

无人机多光谱遥感中植被指数与森林地表可燃物载量关系研究^{*}

周宇飞 王振师 钟映霞 李 强
魏书精 吴泽鹏 戴瑞坤 李小川

(广东省林业科学研究院 / 广东省森林培育与保护利用重点实验室, 广东 广州 510520)

摘要 森林可燃物载量调查专业性强, 工作量大。无人机多光谱遥感可获取较大范围森林影像, 为计算森林地表可燃物载量提供新的思路。试验区建立在广东省佛山市高明区, 测得试验区平均地表可燃物载量高达每公顷 39.33 t, 且湿地松林 *Pinus elliottii* 地表可燃物载量最高。研究发现 NDVI 及 EVI 两种植被指数与森林地表可燃物载量之间存在中等强度的相关性, 并建立了 NDVI (X) 与森林地表可燃物载量 (Y) 的回归模型: $Y = -5.9354X + 8.4663$, 以及 EVI (X) 与森林地表可燃物载量 (Y) 的回归模型: $Y = -5.8485X + 6.7271$ 。研究还发现 NDVI 与地表可燃物载量的线性关系更为显著。

关键词 无人机; 多光谱遥感; 植被指数; 可燃物载量

中图分类号: S758.4 文献标志码: A 文章编号: 2096-2053 (2022) 02-0134-07

Research on the Relationship between Vegetation Index and Forest Surface Fuel Load in UAV Multi-spectral Remote Sensing

ZHOU Yufei WANG Zhenshi ZHONG Yingxia LI Qiang
WEI Shujing WU Zepeng DAI Ruikun LI Xiaochuan

(Guangdong Academy of Forestry/Guangdong Provincial Key Laboratory of Silviculture, Protection and Utilization, Guangzhou, Guangdong, 510520, China)

Abstract The survey of forest combustible load is highly professional and requires lots of work. UAV multi-spectral remote sensing can obtain large-scale forest images, offering a new thinking for calculating the fuel load of forest surfaces. The test area was established in Gaoming district, Foshan city, Guangdong province. The average surface fuel load in the test area was measured up to 39.33 tons per hectare, and the slash pine forest surface fuel load was measured as the highest one. The study found that there was a moderate correlation between vegetation indices of NDVI & EVI and the fuel load of the forest surface. The regression model of NDVI (X) and the forest surface fuel load (Y) was established: $Y = -5.9354X + 8.4663$, and the regression model of EVI (X) and the forest surface fuel load (Y): $Y = -5.8485X + 6.7271$. The study also found that the linear relationship between NDVI and the surface fuel load was more apparent.

Key words UAV; multispectral remote sensing; vegetation index; fuel load

^{*} 基金项目: 广东省林业科技创新专项项目 (2018KJCX003、2019KJCX011)。

第一作者: 周宇飞 (1980—), 男, 高级工程师, 主要从事森林防火和林业信息化研究, E-mail: ttzyftt@163.com。

森林可燃物是森林火灾发生的物质基础^[1-2]。在分析森林是否可以被引燃，以及研究森林火灾如何蔓延等林火行为的时候，可燃物是一项至关重要的因子^[3-4]。可燃物载量的大小直接影响林火燃烧强度、火焰高度以及蔓延速度等林火行为^[4-5]。然而，森林可燃物载量调查具备较强的专业性，并易受地理环境影响，野外采集工作量大，且当森林火灾发生后很难实现调查工作。

卫片、航片等多光谱遥感数据可以获取较大范围森林影像，为减少野外调查工作提供可能^[6]。随着遥感技术理论的不断提高，遥感数据愈加精准和清晰，利用无人机搭载多光谱扫描仪对森林可燃物进行调查成为新的方法和趋势^[7-8]。当前利用无人机多光谱遥感研究主要集中在可燃物分类^[9-10]，对可燃物载量的研究相对较少。无人机机载激光雷达虽可获取地表可燃物的结构数据^[11-12]，但其建模运算较为复杂，且立体点云很难如多光谱遥感一样具体到每一个栅格都有数据。本文研究无人机多光谱遥感中植被指数与森林地表可燃物载量之间的潜在关系，以建立植被指数与森林地表可燃物载量之间的模型。

