

2014—2019年中国秸秆焚烧火点的地理特征分析

涂心萌, 杨绪红, 张景源, 栾心晨, 宁可心

(南京大学地理与海洋科学学院, 南京 210023)

摘要: 客观、精细地刻画秸秆火点的地理空间分布特征, 对科学引导作物秸秆焚烧和提高行政监管效率具有重要意义。基于2014—2019年中国区域内Satsee-Fire火点数据集和地形、社会经济数据建立的中国秸秆火点数据库和自然-人口-经济数据库, 本研究采用GIS分析工具和数理统计方法, 剖析了中国秸秆火点在地形、公共交通和人口-经济三方面7个因子之下的空间格局特征, 结果表明: ① 秸秆焚烧现象集中发生在高程低于250 m、坡度低于8°的区域, 而位于北向坡和南向坡的秸秆火点数分别占总数的42.65%、37.36%。② 秸秆焚烧现象在机场和铁路禁燃区内呈不同的空间格局特征。距机场愈远秸秆焚烧行为愈普遍, 机场禁燃区的秸秆焚烧有近六成发生在距机场11~15 km处; 而铁路禁燃区内的秸秆火点分布较为均衡, 总体呈内部圈层较外部区域略微密集态势, 空间上火点密度整体随纬度增加而逐步增加, 山西、内蒙古、河北及东三省铁路禁燃区火点数占总数的76.88%。③ 近七成的秸秆火点发生在人口密度低于250人/km²的县域, 而58.17%的秸秆火点发生在年GDP低于100亿元的县域; 秸秆焚烧现象与县域人口密度、GDP水平存在负相关关系, 即县域人口密度愈大、县域经济愈发达, 发生秸秆焚烧的现象愈为鲜见。

关键词: 秸秆焚烧; 地理特征; 空间分异; 中国

DOI: 10.11821/dljy020190189

1 引言

作为农业大国, 中国农作物产生的秸秆产量大、分布广。据估计, 2017年中国秸秆理论产量近9亿t, 约占世界秸秆总产量的三成, 是世界第一秸秆产量大国^[1-4]。随着农村生活水平提高、燃料结构转变和劳动力逐渐稀缺, 部分地区对秸秆的需求量明显下降, 秸秆就地焚烧现象屡见不鲜^[5], 全国秸秆露天燃烧比例约占全部处理方式的18.59%^[6]。秸秆焚烧行为不仅严重影响空气质量、危害群众健康、浪费可回收利用资源, 同时对航空、公路、铁路等交通安全也带来了巨大隐患^[7]。国家层面高度重视秸秆焚烧问题, 1999年原环保局发布了《秸秆禁烧和综合利用管理办法》(环发〔1999〕98号), 要求禁止在机场、交通干线、高压输电线路附近和省辖市(地)级人民政府划定的区域内焚烧秸秆; 随后, 国务院办公厅、原发改委等部门发布了《关于加快推进农作物秸秆综合利用的意见》(国办发〔2008〕105号)、《关于加强农作物秸秆综合利用和禁烧工作的通知》(发改环资〔2013〕930号)和《关于进一步加快推进农作物秸秆综合利用和禁烧工作的通知》(发改环资〔2015〕2651号), 进一步要求大力推进生态文明建设, 完善秸秆收储体

收稿日期: 2019-03-14; 修订日期: 2020-02-20

基金项目: 国家自然科学基金项目(41801065)

作者简介: 涂心萌(1999-), 女, 湖北宜昌人, 主修GIS空间建模。E-mail: napher@foxmail.com

通讯作者: 杨绪红(1988-), 男, 湖南湘潭人, 博士, 助理研究员, 主要从事国土空间规划、空间建模研究。

E-mail: yangxhnju@nju.edu.cn

系,加大秸秆禁烧力度,提高禁燃监管水平。现阶段秸秆焚烧现象多发、高发,且具有“点多量少、火点零星、时点随机”等特点,空间分布复杂多变,查证监管耗时耗力,而客观、精细地刻画秸秆焚烧火点的地理空间分布特征,对科学引导作物秸秆处理和提高行政监管效率具有重要实践意义^[4,5,8,9]。

传统的田间秸秆焚烧监测大多采用自下而上的地面巡查、瞭望塔、网格化蹲守等,该类监管方法虽能实时对违法行为进行矫正,但耗时耗力、效率低下。近年来,卫星遥感观测获取秸秆焚烧火点的方法受到了国内外学者的广泛关注。国外学者中, Muirhead K等利用 AVHRR 卫星图像监测了1984年夏季英国秸秆焚烧情况^[10]; Cracknell A P等利用 NOAA 极轨气象卫星的 AVHRR 影像对1995年收获季秸秆焚烧程度进行了分析^[11]; Mccarty J L等分析了2003—2007年五年内美国本土秸秆焚烧的时空分布^[12]; Verma S等量化了2002—2016年印度中央邦秸秆焚烧的时空变化并揭示了火情的增长趋势^[13]。国内学者中,张树誉等检验了MODIS遥感影像适于火点监测的通道特性和光谱特征,并分析2004年关中地区秸秆焚烧空间分布以作实例验证^[14];何立明等利用MODIS火点数据探究了2002—2005年中国秸秆焚烧火点和过火面积的时空特征^[4];胡梅等基于火点像元亮温特征,分析了2007年夏季连续两天内华北平原秸秆焚烧火点的分布特征^[15];厉青等考察了2007年6月内中国秸秆焚烧火点的总体分布^[9];张彦等利用MODIS热异常产品数据提取火点信息,反映了2015年河南省秋季作物秸秆焚烧现象的空间分布与发展态势^[16];张丽娟等对比分析了2014—2015年夏秋收季秸秆焚烧的时空分布特征及发展趋势^[17];毛慧琴等基于MODIS数据研究了东北地区2015—2017年秸秆焚烧火点时间和空间分布^[18];李佳等通过提取比较2000年、2008年和2014年河南省秸秆焚烧火点,分析了河南省14年间秸秆焚烧现象的扩散变化^[19];张景源等从不同时空尺度探索了2014年来中国秸秆露天焚烧火点的时空分布格局及演变特征^[20]。综上所述,以上研究从研究方法和时空尺度等方面对国内外秸秆焚烧时空格局已进行过大量探索,为后续研究积累了丰富经验。

