

DOI: 10.5846/stxb202012103155

常畅,常禹,胡远满,布仁仓,张恒.基于文献计量的森林和草原可燃物含水率研究.生态学报,2022,42(4):1655-1663.

基于文献计量的森林和草原可燃物含水率研究

常 畅^{1,2}, 常 禹^{1,*}, 胡远满¹, 布仁仓¹, 张 恒³

1 中国科学院沈阳应用生态研究所中国科学院森林生态与管理重点实验室, 沈阳 110016

2 中国科学院大学, 北京 100049

3 内蒙古农业大学林学院, 呼和浩特 010019

摘要:伴随着全球气候变化,世界范围内森林、草原火灾频发,在破坏自然生态系统的同时,也带来一系列的经济损失,甚至危及生命安全。探究森林和草原可燃物含水率能够预测火的发生和蔓延,从而规避火灾风险。以 Web of Science 数据库核心合集中相关文献为数据源,基于 CiteSpace 5.7.R2 对获取的题录信息进行计量分析。研究表明:(1)研究历程可分成 3 个阶段,缓慢发展阶段、快速发展阶段和波动增长阶段;这一方向是生态学、地理学、环境科学等多学科的交叉领域,具有一定的空间维度和实际应用性;美国的研究实力在世界各国中最强,我国则有较大的进步空间。(2)森林和草原可燃物含水率相关研究在研究方法上以遥感反演为主流研究方法,气候变化是最常见的研究视角,植被或枯落物的可燃性是研究的核心内容,美国西部是研究最多的区域,火灾科学是最主要的应用领域。(3)当前的研究前沿主要有 3 个方面,大尺度的全球火险预测研究、对可燃物可燃性的多维度分析、基于 MODIS 反演可燃物含水率。

关键词:森林;草原;可燃物含水率;文献计量;CiteSpace

森林生态系统具有涵养水源、调节气候、保持水土等生态功能,在维护生态平衡中具有重要作用。草地生态系统是我国陆地上面积最大的生态系统,在发展畜牧业、保护生物多样性、固持水土等方面占有重要地位^[1]。森林火灾、草原火灾对生态系统破坏力强,是最普遍的干扰方式之一。2019 年年初至同年 8 月,巴西亚境内森林火灾发生次数超过 7 万起^[2],多发生在雨林边缘,湿度相对较低且人类活动较为频繁的地区。2019 年 9 月,澳大利亚山火肆虐^[3],至 2020 年 7 月底,澳大利亚丛林大火导致 30 亿动物死亡,经济损失更加无法估量。2020 年 3 月 30 日,我国四川凉山西昌发生森林大火,因空气湿度极低,气温较高,火势蔓延迅猛,造成 18 名消防员和 1 名林场职工牺牲的惨剧。2018 年数据显示,全球草原面积达 32.73 亿公顷,草原所提供的生产力不容小觑,草原火灾将威胁牧民的生命财产安全以及牲畜生存,影响畜牧业发展,带来巨大的经济损失。

可燃物是火灾发生的物质基础和重要载体,可燃物含水率的高低程度决定了火的发生和蔓延^[4]。可燃物与其所处的环境进行水汽交换是影响可燃物含水率变化的主要因素,含水率的多少与其所处的自然环境的干湿程度和气温高低相关^[5-6]。森林、草原火灾危害巨大,探究可燃物含水率能够发掘林火/草原火点燃的难易程度和蔓延速率,预测林火、草原火行为^[7],防患于未然,降低火灾发生的可能性,减少经济损失,为生产生活提供便利。当前国内外有关可燃物含水率的研究已基本成熟,Ertugrul^[8]等模拟了正常储存的卡拉布里亚松(*Pinus brutia* Ten)地表可燃物的水分含量与土耳其穆格拉省的天气条件(即温度、相对湿度和风速)的关系。Lee 等^[9]比较了基于 3 种 10 h 可燃物含水率预测模型的性能。胡海清^[7]等分析了防火期和坡向对大兴

基金项目:国家重点研发计划战略性国际科技创新合作重点专项(2018YFE0207800);国家自然科学基金项目(31971483)

收稿日期:2020-12-10; **网络出版日期:**2021-11-04

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: changyu@iae.ac.cn

安岭地区南瓮河混交林地表可燃物含水率预测模型精度的影响。于宏洲^[10]等应用时滞平衡含水率法及气象要素回归法,分析了大兴安岭地区阳坡上部落叶松林可燃物含水率的动态变化。国内外可燃物含水率研究大多探究含水率的影响因素和预测评估模型,亦有关于可燃物含水率研究的综述性文章,但是,这些综述一般是基于对已有研究的总结,鲜有利用文献计量的方法理清研究领域研究进展、发展脉络的文章。

文献计量是一种常见的定量分析方法,它基于数学、统计学原理,以可获取文献的诸多特征为研究对象,探究其分布结构、数量关系和变化规律等^[11],通过知识图谱将文献计量可视化结果展示出来^[12],并以此为依据分析有关研究的发展特征和规律,是一种成熟的文献分析和信息挖掘方法^[13]。CiteSpace 文献计量分析软件由美国德雷赛尔大学陈超美博士设计开发^[14-15],用于文献信息的计量与可视化,在诸多领域中被广泛使用^[16-17]。因此,本文以 CiteSpace 5.7.R2 为辅助手段,探究当前国际上关于森林和草原可燃物含水率的研究进展,旨在理清当前相关研究的主要方向,寻求新的突破,从而促进森林和草原可燃物含水率研究的未来发展,更好地预测火行为,增进人类福祉。

