

# 基于 VIIRS 的湖北省生物质燃烧时空格局演变及影响因素分析

何新洁<sup>1</sup> 李荣<sup>1, 2</sup> 张帆<sup>1, 2</sup> 王新生<sup>1, 2</sup> 陈良富<sup>3</sup> 陶明辉<sup>4</sup> 梅新<sup>1, 2</sup> 宋小青<sup>4</sup>

(1. 湖北大学资源环境学院区域开发与环境影响湖北省重点实验室,

湖北 武汉 430061; 2. 湖北大学湖北省农业遥感应应用工程技术研究中心,

湖北 武汉 430061; 3. 中国科学院空天信息创新研究院遥感科学国家重点实验

室, 北京 100101; 4. 中国地质大学地理与信息工程学院, 湖北 武汉 430074)

**【摘要】:** 生物质燃烧是影响大气环境的重要因素之一。湖北省作为我国农业大省, 农业资源十分丰富。客观全面的分析湖北省生物质燃烧情况, 能够为湖北省加强生物质燃烧管控和改善空气质量等提供重要依据。基于 VIIRS375m 热异常产品、土地利用数据及天地图高分辨率遥感影像, 提取了 2012~2019 年湖北省主要生物质燃烧类型火点, 揭示了生物质燃烧的时空格局演变过程及其影响因素。结果表明: (1) 火点主要集中在湖北中部地势较低的江汉平原地区, 以及东部低山丘陵地区。(2) 2012~2019 年湖北省火点数量在整体上呈现明显的下降趋势, 秸秆焚烧为湖北省生物质燃烧主要类型。其中, 秸秆焚烧火点和林地火点占比分别为 67.43% 和 32.57%。(3) 2015 年后, 秸秆焚烧火点数量显著下降, 且维持在较低水平, 治理成效显著。严格的禁烧政策下, 由于缺乏秸秆综合利用途径, 孝感市、随州市、武汉市和黄冈市等地出现严重反弹。因此, 除了进一步强化禁烧政策, 还需寻求更多秸秆综合利用的途径, 形成科学的长效的管控措施。(4) 秸秆焚烧的高峰期主要集中在收获季节, 但严格的管控措施下, 部分地区错峰焚烧导致春季和冬季出现多个分散的秸秆焚烧的小高峰期。林火主要发生在 2~4 月, 该时间段内春节和清明上坟烧纸是引起湖北省森林火灾的重要因素。(5) 秸秆焚烧火点在空间上分布范围呈现先扩大后缩小的形势; 天门市东部和孝感市接壤地区一直是火点密集区, 孝感市全域和武汉市北部秸秆焚烧热点区域呈较快速度扩展; 襄阳市以及位于江汉平原的荆州市、仙桃市、潜江市和天门市西部等地, 原先秸秆焚烧热点区域火点减少明显; 林火主要分布在湖北省北部和东部地区, 自 2016 年以来湖北省林火密度均处于较低水平。

**【关键词】:** VIIRS 生物质燃烧 火点 遥感 秸秆焚烧 时空变化

**【中图分类号】:** X51 **【文献标识码】:** A **【文章编号】:** 1004-8227(2022)07-1627-14

**作者简介:** 何新洁(1997~), 女, 硕士研究生, 主要研究方向为大气遥感研究. E-mail: 770447103@qq.com; 李荣 E-mail: rongli@hubu.edu.cn

**基金项目:** 国家自然科学基金面上项目(42171354); 湖北大学青年基金项目(201910804000002); 区域开发与环境影响湖北省重点实验室开放基金项目(2019(B)003); 湖北省技术创新专项重大项目(2018ABA078)

野外生物质燃烧是人类活动或自然现象引发的森林、草地、农作物残茬等植被露天燃烧现象<sup>[1,2]</sup>,其排放的大量固态与气态污染物,严重影响空气质量与全球气候变化<sup>[3,4]</sup>。已有研究表明,全球每年约 62%的有机碳与 27%的黑炭来自于生物质燃烧排放<sup>[5]</sup>。森林火灾产生的烟雾中含有大量 PM<sub>2.5</sub>(空气动力学直径小于 2.5 μm 的颗粒物),可引发或加重哮喘、慢性支气管炎、肺癌呼吸系统疾病<sup>[6,7]</sup>,并可通过吸收和散射太阳辐射改变地球的能量平衡,进而影响全球气候<sup>[8]</sup>。此外,农田秸秆焚烧排放大量一次与二次气溶胶颗粒物降低地区能见度,引发雾霾、影响空气质量,进而影响人类健康<sup>[7,9,10]</sup>。

尽管国家层面高度重视生物质燃烧并提出了严格的管控措施,但现阶段生物质燃烧仍然是空气污染的重要来源之一<sup>[11]</sup>。通过常规的人工巡检、瞭望塔监视和飞机监测虽然可精确监测生物质燃烧面积与燃烧火点个数,但费用高、效率低下,难以及时获取大范围的燃烧信息。20 世纪 80 年代以来,卫星遥感因观测范围广、时效性高等优点在全球火点监测中的应用大大加深了人类关于生物质燃烧活动的认知。早期美国 GOES(Geostationary Operational Environmental Satellite)卫星的 VAS(Visible Atmospheric Sounder)传感器,因具有每小时观测一次的较高时间分辨率,在动态监测大规模火灾事件上具有优势,Prins 等<sup>[12]</sup>利用 VAS 传感器数据分析了南美洲 1983~1991 年生物质燃烧的趋势,但由于空间分辨率较低(14km),对于小规模火灾事件监测效果不明显。NOAA(National Oceanic and Atmospheric Administration)系列气象卫星上搭载的传感器 AVHRR(Advanced Very High Resolution Radiometer),将空间分辨率提高到 1.1km,应用范围更广,PuRuiliang 等<sup>[13]</sup>基于 AVHRR 产品数据集,研究了北美洲 1989~2000 年北方森林和温带森林燃烧区域的分布情况;Manzo-DelgadoL 等<sup>[14]</sup>基于 AVHRR 传感器数据,建立了用于评估森林火灾风险的逻辑模型;但该传感器并非专门为火点监测设计,饱和温度较低,易受到各种因素的影响而误判火点。搭载在 Terra 和 Aqua 卫星上的 MODIS(Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer)传感器,其波段设计专门考虑了火点监测需求,不仅能够估算过火面积,并且可以实时探测火点位置和火点辐射功率(Fire Radiative Power,FRP)<sup>[15,16]</sup>,其反演的火点产品已经成为全球生物质燃烧监测和排放研究的重要手段<sup>[17,18]</sup>。

徐奔奔等<sup>[19]</sup>基于 MODIS 热异常产品,分析了主要农产区 2013 年~2017 年秸秆焚烧时空变化特征,并深入讨论了全国和区域禁烧政策对秸秆焚烧治理的影响。胡庆华等<sup>[20]</sup>基于 MODIS 卫星数据对黑龙江 2010~2017 年生物质燃烧火点时空分布特征进行了分析。张丽娟等<sup>[21]</sup>利用 MODIS 传感器数据对比分析了 2014 和 2015 年我国夏秋收季节的秸秆焚烧分布情况及发展趋势。尽管 MODIS 数据在监测大规模热异常方面表现突出,其较粗的空间分辨率(1km)对于小范围热异常现象的监测无法达到很好的效果,容易出现小火点遗漏的现象<sup>[22]</sup>。可见光红外成像辐射仪(Visible infrared Imaging Radiometer,VIIRS)是替代 MODIS 的下一代传感器,它进一步将空间分辨率提高到 375m/750m,相较于 MODIS 能够监测到更多小火点<sup>[23]</sup>,有利于进行更小区域尺度火点的探测。已有研究大多利用 MODIS 数据分析中国地区秸秆焚烧或者森林火灾等单类火点的时空格局特征,区域尺度的生物质燃烧研究多集中在东北等火点密集的省份,对生物质燃烧占有重要地位的华中地区研究甚少。湖北省位于华中地区,森林覆盖面积广,森林防火工作十分重要。同时,湖北省是我国重要的农产品生产区,水稻、油菜和小麦等农作物每年收获后会有大量秸秆焚烧,排放出大气污染物引发空气质量问题日益受到关注<sup>[24]</sup>。