1 材料与方法

1.1 试验区概况

试验区位于广东省佛山市高明区荷城镇坑边村，地处北纬 22°57'23" 至 22°57'45"，东经 112°46'45" 至 112°47'10" 之间，面积约 40 hm²。该试验区距离 2019 年 12 月 5 日佛山市高明区凌云山重大森林火灾火烧迹地不到 500 m，属南亚热带季风气候区，主要植被包括马尾松 *Pinus massoniana*、湿地松 *Pinus elliottii*、桉树 *Eucalyptus* spp. 樟树 *Cinnamomum camphora*、木荷 *Schima superba*、格木 *Erythrophleum fordii*、黧蒴栲 *Castanopsis fissa*、红锥 *Castanopsis hystrix*、榕树 *Ficus microcarpa*、潺槁树 *Litsea glutinosa*、各种杂灌木和竹子，基本涵盖佛山高明“12.5”重大森林火灾中的主要植被类型。

1.2 样方设置及地表可燃物载量采集

可燃物载量以烘干可燃物载量为准。为了验证植被指数与实际地表可燃物载量之间的关系，采用网格采样法和随机采样法结合，在试验区内设置 1 m × 1 m 的样方 50 个，其中按照 100 m 网



图 1 试验区及样方分布

Fig.1 Distribution map of test area and sample plots

格设置样地 36 个,按不同林分类型设置随机样地 14 个。将 50 个样方内所有可燃物按照活可燃物及死可燃物分别采集装袋,烘干后量测其烘干可燃物载量,以建立各林分的地表可燃物载量模型。试验区及样方分布如图 1。

1.3 无人机多光谱数据采集及植被指数获取

使用经纬 M300 旋翼无人机搭载多光谱及高清镜头,采用正射投影方式对试验区影像数据进行采集。采集得到的多光谱数据经过辐射定标、反射校正和几何校正后,利用 SpectrononPro 软件进行拼接,最后使用 ENVI 软件获取试验区的归一化植被指数 NDVI (图 2) 和增强植被指数 EVI (图 3)。

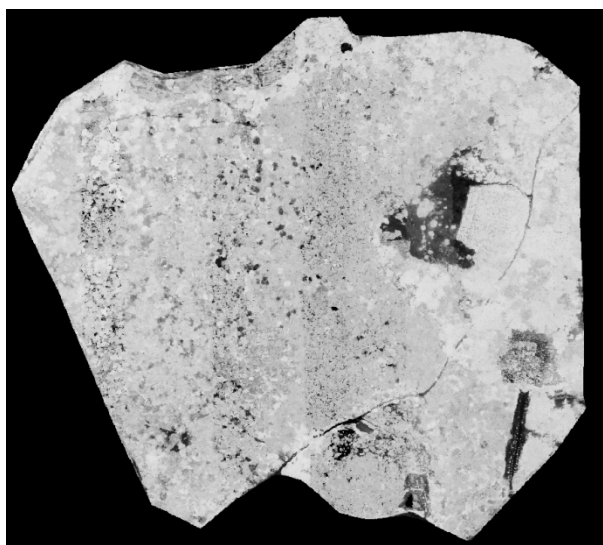


图 2 试验区归一化植被指数 NDVI
Fig.2 NDVI of the experimental area

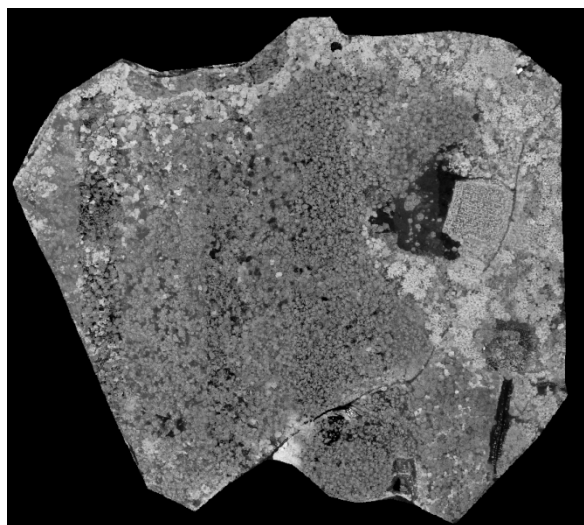


图 3 试验区增强植被指数 EVI
Fig.3 EVI of the experimental area

2 结果与分析

2.1 测试结果

将 50 个样方按照植被类型分成湿地松林、马尾松林、灌草地、阔叶林和竹林 5 种类型,各样方位置、类型、植被指数和载量基本情况见表 1。正射影像与样方实测坐标经过 RTK 校正后的精度在 10 cm 以内,足以满足精校正的要求。

