

引用格式:Ge Qiang, Shen Wenju, Li Ran, *et al.* Research on the Temporal and Spatial Cistribution Characteristics of Thermal Anomalies in China from 2001 to 2018[J]. Remote Sensing Technology and Application, 2022, 37(1): 73-84. [葛强, 沈文举, 李冉, 等. 2001~2018年我国热异常点时空分布特征研究[J]. 遥感技术与应用, 2022, 37(1): 73-84.]
DOI:10.11873/j.issn.1004-0323.2022.1.0073

2001~2018年我国热异常点时空分布特征研究

葛 强^{1,3}, 沈文举^{2,3}, 李 冉⁴, 李莘莘⁵, 蔡 坤^{1,3}, 左宪禹^{2,3},
乔保军^{1,3}, 张云舟⁶

- (1. 河南大学 河南省大数据分析处理重点实验室, 河南 开封 475004;
2. 河南大学 河南省空间信息处理工程实验室, 河南 开封 475004;
3. 河南大学 计算机与信息工程学院, 河南 开封 475004;
4. 国家航天局对地观测与数据中心成果转化部, 北京 100101;
5. 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;
6. 国家文物局, 北京 100010)

摘要:基于2001~2018年MODIS标准产品,研究了我国及七大区域热异常点的时空分布特征。结果表明:空间分布上,热异常点主要分布在除西北、西南之外的大部分地区;年际趋势上,2001~2014年间热异常点数量持续上升,年均增长率为15.01%,2015年后逐年下降,年均下降率为14.96%。月季尺度上,热异常点在春、秋季节出现最为频繁(春:551 716个,秋:416 698个),春、秋季相对在东北地区分布最多(春:164 898个,秋:186 727个),东北地区月均数量10月最高(118 274个);夏季热异常点数量最低(290 793个),多分布于华东地区(120 455个),华东地区月均数量6月最高(76 465个);冬季数量为358 483个,且在华南地区分布最多(108 209个),华南地区月均数量1月最高(37 770个)。研究有助于掌握我国典型区域的森林、草原火灾,以及由于秸秆焚烧、工业排放等引起热异常的变化情况,进而为区域灾害防治和环境监测提供技术支撑。

关键词:热异常点;秸秆焚烧;时空分布;MODIS

中图分类号:X87 **文献标志码:**A **文章编号:**1004-0323(2022)01-0073-12

1 引言

地表热异常通常指如草原火、林火、煤火等其他高温物体和背景信息存在显著反差的现象^[1],而对于地表热异常发生的区域,人们称之为热异常点。常见的有工业类热异常点、生物质燃烧类热异常点和煤火类热异常点。通常地表物体发生燃烧时,会造成周围区域的温度显著性上升。使用热红外遥感技术可以探测到地表信息的异常^[2],生成可以反映地表物体自身属性和空间信息的热异常产

品。如今,这些热异常遥感信息产品已经应用于许多行业。例如孙爽等^[3]利用热异常遥感产品来探讨热异常点辐射强度的变化规律及其与工业能源消耗、污染物排放之间的关系;邱昀等^[4]基于2013~2017年热异常点数据和水泥生产统计信息,进行了大气污染排放评估;靳全锋等^[5]以及杨夏捷等^[6]利用MODIS热异常遥感产品来分析林区的林火污染物排放总量及其时空分布情况;李峰等^[7]利用热异常遥感技术监测和识别煤矿火灾等。另外,利用热

收稿日期:2020-09-13;修订日期:2021-12-21

基金项目:国家自然科学基金项目(U1704122, U1804154)。

作者简介:葛 强(1977—),男,河南泌阳人,教授,主要从事空间信息处理、大数据分析研究。E-mail: gq@henu.edu.cn

通讯作者:李莘莘(1982—),男,河南开封人,副研究员,主要从事大气遥感方面的研究。E-mail: lishenshen@126.com

异常遥感监测技术也可以监测和识别生物质燃烧。中国是世界上生物质燃烧的大国,每年的生物质燃烧总量占世界总量的四分之一^[8],而秸秆焚烧占生物质燃烧总量的比例最大。秸秆焚烧是生物质燃烧的一种,是世界很多地方在为下一轮农作物种植准备土地时使用的生物质管理的一种常见做法。它可以控制杂草、减少病虫害和植物病毒的风险^[9]。但是,大量的秸秆焚烧会对环境造成严重的危害。例如:造成资源浪费;可能引发大面积的火灾事故,对老百姓的生命财产造成很大威胁;持续性地露天焚烧会严重影响空气质量,造成空气污染;降低运输效率,可能引发交通事故等^[10]。

卫星遥感具有大面积覆盖、时间频次高、受限制条件少等优点,能够替代传统上耗时和不精确的人工地基监测秸秆露天焚烧的方法^[11]。美国宇航局(NASA)发射的EOS系列卫星Terra和Aqua,搭载了中分辨率成像光谱仪(MODIS),设置了36个波段,范围从可见光到红外波段。另外,Terra、Aqua卫星相互合作还可以实现每天两次获取全部地表信息的能力。MODIS相比其他卫星传感器有很多优点,如波段范围广、高灵敏度、高监测频率,从而可以识别大量潜在热异常点^[12]。同时,MODIS积攒了自1999年至今超过20 a的数据集,其完整的时间序列特点,对研究长期的热异常年际变化趋势具有较其他卫星无可比拟的优势。由于MODIS适合应对秸秆焚烧变化速度快、突发性强的特点,在大范围秸秆焚烧的监测中一直作为理想的数据源。近些年来,MODIS数据源一直被频繁地使用于监测秸秆焚烧火点事件的研究中^[13]。例如,用MODIS数据来提取河南省秋季作物收获期的秸秆焚烧火点信息,对政府管控秸秆焚烧的措施进行效果评价^[14],利用多时相MODIS遥感数据讨论秸秆焚烧火点监测与气溶胶光学厚度及空气质量的相关性研究^[15-16]还有对使用MODIS数据进行监测火点信息的方法进行改进完善的研究^[17]。但是,前人的研究主要集中在利用MODIS热异常产品分析由森林、草原火灾、秸秆焚烧等以前的环境污染情况;或对较短时间或较小区域的热异常点分布情况进行研究。迄今为止,以中国大陆地区为研究地理区域、选取近20年的时间跨度,分析热异常点的空间分布和时间变化特征的研究还很少。

