

尹春,罗汉,何金梅,等. 地面人工增雨作业对祁连山森林火险气象等级的影响[J]. 陕西气象,2023(5):48-53.

文章编号:1006-4354(2023)05-0048-06

地面人工增雨作业对祁连山森林火险气象等级的影响

尹春¹,罗汉^{2,3},何金梅¹,王琦³,李宝梓³

(1. 甘肃省气象服务中心,兰州 730020;2. 南京信息工程大学大气科学学院,南京 210044;

3. 甘肃省人工影响天气办公室,兰州 730020)

摘要:根据森林火险气象等级的计算方法,基于2011—2020年祁连山区林区森林火险气象等级资料,筛选地面人工增雨作业后森林火险气象等级下降到零级火险解除的典型过程,分析地面人工增雨作业对祁连山森林火险气象等级的影响。结果表明:祁连山区各林区森林火险气象等级为四级及以上的主要时段集中在4—6月、9—11月,具有明显的季节分布特征;2011—2020年在祁连山西、中和东段区域共实施471次人工增雨作业,22.3%的作业后森林火险气象等级没有降低,46.1%的作业后森林火险气象等级有下降但没有降到零级,31.6%的作业后森林火险气象等级降到零级,共149次,其中有67.1%为三级以上森林火险气象等级;在自然降水和人工增雨作业的共同影响下,祁连山森林火险气象等级显著降低,以祁连山东段林区森林火险等级的降低效果最显著。

关键词:人工增雨;森林火险气象等级;祁连山

中图分类号:P481

文献标识码:A

我国森林火灾频发与气候变化息息相关^[1]。祁连山位于河西走廊以南,长达1 000多公里,大部分海拔高度在3 500 m以上,终年积雪,是河西走廊的天然固体水库,是甘肃省内陆河的发源地。东部森林植被覆盖较好,西部为辽阔的草原和荒漠草原。祁连山林区是甘肃省森林防火重点区域,气候干燥,植被稀疏,除沟谷有少量杨桦分布外,其余以云杉纯林为主,森林分布于阴坡和半阴坡,坡向性很明显。从树种组成看,松科等易燃针叶树种分布于祁连山各大林区。随着天然林资源保护、退耕还林等林业重点生态工程的实施,林地面积逐年增加,森林防火任务也逐年增大。祁连山林火的特点是冬春易发,春季起火占65.6%,

冬季占29.3%,夏秋季仅占5.2%。火警和荒火多为阳坡草地或林缘草灌地起火,起火后速度快、强度高、扑救难度大^[2]。

据相关文献,一个地区发生特大森林火灾有其特殊的气象条件,在火灾发生之前往往出现降水量少^[3-5]、连续干旱、气温偏高^[6]、风速大^[7]等异常天气现象。一段时期的持续干旱少雨是森林火灾发生的重要原因之一。森林火险气象等级定量预报、评估方法主要根据《森林火险气象等级》(GB/T 36743—2018)^[8]及行业相关研究结论中主要火险预报模型等进行计算^[9-14]。森林火险预报方法与降水量等气象要素有关^[15-21]。甘肃省目前森林火险气象等级预报和评估主要采取全国森

收稿日期:2023-02-20

作者简介:尹春(1991—),女,汉族,甘肃徽县人,硕士,工程师,从事应用气象研究。

通信作者:罗汉(1988—),男,汉族,甘肃敦煌人,在读博士,工程师,从事人工影响天气开发应用研究。

基金项目:第二次青藏高原综合科学考察研究项目(2019QZKK0104);中国气象局西北区域人影建设研究(RYSY201901);甘肃省自然科学基金青年基金项目(22JR5RA754);甘肃省气象局科研项目(Ms2022-21)

森林火险气象等级方法,在计算涉及的6个要素中,4个与降水量场有关。通过开展合理有效的人工增雨作业,可对局部降水产生影响,从而达到防灾减灾的效果。祁连山地区常年开展的人工增雨作业增加了17.5%的降水,并增加了3.7%流域径流量^[22-27],因此,分析研究祁连山地面人工增雨作业前后森林火险气象等级的变化,可以间接评估人工增雨的作业效果。研究祁连山区各林区人工增雨作业后森林火险等级降为零的作业过程,并基于气候特征背景场,评判西段、中段、东段及各林区综合人工增雨作业效果,为人工增雨作业效

