

2013~2021年新疆森林火灾的时空分布特征

王悦邨¹, 杨 和²

¹成都市新津区气象局, 四川 成都

²成都信息工程大学大气科学学院, 四川 成都

收稿日期: 2025年12月18日; 录用日期: 2026年1月15日; 发布日期: 2026年1月23日

摘 要

基于2013~2021年新疆森林火灾的官方报表数据, 利用相关分析, 回归分析等方法分析了新疆森林火灾的时空分布特征, 并探究了火灾频次与气候因子之间的关系。结果表明: 3~8月的火灾起数较高(占全年85.52%), 4月、3月和7月的火灾起数排全年前三; 3~5月(占全年67.15%)以及8~10月(占全年29.96%)的过火面积较大, 其中4月最大, 3月次之。春夏两季是森林火灾高发期, 2013年以来, 森林火灾起数和过火面积均呈下降趋势。北疆林区是森林火灾发生的主要区域。火灾频次主要受干旱指数($-1.8 \leq CIn \leq -0.6$), 轻旱到中旱, 干旱频率整体呈下降趋势, 且在2017年发生了显著的突变, 为“干旱-湿润”)和月最高温($r = 0.532, P < 0.05$)影响, 森林火灾主要是由人为因素引起的, 其中又以农事用火为主。该研究结果可以为新疆森林火灾的监测预警提供一定的数据支持, 即当低降水与极端高温(月最高温 $\geq 40^\circ\text{C}$)时段叠加时, 需要加强火灾高发区域的火源监测与管控。

关键词

森林火灾, 新疆, 时空分布, 气候因子, 干旱指数, 月最高温

The Spatiotemporal Distribution Characteristics of Forest Fires in Xinjiang from 2013 to 2021

Yueli Wang¹, He Yang²

¹Meteorological Bureau of Xinjin District, Chengdu City, Chengdu Sichuan

²School of Atmospheric Sciences, Chengdu University of Information Technology, Chengdu Sichuan

Received: December 18, 2025; accepted: January 15, 2026; published: January 23, 2026

Abstract

Based on the official report data of forest fires in Xinjiang from 2013 to 2021, this study analyzed

文章引用: 王悦邨, 杨和. 2013~2021 年新疆森林火灾的时空分布特征[J]. 气候变化研究快报, 2026, 15(1): 173-187.
DOI: 10.12677/ccrl.2026.151022

the spatiotemporal distribution characteristics of forest fires in Xinjiang using correlation analysis, regression analysis, and other methods, and explored the relationship between fire frequency and climate factors. The results showed that the number of fires from March to August was relatively high (accounting for 85.52% of the total), and the number of fires in April, March, and July ranked among the top three of the year; The burnt area is relatively large from March to May (accounting for 67.15% of the year) and from August to October (accounting for 29.96% of the year), with the largest in April and the second largest in March. Spring and summer are the peak seasons for forest fires, and since 2013, both the number of forest fires and the area burned have shown a downward trend. The forest areas in northern Xinjiang are the main areas where forest fires occur. The frequency of forest fires is mainly affected by the drought index ($-1.8 \leq CI_n \leq -0.6$, mild to moderate drought, with an overall decreasing trend in drought frequency and a significant mutation in 2017, known as “dry-wet”) and the highest monthly temperature ($r = 0.532$, $P < 0.05$). Forest fires are mainly caused by human factors, with agricultural fire being the main cause. The research results can provide certain data support for the monitoring and early warning of forest fires in Xinjiang, that is, when low precipitation and extreme high temperature (monthly maximum temperature $\geq 40^\circ\text{C}$) overlap, it is necessary to strengthen the monitoring and control of fire sources in high-risk areas.

Keywords

Forest Fires, Xinjiang, Spatiotemporal Distribution, Climate Factors, Drought Index, Monthly Maximum Temperature

Copyright © 2026 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

火灾严重破坏森林生态系统, 甚至危害人类生命财产安全, 是当今世界上发生面广、危害性大、处置救助困难的自然灾害之一。近年来, 全球气候的变暖化加剧了异常天气的出现, 全球各地森林火灾爆发[1] [2]。2021 年公布的第六次评估报告中(IPCC)提到, 全球气候变暖显著加剧了干旱、高温等极端天气, 直接导致森林可燃物干燥度增加, 火灾发生概率上升[3]。中国 2017 年春夏期间, 东北、华北地区遭遇了罕见的高温天气; 内蒙古、黑龙江以及京津冀等地出现历史同期最高温, 北部林区气温一度达 35°C , 并伴随 7~10 级大风。这种极端气候条件下, 森林火险等级显著升高, 更易发生火灾, 例如内蒙古毕拉河“5·2”火灾、黑龙江大兴安岭火灾等。2019 年, 澳大利亚“黑色夏季”烧毁超 1700 万公顷土地; 2022 年 8 月, 中国重庆市 28 个区县最高气温突破 40°C , 全年 40°C 以上高温事件超 15.8 天, 气温之高达有历史记录以来最长, 极端高温与持续干旱造成重庆多个区县发生山火, 过火面积超 13.98 平方千米。2023 年, 加拿大山火持续数月释放超 10 亿吨二氧化碳。此外我国大兴安岭地区也与森林火灾拉锯数十年之久, 损失更是难以估计。

我国森林火灾形势严峻, 有许多学者就我国火灾与气候之间的关系进行了诸多研究。在整个中国, 干旱都是影响火灾的重要因素之一[4]。在气候变暖的大背景下, 高温触发的“暖干旱”现象会改变火灾-气候关系, 降低可燃物含水率, 加速火势蔓延[5]。在我国东北林区, 火灾常发生在降水减少, 干旱加剧的年份[6]。在我国云南林区, 区域相对湿度低于 60%会显著影响森林火灾的发生[7]。但森林火灾并不仅仅发生在森林覆盖率较高的山区, 新疆等缺少植被的土地一旦发生火灾, 情况会更加严重。联合国环境规划署于 2022 年发布的一份报告预测, 包括新疆在内的干旱区森林火灾风险日渐增加[8], 而新疆作为

