

2014–2018年中国田间秸秆焚烧火点的时空变化

张景源, 杨绪红*, 涂心萌, 宁可心, 栾心晨

(南京大学地理与海洋科学学院, 南京 210023)

摘要:从长时间序列、全国尺度剖析田间秸秆露天焚烧现象,对科学疏导秸秆露天焚烧和提高行政监管效率具有重要意义。基于2014-2018年的中国区域内Satsee-Fire火点数据,经过数据转换、提取、清洗等处理流程后,本研究构建了2014-2018年中国秸秆露天焚烧火点数据集,并进一步采用重心转移模型、空间自相关模型和 k 均值聚类模型从不同时空尺度探索了近五年中国田间秸秆露天焚烧火点的时空分布格局及其演变特征。结果表明:中国秸秆露天焚烧政策成效显著,研究时段内秸秆火点数量呈现显著的逐年单调递减态势,年均降低率达22.43%;月际间秸秆火点集中在2-4月、10-11月,合计占全年比重的85.71%;空间上集聚在东北、华北和华中地区,黑吉辽地区占比高达56.37%,如以胡焕庸线为界限,则东南半壁和西南半壁分别占全部火点的78.73%、21.27%。年际间秸秆火点重心主要位于辽宁-河北一带,受东北地区秸秆火点逐年减少影响,总体呈现向西南方向迁移的发展特征;月际间秸秆火点重心呈明显的回字形迁移轨迹。秸秆火点的全局空间自相关介于0.33~0.49,总体在较低水平,并呈现逐年降低态势,在空间上的集聚现象在不断分化,火点的离散分布态势愈加明显,以往高密度秸秆火点的县域密集分布现象在空间不断离散。不同省份的秸秆焚烧现象呈现出“秋冬季主导型”、“春季主导型”和“秋季主导型”3种聚类类型,不同地区的秸秆焚烧规律与其种植制度、作物类型和物候节律具有密切关系。在对秸秆焚烧现象进行管控和疏导时,应充分考虑当地物候节律,以降低行政成本和提高行政效率。

关键词:遥感;秸秆;焚烧;着火点;时空分布

doi:10.11975/j.issn.1002-6819.2019.19.023 <http://www.tcsae.org>

中图分类号:X87 文献标志码:A 文章编号:1002-6819(2019)-19-0191-09

张景源, 杨绪红, 涂心萌, 宁可心, 栾心晨. 2014-2018年中国田间秸秆焚烧火点的时空变化[J]. 农业工程学报, 2019, 35(19): 191–199. doi:10.11975/j.issn.1002-6819.2019.19.023 <http://www.tcsae.org>

Zhang Jingyuan, Yang Xuhong, Tu Xinmeng, Ning Kexin, Luan Xinchun. Spatio-temporal change of straw burning fire points in field of China from 2014 to 2018[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2019, 35(19): 191–199. (in Chinese with English abstract) doi:10.11975/j.issn.1002-6819.2019.19.023 <http://www.tcsae.org>

0 引言

生物质燃烧排放的及其二次形成的气体与颗粒等产物对区域乃至全球的大气环境有着重要影响^[1-4],而农作物秸秆燃烧是中国生物质燃烧的重要表现形式之一^[5-6]。作为农业种植大国,中国农作物秸秆产量巨大,年均秸秆产量高达 $8.02 \times 10^8 \text{ t}$ ^[7],为快速高效处理作物收割后的残余秸秆,便于下一茬农作物的播种和成长,农户可以选择多样化的秸秆处理方式,如用作生活柴薪、动物饲料、回收出售和田头堆弃等^[8],但由于农忙时间仓促、劳动力人手不够、燃料结构调整以及对秸秆焚烧的认识不够等因

素,使得中国大量农作物秸秆在田间露天焚烧,据学者估计,中国年均秸秆露天焚烧量约为 $1.40 \times 10^8 \text{ t}$ ^[9]。大规模的秸秆田间焚烧会产生大量的碳氧化物、氮氧化物、苯以及环芳烃等有害气体和颗粒物,危害人体健康的同时,对大气环境、交通安全和火灾防护造成极大的隐患^[10]。自1999年起,中国各级政府为制止田间秸秆露天焚烧现象相继发布了多项政策,如《秸秆禁烧和综合利用管理办法》(环发[1999]98号)、《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),要求进一步大力推进生态文明建设,完善秸秆收储体系,加大秸秆禁烧力度,提高禁燃监管水平。但由于现阶段秸秆焚烧空间分布复杂多变,查证监管耗时耗力,且具有“点多量少、火点零星、时点随机”等特点,田间秸秆露天焚烧的政策成效不太显著,据调查全国秸秆露天焚烧比例达到20.80%,部

收稿日期:2019-05-12 修订日期:2019-06-05

基金项目:国家自然科学基金项目(41801065)

作者简介:张景源,博士生,主修GIS开发与应用。Email: jingyu-an1998@yahoo.com

*通信作者:杨绪红,博士,助理研究员,主要从事土地利用与国土规划、空间建模研究。Email: yangxhnju@nju.edu.cn

分地区如湖南、湖南省、河南省和安徽省,秸秆露天焚烧比例甚至分别高达43.10%、20.80%和39.70%^[11]。客观、精细地刻画秸秆焚烧火点的时空分布特征,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。

传统的田间秸秆焚烧监测大多采用自下而上的地面调查方法^[12],农户调查涉及面窄、低效耗时,对中宏观尺度秸秆焚烧空间分布的估计存在较大的不确定性且无法获取火点的时空信息^[13-15]。近年来,利用遥感观测自上而下获取秸秆焚烧的时空特征得到学界的广泛关注^[16-19],其基本原理是基于维恩位移定律,当物体温度愈高时其辐射谱的波长越短,常温地物热辐射的波峰位于长波红外波段,当温度升高时,热辐射的峰值将向波长较短的波段移动^[20]。因此,可利用遥感中分辨率成像光谱仪观测地面中红外辐射光谱的能量变化,进而记录地表异常高温物体。据此,杨珊荣等开发了基于MODIS数据进行秸秆焚烧火点提取的算法^[21];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^[22];刘海新等分析了2005-2015年京津冀地区6月麦秸秆焚烧的时空变化^[23];李佳等依据火点像元亮温特征提取比较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^[24];张丽娟等和厉青等分别考察了中国2015年夏秋季节以及2007年6月秸秆焚烧火点的总体分布^[25-26];何立明等利用四年MODIS火点数据进行秸秆焚烧的监测,发现2002-2005年全国秸秆焚烧面积逐年上升^[27]。综合来看,上述研究从研究方法、研究视角和时空尺度等方面对中国秸秆焚烧的时空格局进行了有效探索,为后续研究积累了丰富的经验;但已有研究大多聚焦在局部地区长时段或全国范围单时段的秸秆火点时空变化特征,对宏观尺度、长时间序列秸秆焚烧火点分布及其时空格局变化等方面的研究并未有充分涉及。