果评估提供技术支撑。

1 数据与方法

1.1 研究区

祁连山林区主要包括祁连山西段8个林场、祁连山中段20个林场、祁连山东段21个林场(图1)。选取祁连山南北坡周边的15个气象站作为火险等级计算的代表站,其中祁连山西段区域有酒泉、金塔、瓜州、托勒4站,祁连山中段区域有肃南、山丹、民乐、张掖、野牛沟、祁连6站,祁连山东段区域有永昌、古浪、武威、天祝、乌鞘岭5站。

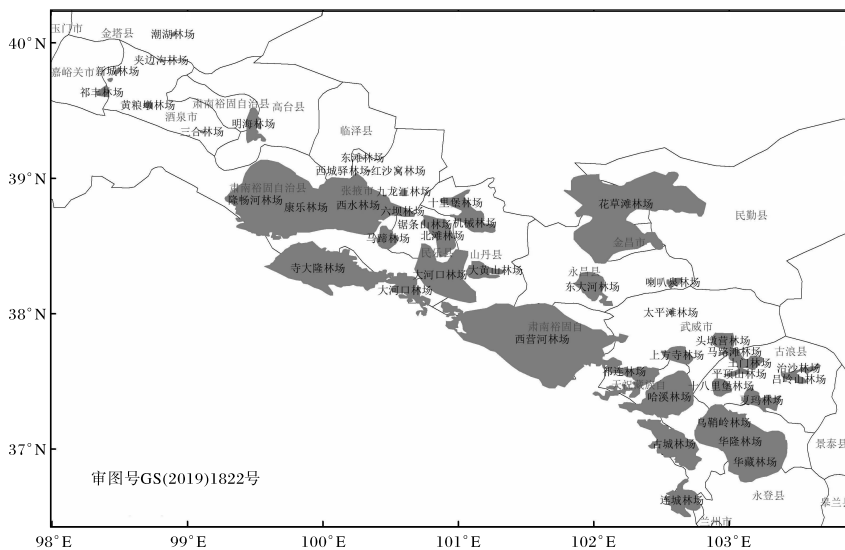


图1 甘肃省祁连山区主要林场分布图(阴影区为林场)

1.2 资料与方法

1.2.1 森林火险气象等级划分 森林火灾的发生、发展与气象条件密不可分,森林火险气象等级是森林火灾发生可能性和蔓延难易程度的一种重要指标。森林火险气象等级的预报和发布是森林防火管理的重要依据。基于《森林火险气象等级》(GB/T 36743—2018)^[8]规定的森林火险气象等级划分和预报服务用语(表1),应用森林火险气象指数计算公式(式(1)、式(2)),考虑降水、积雪、风速、气温、相对湿度、干旱综合指数等要素,对祁连山区各林场2011—2020年逐日森林火险气象等级进行计算、评估。森林火险气象等级由低至高分为五个等级:低火险(一级)、较低火险(二级)、较高火险(三级)、高火险(四级)、极高火险

(五级)。根据地势、气候条件和历史火灾分布等因素,祁连山区处于全国五个FFDI(森林火灾危险指数)计算区域的B区,根据FFDI值(用 I_{FFD} 表示)划分等级(表1)。

$$I_{FFD} = U C_r C_s, \quad (1)$$

$$U = f(v) + f(t) + f(H_R) + f(m). \quad (2)$$

式中, U 为森林火险气象指数的函数表达式。 C_r 为降水量修正系数,当24h降水量 $R \geq 1$ mm时, $C_r = 0$; $R < 1$ mm时, $C_r = 1$ 。 C_s 为积雪修正系数,24h积雪深度 $h > 0$ cm时, $C_s = 0$; $h = 0$ cm时, $C_s = 1$ 。 v 为14时风速(m/s)。 t 为14时气温($^{\circ}\text{C}$)。 H_R 为14时相对湿度(%)。 m 为连续无降水日数(d), $f(m)$ 为基于不同干旱综合指数等级时无降水日数对应的函数值。