杨占婷等<sup>[25]</sup>利用气象卫星和站点环境监测等资料,从特征和成因方面对 2012 年 6 月 11 日和 6 月 15 日发生在鄂中东部的两次严重灰霾天气进行了综合分析,发现两次灰霾天气是由北方冬小麦主产区秸秆集中焚烧产生的污染物输送引起的;周悦等<sup>[26]</sup>利用地面站点的气象数据、污染物浓度和火点资料,分析了 2014 年 6 月湖北省中东部地区一次重度霾天气的成因,结果表明,导致此次霾天气的主要原因是安徽省北部大面积秸秆焚烧形成的污染气团经气流输送影响湖北天气;Shen 等<sup>[27]</sup>利用 MODIS 数据及环境监测站点数据分析了湖北省 2014~2016 年 NO<sub>x</sub>(氮氧化物)的排放特征,研究发现 10 月和 1 至 4 月的 NO<sub>x</sub>排放高峰期与秋收焚烧作物残茬以及春播前秸秆燃烧有关;Zhu 等<sup>[28]</sup>基于 MODIS 火点数据、Himawari-8 卫星的 AOD(气溶胶光学厚度)数据以及空气质量监测数据分析了生物质燃烧对湖北省空气质量的影响,发现生物质燃烧是导致当地空气质量恶化的关键因素,其贡献率超过 41%。上述学者通过结合空气监测站点数据探讨了生物质燃烧对湖北省环境的影响,进一步证实了生物质燃烧排放大量污染物,降低空气质量,也为后续研究积累了宝贵经验。

本研究基于 VIIRS375m 热异常产品数据集(VNP14IMG),提取了湖北省 2012~2019 年的火点数据,并结合高分辨率土地覆盖类型数据,分析湖北省秸秆焚烧和森林火灾这两类主要生物质燃烧火点的时空分布特征与规律,为湖北省生物质燃烧监管和空

气质量治理提供科学依据。

## 1 研究区及数据

### 1.1 研究区概况

湖北省位于我国中部，长江中游，介于  $29^{\circ} \text{N} \sim 33^{\circ} \text{N}$ 、东经  $108^{\circ} \text{E} \sim 116^{\circ} \text{E}$  之间。图 1 为湖北省高程及地理位置分布，全省地势大致为东、西、北三面环山，中间低平，略呈向南敞开的的天盆盆地。在全省总面积积中，山地占 56%，丘陵占 24%，平原湖区占 20%。全省不仅森林覆盖面积大、树种较多。2019 年，全省粮食总产量 2724.98 万 t，连续 7 年稳定在 500 亿斤以上，油料产量 313.95 万 t。粮食作物和油料作物的大面积种植也增加了秸秆的产生。因此，加强湖北省生物质燃烧监测，对森林火灾防控、秸秆焚烧监测以及空气污染治理均具有重要意义。

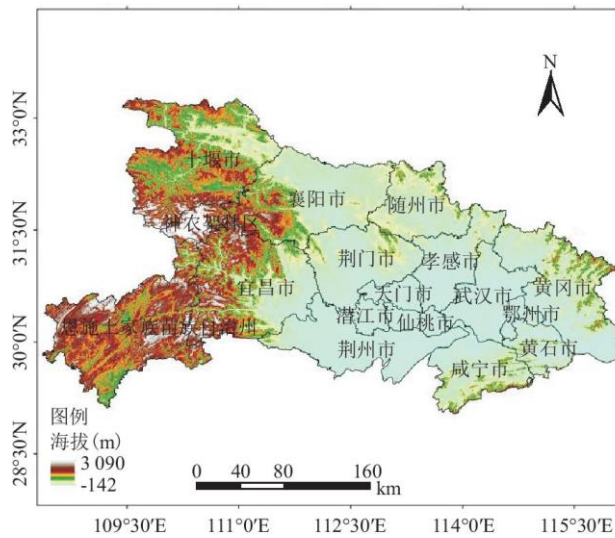


图 1 湖北省高程及地理位置分布

### 1.2 数据来源

#### 1.2.1 VIIRS 热异常数据

2012~2019 年湖北省生物质燃烧火点数据来源于 VIIRS375m 热异常产品数据集 (VNP14IMG) (<https://ladsweb.modaps.eosdis.nasa.gov/search>)。VIIRS 于 2011 年 10 月 28 日搭载在极地轨道 S~NPP 卫星上发射，轨道高度为 829km，扫描宽度为 3060km，分别于上午 1:30 和下午 1:30 穿过赤道，几乎每 12 个小时全球覆盖一次。VIIRS 传感器共有 22 个波段，光谱范围为  $0.412 \sim 12.01 \mu\text{m}$ ，包括 16 个中等分辨率波段 (M1~M16)，空间分辨率为 750m；5 个 375m 分辨率的多光谱分辨率波段 (I1~I5)；1 个低照度条件下的可见光 DNB 波段，空间分辨率为 750m。VIIRS 火点检测算法继承了 MODIS 的火点反演方法，通过采用多个光谱通道的上下文检测算法来识别火点和其他热异常现象<sup>[29]</sup>。由于中红外 I4 通道较低的饱和温度 (367k) 和较高的空间分辨率，导致受火点影响的像元容易饱和，因此 VNP14IMG 将饱和温度较高 (634k) 的 750m 空间分辨率的 M13 通道结合起来反演亚像元火点参数，包括火点位置、火点辐射功率、火点时间、火点像元 I4 通道和 I5 通道的亮温等。相较于 MODIS，VIIRS 可以提供更精细空间的火点信息。

云覆盖是光学卫星反演精度的一个重要限制因素，VIIRS 热异常产品在云覆盖时无法进行火点反演。对云量的长期观测显示，

除 2013 年外, 过去 10 年(2005~2015 年)的云层没有显著变化<sup>[30]</sup>。此外, 范思睿等<sup>[31]</sup>发现中国东南地区(包含湖北省)总云量月变化幅度最小, 月平均总云量常年维持在 65%左右, 标准差仅 4.09; 马茜蓉等<sup>[32]</sup>研究表明, 中国在 2001 年至 2015 年间的总云量年际变化整体呈下降趋势, 但减少趋势不显著, 平均每年减少仅为 0.15%; 游婷等<sup>[33]</sup>指出 2001~2017 年夏季白天中国中东部总云量整体呈减少趋势, 华中地区为弱减少趋势。因此, 目前国内外已有研究在利用卫星数据进行活动火点时空变化研究时, 认为卫星反演的活动火点数据在长时间序列尺度上是具有代表性的<sup>[17]</sup>, 但由此引起的误差仍然值得进一步观测和探讨。