1 数据来源与研究方法

1.1 数据来源

研究基于 WEB OF SCIENCE 数据库核心合集,检索主题中同时包含“fuel moisture”和“forest”,以及同时包含“fuel moisture”和“grassland”的文献,输入检索式 $TS = ((\text{fuel moisture}) \text{ AND } (\text{forest}))$,记为#1, $TS = ((\text{fuel moisture}) \text{ AND } (\text{grassland}))$,记为#2,在 WEB OF SCIENCE 中组配两个检索式检索到的结果,记为#1OR#2,由于 web of science 核心合集所收录文献最早为 1980 年,因此检索的时间范围是 1980 至 2020 年 10 月,剔除无效、重复的文献,共计检索到文章 1298 篇。

1.2 研究方法

可视化软件 CiteSpace 能够清晰准确地解读某一知识领域的发展趋势、研究前沿、研究热点等信息。目前比较常见的可视化有 CiteSpace, Bibexcel, Sati, VOSviewer 等, CiteSpace 因其可视化效果好,功能全面,布局合理,在众学科领域中被学者们广泛使用^[18-19]。以此 1298 篇有关森林/草原可燃物含水率研究的文章为研究对象,导出文章题录信息,再基于 web of science 内的统计数据结合 Excel 对文章数量进行统计,基于 Java 环境下的 CiteSpace 5.7.R2 进行学科领域分析、研究力量分析、对文章关键词根据时间序列进行分析,以及根据引文的聚类分析和突现分析。

2 结果与分析

2.1 文献基本特征分析

2.1.1 文献数量变化规律分析

根据检索到的 1298 篇有关森林/草原可燃物含水率文章的出版年份绘制出发文数量变化图(图 1)。根据图 1 的发文数量,可以将研究的发展历程分为 3 个阶段:1980—2000 年为缓慢发展阶段,年发文数量少,增长缓慢,增长率浮动较大,20 世纪末,相关研究大多处于起步阶段,技术手段落后,国际合作交流较少,导致文献数量较少。2001—2010 年为快速发展阶段,这一时期增长率趋于平缓,除个别年份小幅下降外,大部分年份处于增长态势,21 世纪以来网络通讯发展完善,信息数据全球共享,全球卫星遥感事业取得长足发展,这些都为研究提供了极大的支持。2011 至今为波动增长阶段,这一时期发文数量整体上波动较大,2016 年和 2019 年为负增长率,由于统计时间在 2020 年中叶,因此 2020 文献数量不具有代表性。2010 年 7 月俄罗斯多地发生森林大火,同年 9 月美国科罗拉多州发生森林大火,2013 年美国亚利桑那州森林大火,因此推测特大火灾的发生是导致次年研究数量大量增加的原因。

2.1.2 学科领域

在 WEB OF SCIENCE 数据库核心合集中,每篇文章会涉及一个或多个学科类别的学科标签加以显示,得

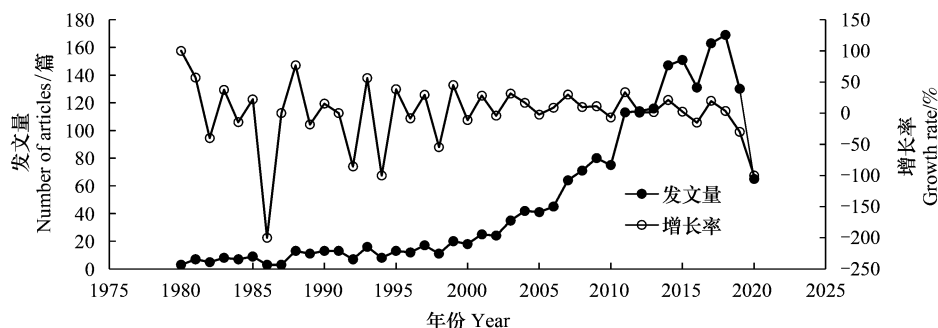


图1 森林/草原可燃物含水率研究发文数量变化

Fig.1 Quantitative change of the research on moisture content of forest/grassland fuels

出学科领域的分类图(图2),图中带有玫粉色圈层的节点代表了该学科突现性。由图2可知,在森林/草原可燃物含水率的研究中,Forestry(林学),Environmental science and ecology(环境科学与生态学),Environmental science(环境科学),Ecology(生态学),Remote sensing(遥感),Engineering(工程学),Meteorology and atmospheric science(气象和大气科学),Energy and Fuels(能源与燃料),Geosciences multidisciplinary(地理科学多学科),Geology(地质学),Agriculture(农学)等学科是其涉及得的主要研究领域。其中林学所占的数量最多,说明对于森林可燃物含水率的研究居多,这是由于森林火灾强大的破坏性和频发性使这类研究数量居多。在分析过程中得知,环境科学这一学科的中心性最高,达到0.43,说明研究森林/草原可燃物含水率这一研究方向主要致力于环境研究,为提高人类赖以生存的地球环境而服务。这一方向是一个综合了林学、生态学、环境科学、地理科学、遥感等学科的多学科交叉领域,与地理科学和气象大气科学的学科交叉,体现对含水率的研究不只是考虑小范围的区域生态而是更具有空间维度,与能源燃料和工程学的交叉体现了研究向实际应用的迈进。

