研究多日平均气象指标的影响,将有利于寻找更合理的森林可燃物含水率预测指标。

2.1.2 多日平均气象因子

不同林型的死、活可燃物含水率与多日平均气象因子的相关性分析结果如图2所示。结果表明,多日平均气温均与森林死可燃物含水率不相关,这与2.1节的结论一致。对于活可燃物,在单日平均气温影响均不显著的情况下,多日平均气温对云南

松(阳坡)无显著影响是可以预见的;单日平均气温 T_2 和 T_4 对云南松(阴坡)的弱显著影响在多日平均气温中也未有所体现,综合考虑其较低的决定系数($R^2=0.211、0.210$)、较弱的显著性($p=0.044、0.046$)和在时间上的不连续性,确定气温指标均不适合用于云南松林活可燃物含水率的预测。对于华山松林活可燃物含水率,具有显著影响的指标较多,但决定系数最高的 T_5 ($R^2=0.325, p<0.01$)仍低于单日气温 T_3 ($R^2=0.359, p<0.01$),因此华山松活可燃物含水率预测模型建议引入指标 T_3 。在相同的显著性水平下($p<0.05$),2日平均气温 T_2 对侧柏林活可燃物含水率影响的决定系数 $R^2=0.240$ 高于单日气温,可作为影响可燃物含水率的关键影响因子引入其预测模型。



注:*表示显著性水平为 $p<0.05$;红色代表正相关,蓝色代表负相关,颜色越深相关性越大

图2 不同林型森林可燃物含水率与多日平均气象因子的相关性分析

从决定系数和显著性 p 值看,云南松(阳坡)、华山松活可燃物分析结果与单日相对湿度一致,均未发现显著相关的指标;多日平均相对湿度对云南松(阴坡)、侧柏林活可燃物含水率的影响分别弱于单日相对湿度 H_6 和 H_2 ;对于云南松(阴坡)、云南松(阳坡)和华山松均发现了影响达到峰值的多日平均相对湿度,分别为 $H_2、H_8$ 和 H_6 ,而侧柏林则与当日相对湿度 H 相关性最强。对于多日平均风速,

云南松(阳坡)活可燃物仍然未发现显著相关的指标;云南松(阴坡)、华山松活可燃物分别未发现对含水率影响显著性高于单日风速 W_7 和 W_8 的指标;对云南松(阴坡)、云南松(阳坡)、华山松和侧柏的死可燃物,以及侧柏活可燃物含水率影响最显著的分别是 $W_8、W_2、W_4、W_8$ 和 W_{10} 。从降水量的角度看,无论是单日还是多日平均降水量均未发现对所研究林型森林活可燃物含水率影响显著的指标,充分

反映了这些林型的含水率特征对短时间、小幅度的降水变化具有较强的自适应性;与单日降水量相似,多日平均降水量对云南松(阴坡)、云南松(阳坡)、华山松、侧柏4种林型的森林死可燃物含水率影响均比较显著,其中最为显著的分别为 P_2 、 P_{10} 、 P_9 和 P_3 。此外,连续干旱天数与各林型的森林死可燃物含水率均呈现了显著相关性($p < 0.01$),而对活可燃物含水率均无显著影响。

上述显著性最强的指标将作为关键气象指标引入各林型森林可燃物含水率预测模型的构建,具体总结如表1所示。其中,云南松(阳坡)的活可燃物含水率未发现具有显著影响的关键气象指标,其他几种林型影响活可燃物含水率的指标类型也不一致;而对于死可燃物,含水率预测的关键气象指标虽然也不一致,但类型基本为多日平均的相对湿度、风速、降水量和连续干旱天数。

表1 不同林型森林可燃物含水率预测的关键气象指标

编号	林型	可燃物类型	因变量预测指标	自变量关键气象指标
1	云南松(阴坡)	活可燃物	C_{1-l}	H_6, W_7
		死可燃物	C_{1-d}	H_2, W_8, P_2, D
2	云南松(阳坡)	活可燃物	C_{2-l}	—
		死可燃物	C_{2-d}	H_8, W_2, P_{10}, D
3	华山松	活可燃物	C_{3-l}	T_{-3}, W_{-8}
		死可燃物	C_{3-d}	H_6, W_4, P_9, D
4	侧柏林	活可燃物	C_{4-l}	T_2, H_2, W_{10}
		死可燃物	C_{4-d}	H, W_8, P_3, D