### 1.2.2 土地利用分类数据

土地利用分类数据来源于国家基础地理信息中心 GlobeLand30(<http://www.globallandcover.com/>), GlobeLand30 数据由美国陆地资源卫星 (Landsat) 和中国环境减灾卫星 (HJ~1) 获取, 采用 WGS~84 坐标系, 空间分辨率为 30m。目前已有 2000、2010 和 2020 三个年份的分类数据, 其中 Globe Land 30V2010 和 V2020 产品的精度分别为 83.50%和 85.72%, 其土地利用类型主要包括耕地、林地、草地、灌木地、湿地、水体、苔原、人造地表、裸地、冰川和永久积雪等 10 个类型, 对应代码分别为 10、20、30、40、50、60、70、80、90、100<sup>[34]</sup>。考虑到土地利用状态变化缓慢, 本研究将火点数据叠加距离最近的年份的土地覆盖类型数据, 以提取火点燃烧类型。2012~2015 年火点数据和 2016~2019 年的火点数据分别叠加到 2010 和 2020 年的土地利用分类数据, 以获取相应年份的生物质燃烧类型火点。

### 1.3 数据处理流程

本研究主要的数据处理流程(图 2): (1) 获取 VIIRS 的 375m 分辨率热异常火点数据 (VNP14IMG) 并进行数据预处理: VNP14IMG 同时提供白天和晚上的热异常点, 包括林火、草原火、火山热异常、农田火点、燃煤电厂及异常噪声点等各种热异常点。2020 年湖北省中部江汉平原地区土地覆盖类型主要是耕地, 周边山地主要是森林, 草地较少(图 3), 本研究主要以农田秸秆焚烧和林火数据的提取和分析为主。根据 VNP14IMG 产品的质量参数, 筛选反演精度较高的热异常像元的经纬度、时间及对应 FRP 等信息。(2) 将 2012~2019 年内提取出来的湖北省高精度热异常点数据与土地利用数据进行叠加分析, 分别保留下垫面为农田和森林的两类热异常点作为农田秸秆焚烧火点和森林火灾火点, 剔除其他类型热异常点。(3) 将初步提取出来的两类火点数据与天地图高分辨率遥感进行叠加, 进行进一步确认, 剔除由于土地利用分类数据误差所带来的噪声点以及类型误判的火点数据, 得到高精度的火点类型数据。(4) 根据火点位置和个数计算火点密度, 并结合行政边界等信息, 统计分析秸秆焚烧和林火现象发生的时空规律特征。

## 2 结果分析

### 2.1 2012~2019 年生物质燃烧时空分布特征

#### 2.1.1 空间分布特征

图 4 为 2012~2019 年期间湖北省农田秸秆焚烧火点与林火燃烧两类火点的总体分布情况, 2012~2019 年 VIIRS 在湖北省监测到生物质燃烧火点共约 55341 个, 总体特征为湖北省中部和东部地区分布密集, 西部较少。从地形方面分析, 火点主要分布在中部地势较低的江汉平原地区, 以及东部低山丘陵地区。中部地区地势低平, 温度适宜, 水资源丰富, 分布着较多的耕地, 火点主要来源于秸秆焚烧; 东部丘陵地带, 森林覆盖度较高, 火点主要来源于森林火灾。西部山区海拔较高, 空气稀薄, 温度较低, 耕地较少, 火点较少。

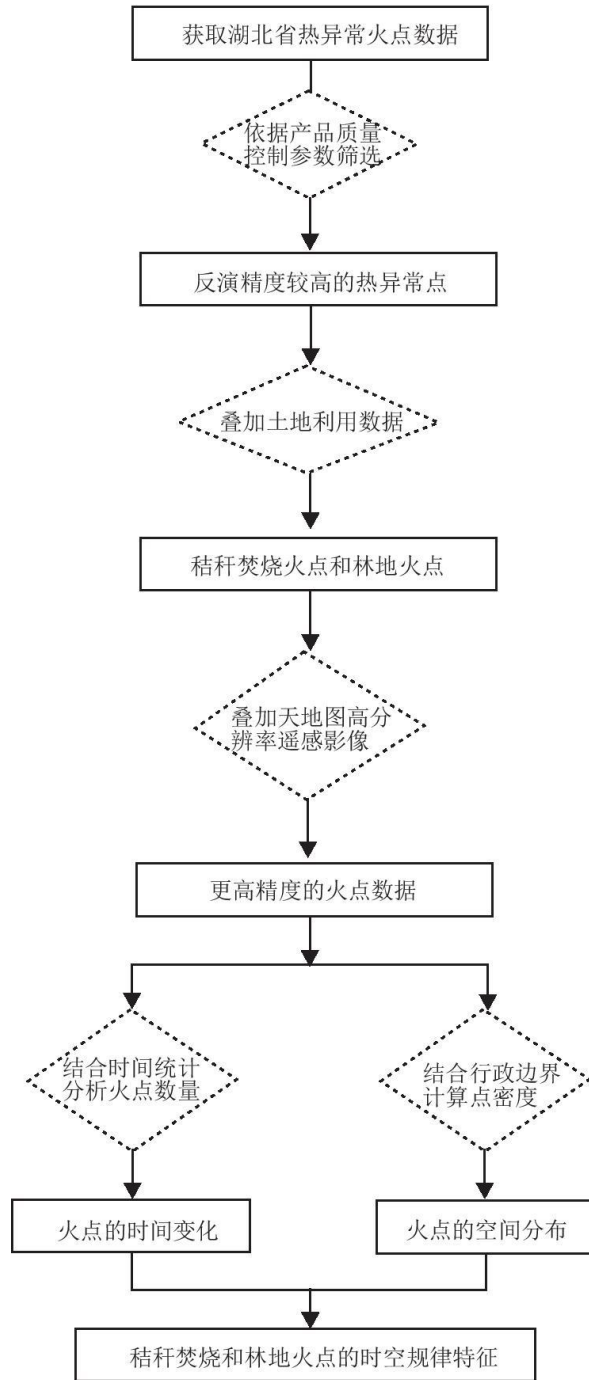


图2 数据处理流程

表1为2012~2019年湖北省各市火点数量统计情况，随州、孝感、黄冈等3市火点数量最多，分别为8437、7644和7424个，占总火点数的15.25%、13.81%和13.42%，均超过10%，以上3市火点占比超过湖北省总数的40%，为湖北省生物质燃烧重要区域。其次荆州、襄阳、黄石、武汉、荆门、咸宁等市生物质燃烧火点占湖北省总数的比例在5%~10%，分别为8.77%、8.06%、7.58%、6.88%、6.86%和5.55%。以上6市占全省总火点数的43.7%。由此可见，湖北省中部和东部城市的火点数量总和占据了湖北省火点总数的大部分，超过了86%，西部神农架林区火点数量仅4个。