研究的思路是选取中国大陆地区作为热异常点的研究区域,以2001~2018年共18年的中国大陆

地区MOD14/MYD14二级标准数据产品为数据源。讨论大陆地区热异常点随空间分布与时间变化趋势情况。针对我国不同地理、气候、行政条件划分的七大典型区域,本研究逐地区分析了热异常点的时空特征,及其潜在的诱发和影响因素。

2 数据和方法

2.1 研究区域

为了进一步分析我国大陆地区热异常点的时空分布特征,将大陆地区按地理位置、自然气候等划分为7大地理区域,分别为:东北地区、华北地区、华中地区、华东地区、华南地区、西南地区 and 西北地区。东北地区包括辽宁、吉林、黑龙江省,自南向北跨中温带与寒温带,属温带季风气候,四季分明,夏季温热多雨,冬季寒冷干燥;华北地区包括北京市、天津市、河北省、山西省和内蒙古自治区,一般指秦岭-淮河线以北,主要为温带季风气候;华中地区包括湖南、湖北、河南3省,地形地貌以岗地、平原、丘陵、盆地、山地为主,气候环境为温带季风气候和亚热带季风气候;华东地区位于中国东部,自南向北包括福建省、江西省、浙江省、上海市、安徽省、江苏省、山东省,属亚热带湿润性季风气候和温带季风气候,适合水稻、小麦等农作物的生长;华南地区包括广西壮族自治区和广东、海南省,位于中国最南部,为四季常绿的热带-亚热带区域。西南地区包括四川省、贵州省、云南省、西藏自治区、重庆市,气候类型由温暖湿润的海洋气候到四季如春的高原季风气候,再到亚热带高原季风湿润气候以及青藏高原独特的高原气候,形成了独特的植被分布格局;西北地区包括陕西省、甘肃省、青海省、宁夏回族自治区、新疆维吾尔自治区,西北地区深居内陆,大部分属中温带和暖温带大陆性气候,局部属于高寒气候^[18]。

2.2 数据来源

研究选择MODIS的标准产品为MOD14/MYD14。该二级产品主要针对全球范围内的热异常-火灾等进行监测,其空间分辨率1 km,双星协同的情况下可以达到一天两次的监测频次。MOD14/MYD14能够对火灾的准确位置(经纬度)进行定位,并判断火灾的能量级别和燃烧比。本研究下载了中国大陆地区2001~2018共18 a的MOD14/MYD14标准数据产品。

2.3 数据处理

2.3.1 热异常点提取原理

由普朗克定律可知,任意物体的绝对温度超过 0 K,都会向外以电磁波的形式辐射能量。当温度一定时,黑体发射和吸收的电磁波能量一样。这个规律可以用普朗克公式来表示^[19]:

$$B_{\lambda} = \frac{C_1}{\lambda^5 (\exp(\frac{C_2}{\lambda T}) - 1)} \quad (1)$$

其中: C_1 和 C_2 为物理常数; T 为开氏温度; λ 为波长。式(1)是反演得到地表温度的物理基础,依据式(1)推导出来的维恩位移定律式(2)是选择热异常遥感光谱波段的理论基础^[20]。MODIS 等卫星遥感的热异常点信息主要是基于维恩位移定律进行提取和计算:

$$\lambda_m \cdot T = 2897.9 (\mu m \cdot K) \quad (2)$$

其中: λ_m 是温度为 T 时黑体辐射本领最大时对应的中心波长; k 为开氏温度单位,可以从公式(2)得到黑体电磁辐射的能流密度波长峰值和黑体的温度关系是成反比^[21]。另外,从维恩位移定律也可以推出,当温度升高时,地球表面的物体辐射峰值波长也会升高,并且波长会向短波方向移动。例如物体的温度范围在 500~700 K,则物体热辐射峰值的波长处在 3~5 μm ^[22]。同时,研究发现卫星空中监测的燃烧点的辐射峰值大多处于 4~5 μm 的中红外波段^[23],如果热异常点辐射峰值波长处在中红外波段,则此时 11 μm 通道的亮温明显低于 4 μm 通道的亮温。

从上面的原理和方法可以得出,常温下地面物体的辐射能量低于中红外波段的能量,而且波段(通常集中在 2.8~5.7 μm)之间的亮温差也发生变化,是热异常点的明显特征。因此可以依据火点像元与背景像元之间的差异性进行阈值判别,从而达到监测热异常点个数。

2.3.2 热异常点统计

MODIS 标准产品提供了火点信度、白天/黑夜识别代码、地表分类等参数,便于相关研究人员对不同条件下的火点数据进行筛选。本文针对我国

较大研究范围,较长研究尺度的热异常信息进行研究,旨在分析我国大陆地区 2001~2018 共 18 a 的热异常点整体情况。

3 分析

3.1 我国热异常点的空间分布

利用 2001~2018 年 MODIS 的热异常产品数据,监测到我国大陆地区共有热异常点 1 617 690 个,图 1 展示了 2001~2018 年我国热异常点的空间分布情况。表 1 列出了我国七大区域热异常点的具体数目。由图 1 和表 1 可以看出,热异常点在七大区域的总数量分布情况:东北地区 388 180 个,华北地区 224 297 个,华中地区 172 231 个,华东地区 320 732 个,华南地区 225 724 个,西南地区 204 743 个,西北地区 81 783 个。单位平方公里的热异常点数分布情况:东北地区 0.255 个/ km^2 ,华北地区 0.268 个/ km^2 ,华中地区 0.308 个/ km^2 ,华东地区 0.402 个/ km^2 ,华南地区 0.498 个/ km^2 ,西南地区 0.088 个/ km^2 ,西北地区 0.027 个/ km^2 。