鉴于此,本文基于2014-2018年中国区域内Satsee-Fire火点数据集,经过数据转换、数据提取、数据清洗等处理后,采用重心转移模型、空间自相关模型和k均值聚类模型从不同时间尺度和空间尺度探索连续5 a中国田间秸秆露天焚烧火点分布的时空格局及其演变,以期全面反映中国秸秆焚烧的时空变化及其趋势,为科学规范作物秸秆禁烧行为和提高行政监管效率提供借鉴。

1 材料与方法

1.1 数据来源及预处理

本研究火点数据源自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数据集SatSee-Fire (Satellite See Fire, <http://satsee.radi.ac.cn:8080/index.html>)。时间跨度为2014年1月1日至2018年12月31日(其中2014年、2015年与2016年缺12月份数据),数据集属性信息包括高温点ID、经度和纬度、捕获日期、反演温度、反演面积和高温点捕获信度。该数据集为何阳等^[28]利用Landsat-8等陆地卫星遥感观测数据,根据高温火点波谱特征,采用归一化燃烧植被指数(NBRS)结果自适应

地确定阈值提取的异常高温点,对包含秸秆焚烧火点在内的异常高温点有着较好的识别作用。中国县域行政区空间矢量数据和耕地图斑源于中国科学院资源环境科学数据中心(<http://www.resdc.cn/>),其中耕地矢量图斑从2015年中国土地利用现状遥感监测数据中提取。

原始火点数据集包含了2014-2018年亚洲区森林火灾、工业烟囱火点、油田火点、田间秸秆火点和野火等高温异常点,数据格式为文本。在进行田间秸秆火点时空分析前进行数据预处理:首先,将2014-2018年亚洲地区异常高温点逐月数据转绘为矢量点数据,定义投影为兰伯特投影,并将信度低于阈值的疑似火点剔除;然后,剔除境外和海域内的火点,提取中国陆域范围内的高温异常点位信息(未含港澳台地区)。由于秸秆火点的开尔文温度介于500~1 000 K^[25],据此剔除温度明显过高或过低的火点;针对火点数据集中常年累月稳定火点数据(同一地点在一年中超过3个不同时间被检出高温点即认为是稳定火点,主要是烟囱火点),采用Python编程依次将稳定火点剔除。最后,以中国耕地图斑作为掩膜,提取出落入耕地图斑范围内的火点,构建田间秸秆火点空间数据集(技术路线如图1a)。据此识别得到2014-2018年中国田间秸秆焚烧火点共计27 375个,利用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作为(2016年7月至2017年2月共监测到秸秆火点2 699个),本研究在该时段内提取出火点总数为2 517个,两者的数量差异率约为6.74%;此外,以验证火点数据做1km的缓冲区,统计本研究同时段的火点落入缓冲区的数量为2 408个,由此得到本研究火点数据集的空间一致性精度约为89.23%,数据基本可信,可用于后续分析,结果如图1b所示。

1.2 研究方法

1.2.1 重心模型

“重心”为物理学概念,指一个物体各部分所受重力合力的作用点^[29-30]。为探索秸秆焚烧火点的时空变化轨迹,本研究引入重心模型以表征秸秆焚烧火点整体的空间迁移。定义中国田间秸秆焚烧火点重心 (\bar{X}, \bar{Y}) 为

$$\bar{X} = \sum_{i=1}^n (S_i \times X_i) / \sum_{i=1}^n S_i \quad (1)$$

$$\bar{Y} = \sum_{i=1}^n (S_i \times Y_i) / \sum_{i=1}^n S_i \quad (2)$$

式中 \bar{X}, \bar{Y} 分别为中国田间秸秆焚烧火点重心的经度和纬度, n 为全国县域个数, S_i 为第 i 个县域的秸秆焚烧火点个数, X_i, Y_i 为第 i 个县域的重心经纬度(此处用行政中心^[31])。当田间秸秆焚烧火点重心发生移动时,即表明秸秆焚烧空间格局发生变化;重心移动方向指示了秸秆焚烧相对增多的方向,偏离距离指示了秸秆焚烧相对增多的程度。

1.2.2 空间自相关分析

空间自相关是衡量位于区域不同空间位置某一属性值之间相关性的指标,是对空间集聚程度的一种度量,分为全局空间自相关和局部空间自相关2种计算方法^[32-33]。

1) 空间权重矩阵

本研究根据火点数据特征,基于邻接规则选取一阶四邻域Rook邻接权重矩阵 W_{ij} ,定义如下^[34]:

$$W_{ij} = \begin{cases} 1, & \text{区域}i\text{与区域}j\text{不相邻} \\ 0, & \text{其他} \end{cases} \quad (3)$$

2) 全局空间自相关

全局空间自相关测度指标选用Global Moran's I ^[35-36],计算公式如下:

$$I = \frac{n \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n W_{ij} (X_i - \bar{X})(X_j - \bar{X})}{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n (W_{ij}) \sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})^2} \quad (4)$$

式中 n 为研究区内县区总数; X_i, X_j 分别为县 i, j 的田间秸秆焚烧火点数; \bar{X} 为属性 X 的平均值; W_{ij} 是空间权重矩阵。 I 取值在 $[-1, 1]$ 之间。Global Moran's I 大于0表示空间正相关,愈趋向于1相似属性值聚集愈明显; I 等于0说明不存在空间自相关性,属性值在空间上随机分布; I 小于0表示空间负相关,愈趋向于-1相异属性值聚集愈明显。

3) 局部空间自相关

全局空间自相关可反映研究区总体属性值与邻域之间的平均差异程度,但难探测出聚集位置及区域相关程度。而局部空间自相关主要用于分析各属性单元在空间

上的分布格局,可度量每个区域与周围地区之间局部空间关联程度^[37],常用指标为Local Moran's I ,计算公式如下:

$$I_i = \frac{n(X_i - \bar{X}) \sum_{j=1}^n W_{ij} (X_j - \bar{X})}{\sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})^2} \quad (5)$$

式中 I_i 为局部空间自相关系数。本研究采用空间自相关模型分析县域尺度下秸秆露天火点的空间聚集或离散特征。

1.2.3 k 均值聚类

划分为 k 个类簇 $C=\{c_1, c_2, \dots, c_k\}$, k 为事先给定的聚类数目。 k 均值的目标是使得各类簇的对象到其所属的类簇中心的距离平方和最小,即 J 最小:

$$J = \sum_{k=1}^k \sum_{i=1}^n \|x_i - u_k\|^2 \quad (6)$$

式中 u_k 为第 k 个类簇的中心。本研究利用 k 均值聚类探索不同地区秸秆焚烧的主导季节,具体是首先对各地区不同月份秸秆焚烧火点数进行归一化,即将每月秸秆焚烧火点数占全年的比例作为特征向量,再选择合适的 k 类簇,采用 k 均值聚类方法进行聚类,当所得的 J 最小时,该 k 类簇即为不同地区的秸秆焚烧在年内的分类,以此分析不同地区田间秸秆焚烧火点在年内分布情况。