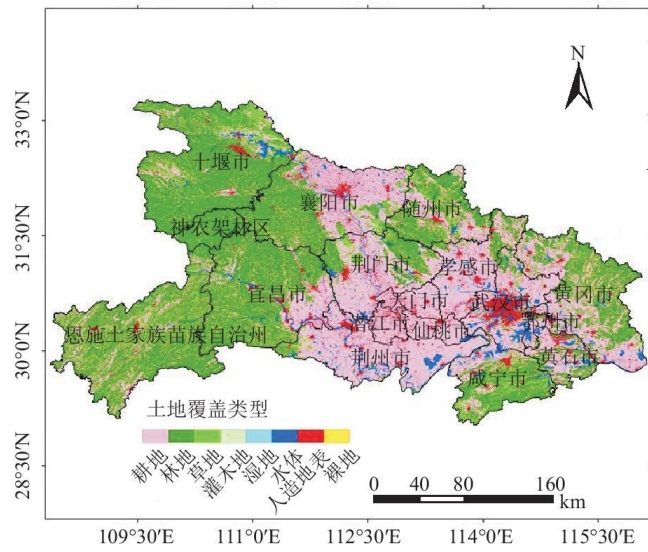


图3 湖北省2020年土地覆盖情况

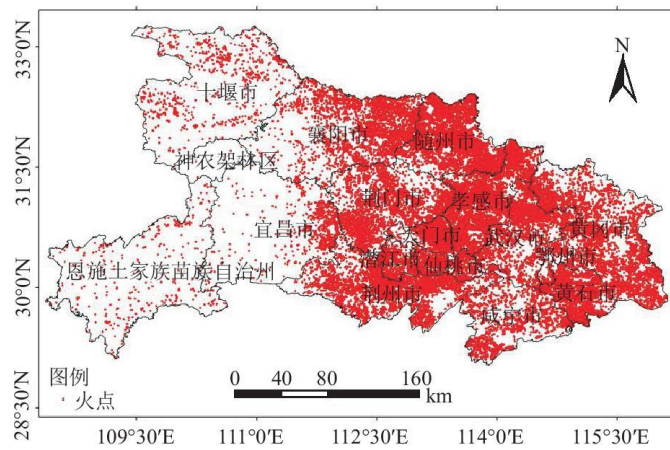


图4 湖北省2012~2019年生物质燃烧火点空间分布

表1 湖北省各市火点数量统计情况

市名称	火点数量	百分比(%)
鄂州市	535	0.97
恩施土家族苗族自治州	515	0.93
黄冈市	7424	13.42
黄石市	4194	7.58
荆门市	3795	6.86
荆州市	4856	8.77

潜江市	932	1.68
十堰市	1289	2.33
随州市	8437	15.25
天门市	2198	3.97
武汉市	3805	6.88
仙桃市	1076	1.94
咸宁市	3070	5.55
襄阳市	4461	8.06
孝感市	7644	13.81
宜昌市	1106	2.00
神农架林区	4	0.01

### 2.1.2 年际变化特征

图5显示了2012~2019年湖北省及各市生物质燃烧火点数量逐年变化情况。2012~2019年湖北省火点总数为55341个，整体上呈现明显的下降趋势。其中，2013与2014年火点数量保持在较高水平，2012~2013年火点数量突增，达到近八年数量峰值，火点数为13145个。为加强大气污染排放控制，改善空气质量，2013年6月我国发布《大气污染防治十条措施》(国十条)，2015年湖北省政府发布《湖北省人民政府办公厅关于加强农作物秸秆露天禁烧和综合利用工作的通知》等政策，促使了湖北省生物质燃烧火点由2014~2019年开始逐年减少。2015年火点数量较上一年明显下降，下降率达到58.92%；2018年火点数最少，为4045个，占总数的7.31%；但2016年和2019年火点数量有小幅度上升。2015年起全省火点总数均保持在大约4000~6000个之间。由此可见，近年来湖北省在秸秆禁烧和林火管控方面进行了严格的防控，并取得了较好的效果。

从地县级城市来看，鄂州市、潜江市、十堰市、天门市、仙桃市、宜昌市和恩施土家族苗族自治州的火点数量在近八年都处于较低水平，变化幅度小，2013年各市火点数达到最大值，且该年火点数量均位于500个以下，其中恩施土家族苗族自治州其余7年的火点数量均为两位数；神农架林区火点长期处于个位数。各市火点数量在2013年和2014年都处于较高水平，2015年后呈现出明显波动，且部分地区火点数量有所反弹。襄阳市和荆州市火点数量变化呈现较为相似的趋势，2014年火点数量开始下降，且近3年火点数都保持在300个以下；荆门市和咸宁市的火点数量在2016~2018这3年均处于相对较低的水平，但荆门市2019年较上一年有所反弹；黄冈市、黄石市、孝感和随州市的火点数量在2013年和2014年都处于较高水平，尤其是2014年黄冈市的火点数量达到了2323个，是湖北省近8年各市火点数量的最大值，且这4个市的火点数量2017~2019年期间火点数量均出现不同程度上升，除黄石(349个)外，其他3市到2019年火点数量仍保持在较高水平(>600个)，说明了这些地区生物质燃烧防控政策的松动；武汉市的火点数量在2012年处于较低水平，仅有256个，而2013年火点数量达到727个，较上年增长幅度明显，火点数量在2016~2018年均约为400个左右，2019年的火点数量增多，接近700个；孝感市火点数量在近8年在全省均都处于较高水平，且该市火点数量自2017年开始上升，2019年的火点数量在该年各市火点数量排名中位于第一，火点达到1223个。

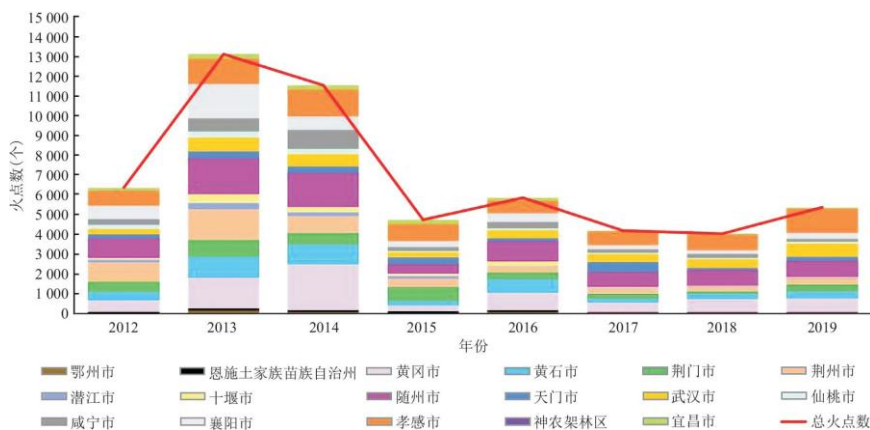


图 5 2012~2019 年湖北省及各市火点数量年际变化特征

## 2.2 不同类型生物质燃烧火点时空分布及影响因素

### 2.2.1 年际变化特征及影响因素分析

图6为秸秆焚烧和林地火点数量及对应FRP的年际变化。秸秆焚烧为湖北省生物质燃烧的主要类型，占总火点数量的67.43%。2012~2019年间，秸秆焚烧火点和林地火点数量都经历了先上升后下降的过程，但存在明显差异。秸秆焚烧火点数量于2013年达到峰值，火点数为8796个，2014年开始下降，2015年下降速度最快，2015年后火点个数保持在较低水平。为加强大气污染排放控制，改善空气质量，2013年6月我国发布《大气污染防治十条措施》(国十条)。为响应“国十条”，2014年，湖北省环保厅发布《湖北省大气污染防治行动计划实施情况考核办法(试行)实施细则》的通知，严查禁烧区内秸秆焚烧行为。这一系列措施导致2014年湖北省秸秆焚烧管控成效显著，较2013年下降28.74%。2015年，湖北省发布了《省人民政府办公厅关于加强农作物秸秆露天禁烧和综合利用工作的通知》提出对全省农作物秸秆实行露天禁烧并进行综合利用，该年秸秆焚烧火点数量快速下降，达到较低水平，火点个数为3915个。为加强执行“禁烧令”，2016年湖北省出台了《湖北省农作物秸秆露天禁烧和综合利用工作年度考核办法(试行)》，一系列措施促使秸秆焚烧火点2015~2018年间持续减少。但由于管控力度存在时紧时松，特别是秋收季节禁烧力度较大，而秋收过后管控松懈，导致错峰燃烧现象出现，2019年湖北省秸秆焚烧出现反弹<sup>[35,36]</sup>。秸秆焚烧的禁烧效果显示出了禁烧政策是影响秸秆焚烧的重要因素，因此需要进一步寻求秸秆综合利用措施，促使禁烧工作和综合利用工作协调发展，才能从根本上治理秸秆焚烧。