2.2 森林可燃物含水率多元回归模型及其预测效果

基于上述确定的关键气象因子,利用监测时段内的前71组数据,采用多元线性回归法构建不同

林型的森林可燃物含水率预测模型;利用剩余20组数据分析所构建模型的预测效果。模型构建结果如表2所示。

表2 不同林型森林可燃物含水率预测的多元回归模型

编号	林型	可燃物类型	预测模型
1	云南松(阴坡)	活可燃物	$C_{1-l} = 0.001H_6 - 0.012W_7 + 1.235$
		死可燃物	$C_{1-d} = 0.001H_2 - 0.006W_8 + 0.017P_2 + 0.003D + 0.130$
2	云南松(阳坡)	活可燃物	—
		死可燃物	$C_{2-d} = 0.004H_8 - 0.018W_2 + 0.006P_{10} + 0.002D + 0.016$
3	华山松	活可燃物	$C_{3-l} = 0.012T_{-3} - 0.026W_{-8} + 1.174$
		死可燃物	$C_{3-d} = 0.001H_6 - 0.013W_4 + 0.022P_9 - 0.007D + 0.230$
4	侧柏林	活可燃物	$C_{4-l} = -0.002T_2 + 0.0004H_2 - 0.037W_{10} + 1.336$
		死可燃物	$C_{4-d} = 0.002H - 0.022W_8 + 0.007P_3 + 0.0005D + 0.124$

以表2中的多元回归预测模型为基础,分别代入相应的气象因子数据,计算得到各林型活、死可燃物含水率的时间序列预测值并与实测值进行对比,结果如图3所示。结果显示,对于各林型活可燃物含水率,除云南松(阳坡)未得到预测指标外,其他几种林型尽管预测指标较少,但模拟预测结果

较好,建模期和预测期平均相对误差范围分别为6.90%~9.30%和5.90%~6.60%;对于死可燃物的含水率,各林型的模拟预测值与实测值偏差相对较大,建模期和预测期的平均相对误差范围分别为38.2%~67.6%和20.1%~36.9%,但总体上均优于前人研究所得模型的预测结果^[15]。