以 X 轴表示植被指数, Y 轴表示地表可燃物载量, NDVI 与地表可燃物载量、EVI 与地表可燃物载量的离散图如图 4 所示。

2.2 地表可燃物载量分析

对地表可燃物载量的统计分析见表 2。50 个样地烘干可燃物载量在 1.085~7.893 kg 之间,平均载量 3.933 kg,从各类型地表可燃物载量来看,湿地松林内地表可燃物载量最高,马尾松、灌草地其次,阔叶林和竹林地表可燃物载量较少。

对各类型地表可燃物载量与其它类型进行差异显著性检验,主要利用 T 检验,计算 P 值。其检验结果如表 3 所示。一般情况下, T 检验的 P 值可以表示有无显著差异。在统计学中,当 P 值小于 0.05 说明差异显著, P 值小于 0.01 说明差异极显著, P 值大于 0.05 说明差异不明显^[13]。

从表中可以看到,竹林与其它类型地表可燃物载量差异极显著,湿地松林和阔叶林与其它类型地表可燃物载量差异显著,马尾松林与灌草地的地表可燃物载量与其它类型差异不明显。这种差异不明显的原因可能是马尾松林与灌草地内地表植被种类更为丰富,不同样地由于地表植被种类差异较大而导致载量波动较大引起的。

2.3 植被指数与地表可燃物载量关系分析

皮尔逊相关系数 r (以下简称 r) 在统计学中通常用来度量两组数据之间的线性相关程度^[14]。本文中,采用 r 分别度量植被指数与各类型地表可燃物载量之间的线性相关程度,其 r 值见表 4。

一般情况下, r 的绝对值在 0 至 0.09 之间表示两组数据无相关性,在 0.1~0.3 之间表示两组数据之间有弱相关性,在 0.3~0.5 之间表示两组数据中等相关,在 0.5~1 之间表示两组数据强相关^[15]。由表中可见, NDVI 和 EVI 与地表可燃物载量存在中等相关性; NDVI 与灌草地、阔叶林和竹林的地表可燃物载量强相关; EVI 与阔叶林和竹林的地表可燃物载量强相关; NDVI 与马尾松林的地表