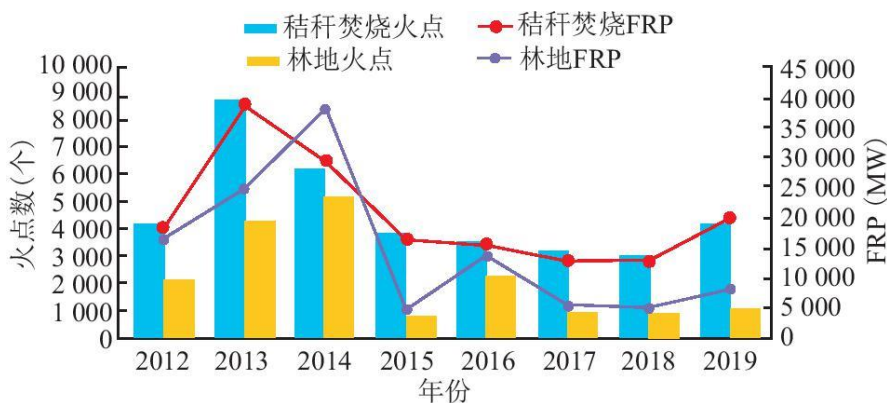


图 6 2012~2019 年湖北省秸秆焚烧、林地火点数量及其对应的 FRP 值

相比秸秆焚烧,林地火点占湖北省生物质燃烧总火点比例较少,约为32.7%,2012~2019年间,总体上呈现下降趋势,2014年达到峰值5297个。其后林火数量呈现波动状态,这种波动状态可能受到气象条件波段变化的影响。FRP参数可以表征火点燃烧的强度。本研究将2012~2019年间FRP的值进行统计,得到各年不同类型的火点对应的FRP参数的值,由年际变化来看,秸秆焚烧火点和林火FRP参数的值分别自2013和2014年之后都呈现不同程度的减少,与这两类火点数量的年际变化趋势一致。FRP参数值的大小受到火点数量与燃烧强度共同影响,一般情况下,火点数量越多,FRP的值就越高,2013、2015、2017、2018和2019年的统计数据中秸秆焚烧火点的数量明显多于林火的数量,这几年的秸秆焚烧火点对应的FRP参数的值也明显高于林火FRP参数的值;但是FRP参数的大小还受到火点燃烧强度的影响,统计数据显示,2012和2016年秸秆焚烧火点的数量多于林火的数量,然而它们所对应的FRP参数的值却相差很少,特别是2014年虽然秸秆焚烧火点的数量多于林火的数量,但是林火的FRP参数的值却高于秸秆焚烧火点,说明了这些年份森林火灾燃烧强度较大。

## 2.2.2 月际变化特征及影响因素分析

图7为2012~2019年湖北省秸秆焚烧火点的月际变化情况,湖北省秸秆焚烧的高峰期主要集中在秋季(9~11月),共16631个,占秸秆焚烧火点总量的44.56%;秸秆焚烧峰期月份为10月份,共9186个,占秸秆焚烧火点总量的24.61%;春季(3~5月)和冬季(12~次年2月)出现多个分散的秸秆焚烧的小高峰期。主要是因为秋季是晚稻、玉米和部分经济作物的成熟期,春末至夏中旬是早稻、油菜和冬小麦的成熟期,作物收获后会产生大量的秸秆<sup>[37]</sup>;加上湖北省冬季有较多的闲置农田,秸秆处理的胁迫感较低,农户依据自身情况来处理秸秆,因此形成了不同的秸秆焚烧小高峰期。

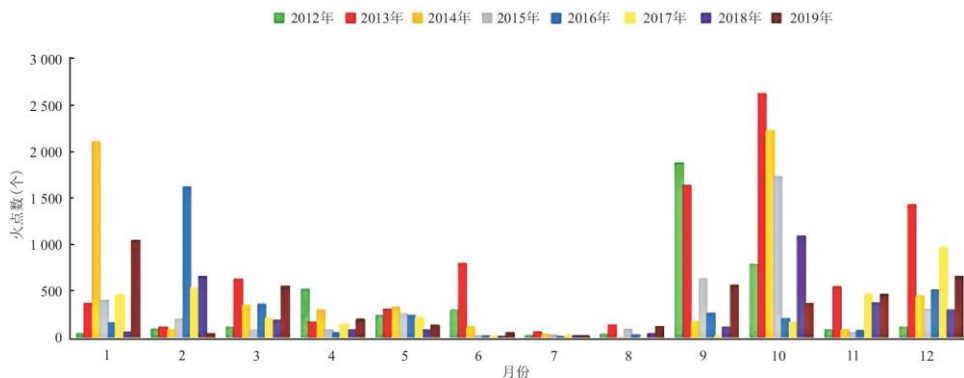


图7 2012~2019年湖北省秸秆焚烧火点月际变化情况

从2012~2019年湖北省林火的月际变化情况来看(图8),湖北省林火的发生具有明显的季节性,但与秸秆焚烧火点存在显著差异。林火主要集中在冬、春两季,尤其是2~4月,为林火发生的高峰期,共10042个,占林火总量的55.72%;5~9月份林火发生概率较低,共903个,占林火总量的5.01%。出现这样的季节分布特征,主要是由于湖北省冬季寒冷干燥,干枯枝叶易起火,加上大风多发,使得林火顺势蔓延;春季气温回升,人为用火不当,春耕烧荒整地、春游野炊用火和清明上坟烧纸都加大了林火发生的风险<sup>[38,39]</sup>。2014年的1月份是林火发生的高峰期,据湖北省气象局资料记载,1月全省平均气温6.1℃,总体偏高2.3℃,全省大部分最高气温、平均气温异常偏高;平均降水量22.1mm,总体偏少约4成,为2008年以来第6个持续偏少年。由于气温偏高、降水偏少,森林火险等级较高;加之春节将至,野外人员活动、节庆及祭祀用火徒增,使得森林火灾高发。

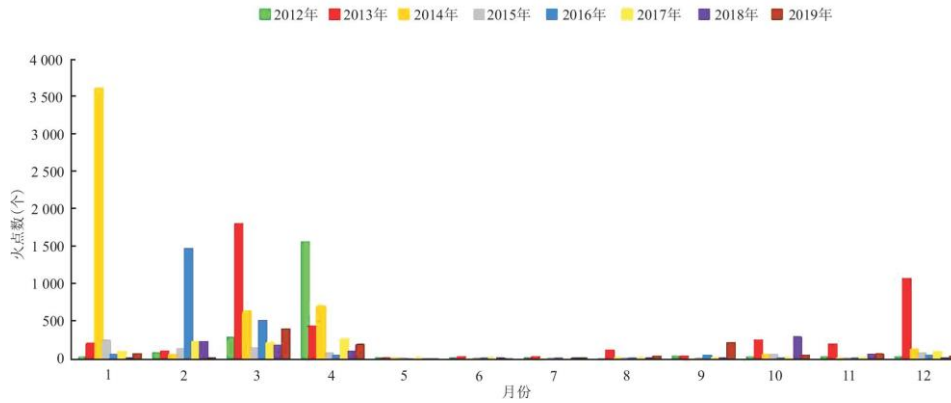


图 8 2012~2019 年湖北省林地火点月际变化情况

### 2.2.3 空间密度分布

本研究利用 ArcGIS 空间分析功能中点密度分析函数，分别计算秸秆焚烧火点与林火两类火点的点密度，来分析湖北省生物质燃烧的重点防控区域。以火点为输入要素，设定输出像元大小为 0.01，搜索半径为 0.1，分别得到了湖北省 2012 至 2019 年不同类型的火点点密度空间分布情况。