然而,已有研究大多分析了局部地区长时段或国家范围单个时点的秸秆火点时空格局特征,鲜见国家尺度、较长时间序列的研究案例;且尚未有效探索秸秆焚烧火点与地理、公共交通和社会经济等因素之间的相互关系及其空间变化规律。鉴于此,本研究基于2014—2019年中国区域内Satsee-Fire火点数据集和地形、社会经济数据建立了中国秸秆火点数据库和自然-人口-经济数据库,而后使用GIS分析工具和数理统计方法,从地形因素中选取高程、坡度、坡向,禁燃区因素中选取距机场和铁路距离,社会经济因素中选取县域人口密度和GDP三方面7个因子作为分析对象,剖析了中国秸秆火点的地理空间格局特征,希冀为科学规范作物秸秆焚烧行为和提高行政监管效率提供理论借鉴。

2 数据来源与研究思路

2.1 数据来源与预处理

本研究使用的数据包括空间矢量类和属性记录类数据。其中,亚洲火点属性记录数据源于中国科学院遥感与数字地球研究所发布的近实时地表高温异常点查询服务系统(SatSee-Fire),数据时段为2014年1月1日至2019年12月31日(前3年缺12月份数据);该数据集集成了Landsat-8、Landsat-7和Sentinel-2等中分辨率卫星的高温点数据,其属性信息包括了高温点ID、高温点经度和纬度、高温点捕获日期、高温点反演温度、高温点反演面积、高温点可信度等。此外,研究所用的空间矢量类数据如中国行政区界线、数字高程模型、机场、铁路和人口、GDP统计数据来源于中国科学院资源环境科学数据中心(<http://www.resdc.cn/>)。具体概况如表1。

表1 基础数据相关属性概述

Tab. 1 Description of related attributes of basic data

序号	数据名称	数据格式	时空尺度	数据源
1	SatSee-Fire 火点	.csv	亚洲区、2014年1月1日至2019年12月31日	http://satsee.radi.ac.cn:8080/index.html
2	中国行政界线	.shp	分省	http://www.resdc.cn/data.aspx?DATAID=200
3	数字高程模型	.grid	90 m × 90 m 网格	http://www.resdc.cn/data.aspx?DATAID=123
4	机场	.shp	2016年全国POI	http://www.resdc.cn/data.aspx?DATAID=240
5	铁路	.shp	2016年全国POI	http://www.resdc.cn/data.aspx?DATAID=236
6	中国人口和GDP	.grid	1 km × 1 km 网格, 2015年	http://www.resdc.cn/data.aspx?DATAID=252
7	中国耕地	.grid	1 km × 1 km 网格, 2015年	http://www.resdc.cn/data.aspx?DATAID=184

基础数据的坐标系统和数据格式各异, 统一各数据的空间参考信息为 Lambert 投影、GCS_Beijing_1954 坐标系统, 分别建立中国秸秆火点数据库和自然-人口-经济数据库。其中, 中国秸秆火点数据库构建流程如下: 首先, 基于火点的经纬度信息将 2014—2019 年亚洲火点属性记录转绘为空间矢量点, 其火点记录中包含了工业烟囱火点、森林火点、秸秆火点、野火等高温异常点位; 其次, 依据数据库中的信度信息, 将信息低于阈值的不可信火点予以剔除, 而后用中国行政区作为掩膜提取出中国区域火点数据集; 再次, 通过空间分析工具剔除火点数据集中常年稳定火点, 由于秸秆火点的温度大体介于 500~1000 K, 将异常高温和异常低温火点作剔除处理; 最后, 用耕地作为掩膜, 剔除不在耕地图斑范围内的火点, 由此形成了中国秸秆火点数据库。利用近年环境保护部卫星环境应用中心发布的月度秸秆火点监测数据进行样本精度检验, 本研究构建的中国秸秆火点数据库样本精度达 89.51%, 数据可信度高, 可用于后续分析。

2.2 研究思路

本研究重点探索 2014—2019 年中国秸秆火点在地理空间层面的分布格局和特征, 从地形因素中选取高程、坡度、坡向, 从禁燃区因素中选取距机场和铁路距离, 从社会经济因素中选取人口和 GDP 三方面 7 个因子作为分析对象, 以构建的中国秸秆火点数据库和自然-人口-经济数据库为基础数据源, 分别采用空间叠置法、缓冲区分析法、频度分级法、频次累积法和自然断点法等数理分析方法, 对秸秆火点在地形因素、公共交通因素和人口-经济因素方面的空间分布特征进行剖析, 研究总体思路如图 1。

3 结果分析

3.1 不同地形因子下秸秆火点空间特征

探索不同地形因子下秸秆火点的空间特征, 可为科学合理制定秸秆处理措施和管制秸秆焚烧行为提供理论依据与实践指导。本研究选取高程、坡度、坡向作为分析对象, 剖析秸秆火点在不同地形因子下的空间分布格局和特征。其中, 坡度、坡向均从数字高程模型中求取, 而后将秸秆火点与各个地形因子空间叠加, 计算各火点的高程、坡度、坡向数值, 在 GIS 平台中进一步采用变异系数断点法、自然断点法或等间距断点法将火点高程、坡度、坡向可视化表达 (图 2)。在此基础上, 核算得到火点在不同高程、坡度、坡向频段范围内的分布情况 (表 2)。

3.1.1 不同高程下火点分布特征 结合中国地形三级阶梯形态和火点变化特征, 以 100 m、250 m、500 m、1000 m、3000 m 为分级间断点, 将火点高程划分为 6 级, 分别统计