表 1 各样方基本情况
Tab.1 Basic situation of each sample

类型 Type	东经 Longitude	北纬 Latitude	NDVI	EVI	活可燃物干质量 /kg Dry weight of live fuel	死可燃物干质量 /kg Dry weight of dead fuel	载量 /kg Lord
湿地松林	112°47'0.98"	22°57'25.07"	0.748	0.297	1.225	4.711	5.936
湿地松林	112°46'57.46"	22°57'34.82"	0.716	0.502	0.879	3.546	4.425
湿地松林	112°47'0.98"	22°57'34.82"	0.788	0.532	1.071	5.339	6.410
湿地松林	112°46'50.44"	22°57'38.06"	0.770	0.264	1.036	4.482	5.518
湿地松林	112°47'0.98"	22°57'38.06"	0.734	0.547	0.991	2.976	3.967
湿地松林	112°46'57.46"	22°57'41.31"	0.783	0.366	1.069	1.483	2.552
湿地松林	112°47'0.98"	22°57'41.31"	0.767	0.522	1.291	2.875	4.166
湿地松林	112°47'4.50"	22°57'41.31"	0.782	0.409	1.098	3.115	4.213
湿地松林	112°46'59.26"	22°57'29.85"	0.697	0.275	1.111	5.100	6.211
湿地松林	112°46'57.42"	22°57'36.34"	0.645	0.478	0.714	3.430	4.144
湿地松林	112°46'59.52"	22°57'37.08"	0.757	0.416	0.795	6.778	7.573
马尾松林	112°46'53.95"	22°57'28.32"	0.757	0.515	0.686	7.207	7.893
马尾松林	112°46'57.46"	22°57'28.32"	0.747	0.399	1.050	4.159	5.209
马尾松林	112°47'0.98"	22°57'28.32"	0.825	0.566	0.665	0.923	1.588
马尾松林	112°47'4.50"	22°57'28.32"	0.822	0.492	0.902	1.206	2.108
马尾松林	112°47'4.50"	22°57'28.32"	0.837	0.591	1.054	3.605	4.659
马尾松林	112°46'53.95"	22°57'31.56"	0.569	0.268	1.103	4.163	5.266
马尾松林	112°46'46.92"	22°57'34.82"	0.835	0.537	0.499	1.635	2.134
马尾松林	112°46'50.44"	22°57'34.82"	0.745	0.409	0.757	3.094	3.851
马尾松林	112°46'53.95"	22°57'34.82"	0.824	0.56	1.868	5.832	7.700
马尾松林	112°46'53.95"	22°57'38.06"	0.828	0.569	0.850	4.961	5.811
马尾松林	112°46'57.46"	22°57'38.06"	0.747	0.393	1.040	5.066	6.106
马尾松林	112°46'50.44"	22°57'41.31"	0.791	0.447	0.534	1.822	2.356
马尾松林	112°46'57.46"	22°57'44.56"	0.822	0.482	0.997	0.891	1.888
马尾松林	112°46'51.23"	22°57'29.47"	0.772	0.357	1.155	4.253	5.408
马尾松林	112°46'47.48"	22°57'33.55"	0.812	0.422	1.283	2.384	3.667
灌草地	112°46'53.95"	22°57'25.07"	0.827	0.601	1.566	2.526	4.092
灌草地	112°46'50.44"	22°57'28.32"	0.611	0.330	1.715	2.174	3.889
灌草地	112°47'0.98"	22°57'31.56"	0.774	0.423	0.815	4.123	4.938
灌草地	112°47'4.50"	22°57'38.06"	0.453	0.293	0.876	1.345	2.221
灌草地	112°46'53.95"	22°57'41.31"	0.707	0.410	1.517	3.111	4.628
灌草地	122°46'52.20"	22°57'25.32"	0.801	0.403	1.161	4.115	5.276
灌草地	112°46'52.09"	22°57'26.56"	0.727	0.530	0.820	3.855	4.675
灌草地	112°46'51.95"	22°57'28.54"	0.756	0.512	2.078	1.118	3.196
灌草地	112°46'49.15"	22°57'30.74"	0.695	0.416	1.565	2.969	4.534

类型 Type	东经 Longitude	北纬 Latitude	NDVI	EVI	活可燃物干质量 /kg Dry weight of live fuel	死可燃物干质量 /kg Dry weight of dead fuel	载量 /kg Lord
阔叶林	112°47'4.50"	22°57'25.07"	0.812	0.517	1.576	0.561	2.137
阔叶林	112°47'8.00"	22°57'28.32"	0.823	0.5	0.494	5.070	5.564
阔叶林	112°46'57.46"	22°57'31.56"	0.822	0.425	0.821	0.839	1.660
阔叶林	112°47'8.00"	22°57'31.56"	0.801	0.475	0.560	0.525	1.085
阔叶林	112°47'8.00"	22°57'34.82"	0.77	0.533	1.416	0.330	1.746
阔叶林	112°46'46.92"	22°57'38.06"	0.912	0.872	0.898	1.035	1.933
阔叶林	112°46'54.35"	22°57'30.08"	0.42	0.113	1.499	5.027	6.526
阔叶林	112°47'05.94"	22°57'36.06"	0.846	0.708	0.616	0.517	1.133
阔叶林	112°47'6.03"	22°57'42.34"	0.855	0.718	1.335	0.601	1.936
竹林	112°47'4.50"	22°57'31.56"	0.703	0.555	1.469	1.333	2.802
竹林	112°47'4.50"	22°57'34.82"	0.805	0.484	0.954	1.631	2.585
竹林	112°47'8.00"	22°57'38.06"	0.822	0.597	0.867	1.190	2.057
竹林	112°47'8.00"	22°57'41.31"	0.88	0.75	0.953	1.382	2.335
竹林	112°47'3.36"	22°57'31.49"	0.87	0.677	0.544	1.291	1.835
竹林	112°47'5.13"	22°57'41.26"	0.778	0.432	1.764	1.334	3.098

表 2 地表可燃物载量统计分析
Tab.2 Statistical Analysis of surface fuel load

类型 Type	样地数 Plot number	求和 Sum	最大值 Max	最小值 Min	平均值 Avarage	方差 Variance
湿地松林 Elliot pine forest	11	55.115	7.573	2.552	5.010	1.437
马尾松林 Masson Pine Forest	15	65.644	7.893	1.588	4.376	2.072
灌草地 Shrubland	9	37.449	5.276	2.221	4.161	0.951
阔叶林 Broadleaf forest	9	23.720	6.526	1.085	2.636	1.980
竹林 Bamboo	6	14.712	3.098	1.835	2.452	0.471
全类型 All type	50	196.64	7.893	1.085	3.933	1.835