图 9 为湖北省 2012~2019 年秸秆焚烧火点密度空间分布情况。由图可知，湖北省存在多个秸秆焚烧热点，主要分布在荆州市、荆门市、天门市、孝感市、随州市、襄阳市北部和武汉市北部。相比 2012 年，2013 年全省秸秆焚烧火点数量较上年增加了 2.08 倍，且热点范围也明显扩大，并呈现由中部向东、西方向扩张趋势，火点增加区主要位于湖北省中部及东部部分地区；2014~2016 年秸秆焚烧火点密度逐步降低，但仍然比较分散，全省存在多个热点区域，尤其是天门~孝感接壤地区一直为秸秆焚烧热点区域。2014 年以后，襄阳、黄石、荆州、仙桃和潜江等地秸秆焚烧热点地区得到了较好控制，但宜昌东部到荆门西部，热点出现增加。2017 年秸秆焚烧火点的空间分布范围进一步缩小，但天门~孝感接壤地区始终为秸秆焚烧热点区域，且密度相比往年有增加趋势，呈现较为明显的集聚态势，说明该区域防控措施松散、不到位。2018 年后，该区域热点密度降低，但秸秆焚烧火点热点由湖北省中部向北部扩散，火点集中出现在孝感市北部、武汉市的北部和随州市的东部。整体来看，湖北省秸秆焚烧火点在空间上的分布范围呈现先扩大后缩小的形势；火点主要分布在中部和东部部分地区，随着时间推移，逐步向中部地区聚集；孝感市在近八年一直是火点密集区，武汉市的火点近两年有所增长；襄阳市、及江汉平原的潜江、仙桃、荆州市和天门西部秸秆焚烧热点减少明显。孝感、随州、武汉北部是近年来秸秆焚烧防控的重点区域。近年来，荆州、荆门等地除制定严格的秸秆焚烧管控措施外，还致力于疏通渠道，以用促禁，将禁烧工作和综合利用工作结合，取得了突出的治理成效。部分地区由于综合利用途径少，单纯依靠严格管控措施，使得秸秆露天禁烧现象有所反弹。

图 10 为湖北省 2012~2019 年林地火点点密度空间分布情况，林火热点区域与秸秆焚烧热点存在显著时空差异。2012~2016 年，林火发生热点区域主要位于湖北省北部和东部地区，对应到地级市，为随州北部、孝感北部、黄冈、黄石和咸宁等市。其中，2015 年湖北省林火数量明显减少，较上年减少了 84.22%，火点分散分布，没有明显集中区。相比往年，2017~2019 年林火数量大量减少，且热点大幅度降低，基本上不存在林火高发的热点地区。湖北省林火空间分布在总体上表现为高度聚集模式，主要分布在湖北省北部和东部地区，但 2016 年后，林火得到了较好的防控，基本上位于较低发生水平。