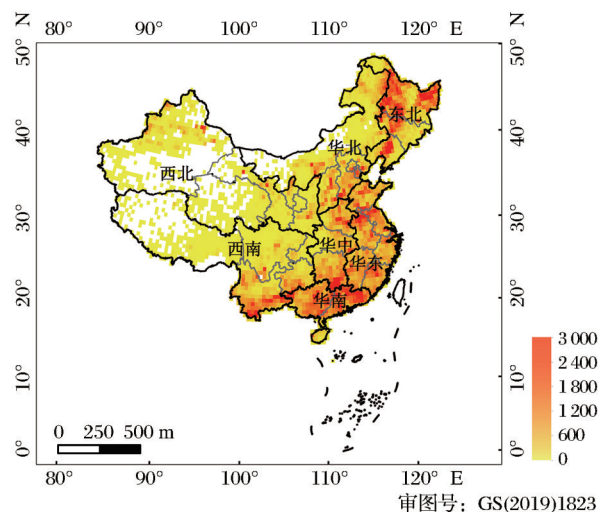


图 1 2001~2018 年中国大陆地区热异常点空间分布

Fig.1 Spatial distribution of thermal anomalies in China mainland from 2001 to 2018

由此可知,卫星探测的热异常点在华南、华东、华中、华北、东北的部分地区相对较多,西南和西北地区分布较少。从图 1 可以明显看出,各区域热异

表 1 我国七大区域热异常点的数量分布

Table 1 Distribution of the number of thermal anomalies in seven major regions of China mainland

区域	东北	华北	华中	华东	华南	西南	西北
区域面积/ km^2	1 520 000	838 100	560 000	798 300	452 900	2 340 600	3 080 100
热异常/个	388 180	224 297	172 231	320 732	225 724	204 743	81 783
单位面积热异常/(个/ km^2)	0.255	0.268	0.308	0.402	0.498	0.088	0.027

常点集中分布的省份主要为:东北地区集中分布在黑龙江省内;华北地区集中分布在河北省和天津市;华中地区集中分布在湖南省南部地区和河南省小部分区域;华东地区集中分布在安徽省和苏北地区;华南地区集中分布在广东和广西省内;西南、西北地区数量较少,零星散布各地。

3.2 我国热异常点的年际变化

从图 2 我国大陆地区 2001~2018 年热异常点季节和年际数量变化中可以看到,每年热异常点多集中在春、秋、冬季,夏季分布较少。2001~2018 年间每年季节热异常点数量的峰值情况:春季在 2017 年出现峰值,为 50 807 个;秋季在 2014 年出现峰值,为 51 276 个;冬季在 2009 年出现峰值,为 35 824 个;夏季数量较少,且每年数量波动不大。另外,也能从图 2 中明显看到,2012~2014 年季节热异常点数量增加后,于 2014 年达到峰值后,在 2015~2018 年持续下降。同时,图 2 还可以清晰地看到 2001~2014 年每年的热异常点数量持续增长,年均增长率为 15.01%,在 2014 年之后数量下降趋势明显,年均下降率为 14.96%,其中 2014 年热异常点总数达到最大峰值,148 096 个。这些变化与 2015 年各地政府严格执行国家发展改革委、财政部、农业部、环境保护部四部门共同发布的《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》中提出要强化秸秆禁烧监管的规定密切相关。

从图 3 的我国大陆地区热异常点的年均值空间分布中可以看出 2001~2003 年全国热异常点数量较少,多集中在东北地区的黑龙江省内。这与地处高纬度地带的东北地区种植的农作物全年仅有一次收获^[24],且当地居民都把秸秆当作农产品废弃物,直接就地焚烧处理^[25]有直接的关系。2004~2006 年热异常点数量上升明显,大多集中于华中地区的安徽、江苏省北部与西南、华南的大部分地区。2007~2009 年较之前热异常点数量出现了连续的上升,东北、西南、华南的很多地区都存在大量的热异常点。2010~2012 年较之前数量明显减少,热异常点主要分布在华中地区所辖的几个省和东北地区的少数地区。2013~2015 年热异常点数量继续上升,且可以清晰直观看到全国范围内东北地区有大量的热异常点,华东北部、华南和西南部分地区也存在热异常点。2016~2018 年较之前热异常点数量下降明显,仅东北地区存在部分较高的热异常点数量,其主要原因在于各级政府严格落实了 2017 年国务院办公厅与中共中央办公厅共同印发的《关于创新体制推进农业绿色发展的意见》中推进农业绿色发展、推进秸秆综合利用的政策。

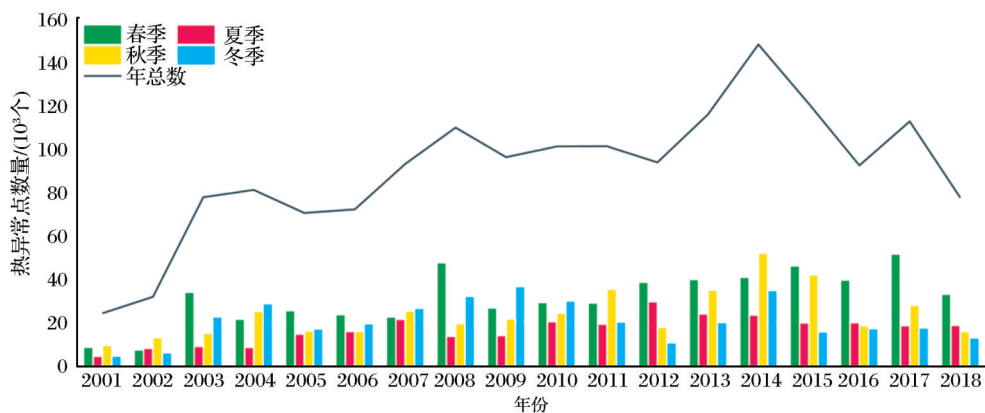


图 2 2001~2018 年我国大陆地区热异常点季节和年际数量变化趋势

Fig.2 Seasonal and inter-annual changes in the number of thermal anomalies in China mainland from 2001 to 2018