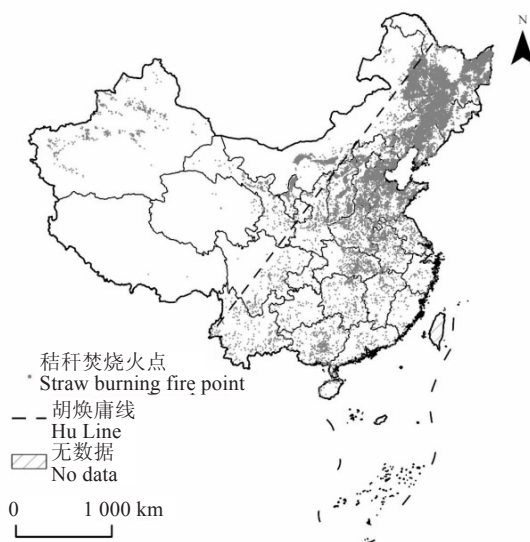
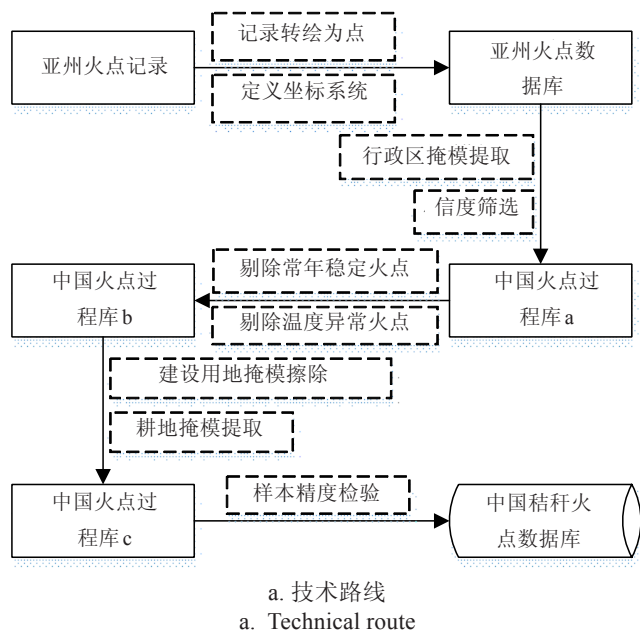


图1 秸秆露天焚烧火点提取技术路线及其空间分布

Fig.1 Technical route and spatial distribution of straw burning fire points

2 结果与分析

2.1 田间秸秆焚烧火点的时间变化特征

分析结果显示,2014-2018年中国共有田间秸秆焚烧火点27 375个,年均秸秆火点数量为5 475个。研究时段内田间秸秆焚烧火点数量呈现逐年单调递减态势(图2a);其中,田间秸秆焚烧火点数量的峰值出现在2014年(7 765个),之后逐年递减,2015年为6 181个,2016年为5 782个,2017年为4 836个,2018年为2 811个,5 a间秸秆焚烧火点减少了近5千个,年均减少990个,年均减少率达22.43%。月际间秸秆焚烧火点数量差异十分显著(图2b);研究时段内秸秆焚烧火点集中出现在10-11月和

2-4月,其中2-4月份火点数量共有13607个,占全年火点数量的49.71%,10-11月火点数量共有9 854个,占全年火点数量的36.00%,合计85.71%。平均每月火点数量为5 475个;火点数量峰值出现在3月份,达到6 839个。

按季度对5 a火点数量进行统计,结果表明(图3):秋季(9-11月)秸秆焚烧火点数量最多,且变化最为显著,研究时段内持续降低,火点数量减少了3 385个,减少比例高达88.22%。夏季(6-8月)秸秆焚烧火点数量始终处于较低水平,介于74~227个之间,并呈现先减后增的变化趋势,5 a合计减少了153个,减少比例为67.40%。春季(3-5月)和冬季(12-2月)则呈现高位波动

略有减少的变化特征,火点数分别减少了 601 和 909, 减少比例分别为 28.15% 和 58.05%。2014-2018 年秸秆焚烧火点总数的持续减少主要是由于秋季秸秆焚烧火点数量逐年降低,而当前秋季、春季秸秆焚烧火点数量分别处于低位和高位,如要进一步控制秸秆露天焚烧现象,建议在现有监管防控基础上加大春季秸秆露天焚烧的查处力度。

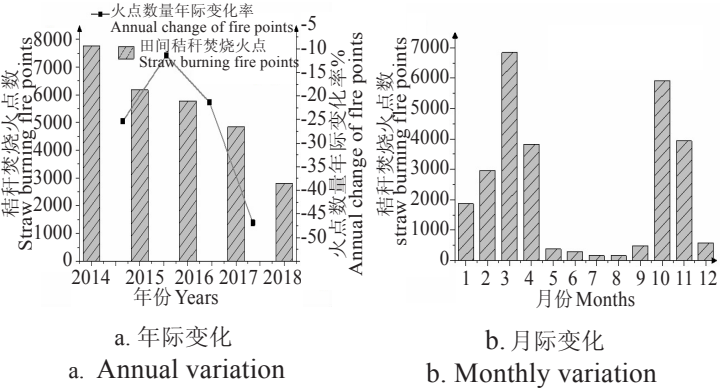


图 2 2014-2018 年秸秆焚烧火点年际和月际变化
Fig.2 Annual and monthly variation of straw burning fire points from 2014 to 2018

2.2 田间秸秆焚烧火点的空间变化特征

研究期内,中国田间秸秆焚烧火点主要分布在东北、华北和华中地区,而华南、华东和西北地区秸秆火点数量相对较少,总体与中国的各主要粮食产区相一致,如以胡焕庸线为界限,则东南半壁田间秸秆焚烧火点数为 21 551 个,占全部火点的 78.73%,西北半壁火点数为 5 824 个,仅占全部田

间秸秆焚烧火点数的 21.27%;田间秸秆焚烧火点数超过 1 000 个的省域共有 7 个,分别为黑龙江、吉林、辽宁、内蒙古、河北、山东、山西,而上海市秸秆焚烧火点数低于 10 个。

从省域分布情况来看,研究期内全国秸秆焚烧火点的空间分布发生了较大的变化,高达 84.80% 的省域秸秆焚烧火点显著减少,少数省份略有增多。其中,黑龙江省、吉林省、辽宁省 3 个省份的田间秸秆焚烧火点减少数量最多,研究期内黑龙江省秸秆焚烧火点年均降低 31.52%;河北、四川、海南、新疆、云南等地区田间秸秆焚烧火点数量出现小幅增加,以火点增加数量最多的河北省为例,研究期内也仅增加 131 个。空间变化结果与近五年来中国不断加大秸秆焚烧行政监管与处罚力度密切相关,反映了中国秸秆禁烧政策成效显著。由于东北地区是中国重要的粮食产地,小麦、玉米和大豆等秸秆资源十分丰富,秸秆焚烧现象亦较为常见。依据秸秆火点提取结果,黑龙江、吉林、辽宁省近五年火点数依次为 7 733、4 548 和 3 153 个,占全国秸秆焚烧火点数比例分别为 28.25%、16.61% 和 11.52%,合计 57.37% 是全国火点数最多的前 3 省份;尽管在近五年该地区秸秆焚烧火点数大幅下降,但其绝对值仍处于高位。究其原因可能是该地区秸秆利用仍处于初级粗放阶段,技术回收体系、农户认识等存在局限,加之地广人稀、监管力量不够^[38];该地区的秸秆焚烧对中国北方的空气质量有很大影响,应有针对性地进一步提高该地区秸秆资源化利用水平和加强管控,减少秸秆焚烧量^[31]。