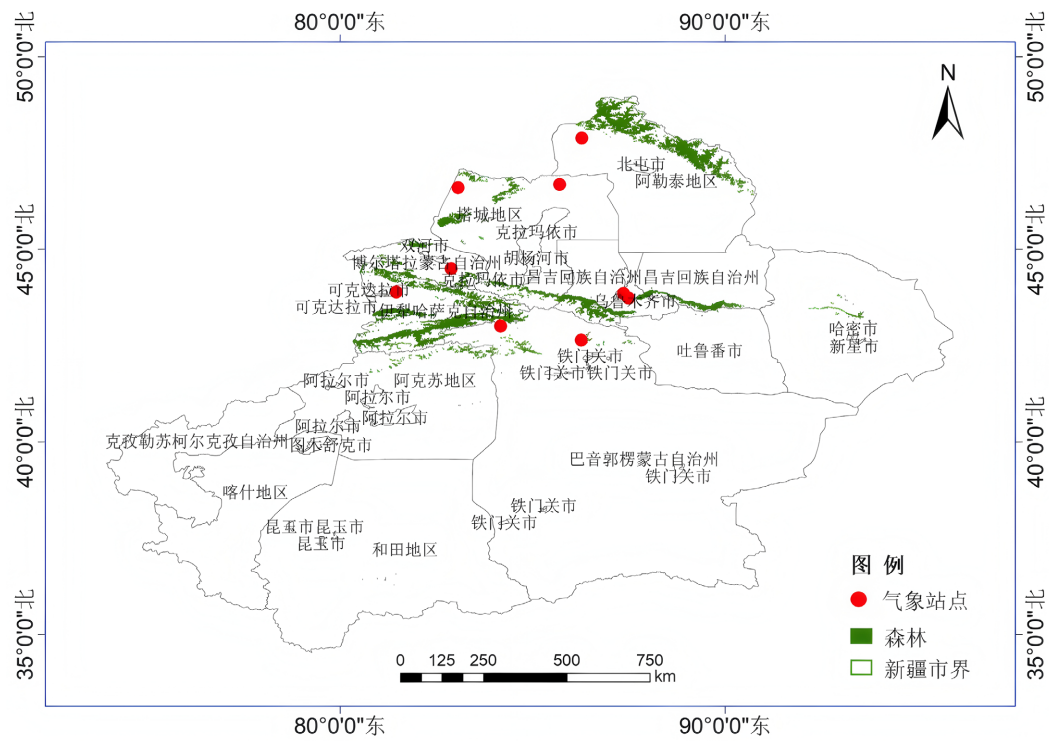
我国西北干旱半干旱区的典型代表，其森林资源稀缺且生态功能突出，承担着防风固沙、水土保持等重要任务，因其地区本身气温较高，受到森林火灾威胁的概率更大。因此研究新疆森林火灾特征及影响因素具有一定的必要性。如何加强森林防火工作，不仅关系到保护森林资源、实现林业发展可持续，也关系到国家和人民财产安全。

梁瀛等(2011)对 1994~2008 年新疆林火发生特征做了分析，指出林火多发时间为 6~9 月，多发地为阿勒泰、塔城、伊犁等地林区[9]；努尔古丽·马坎等(2012)分析了 1994~2008 年新疆森林火灾的发生规律及发展趋势[10]。梁瀛等(2011)研究了新疆北部森林火灾与年均温度、年降水的相关性[11]；Chunming S 等(2020)研究揭示了新疆阿勒泰林区夏季干旱严重程度和火灾发生率与前一年的拉尼娜事件呈显著相关性[12]。但相比高森林覆盖率及林火高发地区(如云南、黑龙江等)，对于新疆地区林火研究仍然较少。由此，本文课题将基于官方火灾报表历史数据等大数据分析，探讨新疆火灾在时空上的分布规律，并结合对应气候数据揭示气候对火灾的影响及相互作用关系，为新疆森林火灾的监测及预警提供一定的科学数据支撑。

2. 资料和方法

2.1. 研究区自然地理概况

新疆维吾尔自治区位于中国西北部，地处亚欧大陆腹地，远离海洋，四面高山环抱。全境地貌呈现典型的“三山夹两盆”格局：北部的阿尔泰山、中部的天山山脉和南部的昆仑山 - 阿尔金山环绕着准噶尔盆地和塔里木盆地。同时横贯中部的天山山脉成为新疆南北疆的地理分界线，根据新疆“两山夹盆地”的地貌特点，将新疆共 15 个地州(属县、市)划分为北疆、东疆和南疆这三个区域[13]。



注：该图基于自然资源部标准底图服务网站下载的审图号为 GS(2019)3333 号的标准地图制作，底图无修改。

Figure 1. The scope of the Xinjiang forest research area and the distribution of meteorological stations
图 1. 新疆森林研究区范围与气象站点分布

Table 1. Meteorological station information
表 1. 气象站点信息

站点	经度	纬度
哈巴河(KABA HE)	86.35	48.05
塔城(TACHENG)	83.00	46.73
和布克赛尔(HOBOKSAR)	85.75	46.82
精河(JINGHE)	82.82	44.57
伊宁(YINING)	81.33	43.95
乌鲁木齐(WU LU MU QI)	87.62	43.78
地窝铺(DIWOPU)	87.47	43.91
巴伦台(BALGUNTAY)	86.33	42.67
巴音布鲁克(BAYANBULAK)	84.15	43.03

新疆大部分地区属于干旱和半干旱地区,降水稀少、分布不均且蒸发强烈,平原区尤为显著。同时新疆也是全国的少林地区之一。据《2021 中国林草生态综合监测评价报告》显示:至 2021 年,新疆的森林面积达 901 万公顷,占全疆面积的 5.4%;森林覆盖率为 5.52%,森林蓄积量至 30,405 万立方米。其独特的自然条件决定了森林分布特点:水平分布上,山区多于平原,北疆多于南疆;垂直分布上,随纬度的递减而增多,且树种较为单一。首先,以天山、阿尔泰山为主的山区天然林,是全疆森林的主体,其主要集中在天山、阿尔泰山和昆仑山海拔 1500~2800 m 的中山带,以主干挺直的西伯利亚落叶松、雪岭云杉等针叶林为主;其次是分布在河流两岸的天然阔叶林——荒漠河谷天然林;最后是覆盖两大盆地及荒漠地区的灌木林,以梭梭、红柳等耐旱植物为主。

基于新疆森林的分布情况,以天山山脉及其以北的森林地区作为森林研究区(见 [图 1](#)),选取位于森林研究区周边的 9 个气象站点(见 [表 1](#))的气象数据进行后续分析。

2.2. 数据来源及处理

2.2.1. 火灾数据

(1) 卫星火点数据

选取 SatSee-Fire 卫星看火(<http://satsee.radi.ac.cn:8080/index.html>)的 Landsat-8 高温点数据作为本研究使用的火灾数据,通过叠加新疆森林地形图来分离出位于研究区范围内的火点数据,再去除置信度低于 80 以及重复的火点数据,最终得到森林火点数据。

(2) 官方报表数据

通过新疆维吾尔自治区林业和草原局(2013~2018 年)以及新疆维吾尔自治区应急管理厅(2019~2021 年)提供的官方历史森林火灾报表数据,汇总这 9 年里森林火灾的发生起数、过火面积、森林受灾面积及受灾类型、起火原因、起火地点、经济损失等数据(见 [表 2](#))。

Table 2. Forest fire basic statistics in Xinjiang from 2013 to 2021
表 2. 2013~2021 年新疆森林火灾基础统计表

年份	森林火灾次数 (次)	火场总面积 (公顷)	受灾森林总面积 (公顷)		
				天然林	人工林
2013	31	64.61	12.79	3.48	9.31
2014	28	118.08	90.71	34.97	55.74

续表

2015	19	143.69	117.28	117.28	
2016	12	8.85	7.82	7.35	0.47
2017	58	32.82	30.14	28.95	1.19
2018	42	23.53	13.22	5.77	7.45
2019	23	13.86	11.49	11.49	
2020	7	8.8	8.29	8.29	
2021	1	0.28	0.28	0.28	