3.3 我国热异常点的月季变化

图 4 展示了 2001~2018 年我国大陆地区热异常点季均值分布情况。表 2 列出了我国七大区域热异常点月均值的数量。由图 4 和表 2 可以看出,在四季的变化中,热异常点在春秋两季相对较多,数量分别为 551 716 个和 416 698 个。从区域上看,东北地区春秋两季的火点比较密集(春季:164 898 个,秋季:186 727 个),月均值在 10 月份达到峰值,为

118 274 个。全国范围夏季的热异常数量最少,为 290 793 个,夏季火点相对较多的区域为华东地区(120 455 个),月均值于 6 月份达到峰值,为 76 465 个。全国范围冬季的热异常点数量为 358 483 个,冬季我国南方的华南地区火点相对较多(108 209 个),月均值在 1 月份达到峰值,为 37 770 个。东北地区作为我国最大的粮食作物生产地,其一年一熟的农作制度使得农作物以中稻、玉米、大豆等秋粮

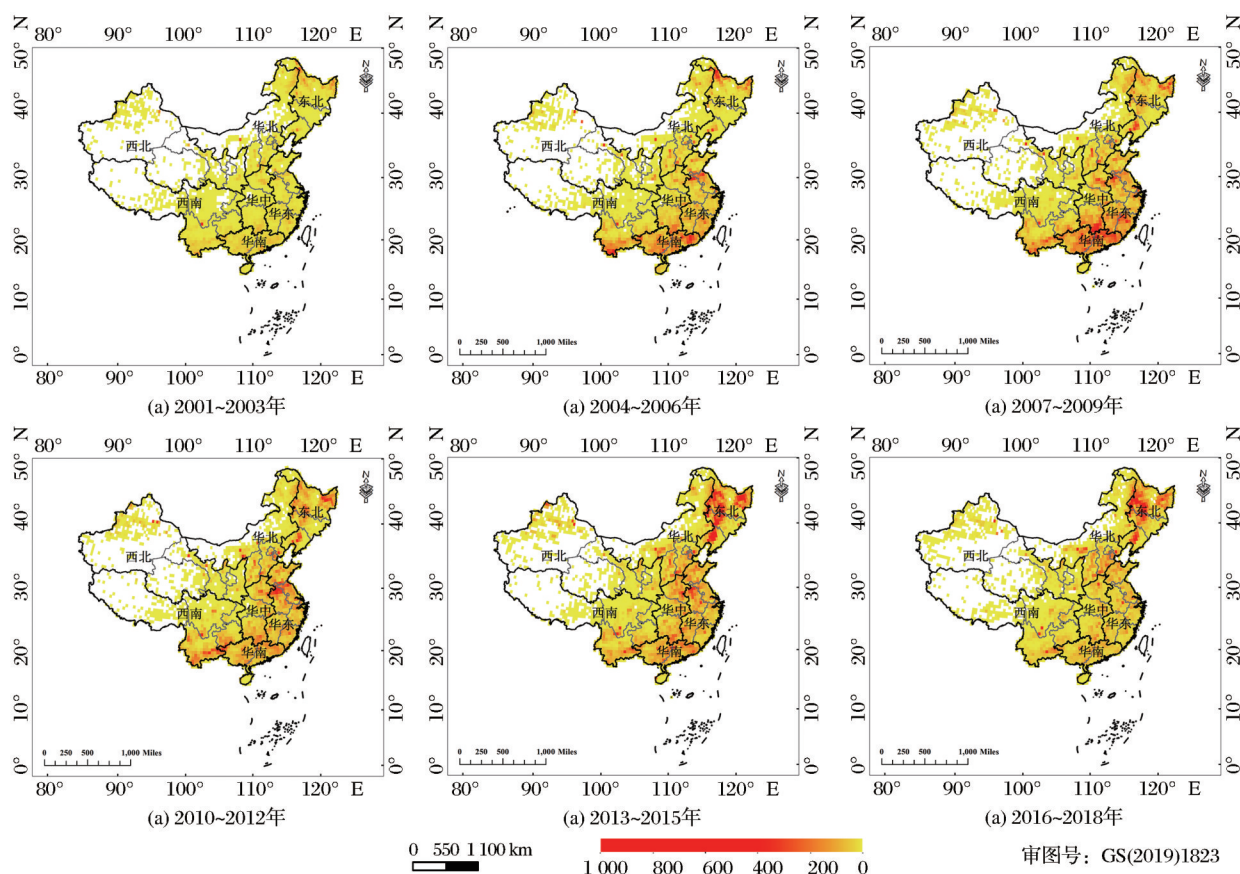


图 3 2001~2018年我国大陆地区热异常点年均值空间分布

Fig.3 Spatial distribution of annual mean values of thermal anomalies in mainland my country from 2001 to 2018