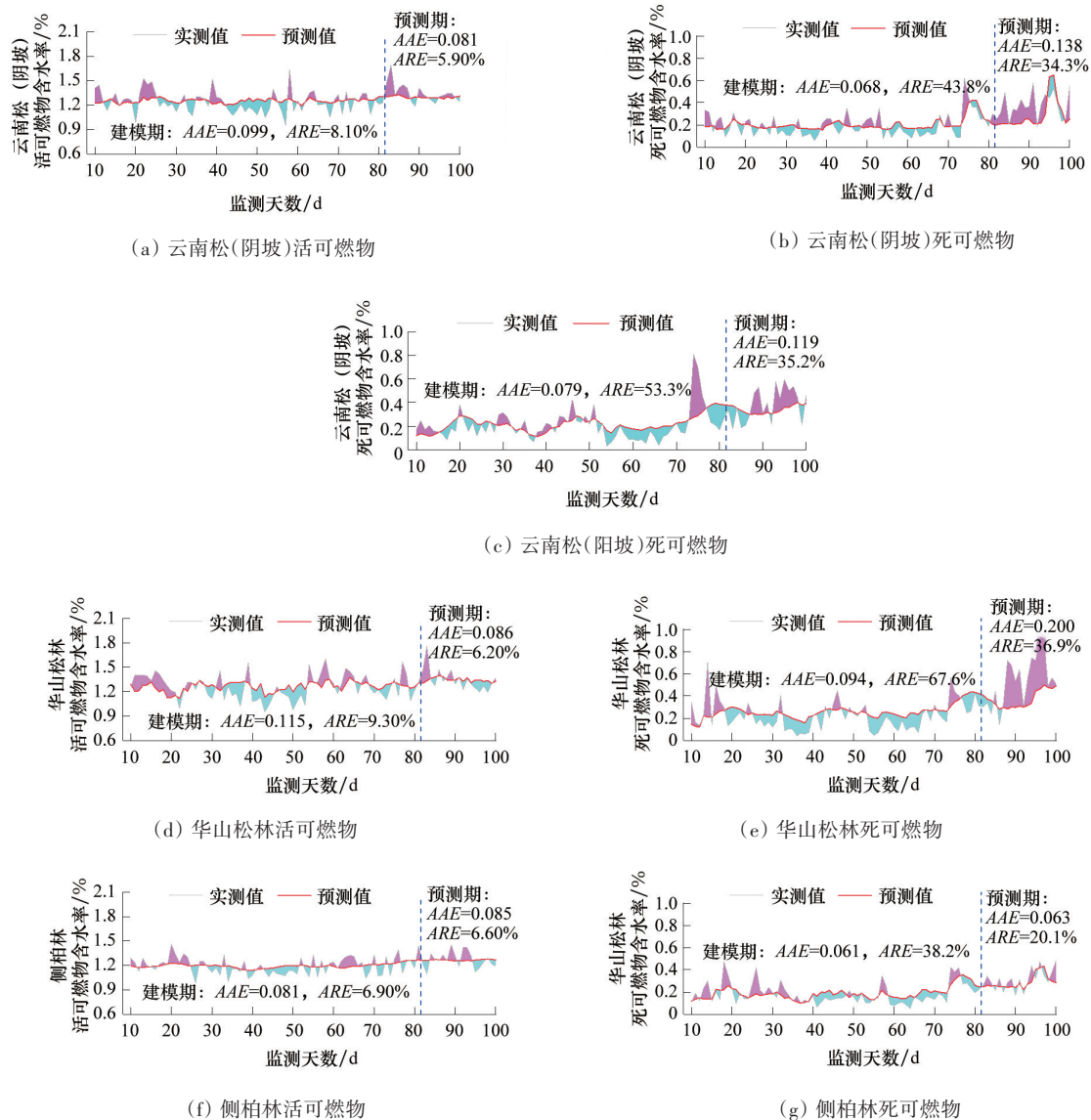


图3 不同林型森林可燃物含水率多元回归模型预测与实测值比较

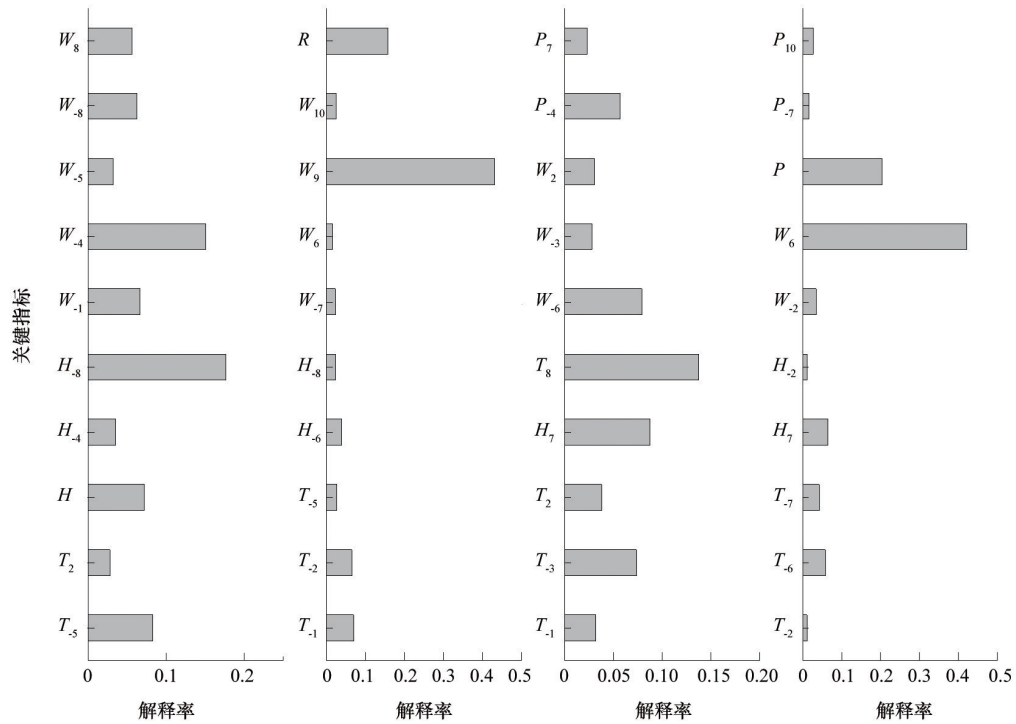
3 基于气象因子的森林可燃物含水率CART预测模型

3.1 气象因子对森林可燃物含水率的影响和贡献率

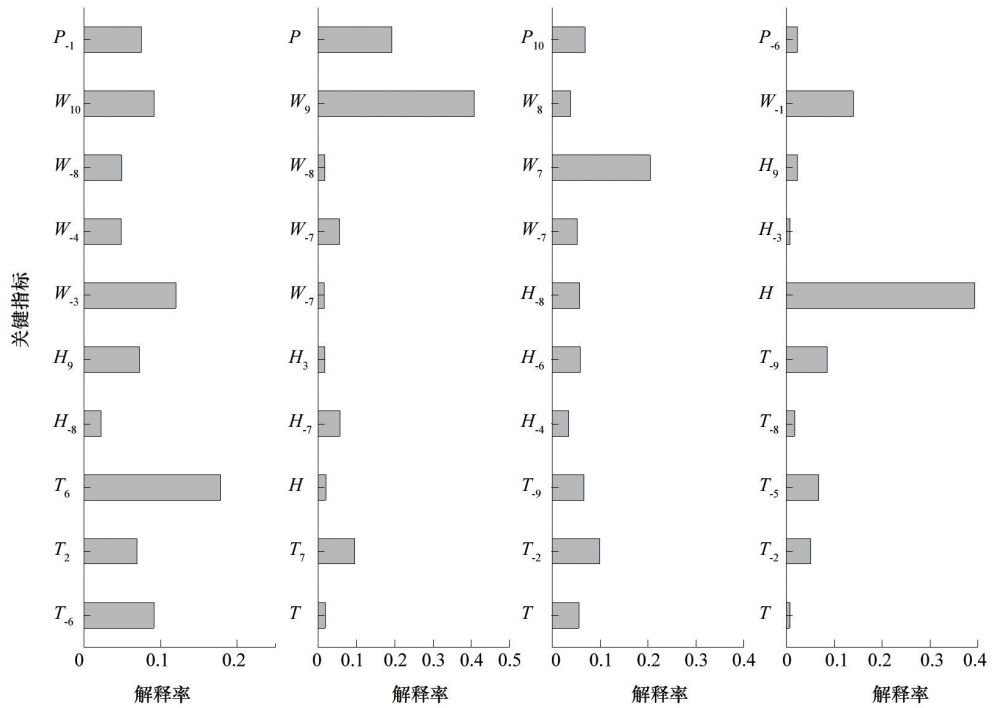
为更好预测不同林型活、死可燃物含水率,基于各气象因子与含水率数据建立了CART模型,并通过分析得到了各气象因子对森林可燃物含水率的影响和贡献率(图4)。结果表明,气象因子对各林型森林活、死可燃物含水率的总体解释率除云南

松(阳坡)活可燃物仅为67.69%外,其余均达到了80%以上(图4)。这与多元回归分析中,云南松(阳坡)活可燃物含水率难以找到有效的预测指标,而其余林型的森林可燃物含水率均可以有效建立模型有一定相通之处。

如图4所示,对于云南松(阴坡), H_8 、 W_4 是影响其活可燃物含水率的主要因子,贡献率分别为17.64%和15.09%; W_9 对其死可燃物含水率影响的贡献率则高达43.13%。云南松(阳坡)活可燃物含水率影响较大的气象因子分别为 T_8 、 T_7 、 H_6 、 T_3 、



(a) 云南松(阴坡) 活可燃物 (b) 云南松(阴坡) 死可燃物 (c) 云南松(阳坡) 活可燃物 (d) 云南松(阳坡) 死可燃物



(e) 华山松林活可燃物 (f) 华山松林死可燃物 (g) 侧柏林活可燃物 (h) 侧柏林死可燃物

图4 不同林型森林可燃物含水率CART模型关键指标及其解释率

P_{-4} ,其死可燃物含水率影响最大的 W_6 和 P 贡献率分别高达42.17%和20.39%。影响华山松林活、死可燃物含水率主要气象因子分别为 T_6 、 W_{-3} 、 W_{10} 、 T_{-6} 和 W_9 、 P 和 T_7 ,这些因子的累积贡献率分别达到48.03%和69.62%。侧柏林活可燃物含水率受 W_7 、 T_{-2} 和 P_{10} 影响最大,而 H 、 W_{-1} 和 T_{-9} 对其死可燃物含水率的贡献率分别达到39.30%、13.94%和8.58%。与多元回归模型相比,CART模型通过学习方法更加充分地利用了气象因子的相关信息,并且得出了各气象因子对森林可燃物含水率的影响路径和贡