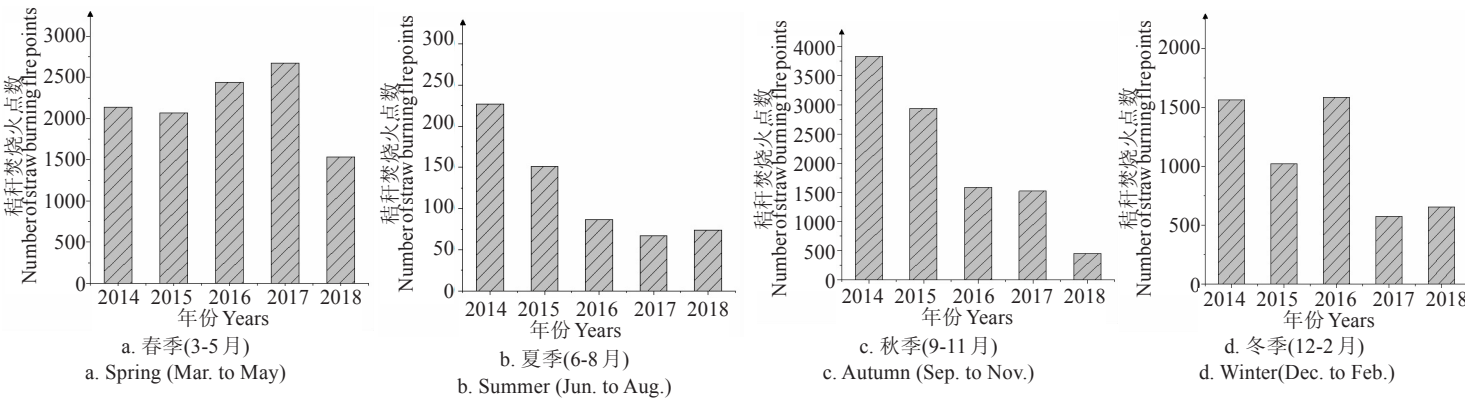


图 3 2014-2018 秸秆焚烧火点季度变化情况
Fig.3 Seasonal variation of straw burning fire points from 2014 to 2018

不同省份的秸秆焚烧火点数量在近五年中变化各异:黑龙江、辽宁等省份 2014-2018 年田间秸秆焚烧火点数量持续下降;内蒙古、新疆等省份田间秸秆焚烧火点数量先增后减;云南省在研究期内田间秸秆焚烧火点数量呈现持续递增的趋势。将省域秸秆火点变化率以 50% 的相等间隔分成 5 类(图 4),结果显示:各省秸秆焚烧火点数变化率介于 -100%~274% 之间。其中,西藏、江西、湖北等 11 个省份变化率低于 -50%,属于田间秸秆焚烧火点快速减少的省份;新疆、海南、云南 3 个省份增长率大于 100%,属于田间秸秆焚烧火点较快增加的省份;其余多数省份增长率处于 -50%~100% 之间,属于秸秆焚烧火点数量相对平稳变化的省份。不同省份的秸秆焚烧火点数量变化的趋势与速度直接反映了不同地区秸秆资源管控和处理

水平的差异。

2.3 田间秸秆焚烧火点的重心转移特征

以县域为统计单元,对逐年田间秸秆焚烧火点进行重心分析,结果如图 5。研究期内,年际间全国秸秆焚烧火点重心向东北方向偏移,主要介于辽宁-河北一带,其中:2014-2016 年秸秆火点重心在辽宁省西部并向西南移动,2017 年北移至内蒙古东侧的库伦旗,而 2018 年向东南移动至北京市密云县,五年间移动距离合计 340.27 km,总体呈现向西南方向移动的发展趋势。结合前述省域秸秆火点数量变化情况可知,该种变化趋势主要受近五年中国东北地区的黑、吉、辽、蒙秸秆焚烧现象在逐年减少,而华中、西南和西北地区的秸秆火点现象并未显著增加所致。

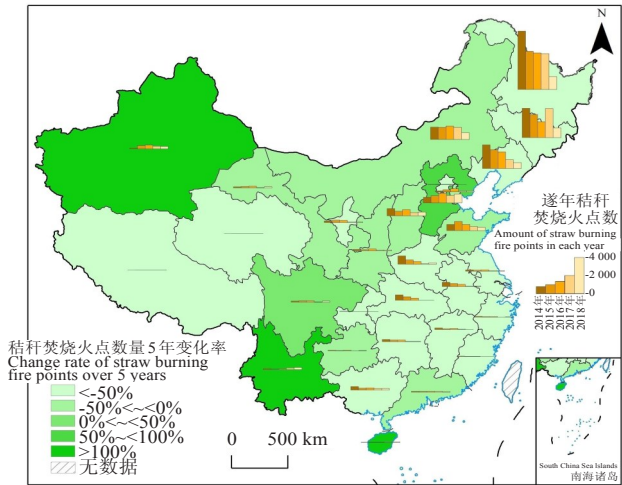


图 4 2014-2018 年不同省份田间秸秆焚烧火点年度变化情况
Fig.4 Annual changes of straw burning fire points at provincial level

年内逐月秸秆焚烧火点重心分析结果如图 5b。研究期内,全国田间秸秆焚烧火点重心在月际间呈现明显的回字形迁移轨迹,1-4 月往东北迁移,4-7 月往西南迁移,7-11 月又往东北迁移,之后 11-12 月往西南迁移,重心回到 1 月份的所在位置附近;此外,月际间秸秆火点重心总体位于中国华北地区北部和东北地区。这种变化轨迹与东北地区 and 南方大部分地区 2 季农作物交替收割季节相一致,反映了主要粮食种植区由于种植制度、季节和作物类型等差异使得秸秆焚烧整体格局在空间上呈现不断迂回的迁移格局。

2.4 田间秸秆焚烧火点的空间自相关特征

为探索田间秸秆焚烧火点在空间分布上的集聚特征,采用空间自相关模型以县域火点数量为分析对象,算得全局莫兰指数(Global Moran's I)和局部莫兰指数(Lo-