作物为主,秸秆主要集中在9月和10月^[26],从而导致了东北地区在全国秋季的热异常点分布图中也表现比较突出。近些年来,因东北地区在各季节开展秸秆管控工作力度分布不均,即大幅度增加秋季秸秆禁烧的力度,春季秸秆禁烧力度不强,使得东北地区年内各月热异常点呈双峰分布特性^[27]。处于长江中下游平原和亚热带的华东地区,形成了一年两至三熟的种植制度,当地居民多种植水稻、小麦、玉米、油菜等作物。由于华东地区的农作物都在6~7月份进行收割,产生的秸秆得不到有效的资源利用,大多会被焚烧处理,从而导致了全国热异常点季节分布中夏季热异常点多分布在华东地区。华南地区是水稻的主要种植地之一,当地也多集中种植甘蔗,每年的12月到来年的2月,是甘蔗、水稻的收获季节。水稻、甘蔗收获后产生的秸秆,由于多处在山区、半山区,不易运输,也多被农民就地露天焚烧,这是导致全国热异常点季节分布中冬季多聚集于华南地区的主要原因。

图5中,地区季节性热异常点数量占比为春季东北地区占比30.59%最高;夏季华东地区占比

41.42%最高;秋季东北地区占比44.76%最高;冬季华南地区占比30.19%最高;这与图4热异常点季节分布图分析讨论的结果相吻合。

3.4 我国七大区域热异常点的时空分布

我国七大区域热异常点的时空分布主要是统计分析了热异常点在我国七大局部地区每年的季节和年际数量变化情况。

3.4.1 东北地区热异常点的时间分布

图6中,东北地区2001~2018年热异常点主要分布在春、秋季。春季热异常点数量在2017年达到峰值,为29 981。秋季热异常点数量于2014年达到峰值,为34 583。另外,也可以从图6明显地看到2001~2018年热异常点年际数量变化情况:2001~2014年数量持续增加,2015~2018年上下波动较大,呈下降趋势,期间年热异常点数量在2014年达到峰值,为50 976。东北地区作为中国的粮食主要生产区,主要种植粮食作物、油料作物、棉花等。以黑龙江省为例,其主要种植的水稻、高粱、玉米、谷子及薯类等农作物在10月份收割,收割后的秸秆多被就地焚烧,部分未及时处理的秸秆因东北地区要

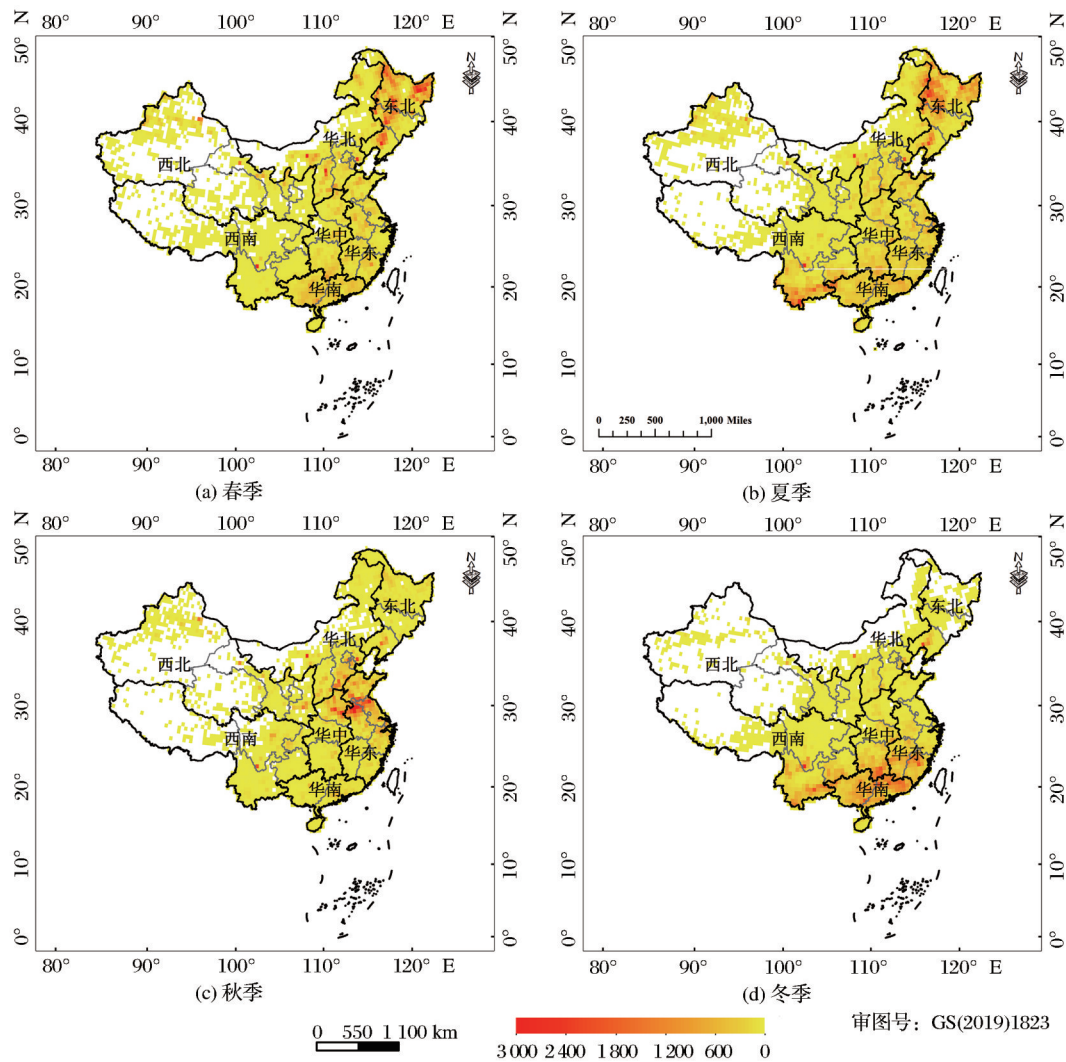


图4 2001~2018年我国大陆地区热异常点数量季均值分布

Fig.4 Distribution of seasonal mean value of the number of thermal anomalies in China mainland from 2001 to 2018