表 1 森林火险气象等级划分和预报服务用语

火险等级	$I_{FFD}(B区)$	名称	预报服务用语
一级	[4, 46)	低火险	森林火险气象等级低
二级	[46, 58)	较低火险	森林火险气象等级较低
三级	[58, 70)	较高火险	森林火险气象等级较高,须加强防范
四级	[70, 73)	高火险	森林火险气象等级高,林区须加强火源管理
五级	[73, 100)	极高火险	森林火险气象等级极高,严禁一切林内用火

根据式(1),当 $R \geq 1$ mm 时, $C_r = 0$ 或 $h > 0$ cm 时, $C_s = 0$, 则 $I_{FFD} = 0$, 森林火险消除, 本文定义其为森林火险气象等级为零级。

当森林火险气象等级达到三级及以上时, 表明森林火险气象等级较高, 需要加强防范。在具备人工增雨作业条件时, 以降低森林火险气象等级为目的实施增雨作业。

1.2.2 地面人工增雨典型作业过程筛选 当人工增雨后, 若不能使森林火险气象等级迅速从较高等级变为零级, 则说明作业后 24 h 降雨量达不到 1 mm 以上, 人工增雨的效果不显著, 人工增雨

对降低森林火险气象等级没有贡献或贡献较低。当一日中有多次增雨作业时, 计为一次作业; 当多个地点同时作业, 计为一次作业。

2011—2020 年共 10 a 祁连山西、中和东段区域地面人工增雨作业和降水数据见表 2。人工增雨作业日数共有 471 d, 其中祁连山西、中、东段分别为 195、72、204 d, 人工增雨后祁连山无降水的日数为 60 d(占总日数的 12.7%), 有降水但降水量 < 1 mm 的日数为 45 d(占总日数的 9.6%), 降水量 ≥ 1 mm 的日数为 366 d(占总日数的 77.7%)。

表 2 祁连山增雨作业日数和对应的 24 h 降水情况统计

林区	祁连山整体	祁连山西段	祁连山中段	祁连山东段
人工增雨日数/d	471	195	72	204
最大降水量/mm	88.0	88.0	48.4	37.5
最小降水量/mm	0.0	0.0	0.5	0.0
平均降水量/mm	9.4	4.3	12.1	11.7
无降水日数/d	60	54	0	6
$0 < \text{降水量} < 1$ mm 日数/d	45	42	3	0
降水量 ≥ 1 mm 日数/d	366	99	69	198

根据地面作业位置、时间、作业方位角、仰角、用弹量等信息, 对增雨作业个例进行作业合理性分析。根据作业仰角和方位角确定有效射程范围, 同时叠加作业时段的 C 波段天气雷达回波, 判定目标云系是否在地面火箭的有效射程以内; 同时利用雷达回波及距离最近的探空站数据等分析云的宏观、微观结构, 分析作业目标云体的催化作业条件。根据地面火箭作业点的经纬度在雷达探测图上准确定位作业位置, 结合作业时间、作业方位角和仰角, 判定地面火箭作业是否合理。对

于合理的地面火箭作业, 筛选为人工增雨典型作业过程。在 471 次人工增雨过程中, 有 105 次因森林火险气象等级开展了作业, 作业后火险等级没有降低, 占 22.3%; 作业后森林火险气象等级有下降但没有降到零级的共 217 次, 占 46.1%; 作业后森林火险气象等级降到零级的共 149 次, 占 31.6%。本文主要分析人工增雨作业后森林火险气象等级降为零级, 即森林火险解除的 149 次典型作业过程, 深入分析人工增雨对森林火险解除的影响。对其进行统计, 其中祁连山西段

30次,祁连山中段27次,祁连山东段92次。

2 祁连山林区气候特征

利用祁连山15个气象站1991—2020年常规地面气象观测资料,对祁连山东段、祁连山中段、祁连山西段3个区域各林区近30a的降水、湿度、温度、风等要素变化的特征行分析,为林区地面人影作业提供气候背景场。祁连山区各林区30a年均气温在4.1~6.3℃之间,平均气温月变