表 3 载量显著差异检验 (P 值)
Tab.3 Load significant difference test (P value)

类型 Type	湿地松林 Elliot pine forest	马尾松林 Masson Pine Forest	灌草地 Shrubland	阔叶林 Broadleaf forest	竹林 Bamboo
活可燃物干质量	0.485	0.164	0.061	0.713	0.909
死可燃物干质量	0.013	0.183	0.909	0.054	2.56E ⁻⁷
载量	0.016	0.309	0.536	0.049	2.29E ⁻⁵

可燃物载量中等相关。其余类型与植被指数之间的相关性较小。

对于具有中等强度和强相关性的两组数据，以 X 表示植被指数值， Y 表示地表可燃物载量，可采用线性函数进行拟合。

可以建立 NDVI 与地表可燃物载量的线性回归模型为：

$Y = -5.9354X + 8.4663 \dots\dots\dots (1)$

EVI 与地表可燃物载量的线性回归模型为：

$Y = -5.8485X + 6.7271 \dots\dots\dots (2)$

其余类型地表可燃物载量与植被指数的拟合函数见表 5。

3 结论与讨论

50 个样方平均载量 3.933 kg，即每公顷 39.33 t，超过发生重特大森林火灾每公顷 30 t 的临界值^[15]，说明该试验区地表可燃物载量很高。这其中，湿地松林内地表可燃物载量最高，阔叶林和竹林地表可燃物载量较少。竹林与其它类型地表可燃物载量差异极为显著，湿地松林和阔叶林与其它类型地表可燃物载量差异显著，马尾松和灌草地由于地表植被种群差异较大，与其它类型地表可燃物载量差异不明显。

NDVI 和 EVI 这两种植被指数均与地表可燃物载量存在着中等强度的相关性，说明可以在一

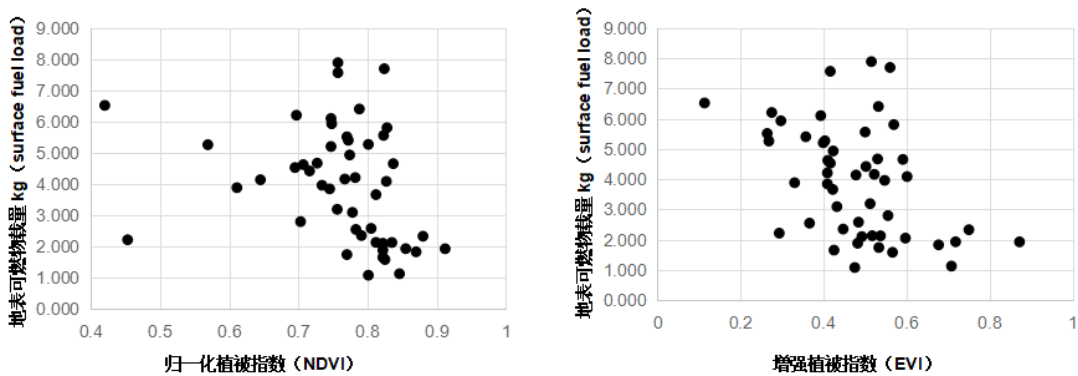


图 4 植被指数与地表可燃物载量离散图
Fig.4 Discrete map of VI and surface fuel load

表 4 植被指数与各类型地表可燃物载量的 r 值
Tab.4 R value between vegetation index and various types of surface fuel loads

类型 Type	湿地松林 elliot pine forest	马尾松林 Masson Pine Forest	灌草地 Shrubland	阔叶林 Broadleaf forest	竹林 Bamboo	全类型 All type
NDVI	0.036	-0.305	0.720	-0.710	-0.710	-0.303
EVI	-0.260	-0.089	0.274	-0.632	-0.729	-0.434

表 5 各植被类型地表可燃物载量与植被指数的拟合函数
Tab.5 Fitting function of surface fuel load and vegetation index for each vegetation type