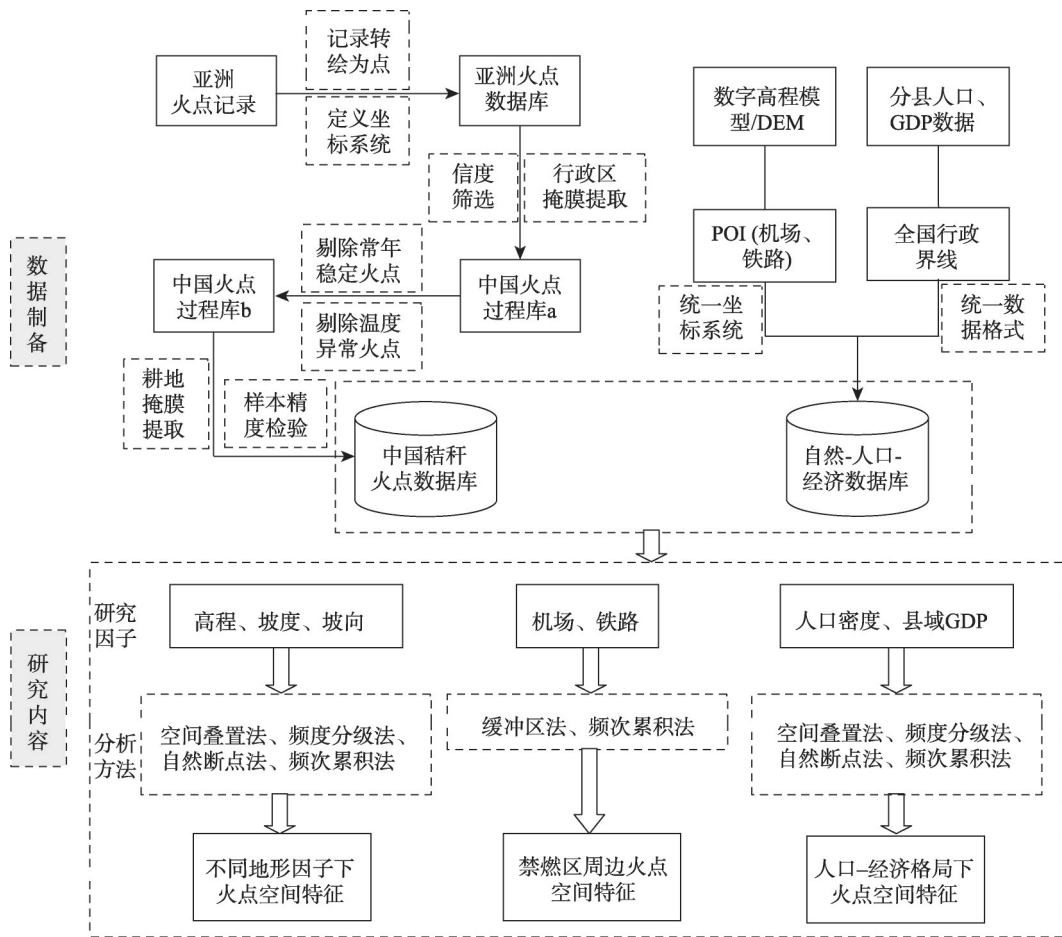


图1 本研究总体思路

Fig. 1 Overall procedure of this research

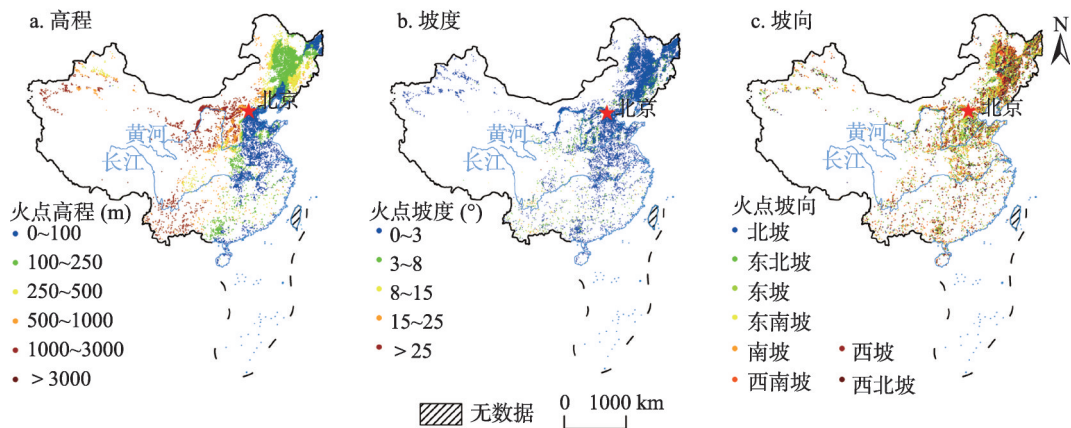


图2 不同高程、坡度、坡向下火点空间分布特征

Fig. 2 Spatial distribution characteristics of fire points at different elevations (a), slopes (b), slope aspects (c)

注: 此图基于国家自然资源部标准地图服务系统的标准地图(审图号GS(2020)4619号)绘制, 底图无修改。

落入各高程梯度级内的火点数和比例, 落入第一级 (0~100 m) 和第二级 (100~250 m) 高程范围内的火点数最多 (合计 20446 个, 占总数的 71.09%), 火点高程峰值段在 100~250 m 范围内, 约占总数的 36.94%; 其余高程梯度级内的火点占总数的比例不足三成。由表 2 可知, 第一级 (0~100 m) 火点分布区域主要位于黄河中下游的华北平原、长江中下游平原和洞庭湖平原、辽河平原以及三江平原, 此外, 在珠江三角洲和雷州半岛偶有分布; 第二级 (100~250 m) 火点主体部分密集分布在东北平原、松嫩平原, 在山东丘陵、黄淮平原西南部、广西盆地也有大量分布; 而第三级 (250~500 m) 主要分布在东北平原的东西两侧和四川盆地的东侧; 第五级 (1000~3000 m) 火点除部分落入云贵高原西南侧外, 其余大部都位于胡焕庸线的西北侧; 第四级 (500~1000 m) 和第六级 (3000 m 以上) 火点分布较为零星分散, 未有显著的集聚区。