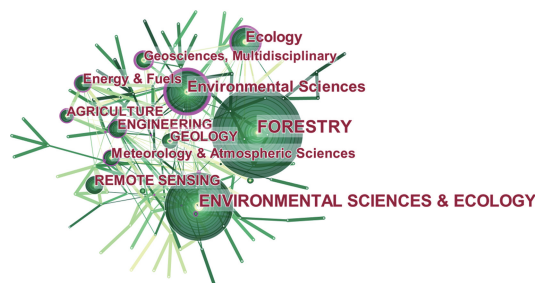


图2 森林/草原可燃物含水率研究学科领域网络图

Fig.2 Subject netview of the research on moisture content of forest/grassland fuels

2.1.3 研究力量分析

利用 CiteSpace 5.7.R2,对文献来源国家(Country)进行分析,将发文数量大于30的国家标签加以显示,共13个国家,得出国际合作关系图(图3),得出13个国家科研实力信息表(表1)。

结合表1和图3可知,(1)在有关森林/草原可燃物含水率相关研究中,美国的研究实力在世界各国中居于领先地位,相关文献中由美国作者发表或合作发表的数量达到496次,文献首次发表年份最早,远超居第二位的澳大利亚180次,h-指数和被引次数也远超各国,说明美国科研实力最高,其中心性也最高,代表美国与世界各国有着较为紧密的合作关系。(2)我国相关研究起步较晚,国际文献最早出现在2004年,按照文献数

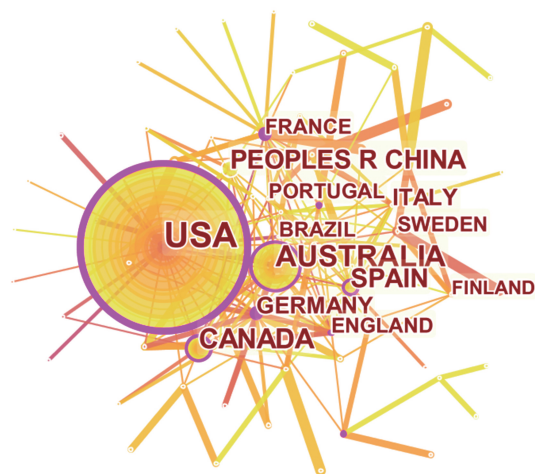


图3 国际合作关系网络图

Fig.3 International partnership netview

量,我国位居世界第五,但我国的 h-指数和被引次数均低于文献数量少于我国的两个国家,这一现象表明我国在这一领域的科研实力有待加强,在提高研究数量的同时更要保证研究质量。(3)位居前 3 位的国家都是国土面积较大且森林面积广阔的发达国家,此外,在前 13 位的国家中,只有中国和巴西两个发展中国家,这与两个国家拥有大面积森林和草原的自然地理特征有关,由此说明,森林/草原可燃物含水率研究是各国专家学者为解决实际问题而产生,有较强的地理相关性。

表 1 科研实力信息表
Table 1 Information sheet of scientific research strength

位次 Number	出现频次 Frequency	中心性 * Centrality	国家 Country	首次发表年份 Year of first publication	h-指数 h-index	被引次数 Cited frequency
1	496	0.37	美国 USA	1991	84	23934
2	180	0.17	澳大利亚 AUSTRALIA	1996	42	6731
3	155	0.10	加拿大 CANADA	1992	43	6676
4	113	0.15	西班牙 SPAIN	1999	34	3498
5	93	0.09	中华人民共和国 PEOPLES R CHINA	2004	19	1186
6	47	0.08	意大利 ITALY	2001	48	1580
7	47	0.23	德国 GERMANY	2001	21	2023
8	45	0.31	法国 FRANCE	1998	17	1551
9	44	0.02	葡萄牙 PORTUGAL	2000	16	961
10	44	0.06	巴西 BRAZIL	1997	13	1073
11	39	0.15	英格兰 ENGLAND	2001	22	2850
12	35	0.07	瑞典 SWEDEN	1992	13	555
13	31	0.03	芬兰 FINLAND	1998	13	559

中心性 *, 全称中介中心性, 指一个节点担任其他两个节点之间最短的桥梁的次数, 一个节点充当中介的次数越多, 其中介中心性就越大

2.2 研究进展分析

2.2.1 关键词分析

关键词是每一篇学术论文的组成部分, 是对文章的高度概括和凝练^[20]。同时, 关键词又代表着不同研究领域的研究焦点^[21]。因此, 透过关键词往往能够理清某一研究领域的发展脉络与趋势, 进而整体把握该领域的研究现状, 有助于进一步展开深入研究。本研究提取了检索到的 1298 篇森林/草原可燃物含水率研究的关键词, 导入 CiteSpace 5.7.R2 中, 文献筛选范围从 1990—2020 年, 设置两年为一个时间切片, 将出现频次大于 30 的关键词标签加以显示, 对共现情况进行可视化, 并选择时区视图加以呈现如图 4。

如图 4, 图中节点和线条不同的颜色代表不同的时间切片, 颜色越深, 年代越久。每个圆形节点代表一个关键词, 节点越大代表其出现频次越多, 节点所在位置代表其最早出现的时间, 关键词节点年轮的颜色由中心向四周逐渐变浅, 某一层越厚, 说明这一关键词在该颜色所代表的时间切片中出现次数越多; 节点间的连线代表两个关键词共同出现在同一篇文献中的事件, 线条颜色代表两个关键词第一次出现在同一篇文章中的年份, 线条越粗, 共现次数越多^[12]。