经历12月到次年3月的积雪期,所以这些秸秆会被保留到来年的4、5月份才进行田间焚烧处理^[28]。这是造成图6东北地区每年热异常点多聚集于春、秋季的主要原因。

3.4.2 华北地区热异常点的时间分布

图6中,华北地区热异常点相对多分布在秋季,秋季热异常点数量于2013年达到峰值,为8 737。2001~2018年热异常点年际数量变化情况:2001~2014年数量持续增加,2015~2018年数量稳定,上下波动幅度较小,期间年热异常点数量在2014年达到峰值,为19 967。华北地区处在暖温带的大陆性气候地区,有明显的季节变化,华北地区南部的淮河流域属亚热带的过渡区域,相比华北地区北部,降水量与气温较高,种植的农作物多为两年三熟,南部区域为一年两熟。而且其主要种植小麦、水稻、玉米、高粱等^[29]。华北地区处在黄淮冬麦区,麦

收后大部分地区种植玉米,玉米收获期为10月份,而当地对收获后的玉米秸秆多进行露天焚烧处理,这是影响华北地区的热异常点主要分布在秋季的重要原因。

3.4.3 华中地区热异常点的时间分布

图6中,华中地区热异常点相对多分布在冬季。冬季热异常数量在2014年达到峰值,为7 172。2001~2018年热异常点年际数量变化情况:总体呈M型趋势变化,2001~2008年数量持续上升,2008~2013年先下降后上升,2014~2018年数量持续下降,期间年热异常点数量出现两个波峰,分别为2008年的16 313和2013年的16 266。另外,由图1得出华中地区热异常点集中分布在湖南省南部地区。湖南省是我国的农业大省,主要种植水稻、玉米、油菜等农作物^[30],其中水稻历年来播种面积和总产量均居全国首位^[31],由于湖南省南部地区

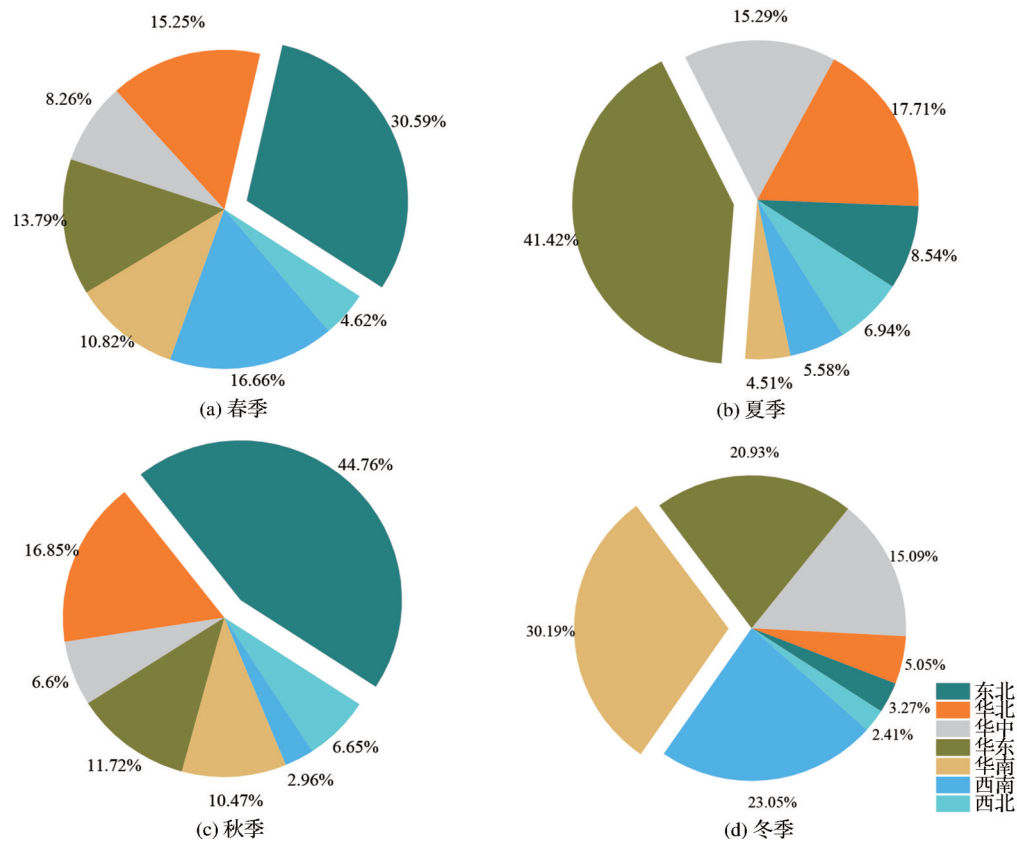


图 5 2001~2018 年我国大陆七大地区热异常点数量季节占比

Fig.5 Seasonal proportion of the number of thermal anomalies in the seven major regions of China mainland from 2001 to 2018

表 2 2001~2018 年我国大陆七大地区热异常点数量月均变化

Table 2 Monthly average changes in the number of thermal anomalies in seven major regions of China mainland from 2001 to 2018

区域	1月	2月	3月	4月	5月	6月	7月	8月	9月	10月	11月	12月
东北	1 422	9 226	61 945	82 002	20 951	5 940	7 089	11 809	19 456	118 274	48 997	1 069
华北	3 216	11 599	41 040	27 142	16 229	22 409	14 965	14 124	17 044	34 968	18 270	3 291
华中	15 612	23 379	24 806	11 730	9 571	31 330	7 437	5 708	4 962	12 964	9 617	15 115
华东	23 157	29 454	30 920	20 396	25 037	76 465	23 996	19 994	9 511	19 553	19 813	22 436
华南	37 770	33 844	31 938	19 310	9 601	4 190	4 567	4 354	5 668	15 149	22 738	36 595
西南	24 214	49 831	46 787	31 678	15 436	4 503	5 436	6 285	2 628	3 403	5 940	8 602
西北	2 334	4 484	9 523	10 235	5 439	8 410	6 517	5 265	6 594	14 110	7 039	1 833