由于高程 1000 m 范围内为中国经济活动活跃区和粮食主产区, 火点分布更为密集, 分析其范围内火点变化更具指导意义, 故以 100 m 为间隔, 统计各高程段内的火点数, 如表 2 所示。其中, 0~100 m 及 100~200 m 火点数量尤为集中, 分别为 9010 个、9159 个, 分别占总数的 34.32% 和 34.88%; 此外, 在 200~300 m、400~500 m 和 900~1000 m 高程范围内的火点相对较多, 合计约占总数的 21.41%, 其余高程段内的火点分布较少, 200~1000 m 火点数量仅为 0~200 m 火点的 44.50%。由此来看, 中国秸秆火点主要集中在低海拔的平原区和丘陵区, 在中山和中低山分布相对较少。高海拔地区由于土壤侵蚀较强、气候严寒等原因, 不适于农耕地发展, 这间接影响了秸秆火点的分布^[21]。相反, 平原地区气候温和、地势平坦、耕地密度大, 适于农业耕作, 秸秆产量较大, 因此火点分布密度较为显著。

3.1.2 不同坡度下火点分布特征 结合坡度对土壤的侵蚀作用程度和火点的分布特征, 以 3°、8°、15°、25°为间断点, 将火点坡度划分为 5 个等级, 分别统计各坡度梯度级内的火点数和比例。分析表 2 可知, 火点数在各个坡度梯度级内呈减少态势。其中, 火点在第一坡度级 (0°~3°) 内分布最为集中, 为 26901 个, 占总数的 93.53%, 主体密集分布在环山东丘陵的华北平原、黄淮平原一线, 在东北平原西南侧和洞庭湖平原北侧也有集中分布; 第二坡度级 (3°~8°) 的火点数为 1596 个, 占总数的 5.55%, 零星分布在东北平原、三江平原和江汉平原; 第三坡度级及以上 (8°以上) 的火点仅占总数的 0.92%; 总体而

表 2 火点在不同高程、坡度、坡向频段范围内分布情况
Tab. 2 Distribution of fire points at different elevations, slopes, and slope aspects

地形因子	单位	范围	火点数(个)	比例(%)
高程	m	0~100	9010	34.32
		100~200	9159	34.88
		200~300	2793	10.64
		300~400	1193	4.54
		400~500	1943	7.40
		500~600	439	1.67
		600~700	217	0.83
		700~800	292	1.11
		800~900	323	1.23
		900~1000	886	3.37
坡度	°	0~3	26901	93.53
		3~8	1596	5.55
		8~15	208	0.72
		15~25	52	0.18
		> 25	4	0.01
坡向		北	6021	20.93
		东北	2924	10.17
		东	3166	11.01
		东南	4074	14.17
		南	3709	12.90
		西南	2960	10.29
	西	2585	8.99	
	西北	3322	11.55	

言,坡度介于1~2级($\leq 8^\circ$)的火点占总数的99.08%,而其余坡度级范围内的火点比例较低,空间分布较为零星分散,并未呈现明显的空间集聚态势。由此来看,坡度 8° 以下的区域是秸秆焚烧的高发聚集区,这可能与我国地形分布和水土保持战略有很大关系。我国地形以坡度较低的平原和丘陵为主,且《水土保持法》提出禁止在 25° 以上陡坡地带开垦种植农作物,已种植的区域要逐步退耕还林,以防止造成水土流失,因此坡度较高的耕地占总体比例较少;此外,因陡坡地带的劳动强度过高、投入产出效率不匹配,而平原和低丘缓坡地带适宜进行农业种植,这亦反映在了秸秆焚烧空间格局上。

3.1.3 不同坡向下火点分布特征 以坡向为分析对象,剖析秸秆火点在不同坡向上的空间分布特征。其中,坡向定义为正东向为零度,逆时针为正方向,以 45° 为间隔,将其等分为8个方向,如 $22.5^\circ\sim 67.5^\circ$ 为东北方向。统计各坡向的火点数和比例,结果如下。由表2可得:分布在正北、东北和西北方向的火点数最多,为12267个,占总数的42.65%;在空间分布上,北向坡火点集中在太行山东西两侧、黄淮平原东北侧和洞庭湖平原西南侧。其次是分布在正南、东南和西南方向的火点数,约占总数的37.36%,主要集中在东北平原、云贵高原和广西盆地等处,其余地区偶有分布;而正西向、正东向的火点数分别仅占总数的8.99%、11.01%,在空间上分布较为零散,并未形成显著集聚分布格局。综合来看,南北向坡上秸秆火点分布较为集中,而东西向坡的火点数量占比较低且空间上并未呈现集聚态势;这可能是由于南向坡光照时间长、积温较大,是农业种植的合理坡向,故秸秆产量较大,而北向坡的秸秆还田动力较低、农忙季节时间紧张,故出现大量秸秆就地焚烧现象。

3.2 禁燃区周边火点空间特征

由于秸秆焚烧会产生大量浓烟和可吸入颗粒物,给机场、铁路等交通干线枢纽造成严重的交通安全隐患。本研究对交通干线周边(秸秆禁燃区)的秸秆焚烧现象进行了空间分析。参照秸秆禁烧和综合利用管理办法的要求,定义机场为中心15 km半径内区域和沿铁路线两侧各2 km区域为秸秆禁燃区^[8]。以1 km为间隔在机场周边15 km范围内作等间距缓冲区,以200 m为间隔在铁路线周边2 km内作等间距缓冲区,分别以全国、省域和具体机场或铁路为统计口径分别统计各缓冲区的火点数,探究禁燃区周边火点空间分布特征。