结合图 4 按照时间脉络, 可以归纳出森林/草原可燃物含水率研究的大致发展特点。(1) 20 世纪 90 年代的关键词主要是 forest(森林)、fire(火)、climate change(气候变化)、biomass(生物量)、vegetation(植被)等, 此时的研究大多是探究森林地区的可燃物含水率与气象条件如温度和湿度、气候变化、区域生物量等一些变量的内在联系, 或火灾现象对生态系统造成的影响。California(加利福尼亚)作为关键词出现, 说明当时开始出现研究以州/省域为研究区域。Fire regime(管理体制)一词在 20 世纪 90 年代末出现, 这表明可燃物含水率研究不再停留于理论层面, 开始面向实际应用。(2) 21 世纪开始出现 model(模型)、modi(程序)、index(指数)、remote sensing(遥感)、fire severity(火烈度)、fire danger(火险)等词, 说明这一时期伴随着计算机的普及、

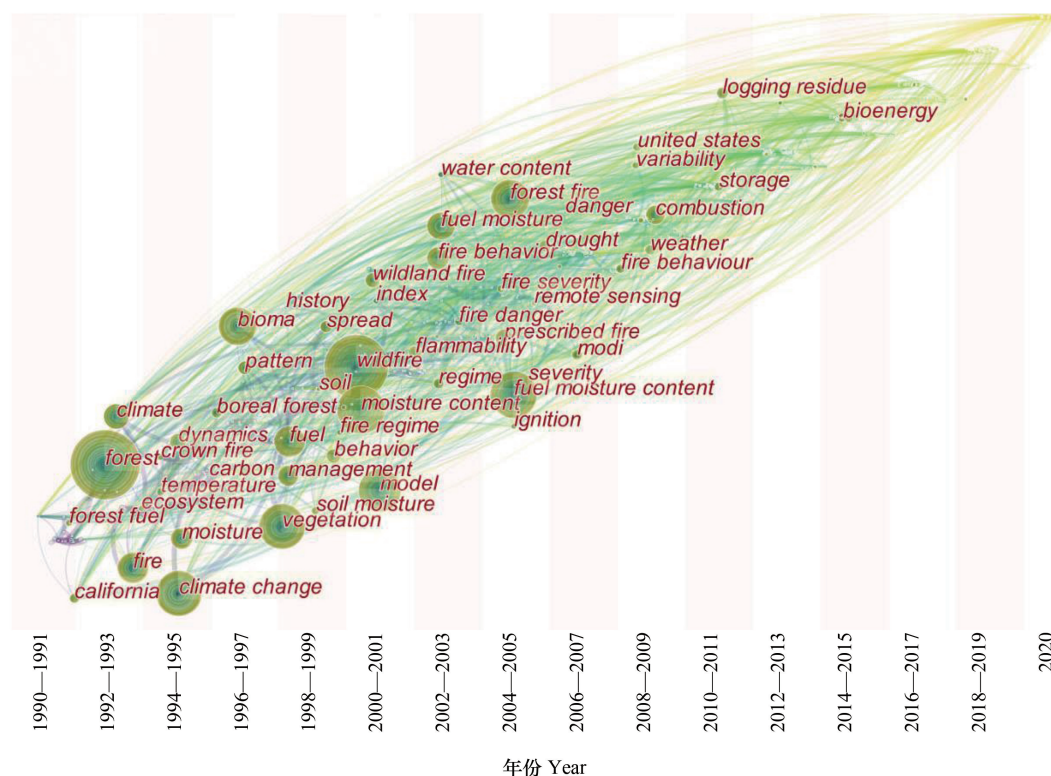


图4 森林/草原可燃物含水率关键词网络图(时区视图)

Fig.4 Keywords netview of the research on moisture content of forest/grassland fuels (Timezone)

由于1980—1989年的文献时间过早,题录信息不完善,导致无法在图中显示

全球卫星事业的发展,研究工具得以改进,人们对于可燃物含水率的估测以及火灾的量化评估开始稳步推进。(3)2008年左右出现了United States(美国),标志着研究区域已经从州/省域扩大到国家层面。(4)2010年以后 logging residue(采伐残渣)一词的出现,体现了森林可燃物含水率的研究中考虑了更加多样的可燃物种类,将人类活动影响加以考虑,研究更加客观、精确、符合实地情况。

2.2.2 聚类分析

每一篇文献都会引用数篇同领域的,或与文章内容相近的文献,频繁的共同引用表明它们具有共同相关的研究主题,因此探究文章的共被引情况,共引分析可以根据内容的相似程度将相关参考文献分组聚类,从而分析这一领域的研究热点^[22]。Citespace的共被引分析是基于检索到的文章及其引用文章进行分析,得出文献共被引网络可视图之后,对所呈现的点进行聚类,从施引文献的标题、关键词或摘要中提取聚类命名术语。本文对有关森林/草原可燃物含水率的1298篇文章进行聚类,两年为一个切片,得出13个群集,群集名称选取LLR(Log-likelihood Ratio)算法计算得到,采用时间线视图(Timeline)加以显示,每个节点代表一篇文献,节点间连线代表其共同被引用的关系,得出引文聚类情况网络图(图5)。

聚类后得出 Q 值(Modularity 聚类模块值)和 S 值(Silhouette)聚类平均轮廓值,一般认为 $Q>0.3$ 时,聚类结构显著, $S>0.5$ 聚类是合理的, $S>0.7$,聚类是可信的。本次聚类中 Q 值为0.8489,代表聚类结构显著; S 值为0.9318,说明聚类可信度高。群集标签从0—5依次为#0 radiative transfer modeling(辐射传输建模),#1 assessing crown fire potential(树冠火潜力评估),#2 shoot flammability(枝条可燃性),#3 western USA(美国西部),#4 fire science(火灾科学),#5 predicting temperate ecosystem sensitivity(生态系统敏感性预测),#6 inter-hemispheric synchrony(两半球同步),#7 fire risk assessment(火灾风险评估),#8 dead fuel(死可燃物),#10 wildfire consumption(野火消耗),#11 forest floor duff(森林半腐层),#12 beetle attack(甲虫攻击),#13 dominant