2.2.2. 气候数据

气象数据来自美国国家海洋和大气管理局(NOAA)下设的国家环境信息中心(NCEI)提供的全球气象站点气象数据 (<https://www.ncei.noaa.gov/data/global-summary-of-the-day/archive>)，选取并使用新疆2013~2021年森林研究区内9个气象观测站点的逐日气象指标，该数据具有高时空分辨率。

2.3. 研究方法

2.3.1. 相关分析

本课题采用相关分析来比较 2013~2021 年里火灾频次与气候因子(降水与气温)之间的相关性。相关分析是一种统计方法，用于研究两个或多个变量之间是否存在某种统计上的联系，可以揭示变量如何随彼此变化而变化。对于本课题而言，火灾频次为因变量，气候因子(降水与气温)为自变量，由于研究数据不符合正态分布或者近似正态分布，故选择肯德尔相关分析方法来计算三个变量之间的相关系数，以此判断它们之间的相关性强度与方向[14]，并采用双尾显著性检验计算相关性的显著性水平。分析的内容包括以下三个方面：(1) 年尺度，2013~2021 年每年火灾总频次与当年降水及气温的相关性；(2) 季尺度，多年平均的春夏秋冬四个季节的火灾频次与当季降水及气温的相关性；(3) 月尺度，多年平均的每月火灾频次与当月降水及气温的相关性。

2.3.2. 多元回归分析

在相关分析的基础上，为了进一步确认气候因子(降水与气温)对火灾频次的影响，进行多元线性回归分析。多元回归分析是指在相关变量中将一个变量视为因变量，其他一个或者多个变量视为自变量，建立多个变量之间线性或者非线性数学模型数量关系式并利用样本数据进行分析的统计分析方法。同样，在本课题中，火灾频次为因变量，气候因子(气温与降水)是自变量，分析内容与相关分析保持一致。

2.3.3. 空间可视化

利用 ArcGIS 绘制新疆森林火灾空间分布图。

3. 结果与分析

基于卫星火点数据筛选提取出的森林火点数据在冬季有多次重复(以 2014.12 为例，火点于同一个地理坐标重复出现 3 次)，存在提取火点时频繁饱和的问题，与新疆统计年鉴显示的官方数据吻合度差，最终决定使用官方报表数据用作后续研究。

3.1. 新疆森林火灾时间分布特征

3.1.1. 年际变化

新疆森林地区在 2013~2021 年间共计发生火灾 221 起，年均 24.56 起(见表 2)。森林火灾起数整体上

呈下降趋势(见图 2): 前期(2013~2016 年)火灾起数逐步下降, 但在 2017 年迎来峰值(58 起), 随后火灾起数逐年下降, 2021 年火灾起数最低(1 起)。

新疆森林地区 9 年内总过火面积为 414.52 公顷, 年均过火面积为 46.06 公顷(见表 2), 其整体变化趋势也呈下降, 但与火灾起数的变化规律不同(见图 2): 前期过火面积呈上升趋势, 并于 2015 年出现最大值(143.69 公顷), 随后过火面积骤降, 在 2021 年出现最小值(0.28 公顷)。

新疆地区森林火灾发生的年际变化比较大, 大致可以划分为 3 个阶段: 2013~2015 年: 火灾严重期(78 起, 326.38 公顷); 2016~2019 年: 火灾高发期(135 起, 79.06 公顷); 2020~2021 年: 火灾低发期(8 起, 9.08 公顷)。

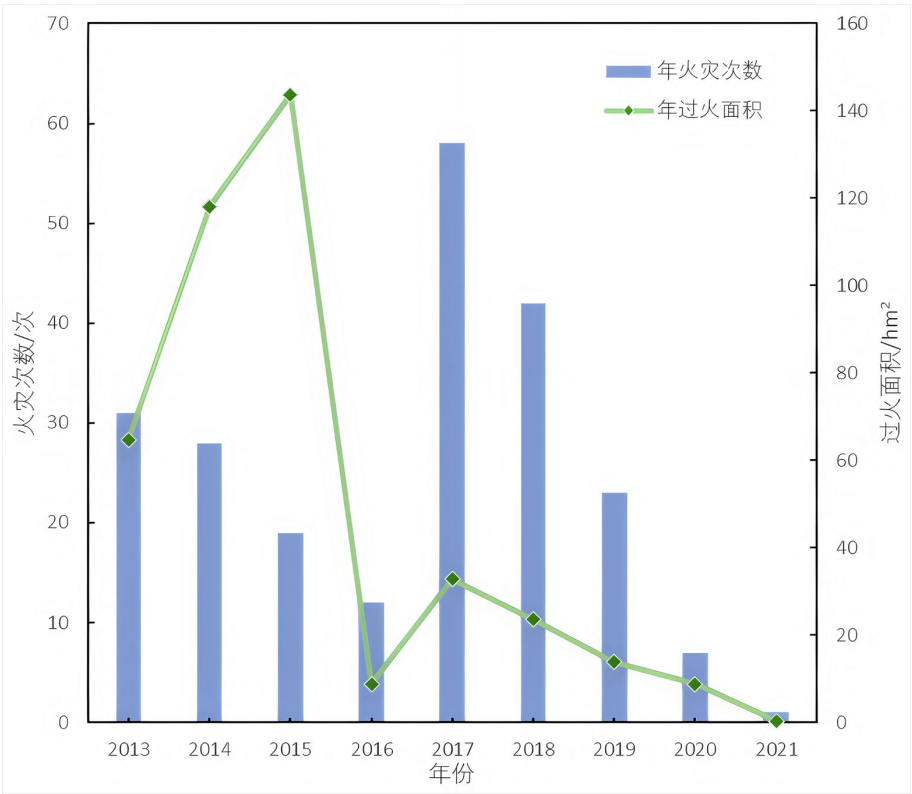


Figure 2. The inter-annual variation of forest fires in Xinjiang from 2013 to 2021
图 2. 2013~2021 年间新疆森林火灾年际变化情况

3.1.2. 月际变化

2013~2021 年, 森林研究区年降水 316.46 毫米, 6 月最多(41.71 毫米), 7~8 月均超过 30 毫米, 夏季降水约占全年 36.04%。年均气温 6.53℃, 1 月最低(-13.17℃), 7 月最高(22.60℃); 6~8 月的最高温均超 40℃, 7 月高达 44℃ (见图 3)。

新疆森林火灾月际变化显著(见图 4)。春夏季共发生火灾 189 起, 分别占总火灾起数的 53.85%和 31.67%。4 月为高峰(57 起, 占比 25.79%; 161.22 公顷, 占比 38.89%); 3 月为次高峰(39 起, 占比 17.65%; 66.39 公顷, 占比 16.02%); 其余高发月为 5 月、8 月和 10 月; 11 月和 12 月火灾趋近于 0; 1 月无火灾发生。7 月是特例: 火灾 33 起(14.93%, 全年第三), 但过火面积仅 2.56 公顷。