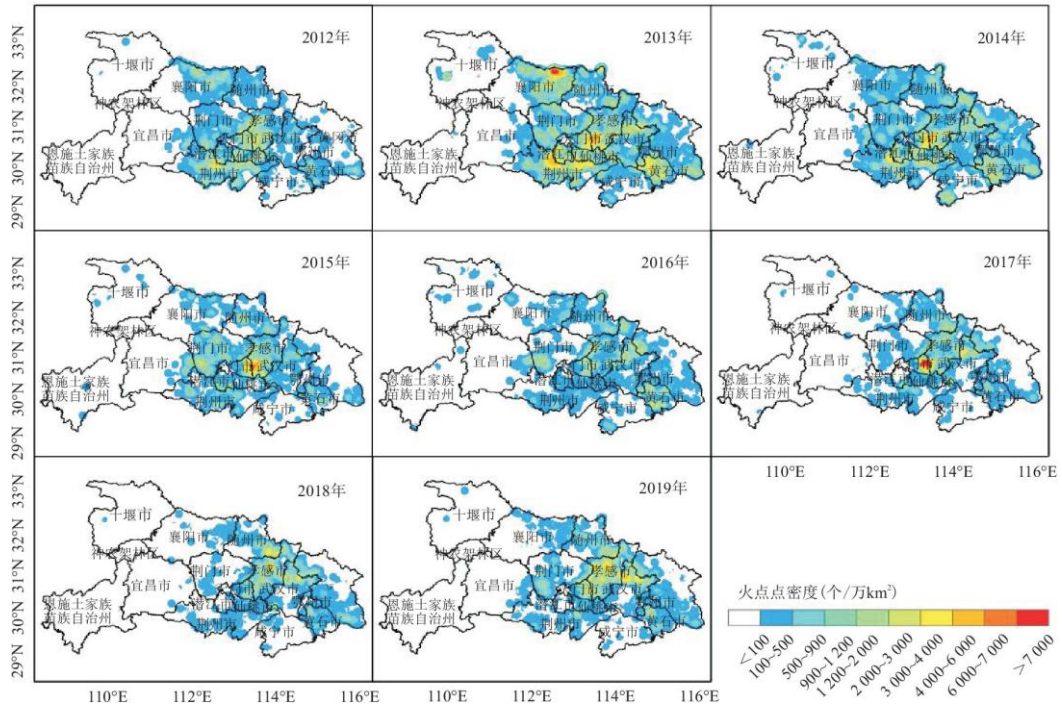


图9 湖北省秸秆焚烧火点点密度空间分布

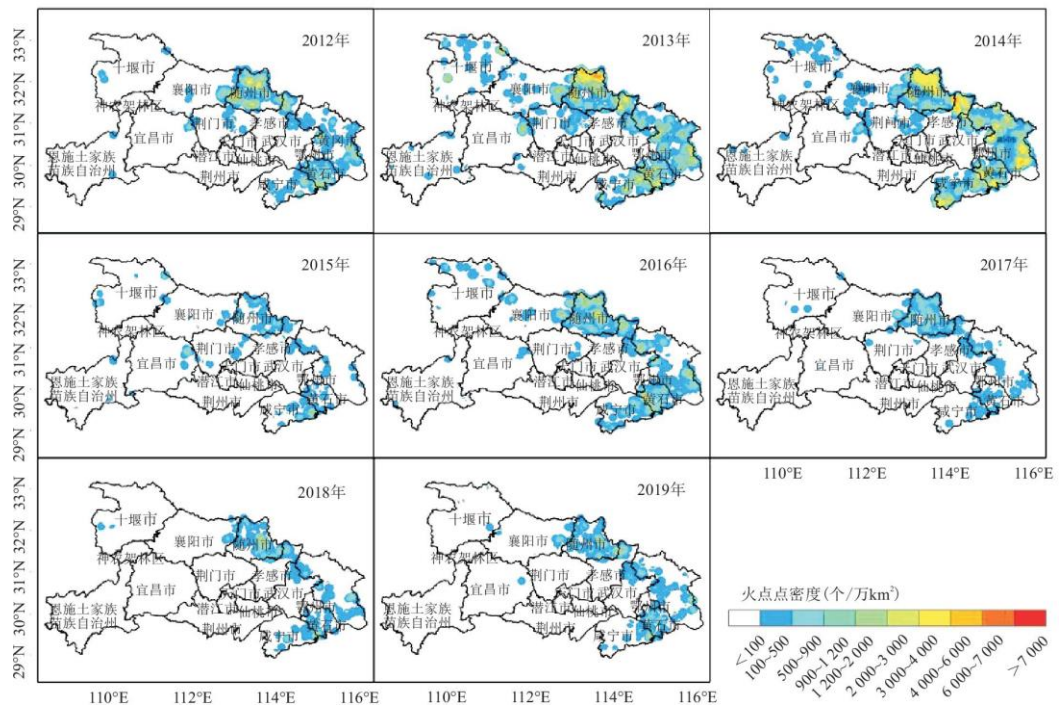


图10 2012~2019年湖北省林地火点点密度空间分布

#### 2.2.4 生物质燃烧影响因素分析

影响湖北省野外生物质燃烧的因素主要有3类，为自然因素、政策因素和社会因素。自然因素主要包括地形因素、气象条件

和种植结构。地形因素影响生物质燃烧火点的类型和分布，湖北省火点主要集中在地势较低的中部和东部地区<sup>[40]</sup>。气象条件对湖北省森林火灾的发生影响较大。湖北冬季寒冷干燥，大风天气多；春季降水少，气温回升易引发气象干旱的气候特征，导致该省冬春季节森林火灾多发<sup>[41]</sup>。湖北省秸秆焚烧的高峰期主要集中在秋季，这一时期与湖北省水稻、玉米、油菜、小麦等作物收获时间相一致，符合湖北省农作物种植结构和农民耕作规律<sup>[42]</sup>。

秸秆禁烧和综合利用等政策对湖北省生物质燃烧变化的影响同样重要。自 2013 年起，国家和湖北省政府部门出台了一系列秸秆禁烧政策，在严格的管控措施下，湖北省秸秆焚烧火点在 2015~2018 年间持续减少，秸秆焚烧管控成效显著。

社会因素主要是指生活能源结构、秸秆综合利用技术和文化习俗对湖北省生物质燃烧的影响。相关研究表明，电力是湖北省中部和东部地区最主要的生活能源，近年来，薪柴和秸秆的使用比例呈明显的下降趋势<sup>[43]</sup>。农村生物质燃料使用减少，使得大量的农作物秸秆闲置在田间，最终被露天焚烧。近年来，湖北省部分城市除了用严格的政策管控秸秆焚烧外，还通过引进秸秆综合利用企业、给予购买秸秆粉碎机补贴等方式提高秸秆综合利用率，将秸秆禁烧工作和综合利用工作结合，从根本上解决秸秆焚烧问题<sup>[44]</sup>。影响湖北生物质燃烧的文化习俗主要是指人们在春节和清明等节日进行的祭祀、春游野炊等人为活动，用火增加，加大了林火发生的可能性，与湖北省林火在 2~4 月多发的特征一致。

### 3 结论与讨论

基于 2012~2019 年的 VIIRS375m 热异常产品 (VNP14IMG)，结合土地利用分类数据及天地图高分辨率卫星影像，提取了湖北省秸秆焚烧与森林火灾两类生物质燃烧类型火点。从总体和分类型两个角度分析了湖北省生物质燃烧火点的时空分布情况，并计算生物质燃烧火点的点密度分布情况，揭示了 2012~2019 年湖北省秸秆焚烧火点和林火的时空动态变化特征。得出以下结论：

(1) 2012~2019 年湖北省生物质燃烧火点空间分布特征总体表现为中部和东部多，西部少，从地形方面分析，火点主要分布在中部地势较低的江汉平原地区，以及东部低山丘陵地区。依据湖北省各市火点数量统计情况发现，火点主要集中在随州、孝感、黄冈等 3 市，其占总火点比例均超过 10%，其次为荆州、襄阳、黄石、武汉、荆门、咸宁，占比均在 5%~10% 之间，以上 9 市占湖北省火点总数超过了 86%。

(2) 2012~2019 年湖北省生物质燃烧火点数量在整体上呈现明显的下降趋势，但部分城市仍存在波动。2013 与 2014 年位于生物质燃烧高位时期，至 2015 年后全省大部分地区生物质燃烧火点控制在较低水平。

(3) 秸秆焚烧为湖北省生物质燃烧的主要类型。其中，秸秆焚烧火点和林地火点占火点总量的百分比分别为 67.43% 和 32.57%。秸秆焚烧治理成果显著，2015 年后，秸秆焚烧火点显著减少且维持在较低水平。但由于综合利用措施不全，部分城市 2019 年出现反弹。因此，除了进一步强化禁烧政策，还需寻求更多秸秆综合利用的途径，形成科学的长效的管控措施。

(4) 从季节变化来看，湖北省秸秆焚烧的高峰期主要集中在秋季，占秸秆焚烧火点总量的 44.56%；秸秆焚烧峰期月份为 10 月份，占秸秆焚烧火点总量的 24.61%；受禁烧政策影响，错峰焚烧形成了春季和冬季多个分散的秸秆焚烧的小高峰期。湖北省林火的发生主要集中在 2~4 月，占林火总量的 55.72%，春季上坟、清明烧纸等非生产性火源仍然是引起湖北省森林火灾的重要因素。

(5) 从火点点密度分布来看，湖北省秸秆焚烧火点在空间上的分布范围呈现先扩大后缩小的形势；火点主要分布在中部和东部部分地区，随着时间推移，逐步向中部地区聚集；天门东部和孝感市接壤地区一直是火点密集区，孝感全域和武汉市的热点地区近两年增长较快；襄阳市和位于江汉平原的荆州市、仙桃、潜江和天门西部等原先秸秆焚烧热点区域由于禁烧政策和结果综合利用的协同治理，火点减少明显。湖北省林火空间分布在总体上表现为高度聚集模式，主要分布在湖北省北部和东部地区，且 2016 年以后湖北省林火密度均位于较低水平。

---

本文以湖北省为研究区域,时间序列为八年,获取了相对充足的样本,便于探究该区域生物质燃烧时空变化的特征规律,具有一定的精度。本研究中,不同类型的火点数据通过 VIIRS375m 分辨率的热异常产品叠加土地利用分类数据和高分辨率遥感影像提取,所得数据集样本精度可靠。但由于土地利用分类数据仅使用了 2010 和 2020 年两个年份,且不同数据产品之间存在分辨率差异,及 VIIRS 热异常数据受反演精度、云量、过境时间等因素的影响,使得本研究的结果的可靠性受到影响。因此,在今后的研究中,还应结合多源卫星数据,尽可能达到全天候的监测水平,以便于加强对生物质燃烧的管控。

#### 参考文献:

[1]JOEL S.LEVINE.Biomass burning-its history,use,and distribution and its impact on environmental-quality and global climate[J].Global Biomass Burning:Atmospheric,Climatic,and Biospheric Implications,1991,1(1):3-21.

[2]THOMPSON A M.Biomass burning and the atmosphere-accomplishments and research opportunities[J].Atmospheric Environment,1996,30(19):i-ii.

[3]徐媛倩.中国生物质开放燃烧排放演变特征及其动态表征研究[D].广州:华南理工大学,2020.

[4]VAN DER WERF G R,RANDERSON J T,GIGLIO L,et al.Global fire emissions and the contribution of deforestation,savanna,forest,agricultural,and peat fires (1997-2009) [J].Atmospheric Chemistry and Physics,2010,10(23):11707-11735.

[5]WIEDINMYER C,AKAGI S K,YOKELSON R J,et al.The Fire INventory from NCAR (FINN):A high resolution global model to estimate the emissions from open burning[J].Geoscientific Model Development Discussions,2010,3(4):625-641.

[6]POPE C A,DOCKERY D W.Health effects of fine particulate air pollution:lines that connect[J].Journal of the Air & Waste Management Association,2006,56(6):709-742.

[7]CHEN J M,LI C L,RISTOVSKI Z,et al.A review of biomass burning:Emissions and impacts on air quality,health and climate in China[J].Science of the Total Environment,2016,579(1):1000-1034.