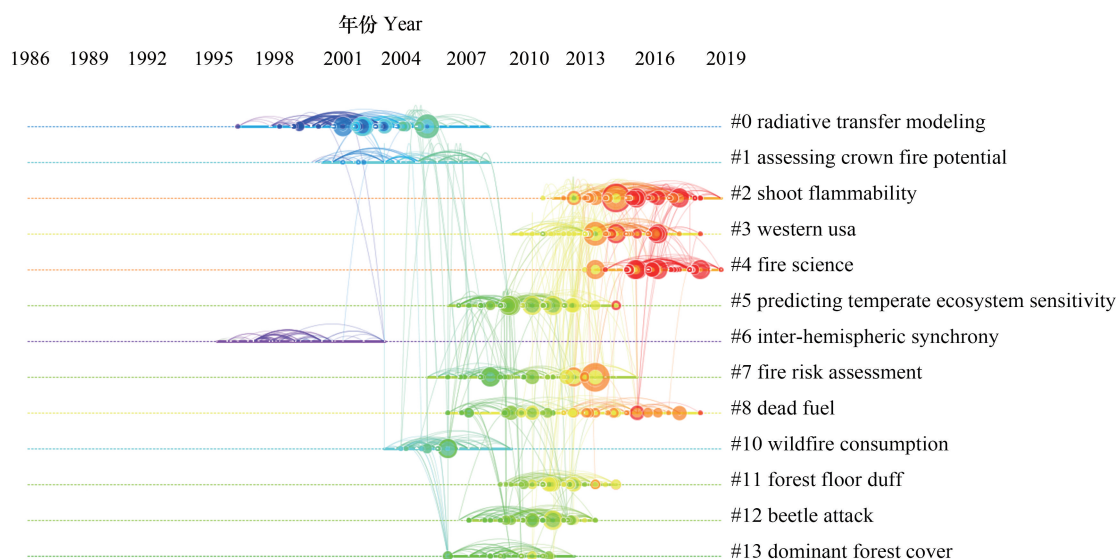


图5 引文聚类情况网络图(时间线视图)

Fig.5 Netview of clusters of reference (Timeline)

forest cover(主要森林覆盖)。群集序号越小,所包含的文献数量越多。由于群集标签是从影响力最强的文章题目中提取,导致标签不能准确地概括群集中的所有文章内容,因此本文选取了前5个群集对文章进行具体分析,剩余群集中包含的文献由于数量少,代表性不强,因此不做具体分析。

群集#0所包含的文章主题相似,主要是以遥感技术为依托,评估叶片含水量,从而对森林火灾进行监测^[23]。Emilio^[24]基于 AVHRR 数据的多时相分析,提出了一种提取地中海地区草地和灌木物种燃料含水率的方法。Kötz^[25]通过对针叶林上的成像光谱仪数据的采集,获取植被冠层结构和叶面含水量的空间分布信息,用于评估森林火灾对树木的影响。这一群集的文献平均发表年份在2002年,由于20世纪90年代国际遥感技术发展成熟,影像分辨率得到较大提升,使遥感影像在各个领域中广泛使用,导致这一时期通过遥感影像评估植被冠层含水率的方法模型的相关研究大量涌向。

群集#1中的文章以评估形式为主^[26],探究森林火灾的发生与不同变量之间的联系,其中对于气候变化与火灾间的关系研究较为常见。如 Flannigan^[27]分析了加拿大火灾天气指数(FWI)与加拿大生态区域历史燃烧面积之间关系,并结合加拿大和哈德利中心 GCMs 的产品,预测未来的燃烧面积。Cochrane^[28]探究了亚马逊地区火灾与土地利用、气候变化间的协同作用。Dymond^[29]提出了一种基于卫星火灾探测(hotspot)数据的火险分级系统校准的方法,探究西印度尼西亚和马来西亚森林火灾问题与加拿大森林火灾天气指标体系的两个组成部分之间的关系。这部分文章多以辩证思维展开探究,对已有的方法展开评估或验证其准确程度。

群集#2包含的文章以植被或其凋落物的可燃性为主要研究对象^[30]。研究可燃物含水率的目的是为了探究可燃物燃烧的可能性,从而对燃烧行为加以利用或规避,因此可以说,植被或凋落物的可燃性是森林/草原可燃物含水率的研究的核心部分。专家学者以不同的视角、方法分析不同植被的可燃性。Essaghi^[31]以可燃物含水率的两个相关参数——点火时间和火焰高度作为可燃性的指数,对摩洛哥森林燃料的可燃性进行评估。Alam^[32]分析了新西兰的43中本地多年生植物的叶片和茎部的可燃性数据,解耦了茎部可燃性和叶片可燃性间的联系。Cawson^[33]分析了潮湿气候条件下桉树林可燃性的驱动因素,结合了从21位火灾专家技术中获取的启发,建立了湿润桉树林区可燃性的概念模型。

群集#3软件生成的标签为 western USA,主要是由于这一群集的文章中大部分以美国西部为研究区,通过上文分析,美国在这一方向的研究中一直处于遥遥领先的地位,因此美国学者也往往会选择本土作为自己的研究区。美国西部地形高大的山地、高原为主,科迪勒拉山系高度大、宽度广,包括海岸山脉、内华达山脉和落