邻近广东、广西两省,两者气候条件较为相近,因此南部地区一年三季种植水稻,而且晚稻收获时间可以持续到十二月底^[32]。同时,据文献研究^[33],湖南省仅 2011 年产生的农作物秸秆总体上有 75.2% 用于还田,而秸秆焚烧还田是湖南省还田的主要方式。这些是造成华中地区热异常点多分布于冬季的重要原因。

3.4.4 华东地区热异常点的时间分布

图 6 中,华东地区热异常点相对多聚集于夏季。夏季热异常点数量于 2012 年达到峰值,为 15 832。

2001~2018 年热异常点年际数量变化情况:2001~2012 年数量持续上升,且 2008~2012 年增长幅度较之前缓慢,2013~2018 年数量持续下降,2013~2016 下降幅度较大,期间年热异常点数量在 2012 年出现峰值,为 26 112。华东地区多采用稻麦连种的种植方式,并且华东的大部分区域位于淮河流域,每年 5 月下旬是淮河流域夏收的开始时间,然后沿从南到北的方向进行推进,结束于 6 月下旬^[34]。所以热异常点多集中分布在夏季。

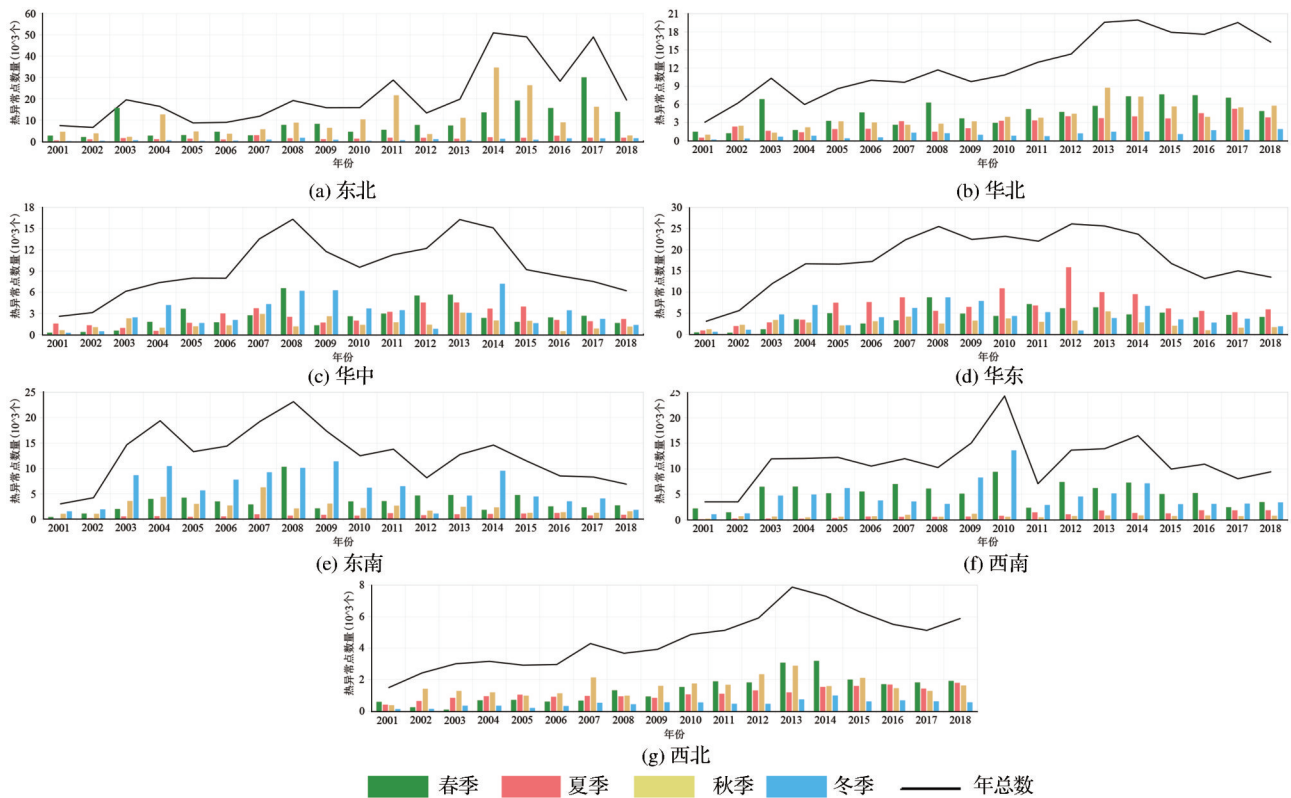


图6 2001~2018年我国大陆七大局地区热异常点季节和年际数量变化趋势

Fig.6 Seasonal and inter-annual variation trends of thermal anomalies in seven major local areas of China mainland from 2001 to 2018

3.4.5 华南地区热异常点的时间分布

图6中,华南地区热异常点多集中分布在冬季。冬季热异常点数量于2009年达到峰值,为11 354。2001~2018年热异常点年际数量变化情况:总体呈先上升后下降的趋势变化,2001~2008年数量持续上升,2009~2018年数量持续下降,在上升和下降的过程中有少许的波动变化,期间年热异常点数量在2008年出现了波峰,为23 149。华南地区是中国甘蔗的集中种植区,而广西产量占全国甘蔗总产量60%以上,连续多年处于全国首位^[35]。每年的12月到次年2月是甘蔗的收割期,根据文献调研数据显示^[36],天焚烧是广西处理农作物秸秆的主要方式。另外,每年的12月份前后也是华南部分地区水稻的收获旺季,同时也是水稻秸秆集中焚烧期,这些都是影响华南地区热异常点多分布在冬季的重要因素。