化呈单峰型(图2),各林区6—8月气温最高,在18.4~20.3℃之间,12月—翌年2月气温最低,在-9.1~-4.8℃之间。其中,祁连山西段年均气温最高(约6.3℃),祁连山东段次高(约5.5℃),祁连山中段最低(约4.1℃)。祁连山林区年平均气温为5.3℃,防火期(每年11月—翌年5月)平均气温为0.3℃。

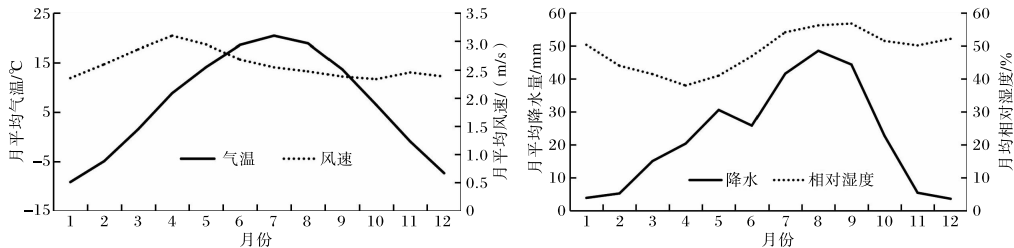


图2 1991—2020年祁连山林区平均气温、风速、降水量、相对湿度月变化

祁连山林区近30a平均风速月分布不均(图2),3—5月最大,9—10月、12月—翌年1月最小。其中,祁连山中段平均风速最小(约2.2 m/s),祁连山东段最大(约3.2 m/s),祁连山西段次之(约2.3 m/s)。祁连山林区年平均风速约为2.6 m/s,防火期(11月—翌年5月)平均风速为2.7 m/s。

祁连山林区降水量月变化大致为双峰型(图2),7—9月降水量最多,最大降水量出现在8月,为48.6 mm,11月—翌年2月降水量明显减少。其中,祁连山中段年降水量最大(约309.5 mm),祁连山东段次之(约299.5 mm),祁连山西段降水量最小(约134.6 mm)。祁连山林区年平均降水量约为247.9 mm,防火期(每年11月—翌年5月)平均月降水量为12.0 mm。

祁连山林区总体相对湿度月变化为双谷型(图2),相对湿度在3—5月降至最低,平均相对湿度为40%,10—12月为次波谷,7—9月最高,平均相对湿度为56%。祁连山林区相对湿度由东向西逐渐减小,其中,祁连山东段平均相对湿度最大(约52%),祁连山中段次之(约51%),祁连山西段平均相对湿度最小(约46%),祁连山各林区年平均相对湿度为50%。防火期(每年11月至翌年5月)平均相对湿度为45%。

3 地面增雨作业的影响

3.1 各月作业效果对比

为了分析祁连山区各林区地面人工增雨(雪)作业对降低森林火险气象等级的作用,统计各月地面人工增雨(雪)作业前森林火险气象等级为一级至五级,作业后森林火险气象等级降为零级的作业次数(图3)。人工增雨作业前等级为一级的作业次数共13次,主要在9月—翌年3月;作业前等级为二级的作业次数共36次,主要在1—2月、5月、8—11月;作业前等级为三级的有53次,主要在11月—翌年4月和6—7月;作业前等级为四级的有21次,主要在4—6月和9—10月;作业前等级为五级的有26次,主要在4—7月。

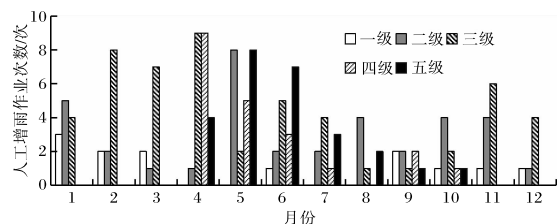


图3 1991—2020年祁连山人工增雨作业后火险降为零级的作业次数

祁连山高海拔地区常年积雪,12月—翌年3月积雪多,气温低,森林火险气象等级也相应较低。7—9月祁连山受西南季风和东亚季风的影响

响,自然降水充沛(图2),森林火险等级总体较低。4—6月和10—11月自然降水相对较少,森林火险气象等级偏高。由图3可知,4—6月增雨作业后火险等级的降为零级的作业次数为64次,10—11月为20次,表明人工增雨(雪)与自然降水共同降低了森林火险气象等级。分析全年人工增雨(雪)对降低森林火险气象等级的贡献,统计三级、四级和五级降低为零级的次数,则三级以上火险等级次数达到100次,占149次典型作业过程的67.1%。