基山脉,森林覆盖面积大,物种多样,生态环境复杂,是森林火灾的频发地区。几十年来美国西部野火的频繁出现,人们逐渐发现火灾与气候之间的联系,Abatzoglou^[34]探究了美国西部八个地理区域协调中心的地区气候与大型火灾面积的关系。Gabrielle^[35]探究了科学地管理野火对内华达山脉植被变化的影响、植被变化对当地水文的影响以及植被变化对森林火灾燃烧特征和生态系统弹性的影响。

群集#4 所包含的文章大多以火灾科学为主题,或最终目的致力于火灾的防控。这些文章发表时间较晚,平均年份为 2016 年,是在可燃物含水率研究发展到一定时期必然兴起的产物,经过了早期的对可燃物的可燃性研究,以及对燃烧过后的生态恢复研究,消防任务显得尤为重要。因此,Collins^[36]使用陆地卫星图像生成准确的火灾严重程度地图,这对于记录火灾状态、为火灾后管理反应以及在研究应用设定优先级具有重要意义。Chuvieco^[37]总结了卫星遥感在消防科学与火灾管理上的贡献。全球气候变暖、人类活动增强的大背景下,森林/草原消防工作的重要性日益凸显,消防工作需要科学化系统化的管理才能将不必要的火灾防患于未然,一旦火灾出现,可以以最迅速地扑灭,将损失降到最低,因此有关消防科学的研究应运而生。

综上,森林/草原可燃物含水率相关研究在研究方法上以遥感反演为主流研究方法,气候变化是最常见的研究视角,植被或枯落物的可燃性是研究的核心内容,美国西部是研究最多的区域,消防科学是最主要的应用领域。

2.3 研究前沿分析

为了了解当前森林/草原可燃物含水率的研究前沿,本文利用 CiteSpace 5.7.R2 分析文献的突现性,突现性是指某一篇文章在某一时期被引次数陡然增加,被引次数越多,说明在这一段时期里相关研究大量出现,因此近期的突现性一定程度上可以代表研究前沿。本文筛选出突现性最强的 25 篇文献,并选取其中突现阶段距今最近的 7 篇文献,如表 2(每个条块代表一年,较粗条块代表突现时期),将其作为当前的研究前沿。

表 2 森林/草原可燃物含水率研究近期突现文献

Table 2 Burst reference of the research on moisture content of forest/grassland fuels recently

文献信息 Reference information	发表年份 Published year	突现性 Burst	突现开始时间 Start time	突现结束时间 End time	1990—2020 年 From 1990 to 2020
Matthews S, 2014, INT J WILDLAND FIRE, V23, P78, DOI ^[38]	2014	10.32	2015	2020	
Caccamo G, 2012, INT J WILDLAND FIRE, V21, P257, DOI ^[39]	2012	9.15	2015	2017	
Jolly WM, 2015, NAT COMMUN, V6, P0, DOI ^[40]	2015	6.61	2016	2020	
de Dios VR, 2015, AGR FOREST METEOROL, V203, P64, DOI ^[41]	2015	9.27	2017	2020	
Pausas JG, 2017, J ECOL, V105, P289, DOI ^[42]	2017	7.33	2017	2020	
Nolan RH, 2016, GEOPHYS RES LETT, V43, P4229, DOI ^[43]	2016	9.58	2018	2020	
Yebra M, 2018, REMOTE SENS ENVIRON, V212, P260, DOI ^[44]	2018	8.61	2018	2020	

结合表 2 以及相关文献总结出当前的研究前沿为以下 3 个方面:

1) 大尺度的全球火险预测研究。全球气候变化的大环境推进大尺度的全球火险预测研究,大尺度全球火险预测研究反之将丰富全球气候变化对人类影响的研究,对全球范围内人类共同应对气候变化提出新看法,推动全球可持续发展战略部署。相比于遥感影像等地面数据,气象数据往往更容易获取,因此大尺度研究通常以大量的气象数据加以分析佐证,结合气候模型进行分析^[40,43]。

2) 可燃物可燃性的多维度分析。可燃性是可燃物含水率研究的核心内容,早期研究大多集中在可燃物含水率预测模型的构建,或探究其与气象因子的关系,这些研究大多分析可燃物时空变化,进而实现火险的

预测目的。进一步剖析可燃性的属性,可将其划分为可燃性、热释放和火灾蔓延率 3 个维度^[42],用于分析燃烧产生的环境效应以及从空间上探究火灾蔓延态势,便于人们掌握不同尺度下可燃性的可变性,从而为进一步研究提供基础。

3) 基于 MODIS 反演可燃物含水率。随着遥感卫星技术的成熟发展,使得遥感影像愈加容易获取。MODIS 数据可免费获取,光谱范围广,更新频率高,在实时地球观测和应急处理方面(如森林和草原火灾监测和救灾)有较大的实用价值。因此利用 MODIS 数据反演地表可燃物含水率^[39,44]在近期成为研究热点,学者们的数据获取不再只局限于实地测量和利用气象数据进行模拟,而是利用 MODIS 数据反演后利用实测数据进行验证。遥感反演有着比气象模拟更准确,比实地测量覆盖面积更广、更加省时省力的优势。

3 结论

本文通过对森林/草原可燃物含水率相关文献进行计量分析,分析研究数量的增长态势、所涉及的研究领域、主要研究力量、研究进展与前沿,为未来学者对森林/草原可燃物含水率的深入研究提供借鉴。