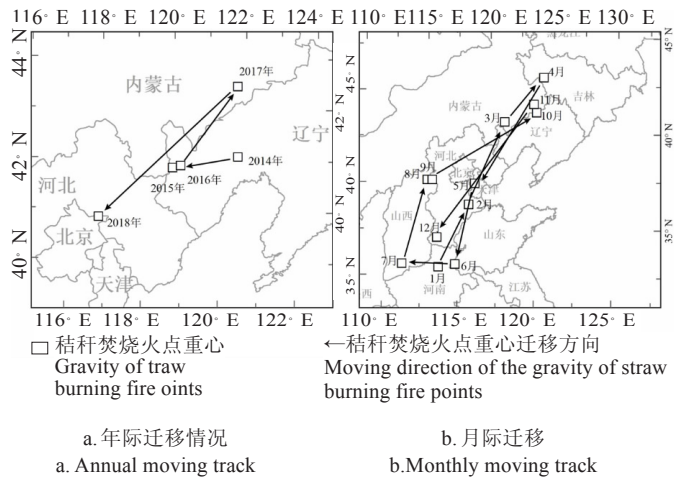


图 5 秸秆焚烧火点分布重心年际与月际迁移情况
Fig.5 Moving tracks of gravity of straw burning fire points at annual and monthly level

cal Moran's I),其中空间权重矩阵采用欧式距离量测和二次距离加权。结果表明,2014-2018 年县域秸秆焚烧火点的莫兰指数介于 0.33-0.49 (P 值均小于 0.05, Z 值均大于 2.5,通过显著性检验)。其中,莫兰指数在逐年降低,2014 年的莫兰指数最大(0.49),2018 年最小(0.33)。5 a 综合后的县域秸秆火点莫兰指数仅为 0.53,呈现较弱的空间集聚态势。由此来看,中国秸秆火点的空间自相关总体在较低水平,并且呈现逐年降低趋势,在空间上的集聚在不断分化,火点的离散分布态势愈加明显。

田间秸秆火点逐年的局部空间自相关结果见图 6。分析可知,相较而言高值-高值聚集区(“高-高”类型)和低值-低值聚集区(“低-低”类型)在空间分布上具有明显的集聚特征,而其余类型区的集聚效应不太明显,具体如下:

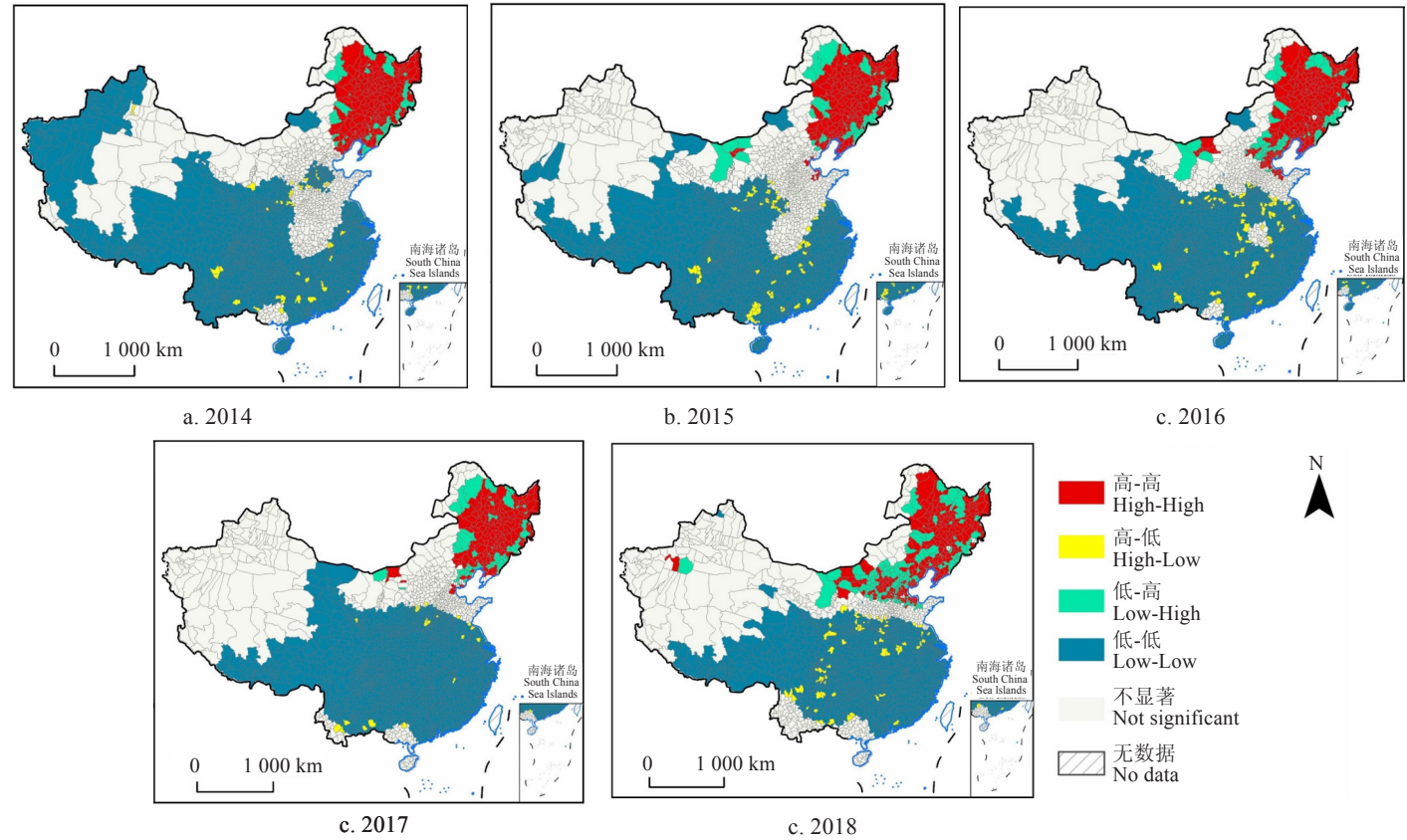


图 6 2014-2018 年县域火点自相关分析结果
Fig.6 Autocorrelation analysis of fire points at county level from 2014 to 2018

1)“高-高”类型主要分布于东北地区,以松嫩平原为核心,2014年包含161个县域单元,5 a间数量略有增加,2018年包含243个县级单元,年均变化率8.58%,增加区域主要在海河平原和内蒙古高原南侧的部分地区,而东北地区略有减少,在空间格局上有逐步扩散态势。

2)“高-低”类型分散分布于中国秦岭-淮河以南的大部分地区,在广西盆地、四川盆地南部、江汉平原、黄淮平原等地有零星分散,5 a包含的县级单元数量依次仅为43、55、74、22和67个,总体呈现波动增加态势,年均变化率9.28%。

3)“低-高”类型围绕着“高-高”类型区,主要分布于东北地区的山地丘陵地带,2014年含有51个县级单元,包括大、小兴安岭,长白山等地区;5 a间呈现明显增长态势,2018年扩充到180个县级单元,年均变化率28.7%,主要增加区域位于内蒙古高原南侧、山西高原、海河平原一带的部分地区。

4)“低-低”类型覆盖了中国南方的大部分地区和西北部地区。2014年含有1 496个县级单元,2018年含有1 405个县级单元,个数总量基本保持稳定,但空间分布存在较大变动,随着时间推移,塔里木盆地西部和天山山脉一带不再呈现“低-低”类型特征,而黄淮平原和江汉平原一带“低-低”类型特征逐渐明显。

从空间自相关结果来看,研究期内田间秸秆焚烧火点空间相关系数不断减小,集聚效应不断减弱;随着秸秆资源利用管控疏导工作的不断深入,秸秆焚烧火点空间分布较为集中的县域在不断减少,而秸秆焚烧火点分布零散的县域却略有增加。