3.2.1 机场周边火点分布特征 整体来看,全国机场禁燃区范围内的火点数共9413个,约占火点总数的34.14%。从空间分布来看,火点密度与机场距离呈正相关,即距离机场愈远火点愈密集,其中11~15 km范围内的火点数最多,共5689个,占机场禁燃区总火点数的60.44%;而在机场核心区0~5 km范围内的火点数相对较少,仅约276个(表3)。

以省域为单元,统计落在各省机场禁燃区内各缓冲区的火点数。禁燃区内火点分布密集区主要在华北、东北地区,包括内蒙古自治区、黑龙江省、辽宁省、吉林省、山东省,其火点数分别为1089个、1029个、978个、730个、529个,分别占总数的11.57%、10.93%、10.39%、7.76%、5.62%,以上省份合计共占全国总数的46.27%;其各缓冲区内火点数均随与机场距离的增加而增加,且均在14~15 km范围达到峰值。如:辽宁省在14~15 km范围内达211个,内蒙古自治区为196个,分别占其禁燃区总火点数的21.57%和18.00%。其次,广西省和宁夏回族自治区机场禁燃区内火点分布也十分密集,数量分别为748个、483个,分别占全国总数的7.95%和5.13%。其禁燃区内部火点密度最大处也为14~15 km范围,数量分别为112个和79个,分别占其禁燃区火点总数的14.97%和16.36%。此外,重庆市、上海市、青海省以及西藏自治区机场禁燃区均未发现秸秆燃烧火点。

东北地区是中国主要的商品粮生产基地之一, 作物秸秆资源十分丰富, 约占全国秸秆总产量的五分之一, 由于气候条件、地域环境、资源配置等因素, 导致其秸秆利用尚处于粗放阶段, 露天焚烧问题突出, 机场附近火点情况严峻^[8]。而西北和华南部分地区则由于社会经济发展较为落后, 农民环保意识薄弱, 相关部门无力实施有效管制, 故其机场禁燃区内火点分布较密集。

就具体机场而言, 以禁燃区内火点数排名前10的机场为分析对象, 其各缓冲区内火点数分布分析见下。此类机场大多分布在东北地区和华北地区, 其中黑龙江省包含3个, 分别是牡丹江机场、齐齐哈尔机场和佳木斯机场, 其禁燃区内火点数分别达160个、96个和93个; 而内蒙古自治区和吉林省各含2个, 前者是乌兰浩特机场、通辽机场, 火点数分别为127、123个, 后者为延吉机场、长春龙嘉国际机场, 火点数为80个、76个; 此外, 山西省长治机场、辽宁省沈阳桃仙国际机场和河北省邯郸机场的火点数相对较多, 分别为70个、96个、70个。此类机场在行政区层面或位于地域广阔的东北三省, 或是省域交界之处, 如长治和邯郸机场均

位于山西省和河北省的分界线附近, 齐齐哈尔机场和乌兰浩特机场则位于吉林省、黑龙江省和内蒙古自治区三省区分界点附近。由于地理区位和行政管辖等原因, 行政区边界周边和地广人稀的东北地区可能存在执法不便等情况, 一定程度上促使了秸秆焚烧现象的发生。

3.2.2 铁路周边火点分布特征 整体而言, 全国范围铁路禁燃区内火点总数为2691个, 约占全国火点总数的9.36%。从铁路禁燃区内部情况看, 火点在铁路禁燃区的各缓冲区内分布较为均衡, 总体呈现内部圈层较外部区域略微密集的态势; 其中, 0~200 m、200~400 m范围为距铁路干线最近处, 同时也是火点分布较为密集处, 其火点数量约占铁路禁燃区火点总数的23.08% (表3)。

以省域为单元, 统计落在各省铁路禁燃区内各缓冲区的火点数。火点分布密集区主要位于华北、东北地区, 呈现各省域铁路周边禁燃区内火点数随纬度的增加而逐步增加的态势, 如: 山西省、内蒙古自治区、河北省、吉林省、辽宁省、黑龙江省等地铁路禁燃区内火点数依次为176个、229个、329个、329个、454个、497个, 分别占全国铁路

表3 全国机场、铁路禁燃区各缓冲区范围内火点情况

Tab. 3 Distribution of fire points in each buffer in the forbidden area of nationwide airports and railways

禁燃区因素	单位	范围	火点数(个)	比例(%)
机场	km	0~1	3	0.03
		1~2	20	0.21
		2~3	47	0.50
		3~4	78	0.83
		4~5	128	1.36
		5~6	230	2.44
		6~7	355	3.77
		7~8	499	5.30
		8~9	641	6.81
		9~10	776	8.24
		10~11	947	10.06
		11~12	1139	12.10
		12~13	1350	14.34
		13~14	1477	15.69
		14~15	1723	18.30
铁路	m	0~200	285	10.59
		200~400	336	12.49
		400~600	246	9.14
		600~800	267	9.92
		800~1000	292	10.85
		1000~1200	271	10.07
		1200~1400	267	9.92
		1400~1600	260	9.66
		1600~1800	236	8.77
1800~2000	231	8.58		

禁燃区内火点总数的6.72%、8.74%、12.56%、12.56%、17.33%、18.97%；且在以上省份禁燃区内部，火点分布最密集的区域均为距铁路较近的0~400 m范围内。如，黑龙江省、吉林省、河北省、内蒙古自治区火点最密集区均为200~400 m，其中分别有火点64个、46个、41个、38个，各占其省域铁路禁燃区内火点总数的12.88%、13.98%、12.46%、16.59%；而辽宁省火点最密集处为0~200 m，其中有火点53个，占其总数的11.67%。相较而言，华中、华南、西南地区各省域铁路禁燃区总火点数均低于50个；此外，上海市、西藏自治区铁路禁燃区内未有火点。