季节上, 春季火灾起数和过火面积占比最高, 夏季火灾起数占比比秋季高 22.17%, 但秋季过火面积反超夏季 20 多公顷。

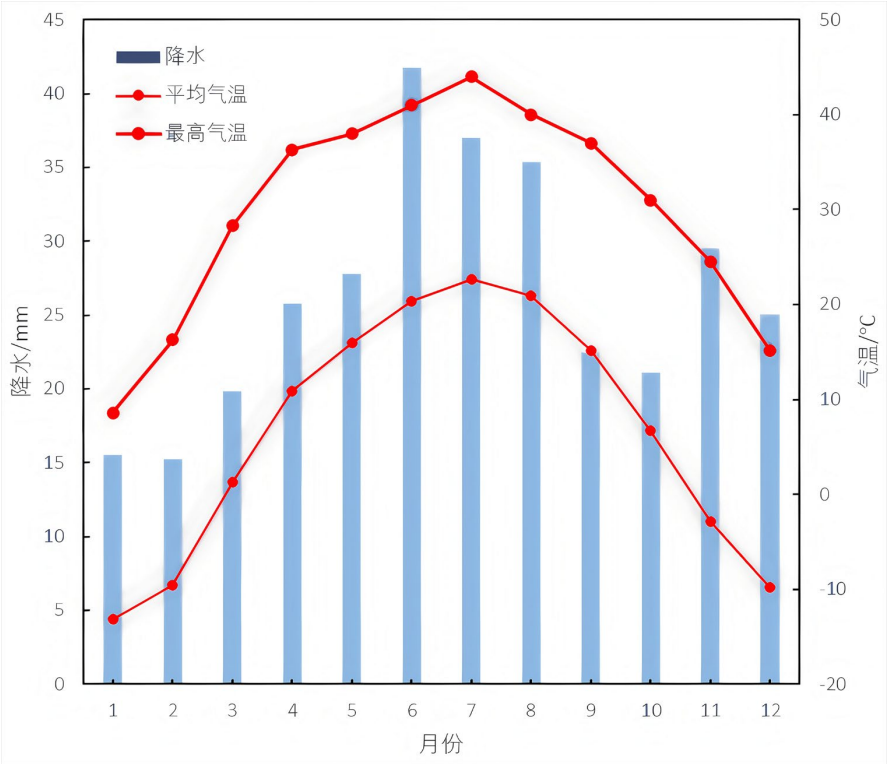


Figure 3. Climatic characteristics of the Xinjiang forest research area from 2013 to 2021 by month
图 3. 新疆森林研究区 2013~2021 年月气候特征

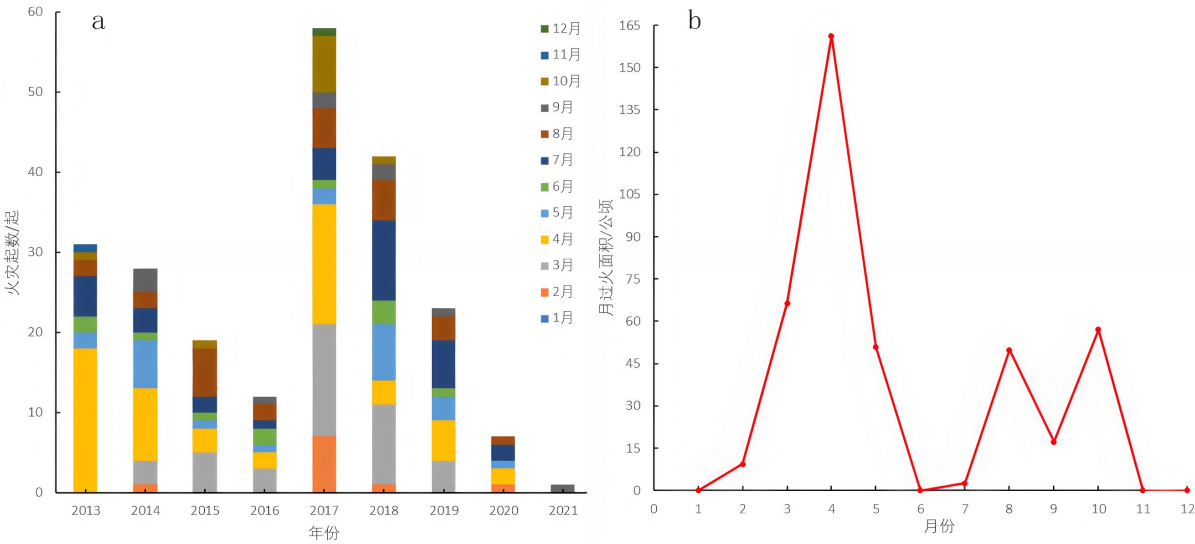


Figure 4. The variation of the number of forest fires (a) and the area burned (b) in Xinjiang from 2013 to 2021
图 4. 2013~2021 年新疆森林火灾每月起数(a)和过火面积(b)变化情况

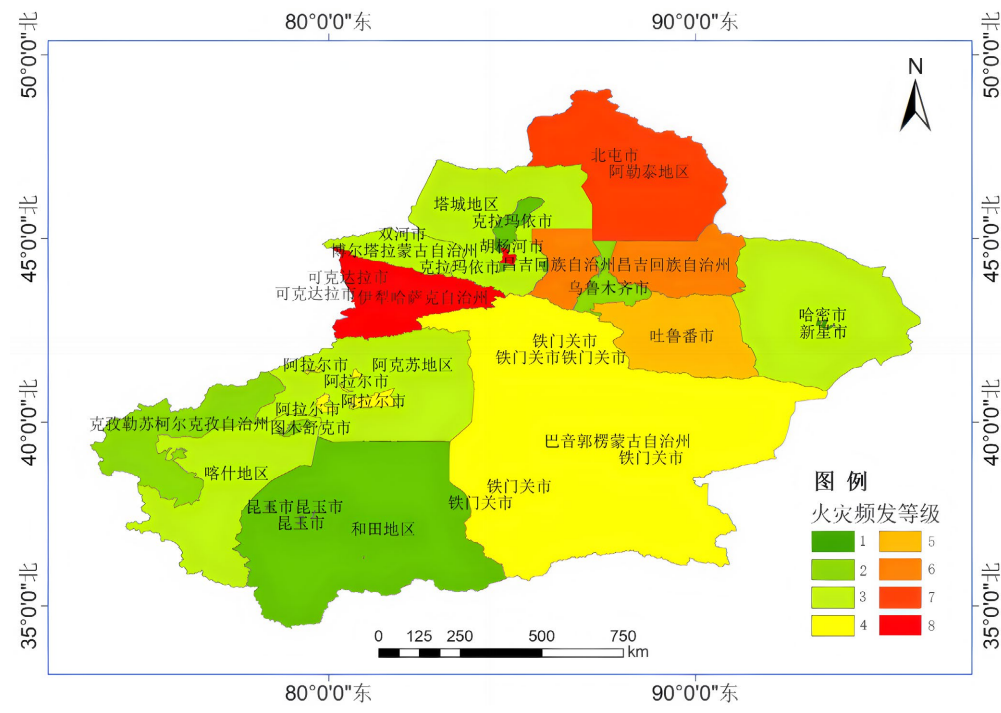
3.2. 新疆森林火灾空间分布特征

根据 2013~2021 年新疆各地州火灾起数，划定 8 个火灾频发等级：等级 1 (火灾起数 = 0)、等级 2 ($1 \leq \text{火灾起数} \leq 5$)、等级 3 ($6 \leq \text{火灾起数} \leq 10$)、等级 4 ($11 \leq \text{火灾起数} \leq 15$)、等级 5 ($16 \leq \text{火灾起数} \leq$