2.5 田间秸秆焚烧火点的聚类分析

采用 k 均值聚类模型,以省域各月秸秆焚烧火点数占全年秸秆焚烧火点数的比例为聚类对象进行聚类分析(2014-2018年上海火点数仅4个,不参与聚类)。对不同 k 值进行尝试,当组数为3时,伪 F 值为4.2381,为组数3~10之间的最大值,故将火点聚类为3类结果,结果如图7。根据各省域秸秆火点的月际分布特点,将不同省份的秸秆焚烧现象聚类为“秋冬季主导型”、“春季主导型”和“秋季主导型”。其中,“秋冬季主导型”秸秆焚烧分类标准差距离为0.197 5,分布范围最广,覆盖了华中、华南、华东的大部分地区,包含江苏、浙江、安徽、宁夏、四川、陕西、湖北、湖南、广东、广西、江西、福建等14个省级行政区,该类型秸秆焚烧主要发生在9月至次年3月,拥有2个焚烧的峰值区间,分别是1月至2月以及10月;“秋冬季主导型”地区大体为东部季风区,耕作制度以一年两熟/三熟或两年三熟为主,种植的作物以春油菜、夏水稻、冬小麦为主,如黄淮海平原春夏播玉米、冬播小麦,南方丘陵区春种夏收和夏种秋收水稻,故有2个焚烧的波峰。“春季主导型”秸秆焚烧分类标准差距离为0.212 7,覆盖了东北、华北、西南的大部分地区,包含了黑吉辽、晋冀鲁、京津、云贵藏疆、内蒙等13个省级行政区,该类型秸秆焚烧时间集中于2月至5月,峰值出现在3月,峰值出现时

间相对晚于“秋冬季主导型”地区,但在10月亦呈现少量集中焚烧现象;“春季主导型”地区大部分为一年一熟为主,主要种植春玉米、春小麦、春花生或春播大豆,焚烧物大部分来源于上一年作物收割后残留在田间的秸秆,在来年播种前集中焚烧处理。“秋季主导型”秸秆焚烧分类标准差距离为0.160 3,包括海南、甘肃、青海3个省级行政区,其秸秆焚烧现象的峰值出现在10月左右,月份分布相对均匀。由此可知,不同地区的秸秆焚烧规律与其种植制度、作物类型和物候节律具有密切关系,在对秸秆焚烧进行管控和疏导时,应充分考虑当地物候节律,以降低行政成本和提高行政效率。

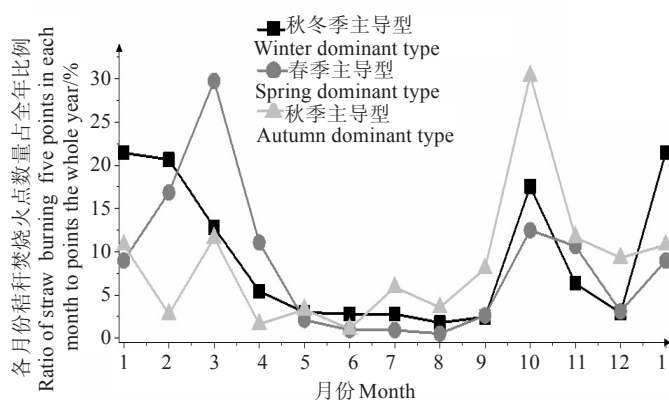


图7 秸秆焚烧火点月际聚类分布

Fig.7 Month clustering results of straw burning fire points

3 讨论

首先,如何发展高时空分辨率的秸秆火点遥感监测、提取和验证技术是当前中国乃至全球秸秆露天焚烧研究的关键核心科学问题,这是制约秸秆露天焚烧监测的主要瓶颈,也是遥感领域、地理学领域和环境科学领域日益关注的重大科学问题。其次,本研究所采用的秸秆火点基础数据源自近实时地表高温异常点数据集SatSee-Fire,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;由于该数据集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,本文在制备中国田间秸秆焚烧火点数据集时进行了多次数据清洗操作,如行政区掩膜提取、稳定火点剔除、火点温度控制、耕地掩膜提取等,虽然所得到的秸秆火点数据集样本精度较高,但由于遥感影像受云量、闪电和过境时间等因素限制,原始数据的时间分辨率、空间分辨率、信度水平最终可能会影响到本研究的精确性,而作为掩膜分析的耕地图斑采用的是单个年份数据,并不能与火点年份逐一对应,也会限制秸秆火点的精度;再者,本研究的时间序列仅为5 a,样本量有限,这对挖掘中国秸秆露天焚烧变化的一般性,规律和趋势略显不足,后续有必要延长数据的时间尺度和进一步扩充样本量;此外,中国秸秆露天焚烧空间差异显著、成因多样、驱动机制复杂,剖析其时空格局特征并不能有效杜绝秸秆露天焚烧现象,有必要进一步开展诸如农户秸秆处理的行为习惯探究、秸秆焚烧现象的驱动机制解析以及禁烧政策制度设计、执行成效评估等方面的研究。

4 结 论

基于中国区域内 Satsee-Fire 火点数据, 经过数据转换、提取、清洗等处理后, 本研究构建了 2014-2018 年中国秸秆露天焚烧火点数据库, 并进一步采用重心转移模型、空间自相关模型和 k 均值聚类模型从不同时空尺度探索了 2014-2018 年中国田间秸秆露天焚烧火点分布的时空格局及其演变, 主要结论如下:

1) 研究时段内田间秸秆焚烧火点数量逐年单调递减, 年均降低率达 22.43%; 田间秸秆焚烧火点集中在 10-11 月、2-4 月, 分别占全年比重的 36.00%、49.71%; 空间上集聚在东北、华北和华中地区, 黑吉辽三省占比高达 56.37%, 如以胡焕庸线为界限, 则东南半壁和西南半壁分别占全部火点的 78.73%、21.27%。

2) 年际田间秸秆焚烧火点重心主要位于辽宁-河北一带, 受东北地区秸秆火点逐年减少影响, 总体呈现向西南方向移动的发展格局, 而月际秸秆火点重心呈现明显的回字形迁移轨迹。

3) 秸秆火点的空间自相关总体在较低水平, 并逐年降低; 在空间上的集聚现象在不断分化, 火点的离散分布态势愈加明显, 以往高密度秸秆火点的县域密集分布现象在空间不断离散。

4) 不同省份的秸秆焚烧现象可聚类为“秋冬季主导型”、“春季主导型”和“秋季主导型”, 不同地区的秸秆焚烧规律与其种植制度、作物类型和物候节律具有密切关系, 在对秸秆焚烧现象进行管控和疏导时, 应充分考虑当地物候节律, 以降低行政成本和提高行政效率。

[参 考 文 献]

- [1] Delmas R, Lacaux J P, Brocard D. Determination of biomass burning emission factors: Methods and results [J]. *Environmental Monitoring and Assessment*, 1995, 38(2/3): 181—204.
- [2] Langmann B, Duncan B, Textor C, et al. Vegetation fire emissions and their impact on air pollution and climate[J]. *Atmospheric Environment*, 2009, 43(1): 107—116.
- [3] Cao G, Zhang X, Gong S, et al. Investigation on emission factors of particulate matter and gaseous pollutants from crop residue burning [J]. *Journal of Environmental Sciences*, 2008, 20(1): 50—55.
- [4] 朱佳雷, 王体健, 邓君俊, 等. 长三角地区秸秆焚烧污染物排放清单及其在重霾污染天气模拟中的应用[J]. *环境科学学报*, 2012, 32(12): 3045—3055.
- Zhu Jialei, Wang Tijian, Deng Junjun, et al. An emission inventory of air pollutants from crop residue burning in Yangtze River Delta Region and its application in simulation of a heavy haze weather process[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2012, 32(12): 3045—3055. (in Chinese with English abstract)
- [5] Streets D G, Yarber K F, Woo J H, et al. Biomass burning in Asia: Annual and seasonal estimates and atmospheric emissions[J]. *Global Biogeochemical Cycles*, 2003, 17(4): 1099.
- [6] Yao C, Chen C, Li M. Analysis of rural residential energy consumption and corresponding carbon emissions in China[J]. *Energy*

Policy, 2012, 41: 445—450.