植被指数 Vegetation index	类型 Type	载量 (Y) 与植被指数 (X) 拟合函数 Fitting function of load(X) and vegetation index(Y)	相关性 Correlation
NDVI	马尾松林	$Y = -9.2194X + 11.588$	中
NDVI	灌草地	$Y = 5.9968X - 0.0707$	强
NDVI	阔叶林	$Y = -9.8743X + 10.383$	强
NDVI	竹林	$Y = -5.1433X + 6.6164$	强
EVI	阔叶林	$Y = -5.7994X + 5.7679$	强
EVI	竹林	$Y = -2.8956X + 4.1387$	强

定程度上构建这两种植被指数对应地表可燃物载量的模型。本文列出了这两种植被指数与地表可燃物载量的模型,见式(1)和式(2)。NDVI与马尾松林、灌草地、阔叶林和竹林的地表可燃物载量均存在中等或强相关,而EVI仅与阔叶林和竹林的地表可燃物载量存在强相关,表明利用NDVI更能建立与地表可燃物载量的线性关系。

由于本文仅在同一地区采集相关数据,且只采集了50个样地的数据,有必要在更多不同地区采集更多样地的数据,以使结论更具有代表性和普适性。由于植被指数种类繁多,可以进一步用本文方法获取其它植被指数与地表可燃物载量之间的关系,或可找到一种对于计算地表可燃物载量更具普适性的植被指数。

参考文献

- [1] 胡海清, 罗斯生, 罗碧珍, 等. 森林可燃物含水率及其预测模型研究进展[J]. 世界林业研究, 2017, 30(3): 64-69.
- [2] 李炳怡, 舒立福, 丁永全, 等. 我国人工林森林可燃物特点及管理技术研究进展[J]. 世界林业研究, 2021, 34(1): 90-95.
- [3] 宗学政, 田晓瑞. 林火行为和扑救技术研究进展[J]. 世界林业研究, 2019, 32(6): 31-36.
- [4] 贺红士, 常禹, 胡远满, 等. 森林可燃物及其管理的研究进展与展望[J]. 植物生态学报, 2010, 34(6): 741-752.
- [5] 王秋华, 舒立福, 戴兴安, 等. 冰雪灾害对南方森林可燃物及火行为的影响[J]. 林业科学, 2008, 44(11): 171-176.
- [6] 王振师, 周宇飞, 李小川, 等. 无人机在森林防火中的应用分析[J]. 林业与环境科学, 2016, 32(1): 31-35.
- [7] 吴超, 徐伟恒, 黄邵东, 等. 林火监测中遥感应用的研究现状[J]. 西南林业大学学报(自然科学), 2020, 40(3): 172-179.
- [8] REILLY S, CLARK M L, BENTLEY L P, et al. The potential of multispectral imagery and 3D point clouds from unoccupied aerial systems (UAS) for monitoring forest structure and the impacts of wildfire in mediterranean-climate forests[J]. Remote Sensing, 2021, 13(19): 3810.
- [9] 李晓彤, 覃先林, 刘倩, 等. 基于AISA Eagle II机载高光谱数据的森林可燃物类型识别方法[J]. 遥感技术与应用, 2021, 36(3): 544-551, 570.
- [10] Fujimoto A, Haga C, Matsui T, et al. An end to end process development for UAV-SfM based forest monitoring: Individual tree detection, species classification and carbon dynamics simulation[J]. Forests, 2019, 10(8): 680.
- [11] HILLMAN S, WALLACE L, LUCIEER A, et al. A comparison of terrestrial and UAS sensors for measuring fuel hazard in a dry sclerophyll forest[J]. International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation, 2021, 95: 102261.
- [12] 周宇飞, 王振师, 钟映霞, 等. 基于无人机机载激光雷达的桉树蓄积量估测技术研究[J]. 林业与环境科学, 2021, 37(2): 7-11.
- [13] 王志武, 谢厚桂. 概率论与数理统计[M]. 北京: 中国林业出版社, 2010.
- [14] 黄奇晓. 福建省森林火灾对气候变化的响应及趋势预测[D]. 福州: 福建农林大学, 2020.
- [15] 陈希孺. 概率论与数理统计[M]. 合肥: 中国科学技术大学出版社, 2017.
- [16] 国家林业局全国森林防火规划(2016-2025年). [EB/OL]. http://www.gov.cn/xinwen/2016-12/29/content_5154054.htm, 2016-12-19/2022-03-20.