献率^[22]。

3.2 CART模型对森林可燃物含水率的预测精度

为进一步研究基于气象因子的CART模型在森林可燃物含水率预测中的适用性及其效果,选取样本空间中的71组数据对模型进行训练,然后利用剩余20组数据验证模型并进行预测效果分析。模型训练和验证所需数据每次都是在所有样本中随机抽取,每个模型重复运行次数为 $M=200$,然后计算相对平均误差ARE进行模型验证和预测效果分析(图5、表3)。

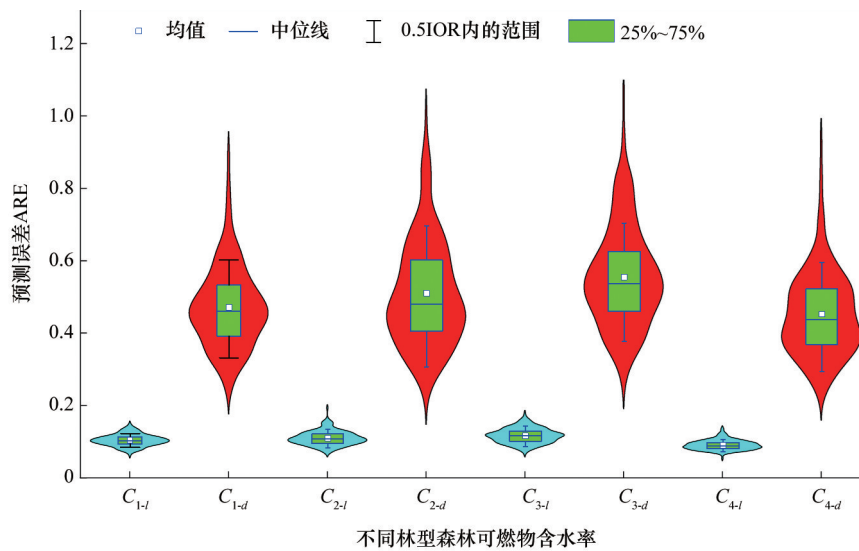


图5 不同林型森林可燃物含水率的CART模型预测效果

表3 不同林型森林可燃物含水率CART模型预测的平均相对误差

(单位:%)

指标	C_{1-l}	C_{1-d}	C_{2-l}	C_{2-d}	C_{3-l}	C_{3-d}	C_{4-l}	C_{4-d}
TARE	10.39	47.19	10.95	50.94	11.64	55.48	9.07	45.23
标准差	1.60	11.33	1.94	14.65	2.02	13.91	1.34	11.66
最优ARE	6.21	24.75	7.00	23.74	6.77	26.64	5.38	22.88

结果表明,CART模型对云南松(阴坡)、云南松(阳坡)、华山松、侧柏4种林型的活可燃物含水率预测的平均相对误差最优值分别为6.21%、7.00%、6.77%和5.38%,预测精度较高,这与多元回归模型的预测结果较为一致,但CART模型实现了对云南松(阳坡)活可燃物含水率的预测。CART模型对以上4种林型死可燃物含水率预测的平均相对误差最优值分别为24.75%、23.74%、26.64%和

22.88%,预测精度相对较低但多数优于多元回归模型。因此,CART模型在基于气象因子的森林可燃物含水率预测中适用,可以达到或优于传统多元回归模型的精度,同时可以解决部分传统方法难以确定关键指标的问题。总之,由于森林可燃物含水率数据获取困难、精度低以及气象因子的影响机制不明确等问题,不同林型森林可燃物含水率的监测、分析和预测仍需开展更加深入的研究。

3.3 森林可燃物含水率预测模型应用展望

森林火险是用来表示对林火环境的固定和可变因素做出估价的通用术语,这些环境因素决定了林火引燃难易程度、蔓延速度、控制难度和产生的影响,对影响火险的单个和组合的因素,做出系统的估计和综合评估。森林火险气象等级是在主要考虑天气和气象要素的变化对森林可燃物易燃性的影响程度,可燃物的易燃性与可燃物含水率有密切的关系。目前森林草原火险服务中应用的火险预报模型,主要考虑天气和气象要素的变化,可燃物要素相关信息主要是根据卫星遥感反演植被情况获取,不能反映未来可燃物含水率的变化,影响火险预报的准确性。由于森林可燃物含水率预测受气象条件、植被结构等多种因素影响,准确预测难度较大,但基于气象因子的森林可燃物含水率 CART 预测模型的技术路线十分清晰,在火险预报模型中将有很好的适用性。引入可燃物含水量的森林草原火险预报模型充分考虑中国不同区域不同林种活可燃物、死可燃物含水率变化,将会很好地预测林火发生、火行为等火险综合指标,为森林火灾防控工作提供全面的指标参考和工作指导。