20)、等级 6 ($20 \leq \text{火灾起数} \leq 30$)、等级 7 ($30 \leq \text{火灾起数} \leq 50$)、等级 8 (火灾起数 ≥ 60)。

由图 5 可知：伊犁哈萨克自治州火灾频发等级居全疆最高(60 起)；阿勒泰地区火灾频发等级列全疆第二；第三、第四是昌吉回族自治州(23 起)和吐鲁番地区(18 起)。

北疆火灾起数占全疆 69.23%，东疆占 11.76%，南疆占 19.01%。表明火灾频发区域集中在北疆(天山山脉及其以北地区)，与新疆森林分布相对应。



注：该图基于自然资源部标准底图服务网站下载的审图号为 GS(2019)3333 号的标准地图制作，底图无修改。

Figure 5. Spatial distribution of forest fires in Xinjiang
图 5. 新疆森林火灾空间分布情况

3.3. 关键气候因子与火灾时序的对比

基于气候资料的气候指标，本研究选取平均温度、月最高温及降水量作为关键气候因子，分析其与火灾的关系。过火面积呈现明显的季节差异，春季最高，冬季最低。尽管春季均温(9.35°C)低于夏季(21.28°C)，但春季过火面积约夏季的 5 倍(见图 6(b))，这可能是因为新疆年平均湿度不足 30%，春季植被干燥易燃，加之人类活动(农事用火等)频繁；而夏季多降水能抑制火势，冬季低温(-10.86°C)及积雪的覆盖也显著降低火灾风险。

火灾起数从 2013 年的 31 起波动下降至 2021 年的 1 起，但 2017 年异常增至 58 起。年降水量虽然整体波动较大，仍呈上升趋势(见图 6(a))。2013~2014、2017 及 2020~2021 年为降水负距平年份(降水偏少)，2015~2016 及 2019 年为降水正距平年份(降水偏多)。气温水平除 2014 (-0.87°C)和 2018 年(-0.69°C)为负值外，其余年份均高于年均值(见图 7)。多数年份支持“降水与火灾呈负相关(降水量多则火灾少)”这一假设，例如 2016 年降水最多，火灾仅 12 起；降水负距平年份(如 2013、2014、2017 年)普遍火灾起数多。但 2020 年降水偏少(降水距平为 -28.11 毫米)仅发生 7 起火灾，可能与气温距平增幅较低(0.09°C)及严格防火政策有关。

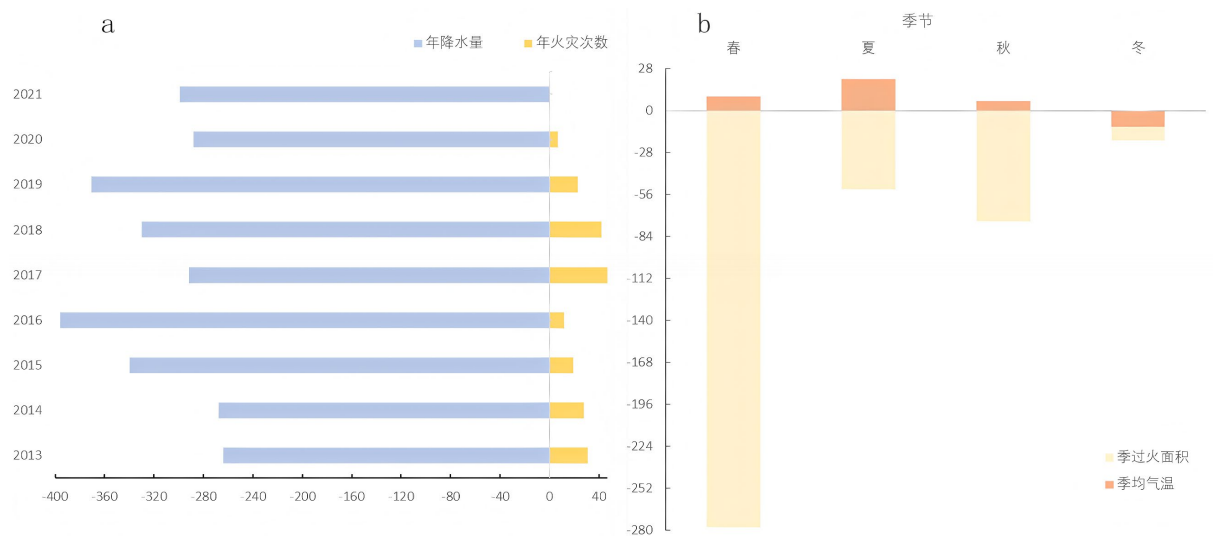


Figure 6. Comparative analysis of key climatic factors and fire chronology (a) annual precipitation and annual fire frequency (b) seasonal mean temperature and seasonal burnt

图 6. 关键气候因子与火灾时序的对比(a) 年降水与年火灾次数; (b) 季节均温与季过火面积

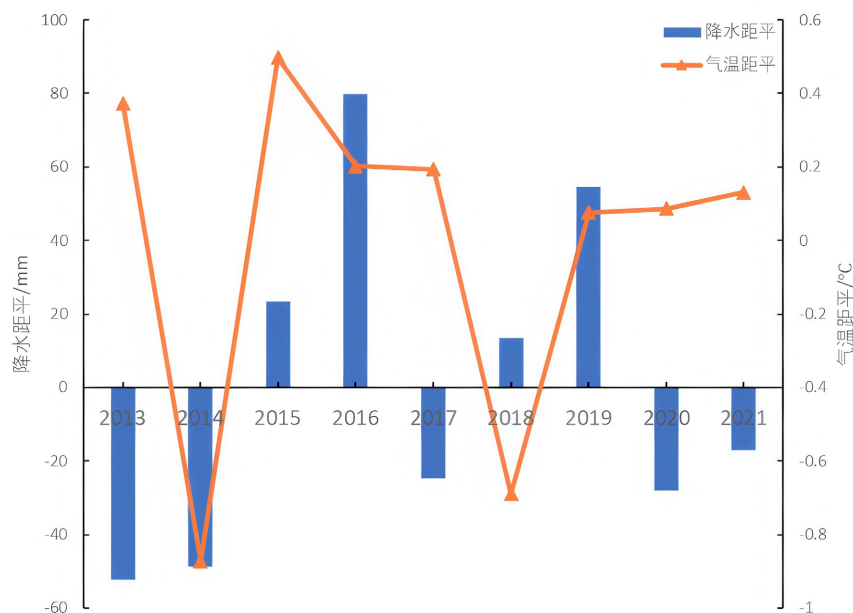


Figure 7. The situation of precipitation and temperature deviation in each year from 2013 to 2021