我们统计得出了铁路禁燃区内火点数排名前10的铁路干线，即沈山线、包兰线、京包线、长大线、平齐线、秦沈线、滨北线、沈吉线、滨洲线、大秦线，其周边火点数分别为105个、94个、86个、84个、70个、68个、67个、57个、56个、54个，分别占全国范围内铁路禁燃区内火点总数的3.90%、3.49%、3.46%、3.20%、2.60%、2.52%、2.48%、2.12%、2.08%、2.01%。从禁燃区内部空间分布看，上述铁路禁燃区火点最密集区大多也临近铁路线。如：沈山线、包兰线、京包线火点分布最密集区为200~400 m，火点数量分别为14个、22个、14个，各占其禁燃区内火点总数的13.33%、23.40%、16.28%；而平齐线、滨北线则为0~200 m，其中火点均为10个，占其总数的14.29%、14.93%。中国东北地区铁路干线大多穿越平原农业区，且空间分布较为稀疏，不便于行政部门实时监管和查处秸秆焚烧现象，从而使得该区域秸秆焚烧得不到较好的管制。

3.3 不同人口密度和经济水平下火点分布特征

为探究秸秆焚烧现象在不同人口、经济发展水平下的空间分布特征，本研究以县域为统计口径，分别统计不同人口密度和GDP总量下的县域火点数（表4）。

以250人/km²为间距，对县域人口密度进行等间距分级，共分10级，统计落入各级别的火点数。总体而言，火点数随着人口密度的增加而呈现大幅减少的态势。其中，人口密度低于250人/km²的县域的秸秆火点最多，为20030个，约占总火点数的七成；人口密度范围为250~500人/km²的县域的火点数目显著减少，仅有4495个，不到总数的二成；而人口密度高于500人/km²的县域的火点数量仅有4150个，为总数的七分之一。可以认为，秸秆火点数与人口密度存在一定的负相关关系，即县域人口密度越小，发生秸秆焚烧的现象越频繁。经分析，在人口密度较小的县域内，农户规模小且分散，执法成本高，对于广为发生的焚烧现象，相关执法部门难以管理和监察^[23]。比如，

表4 不同县域人口密度、县域GDP水平下的火点数

Tab. 4 Distribution of fire points with different county population densities and county GDP

社会经济因素	单位	范围	火点数(个)	比例(%)
县域人口密度	人/km ²	0~250	20030	69.85
		250~500	4495	15.68
		500~750	2386	8.32
		750~1000	849	2.96
		1000~1250	246	0.86
		1250~1500	89	0.31
		1500~1750	179	0.62
		1750~2000	25	0.09
		2000~2250	174	0.61
		>2250	202	0.70
县域GDP水平	百亿元	0~1.0	16679	58.17
		1.0~2.0	6288	21.93
		2.0~3.0	2917	10.17
		3.0~5.0	1434	5.00
		5.0~7.5	860	3.00
		7.5~10.0	87	0.30
		10.0~12.5	119	0.42
		12.5~15.0	111	0.39
		15.0~20.0	51	0.18
		>20.0	128	0.45

东北地区是地广人稀的产粮区, 秸秆处理量小, 剩余量大, 监管困难, 因此秸秆露天焚烧的情况十分严重^[24,25]。

将县域GDP按100亿元、200亿元、300亿元、500亿元、750亿元、1000亿元、1250亿元、1500亿元、2000亿元为间断点划分为10级, 分别统计不同级别范围内的火点数。总体而言, 火点数随着经济发展程度的提高而呈现大幅减少的态势。其中, GDP低于100亿元的县域的火点数量最多, 高达16679个, 约占总数的58.17%; 其次, GDP介于100~200亿元、200~300亿元、300~500亿元、500~750亿元范围内的县域的火点数量分别为6288个、2917个、1434个、860个, 分别占总数的21.93%、10.17%、5.00%、3.00%; 而GDP超过750亿元的县域的火点数量仅为496个, 占总数的11.74%。由此, 县域GDP水平与秸秆火点数之间存在一定程度的负相关关系, 即县域经济越发达, 秸秆焚烧行为越鲜见。可能缘由为: 在经济欠发达地区, 农民无力拨出资金雇佣劳动力以及购买设施对遗弃秸秆进行处理, 从而倾向于将秸秆原地焚烧; 同时, 此类县域往往缺少相关部门或机构提供合适的秸秆处理渠道, 政府也难以对农民进行资助, 甚至无法对违法行为进行有效监管; 此外, 随着农民工劳动成本的日益增加, 处理秸秆的收益相比之下微不足道。因此, 大部分农户不再看中秸秆微弱的经济价值, 便选择将其直接原地焚烧而非收集利用, 这与前人的研究成果呈现一致性^[5,22,26]。

4 结论

基于空间分析和数理统计方法, 本文剖析了中国秸秆火点在地形、公共交通和人口-经济三方面7个因子之下的空间分布情况, 揭示了2014—2019年中国秸秆焚烧的空间格局及其分异特征。得出如下结论:

(1) 秸秆火点呈由西向东、由南向北渐密的空间格局。秸秆焚烧现象集中发生在高程低于250 m (占总数71.09%)、坡度低于8° (占总数99.08%) 的区域, 而位于北向坡和南向坡的秸秆火点数分别占总数的42.65%、37.36%。

(2) 秸秆焚烧现象在机场和铁路禁燃区内呈不同的空间格局特征。距机场愈远秸秆焚烧行为愈普遍, 机场禁燃区内的秸秆焚烧有六成发生在距机场11~15 km处, 空间上主要分布在内蒙古、黑龙江、辽宁、吉林、山东、广西和宁夏等地; 铁路禁燃区内的秸秆火点分布较为均衡, 总体呈内部圈层较外部区域略微密集的态势, 距铁路400 m范围内的秸秆火点约占铁路禁燃区火点总数的23.08%, 空间上火点密度整体随纬度增加而逐步增加, 山西、内蒙古、河北及东三省铁路禁燃区火点数占总数的76.88%。

(3) 约七成的秸秆火点发生在人口密度低于250人/km²的县域, 而58.17%的秸秆火点发生在年GDP低于100亿元的县域; 秸秆焚烧现象与县域人口密度、县域GDP水平存在一定程度的负相关关系, 即县域人口密度越大、县域经济越发达, 秸秆焚烧的现象愈为鲜见。