气象要素的变化直接影响可燃物湿度变化和森林火灾发生的可能性,因此,火险天气的监测和预报是火险等级的重要支撑。随着地面气象站、气象雷达、卫星的发展和运用,中国已建立了地基、空基、天基相结合,种类齐全、布局合理的气象观测体系。同时,近年来中国数值天气预报水平发展迅猛,可以实现短、中、长期气象预报和气候预测,预报空间分辨率和准确性也在不断提高,有利于基于气象因子的森林可燃物含水率 CART 预测模型的进一步扩展应用,提升火险预报的精准性。

4 结论

1) 除云南松(阳坡)活可燃物以外,通过相关性分析确定了影响云南松(阴坡)、云南松(阳坡)、华山松和侧柏林活、死可燃物含水率的关键气象因子,并分别建立了森林可燃物含水率的多元回归预测模型,活、死可燃物含水率预测的平均相对误差

分别介于 5.90%~6.60% 和 20.1%~36.9%。

2) 基于 CART 方法,得到了气象因子对 4 种不同林型活、死可燃物含水率的影响及其贡献率,基于气象因子的 CART 模型对森林活可燃物含水率预测的最优平均相对误差(5.38%~7.00%)明显低于死可燃物(22.88%~26.64%),与多元回归模型一致且精度普遍更高,同时还解决了多元回归模型无法预测云南松(阳坡)活可燃物含水率的问题。

3) 由于森林可燃物含水率数据获取困难、精度低,以及气象因子的影响机制不明确等问题,不同林型森林可燃物含水率的监测、分析和预测仍需结合森林火灾风险普查、精细化气象实况和预报资料开展更加深入的研究。

参考文献(References)

- [1] 赵荣钦, 黄贤金, 郟文聚, 等. 碳达峰碳中和目标下自然资源管理领域的关键问题[J]. 自然资源学报, 2022, 37(5): 1123-1136.
- [2] Pan Y, Birdsey R A, Phillips O L, et al. The structure, distribution, and biomass of the world's forests[J]. Annual Review of Ecology, Evolution, and Systematics, 2013, 44: 593-622.
- [3] Ahlström A, Schurgers G, Arneeth A, et al. Robustness and uncertainty in terrestrial ecosystem carbon response to CMIP5 climate change projections[J]. Environmental Research Letters, 2012, 7(4): 044008.
- [4] 胡海清, 陆昕, 孙龙, 等. 大兴安岭典型林分地表死可燃物含水率动态变化及预测模型[J]. 应用生态学报, 2016, 27(7): 2212-2224.
- [5] 芮淑君. 北京市妙峰山林场可燃物含水率的影响因子及预测模型研究[D]. 北京: 北京林业大学, 2017.
- [6] 王生营. 基于计算机视觉的森林火灾检测算法研究[D]. 银川: 北方民族大学, 2021.
- [7] 于宏洲, 舒立福, 邓继峰, 等. 以小时为步长的大兴安岭典型林分地表死可燃物含水率模型预测及外推精度[J]. 应用生态学报, 2018, 29(12): 3959-3968.
- [8] 张云林. 蒙古栎和红松凋落物含水率动态变化影响因素及预测模型研究[D]. 哈尔滨: 东北林业大学, 2019.
- [9] Masinda M M, Sun L, Wang G, et al. Moisture content thresholds for ignition and rate of fire spread for various dead fuels in northeast forest ecosystems of China[J]. Journal of Forestry Research, 2021, 32: 1147-1155.