- [7] 车莉. 农作物秸秆资源量估算、分布与利用潜力研究[D]. 大连: 大连理工大学, 2014.
- Che Li. Study on Crop Residue Estimate, Spatial Distribution and Use Potential[D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2014. (in Chinese with English abstract)
- [8] 韩鲁佳, 闫巧娟, 刘向阳, 等. 中国农作物秸秆资源及其利用现状[J]. *农业工程学报*, 2002, 18(3): 87—91.
- Han Lujia, Yan Qiaojuan, Liu Xiangyang, et al. Straw resources and their utilization in China[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering(Transactions of the CSAE)*, 2002, 18(3): 87—91. (in Chinese with English abstract)
- [9] 曹国良, 张小曳, 王亚强, 等. 中国区域农田秸秆露天焚烧排放量的估算[J]. *科学通报*, 2007, 52(15): 1826—1831.
- Cao Guoliang, Zhang Xiaoye, Wang Yaqiang, et al. Estimation the quantity of crop residues burnt in open field in China regional farmland[J]. *Chinese Science Bulletin*, 2007, 52 (15): 1826 — 1831. (in Chinese with English abstract)
- [10] Mehmood K, Chang S, Yu S, et al. Spatial and temporal distributions of air pollutant emissions from open crop straw and biomass burnings in China from 2002 to 2016[J]. *Environmental Chemistry Letters*, 2018, 16(1): 301—309.
- [11] 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: 自然科学版*, 2015, 51(4): 647—656.
- Li Jianfeng, Song Yu, Li Mengmeng, et al. Estimating air pollutants emissions from open burning of crop residues in Jianghan plain[J]. *Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Pekinensis*, 2015, 51(4): 647—656. (in Chinese with English abstract)
- [12] 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[J]. *环境科学研究*, 2016, 29(8): 1109—1118.
- Peng Liqun, Zhang Qiang, He Kebin, et al. Emissions inventory of atmospheric pollutants from open burning of crop residues in China based on a national questionnaire[J]. *Research of Environmental Sciences*, 2016, 29(8): 1109—1118. (in Chinese with English abstract)
- [13] 田贺忠, 赵丹, 王艳. 中国生物质燃烧大气污染物排放清单[J]. *环境科学学报*, 2011, 31(2): 349—357.
- Tian Hezhong, Zhao Dan, Wang Yan. Emission inventories of atmospheric pollutants discharged from biomass burning in China [J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2011, 31(2): 349—357. (in Chinese with English abstract)
- [14] 王如芳, 张吉旺, 董树亭, 等. 中国玉米主产区秸秆资源利用现状及其效果[J]. *应用生态学报*, 2011, 22(6): 1504—1510.
- Wang Lufang, Zhang Jiawang, Dong Shuting, et al. Present situation of maize straw resource utilization and its effect in main maize production regions of China[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2011, 22(6): 1504—1510. (in Chinese with English abstract)
- [15] Li L, Zhao Q, Zhang J, et al. Bottom-up emission inventories of multiple air pollutants from open straw burning: A case study of Jiangsu province, Eastern China[J]. *Atmospheric Pollution Research*, 2018, 10(2): 501—507.