图 7. 2013~2021 年期间各年降水与气温的距平变化情况

3.4. 火灾频次与气候因子的相关性

年尺度上(见表 3), 月降水与月最高温: 除 2021 年外, 其余年份均呈正相关(0.152~0.595), 且前期年份显著(如 2013、2014、2016 以及 2017 年), 其中 2013 年二者相关性最强($r = 0.595$, $P < 0.01$), 表明该年降水量与气温同步变化的趋势显著。

月降水与月火灾频次: 大部分年份都呈正相关(如 2013 年 $r = 0.585$, 2018 年 $r = 0.336$), 但 2017 年的相关性趋近于 0 ($r < 0.001$), 2021 年甚至出现了负相关($r = -0.408$); 仅 2013 年显著($P < 0.05$), 其他年

份均不显著,表明年际差异大,降水对火灾的直接影响可能较弱或者受其他因素的干扰。

月最高温与月火灾频次:所有年份均呈正相关(0.142~0.689)且 2013、2015、2016 和 2019 年显著($P < 0.05$),2018 年显著($P < 0.01$),其中 2021 年二者相关性骤降($r = 0.186$),可能与防火工作的推进完善有关。

月尺度上(见表 4),月均降水与月最高温: $r = 0.636$, $P < 0.01$,呈强正相关,表明从长期来看,降水量与气温同步变化的趋势显著。月最高温与月火灾频次: $r = 0.532$, $P < 0.05$,呈中等正相关,表示气温升高有可能通过干燥效应间接增加火灾风险。月均降水与月火灾频次: $r = 0.219$ 且未达显著水平,表明降水对火灾的直接影响可能被其他因素(如人类活动)所掩盖。

季尺度上(见表 5),三者之间均不存在显著性差异。基于季最高温与火灾频次:冬季为中等负相关,可能与低温抑制燃烧,降雪覆盖减少火源等有关。

Table 3. The correlation coefficients of the three on an annual scale
表 3. 年尺度下每年三者的相关系数

年份	变量	月降水	月最高温	月火灾频次
2013	月降水	1		
	月最高温	0.595**	1	
	月火灾频次	0.585*	0.546*	1
2014	月降水	1		
	月最高温	0.515*	1	
	月火灾频次	0.329	0.329	1
2015	月降水	1		
	月最高温	0.364	1	
	月火灾频次	0.085	0.524*	1
2016	月降水	1		
	月最高温	0.485*	1	
	月火灾频次	0.174	0.522*	1
2017	月降水	1		
	月最高温	0.504*	1	
	月火灾频次	<0.001	0.142	1
2018	月降水	1		
	月最高温	0.369	1	
	月火灾频次	0.336	0.689**	1
2019	月降水	1		
	月最高温	0.303	1	
	月火灾频次	0.168	0.503*	1
2020	月降水	1		
	月最高温	0.152	1	
	月火灾频次	0.250	0.365	1
2021	月降水	1		
	月最高温	-0.030	1	
	月火灾频次	-0.408	0.186	1

注: *在 0.05 级别(双尾),相关性显著。**在 0.01 级别(双尾),相关性显著。

Table 4. The three-way correlation coefficient averaged over the years at the monthly scale
表 4. 月尺度下多年平均的三者相关系数

变量	月均降水	月最高温	月均火灾频次
月均降水	1		
月最高温	0.636**	1	
月均火灾频次	0.219	0.532*	1

注：*在 0.05 级别(双尾)，相关性显著。**在 0.01 级别(双尾)，相关性显著。

Table 5. The three-correlation coefficient of the four seasons at the seasonal scale
表 5. 季尺度下四季的三者相关系数

季节	变量	季降水	季最高温	季火灾频次
春季	季降水	1		
	季最高温	-0.056	1	
	季火灾频次	0.197	0.141	1
夏季	季降水	1		
	季最高温	-0.087	1	
	季火灾频次	0.057	-0.209	1
秋季	季降水	1		
	季最高温	-0.057	1	
	季火灾频次	0.093	0.096	1
冬季	季降水	1		
	季最高温	0.056	1	
	季火灾频次	-0.174	-0.521	1

注：*在 0.05 级别(双尾)，相关性显著。**在 0.01 级别(双尾)，相关性显著。

3.5. 火灾频次与气候因子的多元回归

首先是整体模型对火灾频次变异性的解释能力(见表 6)：R² 值的范围从 0.007~0.462，表明模型的解释能力在不同年份差异显著。其中 2016 年 R² 值为 0.462，气温和降水可以解释火灾频次 46.2%的变异，是模型中解释能力最强的一年；而 2017 年 R² 值为 0.007，模型几乎没有解释能力，表明该年火灾频次主要受其他未列入回归模型的变量(如人为活动、风力、雷击等)影响。多年平均月尺度的 R² 值为 0.412，即长期趋势中，气温和降水可解释 41.2%的火灾变异，但没有通过统计显著性检验。

其次是回归系数：其能反映气候因子对火灾频次的影响强度。2016 年的回归系数为 0.680，表示月最高温或降水每增加 1 单位，火灾频次增加 0.680 单位，影响最强；2017 年的回归系数为 0.081，几乎无线性关系，可能因极端天气或人为活动导致模型失效。冬季回归系数为 0.425，影响较强，可能与低温和降雪有关。

最后是 P 值(显著性)分析：仅 2016 和 2018 年接近显著性(P=0.062, P=0.069)，其他年份均未通过显著性检验(P>0.05)。同时在季尺度上，所有季节均不显著(P>0.5)，表明季节模型需进行优化或者补充变量。总之当前模型在部分年份(如 2016 和 2018 年)具有一定的解释能力，但整体显著性不足，还需要进一步优化变量的选择和方法。

Table 6. Multivariate regression model of climatic factors and fire frequency
表 6. 气候因子与火灾频次的多元回归模型

时间尺度	回归系数	R ²	P 值
2013	0.323	0.104	0.610
2014	0.451	0.204	0.359
2015	0.547	0.299	0.203
2016	0.680	0.462	0.062
2017	0.081	0.007	0.971
2018	0.669	0.448	0.069
2019	0.589	0.346	0.148
2020	0.531	0.282	0.226
2021	0.339	0.115	0.578
年平均的月尺度	0.642	0.412	0.092
春	0.332	0.110	0.705
夏	0.245	0.060	0.830
秋	0.100	0.010	0.970
冬	0.425	0.180	0.551

3.6. 新疆森林火灾的火源分布

从火源分布看(见图 8), 新疆森林火灾主要由人为因素引发。2013~2021 年, 共发生 221 起火灾, 其中 192 起(86.88%)已查明起火源, 29 起(13.12%)未查明。在已查明火源中, 人为火源 121 起(63.02%), 自然火源 71 起(36.98%), 自然火源中雷击火 56 起(78.87%)。