- [10] 邵潇. 北京西山主要森林类型地表枯死可燃物含水率预测模型研究[D]. 北京: 北京林业大学, 2015.
- [11] 常畅, 常禹, 胡远满, 等. 基于文献计量的森林和草原可燃物含水率研究[J]. 生态学报, 2022, 42(4): 1655-1663.
- [12] Yang X, Yu Y, Hu H, et al. Moisture content estimation of forest litter based on remote sensing data[J]. *Environmental Monitoring Assessment*, 2018(190): 421.
- [13] Chuvieco E, Cocer D, Riaño D, et al. Combining NDVI and surface temperature for the estimation of live fuel moisture content in forest fire danger rating[J]. *Remote Sensing of Environment*, 2004, 92(3): 322-331.
- [14] 刘曦, 金森. 平衡含水率法预测死可燃物含水率的研究进展[J]. 林业科学, 2007, 47(12): 126-133.
- [15] Toomey M, Vierling L A. Multispectral remote sensing of landscape level foliar moisture[J]. *Techniques and Applications For Forest Ecosystem Monitoring Canadian Journal of Forest Research*, 2005, 35(5): 1087-1097.
- [16] Nelson R M. A Method for predicting equilibrium moisture content of forest fuels[J]. *Canadian Journal of Forest Research*[J], 1984, 14: 597-600.
- [17] 金森, 姜文娟, 孙玉英, 等. 用时滞和平衡含水率准确预测可燃物含水率的理论算法[J]. 森林防火, 1999(4): 12-14.
- [18] Catchpole E A, Catchpole W R, Viney N R. Estimating fuel response time and predicting fuel moisture content from field data[J]. *International Journal of Wildland Fire*, 2001, 10(2): 115-222.
- [19] 邢俊景, 曲智林. 基于混合效应模型的大兴安岭地被可燃物含水率模型[J]. 东北林业大学学报, 2017, 45(3): 58-62.
- [20] 刘金波. 昆明地区几种林型可燃物含水率预测模型的研究[D]. 哈尔滨: 东北林业大学, 2017.
- [21] Quan X, He B, Yebra M, et al. Retrieval of forest fuel moisture content using a coupled radiative transfer model[J]. *Environmental Modelling & Software*, 2017, 95: 290-302.
- [22] 贾俊平, 何晓群, 金勇进. 统计学(第五版)[M]. 北京: 中国人民大学出版社, 2012.
- [23] De'ath G, Fabricius K E. Classification and regression trees: A powerful yet simple technique for ecological data analysis[J]. *Ecology*, 2000, 81(11): 3178-3192.
- [24] 闫一凡, 刘建立, 李晓鹏, 等. 基于聚类和分类与回归树的地力等级评价研究[J]. 土壤, 2014, 46(4): 656-661.
- [25] Belart F, Leshchinsky B, Sessions J. Finite element analysis to predict in-forest stored harvest residue moisture content[J]. *Forest Science*, 2017, 63(4): 362-376.
- [26] Chae H M, Jeon B R, Lee S Y, et al. Effects of weather factors on fuel moisture contents of forestland in chuncheon, south korea[J]. *Journal of the Faculty of Agriculture, Kyushu University*, 2017, 62(1): 23-29.

Research on the prediction models of forest fuel moisture content based on meteorological factors

YUAN Xiaoyu¹, YANG Xiaodan^{1*}, WANG Zhongyu²

1. Public Weather Service Center, China Meteorological Administration, Beijing 100081, China

2. Department of Mathematical and Physical, North China Electric Power University, Beijing 102206, China

Abstract The prediction of forest fuel moisture content is of great significance to the forecast of forest fire risk and the protection of forest ecosystem. Based on the systematic analyses of the key meteorological factors affecting the forest fuel moisture content, the prediction models of the live and dead fuels moisture content of four different forest types, namely, *Pinus yunnanensis* (shady slope), *Pinus yunnanensis* (sunny slope), *Pinus armandii* and *Platycladus orientalis*, were established utilizing the methods of multiple regression, classification and regression tree (CART), etc. The results showed that the average relative errors of the multiple regression model in predicting the live and dead fuels moisture content in different forest types were between 5.90%~6.60% and 20.1%~36.9%, respectively. CART model was found applicable for the prediction of forest fuel moisture content based on meteorological factors. The optimal average relative errors of the prediction of live fuels moisture content (5.38%~7.00%) were significantly lower than that of dead fuels (22.88%~26.64%), which was consistent with the multiple regression model and generally had higher accuracies. Besides, the problem that the live fuel moisture content of *Pinus yunnanensis* (sunny slope) cannot be predicted was also solved. The research results are expected to provide some theoretical supports for the establishment and accuracy improvement of further prediction model of forest fuel moisture content and even the forecast model of forest fire risk.

Keywords meteorological factors; forest fuel; moisture content prediction; multiple regression model; classification and regression tree ●



(责任编辑 傅雪)