3.2 各林区作业效果对比

统计祁连山区各林区地面人工增雨作业使各级森林火险降为零级的次数及占比(表3),发现祁连山区各林区地面人工增雨作业前森林火险气象等级在二级及以下的49次,占总样本数的32.9%,三级的有53次,占35.6%,四级及以上的共47次,占31.5%。

祁连山西段地面人工增雨作业前森林火险气象等级在三级及以上的占63.3%,其中五级占30%,四级占10%,三级占23.3%;祁连山中段森林火险气象等级在三级及以上的占85.2%,其中五级占7.4%,四级占25.9%,三级占51.9%;祁连山东段森林火险气象等级在三级及以上的过程占63.1%,其中五级占16.3%,四级占12%,三级占34.8%。

总体来说,祁连山西段自然降水量最少,五级极高火险等级在各级火险中的作业次数最多,占比30%,为各林区中最大。中段自然降水量最多,五级极高火险等级仅占7.4%,但需要加强防范三级和四级森林火险(占78%)。祁连山东段林区的火险等级次数占比除一级外,其余介于西段和中段之间,但人工增雨的次数和频率最高。在自然降水和人工增雨作业的共同影响下,祁连山东段林区森林火险气象等级的降低效果最显著。

表3 祁连山区各林区地面人工增雨作业后森林火险气象等级为零级的火险等级次数及所占比例

林区	一级		二级		三级		四级		五级	
	次数 /次	占比 /%	次数 /次	占比 /%	次数 /次	占比 /%	次数 /次	占比 /%	次数 /次	占比 /%
西段	2	6.7	9	30.0	7	23.3	3	10.0	9	30.0
中段	2	7.4	2	7.4	14	51.9	7	25.9	2	7.4
东段	9	9.8	25	27.2	32	34.8	11	12.0	15	16.3

4 结论与讨论

(1)祁连山各林区年均气温在4.1~6.3℃之间,每年7—9月降水量最多,每年11月—翌年2月降水量最少,年平均相对湿度为50%,各林区近30a月平均风速在3—5月最大,9—10月、12月—翌年1月最小。

(2)2011—2020年共10a祁连山西、中和东段区域共进行人工增雨作业的日数分别为195、72和204d,人工增雨后祁连山无降水的日数为60d(占总日数的12.7%),有降水但降水量≤1mm的日数为45d(占总日数的9.6%),降水量>1mm的日数为366d(占总日数的77.7%)。在471次人工增雨过程中,22.3%的作业后森林火险气象等级没有降低;46.1%的作业后森林火

险气象等级有下降但没有降到零级;31.6%的作业后森林火险气象等级降到零级的共149次,其中有67.1%三级以上森林火险气象等级降到零级。

(3)祁连山西段自然降水量最少,五级森林火险气象等级的次数最多,占比达到30%。祁连山中段林区自然降水量最大,三级和四级的森林火险气象等级次数占78%。祁连山东段的森林火险气象等级除一级外,其余介于西段和中段,一级和二级森林火险气象等级占到37%。

(4)在自然降水和人工增雨作业的共同影响下,77.7%森林火险气象等级降低,其中27.3%由三级以上高风险森林火险气象等级降为零级,解除火险预警。各林区中以祁连山东段林区森林

火险气象等级的降低效果最显著。如何区分人工增雨和自然降水的量值, 定量化评估人工增雨对降低森林火险的贡献率需要进一步研究。

参考文献:

- [1] 苏立娟, 何友均, 陈绍志. 1950—2010年中国森林火灾时空特征及风险分析[J]. 林业科学, 2015, 51(1): 88-96.
- [2] 车克钧, 王金叶, 党显荣, 等. 祁连山北坡森林火险等级指标的研究[J]. 森林防火, 1994(1): 8-10.
- [3] 蔡恒明, 魏航, 陈圣东. 大兴安岭地区森林火灾和气象因子相关性研究[J]. 林业科技, 2021, 46(1): 49-51.
- [4] 许东蓓, 蒲肃, 黄玉霞, 等. 甘肃省林区气候特征及其与森林火险的关系[J]. 西北农林科技大学学报(自然科学版), 2008, 36(2): 97-103.
- [5] 赵鹏武, 葛晨赫, 王嘉夫等. 内蒙古大兴安岭森林火险等级评价与区划研究[J]. 西南林业大学学报(自然科学版), 2021, 41(2): 151-158.
- [6] 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.
- [7] 张馨月, 苏晓慧. 四川省林火次数与气象因子的相关性研究[J]. 西北林学院学报, 2017, 32(3): 176-180.
- [8] 中国气象局, 全国气象防灾减灾标准化技术委员会. 森林火险气象等级: GB/T 36743—2018[S]. 北京: 中国标准出版社, 2018: 1-5.
- [9] 赵璠, 舒立福, 杨征夺, 等. 西南林区森林火灾火险预报模型评价研究[J]. 林业机械与木工设备, 2017, 45(5): 15-21.
- [10] 郭海峰, 禹伟. 湖南省森林火险天气等级预测模型研究[J]. 中南林业科技大学学报, 2016, 36(12): 44-47.
- [11] 张金勇, 吴树森, 李冰, 等. 基于卡尔曼滤波方法对漠河森林火险等级预报的研究[J]. 科技视界, 2015(5): 346-347.
- [12] 曹姗姗. 小尺度森林火险等级预报模型研究[D]. 北京: 中国林业科学研究院, 2014.
- [13] 覃先林, 张子辉, 李增元, 等. 国家级森林火险等级预报方法研究[J]. 遥感技术与应用, 2008(5): 500-504.
- [14] 石霖晟杰. 连续化森林火险天气等级预报模型研究[J]. 农业与技术, 2021, 41(6): 93-95.
- [15] 程鹏, 罗汉, 刘琴, 等. 基于地基GPS的祁连山大气可降水量特征[J]. 气象, 2021, 47(9): 1135-1145.
- [16] 牛若芸, 翟盘茂, 孙明华. 森林火险气象指数及其构建方法回顾[J]. 气象, 2006(12): 3-9.
- [17] 孙智辉, 李生袖, 苏长年, 等. 延安市森林火险分级预报方法[J]. 气象, 2005(6): 80-82+97.
- [18] 蒋年冲, 吴林林, 曾光平. 抗旱型火箭人工增雨效果检验方法初步研究[J]. 气象, 2006(8): 54-58.
- [19] 孔祥伟, 杨建才, 李红, 等. 河西走廊西部干旱区一次极端暴雨天气的水汽特征分析[J]. 气象, 2021, 47(4): 412-423.
- [20] 梁谷, 田显, 李燕. 人工增雨效果评估中历史降水量代表性的探讨[J]. 陕西气象, 2012(4): 16-18.
- [21] 孙智辉, 苏长年, 尹盟毅. 延安市森林火险天气分级预报方法[J]. 陕西气象, 2004(5): 10-12.
- [22] 程鹏, 陈祺, 蒋友严, 等. 河西走廊石羊河流域近10年人工增雨效果检验评估[J]. 高原气象, 2021, 40(4): 866-874.
- [23] 王瑞英, 周文韬, 宁婧, 等. 基于低频振荡的西南雨季降水的延伸期预报[J]. 陕西气象, 2022(6): 34-41.
- [24] 卢珊, 王百朋, 张宏芳, 等. 基于中国降水格点数据集的陕西夏季不同等级降水时空变化特征分析[J]. 陕西气象, 2022(2): 18-23.
- [25] 何金梅, 闫昕昉, 李晓琴. 白龙江流域甘肃段2015—2018年汛期降水特征[J]. 陕西气象, 2021(3): 29-35.
- [26] 薛小宁. 黄土高原一次对流性大暴雨成因分析[J]. 陕西气象, 2022(5): 7-14.
- [27] 石光普, 王银花, 刘世华, 等. 甘肃靖远“8·10”致洪短时强降水成因分析[J]. 陕西气象, 2022(4): 30-36.