从研究的基本特征上看,相关研究在可以分成 3 个研究阶段,缓慢发展阶段、快速发展阶段和波动增长阶段;这一方向综合了林学、生态学、环境科学、地理科学、遥感等学科具有一定的空间维度和实际应用性;美国的研究实力在世界各国中居于领先地位,我国相关研究起步较晚,且我国在未来的研究中要注重提高研究质量,可燃物含水率研究数量较多的国家往往有较大的森林面积。

从研究进展上看,伴随着科学技术的提高,信息获取难度大大降低,研究区面积逐渐扩大,由州域扩大到全国,进而扩大到全球范围;关于研究方法,20 世纪 90 年代相关研究主要以探究可燃物含水率与气象因子或其他环境条件之间的关系为主,实际应用研究也于 90 年代末期开始出现。21 世纪随着科技进步,研究工具得以改进,依赖于遥感影像、数学建模等方法大量出现,对于可燃物含水率的估测的准确性得以提升,火灾的量化评估开始稳步推进。整体上看,森林/草原可燃物含水率相关研究在研究方法上以遥感反演为主流研究方法,气候变化是最常见的研究视角,植被或枯落物的可燃性是研究的核心内容,美国西部是研究最多的区域,消防科学是最主要的应用领域。

总结出当前的研究前沿主要有 3 个方面,大尺度的全球火险预测研究、可燃物可燃性的多维度分析和基于 MODIS 反演可燃物含水率。与早期研究相比,当前的前沿在研究尺度上更广阔,在研究视角上更深入透彻,在研究数据上的精度更高,更准确。因此,未来我国在森林/草原可燃物含水率研究中,应注重对深度和广度的挖掘,利用遥感空间信息,增加对森林/草原可燃物含水率空间异质性的研究,形成对整体区域上的火险预测,注重研究的实用性。

参考文献 (References):

- [1] 谢高地, 张钰铨, 鲁春霞, 郑度, 成升魁. 中国自然草地生态系统服务价值. 自然资源学报, 2001, 16(1): 47-53.
- [2] 张凯. 亚马孙热带雨林发生森林大火. 生态经济, 2019, 35(10): 1-4.
- [3] 白夜, 武达, 石宽, 王博. 澳洲山火肆虐引发的思考. 中国应急管理, 2020, (1): 62-63.
- [4] 胡海清, 罗斯生, 罗碧珍, 苏漳文, 魏书精, 孙龙. 森林可燃物含水率及其预测模型研究进展. 世界林业研究, 2017, 30(3): 64-69.
- [5] Liu Y Q. Responses of dead forest fuel moisture to climate change. Ecohydrology, 2017, 10(2): e1760.
- [6] Anderson H E. Moisture diffusivity and response time in fine forest fuels. Canadian Journal of Forest Research, 1990, 20(3): 315-325.
- [7] 胡海清, 罗碧珍, 罗斯生, 孙龙. 大兴安岭南麓河谷落叶松-白桦混交林地表可燃物含水率. 生态学报, 2019, 38(5): 1314-1321.
- [8] Bilgili E, Coskuner K A, Usta Y, Goltas M. Modeling surface fuels moisture content in *Pinus brutia* stands. Journal of Forestry Research, 2018, 30(2): 577-587.
- [9] Lee H, Won M, Yoon S, Jang K. Estimation of 10-hour fuel moisture content using meteorological data: a model inter-comparison study. Forests, 2020, 11(9): 982.
- [10] 于宏洲, 金森, 邸雪颖. 以小时为步长的大兴安岭兴安落叶松林地表可燃物含水率预测模型. 应用生态学报, 2013, 24(6): 1565-1571.
- [11] 张玲玲, 巩杰, 张影. 基于文献计量分析的生态系统服务研究现状及热点. 生态学报, 2016, 36(18): 5967-5977.
- [12] 张灿灿, 孙才志. 基于 CiteSpace 的水足迹文献计量分析. 生态学报, 2018, 38(11): 4064-4076.
- [13] Shi Z J, Zhang J E, Wei H. Research progress on soil seed bank: a bibliometrics analysis. Sustainability, 2020, 12(12): 4888.