- [16] 张春雨. 基于多源卫星数据的秸秆焚烧监测研究[D]. 成都: 电子科技大学, 2017.
Zhang Chunyu. Straw Burning Monitoring Based on Multi-Source Satellite Data[D]. Chengdu: University of Electronic Science and Technology of China, 2017. (in Chinese with English abstract)
- [17] 陈洁, 郑伟, 高浩, 等. 多源卫星遥感农作物秸秆焚烧过火区面积估算方法[J]. 农业工程学报, 2015, 31(3): 207—214.
Chen Jie, Zheng Wei, Gao Hao, et al. Estimation method of straw burned area based on multi - source satellite remote sensing[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2015, 31(3): 207—214. (in Chinese with English abstract)
- [18] 武喜红, 刘婷, 程永政, 等. 多源卫星遥感秸秆焚烧过火面积动态监测[J]. 农业工程学报, 2017, 33(8): 153—159.
Wu Xihong, Liu Ting, Cheng Yongzheng, et al. Dynamic monitoring of straw burned area using multi-source satellite remote sensing data[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2017, 33(8): 153—159. (in Chinese with English abstract)
- [19] 陈洁, 郑伟, 高浩, 等. 多源卫星遥感农作物秸秆焚烧过火区面积估算方法[J]. 农业工程学报, 2015, 31(3): 207—214.
Chen Jie, Zheng Wei, Gao Hao, et al. Estimation method of straw burned area based on multi - source satellite remote sensing[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2015, 31(3): 207—214. (in Chinese with English abstract)
- [20] 王桥, 厉青, 陈良富, 等. 大气环境卫星遥感技术及其应用[M]. 北京: 科学出版社, 2011.
- [21] 杨珊荣, 李虎, 余涛, 等. 基于MODIS的秸秆焚烧火点识别原理及算法IDL实现[J]. 遥感信息, 2009, (2): 91—97.
Yang Shanrong, Li Hu, Yu Tao, et al. Principle of identifying crop straw fire based on MODIS and its algorithm implementation using IDL language[J]. Remote Sensing Information, 2009, (2): 91—97. (in Chinese with English abstract)
- [22] 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[J]. 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 burning of residues and its emissions of PM_{2.5} in northeast China based on satellite remote sensing[J]. Chinese Journal of Agricultural Resources and Regional Planning, 2018, 39(4): 59—66. (in Chinese with English abstract)
- [23] 刘海新, 崔明月, 赵安周, 等. 2005-2015京津冀地区麦秸秆焚烧时空变化分析[J]. 河北工程大学学报(自然科学版), 2017, 34(2): 100—104
Liu Haixin, Cui Mingyue, Zhao Anzhou, et al. Spatiotemporal variation analysis of wheat straw burning during 2005-2015 in Beijing-Tianjin-Hebei Metropolitan Region[J]. Journal of Hebei University of Engineering(Natural Science Edition), 2017, 34(2): 100—104 (in Chinese with English abstract)
- [24] 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[J]. 测绘工程, 2018, 27(1): 42—46.
Li Jia, Li Shuping, Duan Ping, et al. Remote sensing monitoring and analysis of straw burning in Henan province based on MODIS [J]. Engineering of Surveying and Mapping, 2018, 27(1): 42—46. (in Chinese with English abstract)
- [25] 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.
Zhang Lijuan, Li Qing, Chen Hui, et al. Analysis and comparison of straw burning based on remote sensing monitoring data during summer and autumn harvest season from 2014 to 2015 in China [J]. Environment and Sustainable Development, 2016, 41(6): 61—65. (in Chinese with English abstract)
- [26] 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[J]. 生态与农村环境学报, 2009, 25(1): 32—37.
Li Qing, Zhang Lijuan, Wu Chuanqing, et al. Satellite -remote-sensing-based monitoring of straw burning and analysis of its impact on air quality[J]. Journal of Ecology and Rural Environment, 2009, 25(1): 32—37.
- [27] 何立明, 王文杰, 王桥, 等. 中国秸秆焚烧的遥感监测与分析[J]. 中国环境监测, 2007, 23(1): 42—50.
He Liming, Wang Wenjie, Wang Qiao, et al. Evaluation of the agricultural residues burning reduction in China using MODIS fire product[J]. Environmental Monitoring in China, 2007, 23(1): 42—50. (in Chinese with English abstract)
- [28] 何阳, 杨进, 马勇, 等. 基于Landsat-8陆地卫星数据的火点检测方法[J]. 红外与毫米波学报, 2016, 35(5): 600—608.
He Yang, Yang Jin, Ma Yong, et al. A method for fire detection using Landsat 8 data [J]. Journal of Infrared and Millimeter Waves, 2016, 35(5): 600—608. (in Chinese with English abstract)
- [29] 陈志刚, 王青, 黄贤金, 等. 长三角城市群重心移动及其驱动因素研究[J]. 地理科学, 2007, 27(4): 457—462.
Chen Zhigang, Wang Qing, Huang Xianjin, et al. Movement of urban agglomeration gravity and its driving forces in the Changjiang (Yangtze) Delta of China[J]. Scientia Geographica Sinica, 2007, 27 (4): 457—462. (in Chinese with English abstract)
- [30] 杨绪红, 金晓斌, 管栩, 等. 2006-2012年中国土地整治项目空间特征分析[J]. 资源科学, 2013, 35(8): 1535—1541.
Yang Xuhong, Jing Xiaobin, Guanhu, et al. The spatial distribution of land consolidation projects in China from 2006 to 2012[J]. Resources Science, 2013, 35(8): 1535—1541. (in Chinese with English abstract)
- [31] 王倩倩, 黄贤金, 陈志刚, 等. 我国一次能源消费的人均碳排放重心移动及原因分析[J]. 自然资源学报, 2009, 24(5): 833—841.
Wang Qianqian, Huang Xianjin, Chen Zhigang, et al. Movement of the gravity of carbon emissions per capita and analysis of causes [J]. Journal of Natural Resources, 2009, 24(5): 833—841.
- [32] 陈彦光. 基于Moran统计量的空间自相关理论发展和方法改进[J]. 地理研究, 2009, 28(1): 1449—1462.
Chen Yanguang. Reconstructing the mathematical process of spatial autocorrelation based on Moran's statistics[J]. Geographical Research, 2009, 28(1): 1449—1462. (in Chinese with English abstract)
- [33] Moran P A P. Notes on continuous stochastic phenomena[J]. Biometrika, 1950, 37: 17—23.
- [34] 杨绪红, 金晓斌, 郭贝贝, 等. 2006-2012年中国土地整治项目投

- 资时空分析[J]. 农业工程学报, 2014, 30(8): 227—235.
- Yang Xuhong, Jing Xiaobin, Guo Beibei, et al. Spatio-temporal differentiation of land consolidation investment in China from 2006 to 2012[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering(Transactions of the CSAE), 2014, 30(8): 227—235. (in Chinese with English abstract)
- [35] Geary R C. The contiguity ratio and statistical mapping [J]. The Incorporated Statistician, 1954, 5(3): 115—127, 129—146.
- [36] Getis A, Ord J K. The analysis of spatial association by use of distance statistics [J]. Geographical Analysis, 1992, 24(3): 189—206.
- [37] 黄飞飞, 张小林, 余华, 等. 基于空间自相关的江苏省县域经济实力空间差异研究[J]. 人文地理, 2009, 24(2): 84—89.
- Huang Feifei, Zhang Xiaolin, Yu Hua, et al. Study on the spatial differences of county economic strength in Jiangsu province based on spatial autocorrelation[J]. Human Geography, 2009, 24(2): 84—89. (in Chinese with English abstract)
- [38] 段然, 李令军, 姜磊, 等. 基于 Himawari-8 卫星的中国东北秸秆焚烧监测及其对空气质量的影响研究[J]. 环境污染与防治, 2018, 40(3): 274—277.
- Duan Ran, Li Lingjun, Jiang Lei, et al. Monitoring of straw burning in Northeast China based on Himawari-8 satellite and study of its influence on air quality[J]. Environmental Pollution & Control, 2018, 40(3): 274—277. (in Chinese with English abstract)

Spatio-temporal change of straw burning fire points in field of China from 2014 to 2018

Zhang Jingyuan, Yang Xuhong^{*}, Tu Xinmeng, Ning Kexin, Luan Xinchun

(School of Geography and ocean science, Nanjing University, Nanjing 210023, China)

Abstract: Understanding the changes in field straw-burning at national scale over a comparatively long period is essential to improving straw management and helping its administrative supervision. Using the Stasee-Fire data from 2014 to 2018 in China, we constructed a dataset of field straw-burning in China after data conversion, extraction, cleaning and other processing. We then analyzed its spatiotemporal changes at different scales over the past five years using the central gravity-moving model, spatial autocorrelation model and the K-mean clustering model. The results show that the mandate of banning field straw-burning has achieved its objectives, and that the number of straw-burning had fallen at an average annual rate of 22.43%. The monthly straw-burning in February-April and October-November accounted for 85.71% of the annual burning. Most of straw-burning were in northeast, the north plain and Heilongjiang, with 56.31% of the burnings occurring in Liaoning and Jilin provinces. Taking the Hu-Huanyong line as a boundary line, the straw-burning in the regions to the southeast and southwest of the line was 78.73 : 21.27. It was found from the central gravity-moving model that the gravitational center of the straw-burning was located in Liaoning and Hebei, with a tendency of shifting to southwest due to the decline in straw-burning in northeast China. The center of the monthly straw-burning showed a noticeable return-glyph trajectory. We found that the spatial autocorrelation of the straw-burning was between 0.33 and 0.49 at national scale but has been falling, and that the straw-burning was no longer concentrated in some regions and it instead occurred sparsely across the country. At provincial scale, straw-burning can be classified as autumn - winter, spring, and autumn-burning type, with specific types in each area depending on its cultivation, crop varieties and climate. Therefore, improving management of straw-burning should take climate change and crop varieties into account.

Keywords: remote sensing; straw; burning; fire points; spatio-temporal distribution