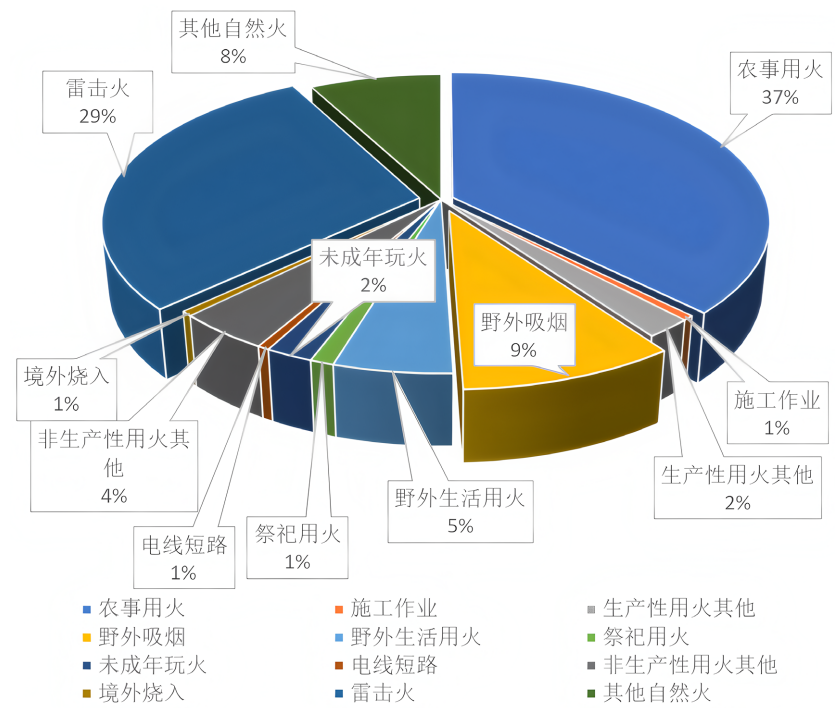


Figure 8. Classification of ignition sources of forest fires in Xinjiang from 2013 to 2021
图 8. 2013~2021 年新疆森林火灾起火源分类

人为火源中, 生产性用火 77 起, 以农事用火为主(72 起, 93.51%); 非生产性用火 43 起, 以野外吸烟(18 起)和野外生活用火(10 起)为主, 两者共占 65.12%。主要起火源占比超过 5%的依次为: 农事用火(37%)、雷击火(29%)、野外吸烟(9%)和其他自然火(8%)。

年尺度上, 农事用火火灾起数在 2017 年达高峰(32 起), 雷击火在 2018 年达高峰(17 起)。月尺度上, 农事用火集中于 2~4 月, 4 月最高; 雷击火发生于 6~8 月, 7 月最高。

4. 讨论与结论

4.1. 讨论

4.1.1. 时间分布特征讨论

在月尺度上, 火灾活动受气候与火源的双重调控: 春季(3~5 月)农事用火频繁, 4 月火灾起数达全年高峰 57 起, 过火面积 161.22 公顷, 此时气温回升至 10.89℃而降水不足(25.81 毫米), 植被未返青, 枯草易引燃。3 月为次高峰, 气温升至 1.26℃, 积雪融化后可燃物暴露, 且处于农事用火初期管控薄弱。夏季(6~8 月)降水充沛(均超 35 毫米), 抑制火灾蔓延, 但频繁的雷电活动导致雷击火频发, 7 月火灾 33 起(全年第三), 过火面积仅 2.56 公顷, 因降水抑制和人为扑救。冬季低温降雪, 火灾几近消失。

年尺度上, 森林火灾起数和过火面积呈下降趋势, 与全国一致[15]。这得益于我国防火能力提升, 形成“预防为主、防救结合”防控体系, 国家重视和部门工作完善, 有效降低火灾发生。

4.1.2. 空间分布特征讨论

新疆森林火灾主要发生于北疆森林区, 尤以天山山脉及其以北地区为主, 共计 153 起, 年均 17 起; 南疆较少, 仅 42 起, 年均 4.67 起。此空间分布特征与其他学者的研究结论一致[16]。

4.1.3. 火灾频次与气候因子间关系的讨论

基于 CIn 指数(综合干旱指数)的新疆干旱趋势研究表明, 2017 年被确认为一个显著突变点, 表明该地区干旱频率减少, 整体呈现“干旱-湿润”转变趋势[17]。在 2013~2021 年期间, CIn 指数介于-0.6 至-1.8 之间, 属于轻旱至中旱水平[17], 与同期多数年份火灾频次具有较好对应关系。

从年际变化来看, CIn 指数的 Sen's 斜率值(大于 0 表示变湿)呈波动特征: 2013~2015 年, Sen's 斜率上升至峰值 0.002, 干旱趋势减弱; 2017 年该值降至最低 0.0013, 干旱程度加重; 此后 Sen's 斜率趋于稳定, 反映持续湿润化趋势[17]。这一干湿变化与火灾频次的波动基本吻合。例如, 2015 年 Sen's 斜率达最大(0.002), 气候偏湿, 火灾仅 19 起; 2016 年降水量最高(396.30 毫米), 火灾仅 12 起, 进一步印证湿润条件对火灾的抑制作用。

季节与月尺度分析表明, 夏季 Sen's 斜率为负(-1.07×10^{-5}), 呈干旱趋势[17], 与 7~8 月火灾高发(33 起、26 起)一致。低降水月份, 如 3 月(19.84 毫米)和 4 月(25.81 毫米)分别发生 39 起和 57 起火灾, 反映干旱对火灾风险的显著推动作用。高温亦为重要影响因素, 月最高温与月火灾频次呈中等正相关($r=0.532$, $P<0.05$)。7 月最高温达 44℃, 加之中等降水(36.97 毫米), 火灾 33 起; 而 6 月最高温为 41℃, 因降水较充沛(41.71 毫米), 火灾仅 11 起, 说明高温在低湿条件下更易导致高火灾风险。

综合来看, 干旱与高温共同构成影响火灾频次的关键气候因子, 形成以干旱为主、高温协同的驱动机制。干旱是核心驱动因子, 低降水、CIn 指数下降及 Sen's 斜率降低均与火灾增加显著相关。高温则作为间接驱动, 在干燥环境下作用突显。部分年份如 2017 年, 虽降水量中等但火灾频次最高, 可能与干旱期集中产生的滞后效应及人为因素有关, 提示极端事件频发年份需加强风险关注。

4.1.4. 火源讨论

人为火源是引发森林火灾发生的主要火源, 与其他研究学者关于新疆地区或阿勒泰地区森林火源的

分析结论是一致的[10] [18]。在西南地区的森林火灾火源分类中, 人为火源也是主要火源[19]。

4.2. 结论

基于新疆官方森林火灾报表数据(2013~2021 年), 分析了新疆森林火灾的时空分布特征, 并结合气象数据探究火灾频次与气候因子间的关系以及火源分析, 得到如下主要结论:

(1) 在时间尺度上, 于月尺度, 3~8 月的火灾起数较高, 占全年火灾起数的 85.52%, 3 月、4 月和 7 月的火灾起数排全年前三; 3~5 月以及 8~10 月的过火面积较大, 分别占全年过火面积的 67.15%和 29.96%, 4 月过火面积最大, 3 月次之。于季尺度, 春夏两季(共计 189 起)是森林火灾的高发期, 分别占全年火灾起数的 53.85%和 31.67%。于年尺度, 森林火灾起数和过火面积均呈下降趋势, 与国家大力开展推进防火工作密切相关。

(2) 在空间分布上, 森林火灾发生的范围主要集中北疆林区, 即天山山脉及其以北地区。

(3) 关于火灾频次与气候间的关系。分析可知: 干旱与高温均是影响火灾频次的重要气候因子, 且形成了以干旱为主、高温协同的驱动机制。CIn 指数越小, Sen's 斜率 < 0 或者下降(变干趋势), 叠加月最高温与火灾频次的中等正相关($r = 0.532, P < 0.05$), 更易加强森林内可燃物的干燥程度, 从而进一步诱发火灾发生。

(4) 从火源划分来看, 人为因素是引发森林火灾的主要原因, 其中又以农事用火为主。

5. 建议与展望

5.1. 建议

5.1.1. 基于气候预测的预警机制

(1) 动态干旱监测与分级预警: 建立逐月 CIn 指数监测体系, 重点监测 3~4 月(火灾高发期)和 7~8 月(高温干旱叠加期)的 CIn 值变化。当年际 Sen's 斜率 > 0 (变湿趋势)时, 降低全年火灾预警等级; 斜率 ≤ 0 或下降时(如 2017 年), 提高预警级别, 尤其是春夏两季。

(2) 精细化降水分布预测: 结合月降水数据, 识别“前期干旱 - 后期湿润”型年份(如 2017 年), 重点监控干旱积累期(1~6 月), 提前部署防火资源。利用气象模型预测极端高温(如月最高温 $\geq 40^\circ\text{C}$)与低降水(月均降水 ≤ 30 毫米)的叠加时段, 发布“双高风险”警报。

(3) 突变年份专项预警: 对类似 2017 年的“干旱 - 湿润”突变年份, 建立历史案例库, 分析其降水时空分布特征。当年内降水分布不均(如上半年降水低于均值 30%)时, 启动“突变响应预案”, 加强资源预置。

5.1.2. 重点区域防控策略

(1) 时段性重点防控: 重点关注春季历史火灾高发区, 限制野外用火, 开展可燃物清理(如枯枝落叶、灌木), 增设临时防火瞭望塔; 夏季高温干旱叠加区要加强林区湿度监测, 实施无人机巡逻, 在 Sen's 斜率 ≤ 0 的年份, 提前部署消防队伍。

(2) 空间风险分区: 高敏感区(中旱至重旱)列为一级防控区, 全年实施网格化管理; 次敏感区(轻旱至中旱、降水分布不均)列为二级防控区, 重点监控干旱积累期。

5.2. 研究不足与未来方向

本课题的研究内容存在一定的不足: 首先是回归模型整体的显著性差, 需要对变量和方法的选取做进一步的优化来调整出合适的模型, 其次没有考虑可燃物与地形这两个林火驱动因素, 但目前缺乏可燃物与地形数据。希望可以在今后的研究中调整出合适的回归模型, 并加入这两个林火驱动因素, 进行多

因子耦合分析以及长期气候变化的情景模拟。

参考文献

- [1] 吴月圆, 舒立福, 王明玉, 等. 近年世界森林火灾综述[J]. 温带林业研究, 2022, 5(4): 49-54.
- [2] United Nations Environment Programme (2022) Frontiers 2022: Noise, Blazes and Mismatches-Emerging Issues of Environmental Concern. United Nations Environment Programme.
- [3] IPCC (2021) Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Cambridge University Press.
- [4] Zhao, F. and Liu, Y. (2021) Important Meteorological Predictors for Long-Range Wildfires in China. *Forest Ecology and Management*, **499**, Article ID: 119638. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2021.119638>
- [5] 杜建华, 宫殷婷, 蒋丽伟. 中国森林火灾发生特征及其与主要气候因子的关系研究[J]. 林业资源管理, 2019(2): 7-14.
- [6] Yao, Q., Brown, P.M., Liu, S., Rocca, M.E., Trouet, V., Zheng, B., *et al.* (2017) Pacific-Atlantic Ocean Influence on Wildfires in Northeast China (1774 to 2010). *Geophysical Research Letters*, **44**, 1025-1033. <https://doi.org/10.1002/2016gl071821>
- [7] Ying, L., Cheng, H., Shen, Z., Guan, P., Luo, C. and Peng, X. (2021) Relative Humidity and Agricultural Activities Dominate Wildfire Ignitions in Yunnan, Southwest China: Patterns, Thresholds, and Implications. *Agricultural and Forest Meteorology*, **307**, Article ID: 108540. <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2021.108540>
- [8] United Nations Environment Programme (2022) Spreading Like Wildfire: The Rising Threat of Extraordinary Landscape Fires. United Nations Environment Programme.
- [9] 梁瀛, 张思玉, 努尔古丽. 新疆森林火灾特征及变化规律分析[J]. 森林防火, 2011(1): 39-42.
- [10] 努尔古丽·马坎, 梁瀛, 巴哈尔古丽. 新疆森林火灾分析及预防[J]. 防护林科技, 2012(3): 61- 62+73.
- [11] 梁瀛, 雍宏, 努尔古丽. 新疆北疆林区森林火灾与气象因子的相关性分析[J]. 新疆农业科学, 2011, 48(3): 539-543.
- [12] Shi, C., Liang, Y., Gao, C., Wang, Q. and Shu, L. (2020) Drought-Modulated Boreal Forest Fire Occurrence and Linkage with La Nina Events in Altai Mountains, Northwest China. *Atmosphere*, **11**, Article No. 956. <https://doi.org/10.3390/atmos11090956>
- [13] 贾琳琳. 新疆区域经济差异及其影响因素分析[D]: [硕士学位论文]. 乌鲁木齐: 新疆财经大学, 2020.
- [14] 李春喜, 邵云, 姜丽娜. 生物统计学[M]. 第4版. 北京: 科学出版社, 2008.
- [15] Zong, X.Z., Tian, X.R., Yao, Q.C. and Brown, P.M. (2022) An Analysis of Fatalities from Forest Fires in China, 1951-2018. *International Journal of Wildland Fire*, **31**, 507-517. <https://doi.org/10.1071/wf21137>
- [16] 梁瀛, 努尔古丽, 高健. 新疆森林火灾发生规律及分析[J]. 中国林业, 2010(21): 35.
- [17] 孟琪琳, 窦燕. 改进的综合气象干旱指数在新疆的适用性分析[J]. 人民长江, 2025, 56(7): 93-100+106.
- [18] 王劲, 王秋华, 梁瀛, 等. 新疆阿勒泰地区 2002-2018 年森林草原火灾时空分布研究[J]. 山东林业科技, 2021, 51(6): 47-52.
- [19] 张运林, 郭妍, 胡海清. 2001-2017 年西南地区森林火灾数据特征分析[J]. 西北林学院学报, 2021, 36(1): 179-186.