由于包含了森林火点、烟囱火点、秸秆火点等多种高温火点, 本研究在研制中国秸秆焚烧火点数据集时进行了多次数据清洗和提取操作, 包括行政区掩膜提取、稳定火点剔除、火点温度限制、耕地掩膜提取等, 所得数据集样本精度较高, 但考虑到遥感影像受闪电、云量、过境时点等因素影响, 以及耕地掩膜分析时使用的是单一年份的耕地静态数据, 致使本研究结果的可靠性可能会受到影响。此外, 本研究的时间序列仅为6年, 样本量有限, 这对探究中国秸秆火点变化的规律和趋势略显局限, 后续可延长数据集的时间尺度。基于高时空分辨率遥感影像探索研发秸秆火点监测、提取和验证技术,

将大大提高秸秆露天焚烧监测的精度和信度；同时，秸秆焚烧的生态环境效应，禁烧政策实施效果评估，秸秆资源化高效利用研发等方面，都值得在后续研究中进一步深入。

致谢：感谢匿名评审专家在论文评审中所付出的宝贵时间和精力，评审专家对本文文献综述写作方法、静态耕地数据误差、语言表达方面的修改意见，使本文受益匪浅。

参考文献(References)

- [1] 郑凤英, 张英珊. 我国秸秆资源的利用现状及其综合利用前景. 西部资源, 2007, 16(1): 25-26. [Zheng Fengying, Zhang Yingshan. The utilization status and comprehensive utilization prospect of straw resources in China. Western Resources, 2007, 16(1): 25-26.]
- [2] 国家统计局. 2010-2017年我国秸秆理论资源量及可收集资源量. <https://baijiahao.baidu.com/s?id=1609929438736161928&wfr=spider&for=pc>, 2018-08-28. [National Statistics. The theoretical resources of straw in China and the resources that can be collected from 2010 to 2017. <https://baijiahao.baidu.com/s?id=1609929438736161928&wfr=spider&for=pc>, 2018-08-28.]
- [3] 贾秀飞, 叶鸿蔚. 秸秆焚烧污染治理的政策工具选择: 基于公共政策学、经济学维度的分析. 干旱区资源与环境, 2016, 30(1): 36-41. [Jia Xiufei, Ye Hongwei. The policy tool selection of straw burning pollution control: Based on the analysis of public policy and economics. Journal of Arid Land Resources and Environment, 2016, 30(1): 36-41.]
- [4] 何立明, 王文杰, 王桥, 等. 中国秸秆焚烧的遥感监测与分析. 中国环境监测, 2007, 23(1): 42-50. [He Liming, Wang Wenjie, Wang Qiao, et al. Remote sensing monitoring and analysis of straw burning in China. Environmental Monitoring in China, 2007, 23(1): 42-50.]
- [5] 彭立群, 张强, 贺克斌. 基于调查的中国秸秆露天焚烧污染物排放清单. 环境科学研究, 2016, 29(8): 1109-1118. [Peng Liqun, Zhang Qiang, He Libin. Pollutant emission inventory of China straw open burning based on investigation. Research of Environmental Sciences, 2016, 29(8): 1109-1118.]
- [6] 王书肖, 张楚莹. 中国秸秆露天焚烧大气污染物排放时空分布. 中国科技论文, 2008, 3(5): 329-333. [Wang Shuxiao, Zhang Chuying. Spatial and temporal distribution of air pollutants emitted by straw burning in open air in China. China Sciencepaper, 2008, 3(5): 329-333.]
- [7] 徐玉宏. 我国秸秆焚烧污染与防治对策. 环境与可持续发展, 2007, (3): 21-24. [Xu Yuhong. Pollution from straw burning in China and its countermeasures. Environment And Sustainable Development, 2007, (3): 21-24.]
- [8] 秸秆禁烧和综合利用管理办法. 资源节约和综合利用, 1999, (3): 6-6. [Administrative measures on prohibition of burning and comprehensive utilization of straw. Resources Economization and Comprehensive Utilization, 1999, (3): 6-6.]
- [9] 厉青, 张丽娟, 吴传庆, 等. 基于卫星遥感的秸秆焚烧监测及对空气质量影响分析. 生态与农村环境学报, 2009, 25(1): 32-37. [Li Qing, Zhang Lijuan, Wu Chuanqing, et al. Monitoring of straw burning based on satellite remote sensing and analysis of its effect on air quality. Journal of Ecology and Rural Environment, 2009, 25(1): 32-37.]
- [10] Muirhead K, Cracknell A P. Straw burning over Great Britain detected by AVHRR. International Journal of Remote Sensing, 1985, 6(5): 827-833.
- [11] Cracknell A P, Saradjian M R. Monitoring of straw burning in the U.K. using AVHRR data-Summer 1995. International Journal of Remote Sensing, 1996, 17(12): 2463-2466.
- [12] Mccarty J L, Korontzi S, Justice C O, et al. The spatial and temporal distribution of crop residue burning in the contiguous United States. Science of the Total Environment, 2009, 407(21): 5701-5712.
- [13] Verma S, Dar J A, Malasiya D, et al. A MODIS-based spatiotemporal assessment of agricultural residue burning in Madhya Pradesh, India. Ecological Indicators, 2019, 105: 496-504.
- [14] 张树誉, 李登科, 景毅刚. "3S"技术在关中地区秸秆焚烧遥感监测中的应用. 环境监测管理与技术, 2005, 17(2): 17-20. [Zhang Shuyu, Li Dengke, Jing Yigang. Application of "3S" technology in remote sensing monitoring of straw burning in Guanzhong area. The Administration and Technique of Environmental Monitoring, 2005, 17(2): 17-20.]
- [15] 胡梅, 齐述华, 舒晓波, 等. 华北平原秸秆焚烧火点的MODIS影像识别监测. 地球信息科学学报, 2008, 10(6): 802-807. [Hu Mei, Qi Shuhua, Shu Xiaobo, et al. MODIS image recognition and monitoring of straw burning in north China plain. Journal of Geo-information Science, 2008, 10(6): 802-807.]
- [16] 张彦, 刘婷, 李冰, 等. 基于MODIS数据的河南省秋季作物秸秆焚烧火点监测研究. 河南农业科学, 2016, 45(11): 149-154. [Zhang Yan, Liu Ting, Li Bing, et al. Monitoring of crop straw burning in autumn in Henan province based on MODIS data. Journal of Henan Agricultural Sciences, 2016, 45(11): 149-154.]