- [14] 曹永强, 刘明阳. 基于 CiteSpaceV 的国内生态工程研究文献可视化分析. 生态学报, 2019, 39(11): 4190-4199.
- [15] 侯剑华, 胡志刚. CiteSpace 软件应用研究的回顾与展望. 现代情报, 2013, 33(4): 99-103.
- [16] Goerlandt F, Li J, Reniers G. The landscape of risk communication research: a scientometric analysis. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 2020, 17(9): 3255.
- [17] 陈大明, 赵晓勤, 缪有刚, 毛开云, 熊燕. 全球冠状病毒研究态势分析及其启示. 中国临床医学, 2020, 27(1): 1-12.
- [18] 祝薇, 向雪琴, 侯丽朋, 王保盛, 唐立娜. 基于 CiteSpace 软件的生态风险知识图谱分析. 生态学报, 2018, 38(12): 4504-4515.
- [19] 赵翔, 贺桂珍. 基于 CiteSpace 的 DPSIR 研究回顾及展望. 生态学报, 2021(16): 1-14[2021-06-04]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.2031.Q.20210521.0859.006.html>.
- [20] 王耕, 常畅, 石永辉. 基于文献计量的自然资本研究现状及热点. 生态学报, 2019, 39(21): 8183-8192.
- [21] 易行, 白彩全, 梁龙武, 赵子聪, 宋伟轩, 张妍. 国土生态修复研究的演进脉络与前沿进展. 自然资源学报, 2020, 35(1): 37-52.
- [22] Wu J J, Jia D N, Wei Z Q, Xin D. Development trends and frontiers of ocean big data research based on CiteSpace. *Water*, 2020, 12(6): 1560.
- [23] Danson F M, Bowyer P. Estimating live fuel moisture content from remotely sensed reflectance. *Remote Sensing of Environment*, 2004, 92(3): 309-321.
- [24] Chuvieco E, Cocero D, Riaño D, Martín P, Martínez-Vega J, De La Riva J, Pérez F. Combining NDVI and surface temperature for the estimation of live fuel moisture content in forest fire danger rating. *Remote Sensing of Environment*, 2004, 92(3): 322-331.
- [25] Kötz B, Schaepman M, Morsdorf F, Bowyer P, Itten K, Allgöwer B. Radiative transfer modeling within a heterogeneous canopy for estimation of forest fire fuel properties. *Remote Sensing of Environment*, 2004, 92(3): 332-344.
- [26] Cruz M G, Alexander M E. Assessing crown fire potential in coniferous forests of western North America: a critique of current approaches and recent simulation studies. *International Journal of Wildland Fire*, 2010, 19(4): 377-398.
- [27] Flannigan M D, Logan K A, Amiro B D, Skinner W R, Stocks B J. Future area burned in Canada. *Climatic Change*, 2005, 72(1/2): 1-16.
- [28] Cochrane M A, Laurance W F. Synergisms among fire, land use, and climate change in the Amazon. *AMBIO: A Journal of the Human Environment*, 2008, 37(7/8): 522-527.
- [29] Dymond C C, Field R D, Roswintarti O, Guswanto. Using satellite fire detection to calibrate components of the fire weather index system in Malaysia and Indonesia. *Environmental Management*, 2005, 35(4): 426-440.
- [30] Babl E, Alexander H D, Siegert C M, Willis J L. Could canopy, bark, and leaf litter traits of encroaching non-oak species influence future flammability of upland oak forests? *Forest Ecology and Management*, 2020, 458: 117731.
- [31] Essaghi S, Hachmi M, Yessief M, Dehhaoui M, El Amarty F. Assessment of flammability of Moroccan forest fuels: new approach to estimate the flammability index. *Forests*, 2017, 8(11): 443.
- [32] Alam M A, Wyse S V, Buckley H L, Perry G L W, Sullivan J J, Mason N W H, Buxton R, Richardson S J, Curran T J. Shoot flammability is decoupled from leaf flammability, but controlled by leaf functional traits. *Journal of Ecology*, 2020, 108(2): 641-653.
- [33] Cawson J G, Hemming V, Ackland A, Anderson W, Bowman D, Bradstock R, Brown T P, Burton J, Cary G J, Duff T J, Filkov A I, Furlaud J M, Gazzard T, Kilinc M, Nyman P, Peacock R J, Ryan M, Sharples J J, Sheridan G J, Tolhurst K, Wells T, Zylstra P, Penman T D. Exploring the key drivers of forest flammability in wet eucalypt forests using expert-derived conceptual models. *Landscape Ecology*, 2020, 35(8): 1775-1798.
- [34] Abatzoglou J T, Kolden C A. Relationships between climate and macroscale area burned in the western United States. *International Journal of Wildland Fire*, 2013, 22(7): 1003-1020.
- [35] Boisramé G, Thompson S, Collins B, Stephens S. Managed wildfire effects on forest resilience and water in the Sierra Nevada. *Ecosystems*, 2016, 20(4): 717-732.
- [36] Collins L, McCarthy G, Mellor A, Newell G, Smith L. Training data requirements for fire severity mapping using Landsat imagery and random forest. *Remote Sensing of Environment*, 2020, 245: 111839.
- [37] Chuvieco E, Aguado I, Salas J, García M, Yebra M, Oliva P. Satellite remote sensing contributions to wildland fire science and management. *Current Forestry Reports*, 2020, 6(2): 81-96.
- [38] Matthews S. Dead fuel moisture research: 1991—2012. *International Journal of Wildland Fire*, 2014, 23(1): 78-92.
- [39] Caccamo G, Chisholm L A, Bradstock R A, Puotinen M L, Pippen B G. Monitoring live fuel moisture content of heathland, shrubland and sclerophyll forest in south-eastern Australia using MODIS data. *International Journal of Wildland Fire*, 2012, 21(3): 257-269.
- [40] Jolly W M, Cochrane M A, Freeborn P H, Holden Z A, Brown T J, Williamson G J, Bowman D M J S. Climate-induced variations in global wildfire danger from 1979 to 2013. *Nature Communications*, 2015, 6: 7537.
- [41] De Dios V R, Fellows A W, Nolan R H, Boer M M, Bradstock R A, Domingo F, Goulden M L. A semi-mechanistic model for predicting the moisture content of fine litter. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2015, 203: 64-73.
- [42] Pausas J G, Keeley J E, Schwilke D W. Flammability as an ecological and evolutionary driver. *Journal of Ecology*, 2017, 105(2): 289-297.
- [43] Nolan R H, Boer M M, De Dios V R, Caccamo G, Bradstock R A. Large-scale, dynamic transformations in fuel moisture drive wildfire activity across southeastern Australia. *Geophysical Research Letters*, 2016, 43(9): 4229-4238.
- [44] Yebra M, Quan X W, Riaño D, Larraondo P R, Van Dijk A I J M, Cary G J. A fuel moisture content and flammability monitoring methodology for continental Australia based on optical remote sensing. *Remote Sensing of Environment*, 2018, 212: 260-272.