[8]徐足飞.南京北郊 PM<sub>2.5</sub> 化学组分及生物质燃烧影响分析[D].南京:南京信息工程大学,2018.

[9]TANG R,HUANG X,ZHOU D R,et al.Biomass-burning-induced surface darkening and its impact on regional meteorology in eastern China[J].Atmospheric Chemistry and Physics,2020,20(10):6177-6191.

[10]TAO M H,CHEN L F,WANG Z F,et al.Satellite observation of abnormal yellow haze clouds over East China during summer agricultural burning season[J].Atmospheric Environment,2013,79(1):632-640.

[11]黄凡,陈楠,周家斌,等.2016-2017年武汉市城区大气 PM<sub>2.5</sub> 污染特征及来源解析[J].中国环境监测,2019,35(1):17-25.

[12]PRINS E M,MENZEL W P.Trends in South American biomass burning detected with the GOES visible infrared spin scan radiometer atmospheric sounder from 1983 to 1991[J].Journal of Geophysical Research:Atmospheres,

---

1994, 99 (D8) : 16719.

[13] PU R, LI Z Q, GONG P, et al. Development and analysis of a 12-year daily 1-km forest fire dataset across North America from NOAA/AVHRR data[J]. *Remote Sensing of Environment*, 2007 (2) : 198-208.

[14] MANZO-DELGADO L, SÁNCHEZ-COLÓN S, ÁLVAREZ R. Assessment of seasonal forest fire risk using NOAA-AVHRR: a case study in central Mexico[J]. *International Journal of Remote Sensing*, 2009, 30(19) : 4991-5013.

[15] GIGLIO L, DESCLOITRES J, JUSTICE C O, et al. An enhanced contextual fire detection Algorithm for MODIS[J]. *Remote Sensing of Environment*, 2003, 87(2-3) : 273-282.

[16] GIGLIO L. MODIS collection 6 active fire product user' s guide, revision A[M]. University of Maryland. 2015.

[17] WEI X K, WANG G J, CHEN T X, et al. A spatio-temporal analysis of active fires over China during 2003-2016[J]. *Remote Sensing*, 2020, 12(11) : 0-20.

[18] MOLINARIO G, DAVIES D K, SCHROEDER W, et al. Characterizing the spatio-temporal fire regime in Ethiopia using the MODIS-active fire product: A replicable methodology for country-level fire reporting[J]. *African Geographical Review*, 2014, 33(2) : 99-123.

[19] 徐奔奔, 范萌, 陈良富, 等. 2013-2017 年主要农业区秸秆焚烧时空特征及影响因素分析[J]. *遥感学报*, 2020, 24(10) : 1221-1232.

[20] 胡庆华, 李兵. 基于 MODIS 卫星数据的黑龙江省生物质燃烧火点时空分布[J]. *草业科学*, 2018, 35(8) : 2049-2057.

[21] 张丽娟, 厉青, 陈辉, 等. 2014-2015 年夏秋收期间全国秸秆焚烧遥感监测结果对比分析[J]. *环境与可持续发展*, 2016, 41(6) : 61-65.

[22] ROBERTS G, WOOSTER M J, XU W, et al. LSA SAF Meteosat FRP products - Part 2: Evaluation and demonstration for use in the Copernicus Atmosphere Monitoring Service (CAMS) [J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2015, 15(11) : 15000-15976.

[23] ZHANG T R, WOOSTER M J, XU W, et al. Approaches for synergistically exploiting VIIRS I-and M-Band data in regional active fire detection and FRP assessment: A demonstration with respect to agricultural residue burning in Eastern China[J]. *Remote Sensing of Environment*, 2017, 198(1) : 407-424.

[24] 李建峰, 宋宇, 李蒙蒙, 等. 江汉平原秸秆焚烧污染物排放的估算[J]. *北京大学学报*, 2015, 51(4) : 647-656.

[25] 杨占婷. 鄂中东部两次秸秆焚烧引发的严重灰霾天气分析[J]. *气象科技*, 2013, 41(6) : 1147-1152.

[26] 周悦, 岳岩裕, 李兰, 等. 秸秆焚烧导致湖北中东部一次严重霾天气过程的分析[J]. *气候与环境研究*, 2016, 21(2) : 141-152.

- 
- [27] SHEN Y L, JIANG C M, CHAN K L, et al. Estimation of field-level NO<sub>x</sub> emissions from crop residue burning using remote sensing data: A case study in Hubei, China[J]. *Remote Sensing*, 2021, 13(3):404.
- [28] ZHU B, ZHANG Y, CHEN N, et al. Assessment of air pollution aggravation during straw burning in Hubei, Central China[J]. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 2019, 16(8):1446-.
- [29] SCHROEDER W, OLIVA P, GIGLIO L, et al. The New VIIRS 375 m active fire detection data product: Algorithm description and initial assessment[J]. *Remote Sensing of Environment*, 2014, 143(1):85-96.
- [30] TAO M H, CHEN L F, WANG Z F, et al. Did the widespread haze pollution over China increase during the last decade? A satellite view from space[J]. *Environmental Research Letters*, 2016, 11(5):054019.
- [31] 范思睿, 王维佳, 林丹. 基于 ISCCP 云资料的中国地区不同类型云的时空分布[J]. *干旱气象*, 2020, 38(2):213-225.
- [32] 马茜蓉, 游庆龙, 蔡淼, 等. 基于 CERES 卫星资料分析中国近 15a 云量变化[J]. *干旱气象*, 2018, 36(6):911-920.
- [33] 游婷, 张华, 王海波, 等. 夏季白天中国中东部不同类型云分布特征及其对近地表气温的影响[J]. *大气科学*, 2020, 44(4):835-850.
- [34] CHEN J, BAN Y F, LI S N. Open access to Earth land-cover map[J]. *Nature*, 2015, 514(7523):434-434.
- [35] 刘宇虹. 湖北农作物秸秆资源分布及其综合利用政策研究[D]. 武汉: 华中师范大学, 2018.
- [36] 殷恕忠, 王振淳, 董奇, 等. 秸秆露天焚烧: 综合利用是解决问题的根本[J]. *湖北画报*, 2015(7):16-17.
- [37] 王俊. 气象因子对秸秆焚烧源 PM<sub>10</sub> 浓度的影响研究[D]. 合肥: 安徽农业大学, 2013.
- [38] 顾先丽, 吴志伟, 张宇婧, 等. 基于 MODIS 数据的 2001—2015 年江西省林火时空特征分析[J]. *广东农业科学*, 2018, 45(6):129-134, 2.
- [39] 崔阳, 狄海廷, 邢艳秋, 等. 基于 MODIS 数据的 2001—2018 年黑龙江省林火时空分布[J]. *南京林业大学学报(自然科学版)*, 2021, 45(1):205-211.
- [40] 涂心萌, 杨绪红, 张景源, 等. 2014—2019 年中国秸秆焚烧火点的地理特征分析[J]. *地理研究*, 2020, 39(10):2379-2390.
- [41] 刘琳. 基于 MODIS 数据的重庆市森林火灾监测与预警研究[D]. 重庆: 重庆师范大学, 2014.
- [42] 杨光义. 东北地区生物质露天燃烧源排放及其对大气环境的影响与评估[D]. 长春: 中国科学院大学(中国科学院东北地理与农业生态研究所), 2020.
- [43] 赵亚丽. 湖北省农村生活能源消费现状及发展趋势研究[D]. 荆州: 长江大学, 2016.
- [44] 杨林东. 江汉平原秸秆焚烧及综合利用研究[D]. 武汉: 中南民族大学, 2016.