- [17] 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. 环境与可持续发展, 2016, 41(6): 61-65. [Zhang Lijuan, Li Qing, Chen Hui, et al. Comparative analysis of remote sensing monitoring results of straw burning in China during summer and autumn harvest from 2014 to 2015. Environment And Sustainable Development, 2016, 41(6): 61-65.]
- [18] 毛慧琴, 张丽娟, 厉青, 等. 基于卫星遥感的东北三省露天秸秆焚烧及其排放研究. 中国农业资源与区划, 2018, 39(4): 59-66. [Mao Huiqin, Zhang Lijuan, Li Qing, et al. Study on open air straw burning and its emission in three provinces of northeast China based on satellite remote sensing. Journal of China Agricultural Resources and Regional Planning, 2018, 39(4): 59-66.]
- [19] 李佳, 李舒婷, 段平, 等. 基于MODIS的河南省秸秆焚烧遥感监测与分析. 测绘工程, 2018, 27(1): 42-46. [Li Jia, Li Shuting, Duan Ping, et al. Remote sensing monitoring and analysis of straw burning in Henan province based on MODIS. Engineering of Surveying and Mapping, 2018, 27(1): 42-46.]
- [20] 张景源, 杨绪红, 涂心萌, 等. 2014—2018年中国田间秸秆焚烧火点的时空变化. 农业工程学报, 2019, 35(19): 191-199. [Zhang Jingyuan, Yang Xuhong, Tu Xinmeng, et al. Spatio-temporal change of straw burning fire points in field of China from 2014 to 2018. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2019, 35(19): 191-199.]
- [21] 杨存建, 刘纪远, 张增祥, 等. 不同高程带上的土壤侵蚀特征分析. 水土保持通报, 2001, 21(4): 15-18. [Yang Cunjian, Liu Jiyuan, Zhang Zengxiang, et al. Analysis of soil erosion characteristics in different elevation zones. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2001, 21(4): 15-18.]
- [22] 涂汉明, 刘振东. 中国地势起伏度研究. 测绘学报, 1991, 20(4): 311-319. [Tu Hanming, Liu Zhendong. A study on the topography of China. Acta Geodaetica et Cartographica Sinica, 1991, 20(4): 311-319.]
- [23] 张庆忠. 秸秆焚烧缘何屡禁难止?. 世界环境, 2008(1): 46-47. [Zhang Qingzhong. Why is straw burning difficult to stop?. World Environment, 2008(1): 46-47.]
- [24] 中国航空报. 我国农机行业的国际化趋势. <http://www.cannews.com.cn/2019/0131/189200.shtml>, 2019-01-31. [China Aviation News. The internationalization trend of agricultural machinery industry in China. <http://www.cannews.com.cn/2019/0131/189200.shtml>, 2019-01-31.]
- [25] 苏瑜, 黄连光, 王秀敏. 秸秆焚烧现状与对策探讨. 宁夏农林科技, 2012, 53(3): 113-114. [Su Yu, Huang Lianguang, Wang Xiumin. The discussion of present situation and countermeasures of straw burning. Ningxia Journal of Agriculture And Forestry Science And Technology, 2012, 53(3): 113-114.]
- [26] 郭莉, 陈静, 朱晓东, 等. 农村秸秆焚烧的原因及对策研究. 中国人口·资源与环境, 2001, 11(S1): 111-113. [Wu Li, Chen Jing, Zhu Xiaodong, et al. Study on causes and countermeasures of rural straw burning. China Population, Resources and Environment, 2001, 11(S1): 111-113.]

Analyzing geographical characteristics of straw burning in China during 2014-2019

TU Ximmeng, YANG Xuhong, ZHANG Jingyuan, LUAN Xinchun, NING Kexin

(School of Geography and Ocean Science, Nanjing University, Nanjing 210023, China)

Abstract: Objectively and precisely depicting the spatial distribution characteristics of straw burning is of great significance to scientifically guide the prohibition of straw burning and improve the efficiency of administrative supervision. Based on Satsee-Fire point datasets in China during 2014-2019, natural environment and population-economy data, China's straw fire points database and nature-population-economics database established by terrain, social and economic data, this study used GIS analysis tools and mathematical statistics methods to examine the distribution characteristics of straw burning fire points in China during the 6 years under the influences of 7 factors in 3 aspects including terrain, public transport and the population-economy. The results showed that: (1) straw burning phenomenon concentrated in areas whose elevation was less than 250 m and gradient was less than 8° . And the number of fire points which are located on the north slope or the south slope accounted for 42.65% and 37.36% of the total, respectively. (2) Straw burning presented different spatial characteristics in the forbidden area of airports and railways. The farther away from the airport, the more common the straw burning was. Approximately 60% of the straw burning in the forbidden area of the airports took place 11-15 km away from the airport. However, the distribution of straw burning fire points in the forbidden area of railways were more balanced, and the internal circle was slightly more dense than the external region on the whole. In terms of space, the fire point density increased gradually with the increase of latitude. The number of fire points in the forbidden area of railways in Shanxi, Inner Mongolia, Hebei and the three provinces of Northeast China accounts for 76.88% of the total. (3) Nearly 70% of straw burning occurred in counties with a population density of less than 250 people/km², while 58.17% occurred in counties with annual GDP less than 10 billion yuan. There was a negative correlation between the phenomenon of straw burning and the population density and GDP level of the county, that is, the larger the population density and the more developed the county economy was, the rarer the phenomenon of straw burning was.

Keywords: straw burning; geographical characteristic; spatial heterogeneity; China