3.4.6 西南地区热异常点的时间分布

图6中,西南地区热异常点相对多分布于春季。春季热异常数量在2010年达到峰值,为9 362。2001~2018年热异常点年际数量变化情况:总体变化趋势与华南地区类似,2001~2010年数量持续上

升,2010~2018年数量持续下降,且在峰值所在年份的区间段数量上下波动幅度较大,其他时间段波动变化较为平缓,期间年热异常点数量在2010年出现了波峰,为24 253。西南地区地处中国西南部,作为中国的西南部的生态屏障,拥有复杂的地形地貌和变化多样的气候,从而形成了水田少于旱田,可耕地多处在高海拔和高原的山地^[37]。因此居民多种植水稻、油菜、甘蔗、玉米等作物。另外,在图1能明显发现2001~2018年西南地区的热异常点多集中在云南省,贵州省次之。这与云南和贵州多种植马铃薯、甘蔗和油菜密切相关。西南地区马铃薯产量约占全国产量的40%,因为其夏季凉爽,雨量充沛,在海拔较高的地区(1 200 m以上)最适合马铃薯生长^[38]。每年的2月~5月是马铃薯的收割时期,这与甘蔗和油菜处在同一时间段收割。统计发现,中国东部和南部各省份有超过30%的秸秆直接留在田间或就地焚烧^[39]。这是导致西南地区每年的收获旺季与图6中热异常点数量在西南地区的季节变化趋势相对一致的主要原因。

3.4.7 西北地区热异常点的时间分布

图6中,西北地区热异常点相对多分布在秋季。

秋季热异常数量在2013年达到峰值,为2 874。2001~2018年热异常点年际数量变化情况:总体呈先上升后下降的趋势变化,2001~2013年数量持续上升,2014~2018年数量持续下降,且2017~2018年有少许的上升波动,期间年热异常点数量在2013年出现了波峰,为7 868。西北地区由于干旱,降雨少,当地以棉花、玉米、小麦作为主要的种植作物。新疆是中国产棉大省,当地的棉花于4、5月份进行播种,8月底至10月进行收割,当地人对棉花秸秆处理方式较为粗犷,大多都是打碎后就地焚烧^[40]。自1995年以来,甘肃省按照“九五”计划制定方针,加大了主要经济作物的种植面积,例如粮食作物、玉米、薯类、蔬菜的种植规模在2014年已经增加到了 $419.75 \times 10^4 \text{ hm}^2$,相比1995年的 $377.3 \times 10^4 \text{ hm}^2$,每年平均增加0.57%,同时产生的大量秸秆直接焚烧没有被资源化利用^[41]。这些都是导致西北地区热异常点近年来的数量变化的重要原因。

4 结 论

通过地面接收中国大陆地区2001~2018年的MOD14/MYD14二级标准数据产品,本研究对其进行数据处理后提取热异常点,从整体和局部两个角度探讨2001~2018年我国大陆地区热异常点的时空分布。结果表明:

(1)2001~2018年我国热异常点集中分布在黑龙江省、河北省和天津市、湖南省南部地区、安徽省和苏北地区、广东和广西省内;年际变化中,热异常点数量于2001~2014年持续增长,2014年后呈逐年下降趋势。月季分布中,热异常点在春秋两季相对较多,数量分别为551 716个和416 698个。从区域上看,东北地区春秋两季的火点比较密集(春季:164 898个,秋季:186 727个),月均值在10月份达到峰值,为118 274个。全国范围夏季的热异常数量最少,为290 793个,夏季火点相对较多的区域为华东地区(120 455个),月均值于6月份达到峰值,为76 465个。由年际变化情况可知,自20世纪末以来我国持续加强对秸秆焚烧现象实施的管控工作取得了很好的实际效果。但为了防止秸秆焚烧现象的反弹,国家有关部门和各地区政府可以基于热异常点在我国的空间、月季分布进行分地区,分时间段的精准防控,便于节省人力、物力等防控成本,显著减少秸秆焚烧对环境的污染。

(2)2001~2018年我国七大区域热异常点时空

分布情况:单位平方公里中热异常点数目最多的区域为华南、华东地区,分别为0.498个/ km^2 和0.402个/ km^2 。且华南地区热异常点分布最多的月份是1月,华东地区热异常点分布最多的月份为6月。西北、西南地区是单位平方公里中热异常点数目最少的区域,数据显示西南地区热异常点多聚集在2月份,西北地区常年数量最少。这可以使各区域政府和环保部门的工作人员更系统、深刻地认识所辖范围内的秸秆焚烧时空分布情况,为工作人员高效率地开展秸秆焚烧防控工作提供有力数据支撑。

(3)另外,利用热异常数据产品结合区域内的作物残渣产生的污染气体的历年排放监测数据^[42-43],也可以更明确地认识区域内环境污染的情况,后续可以从这些数据进行进一步的研究,从而推动区域内环境治理工作,实现精准防控的要求。

参考文献(References):

- [1] Liu Antao. Land surface temperature retrieval of the hot abnormality on remote sensing[D]. Jinlin: Jilin University, 2008.[刘安涛.地表热异常遥感温度反演[D].吉林:吉林大学,2008.]
- [2] Liu S W, Ye C L, Sun Q T, *et al.* Detection of geothermal anomaly areas with spatio-temporal analysis using multi-temporal remote sensing data[J]. IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing, 2021, 14:4866-4878.
- [3] Sun Shuang, Li Lingjun, Zhao Wenji, *et al.* Industrial pollution emissions based on thermal anomaly remote sensing monitoring: a case study of southern Hebei urban agglomerations, China[J]. China Environmental Science, 2019, 39(7):3120-3129.[孙爽,李令军,赵文吉,等.基于热异常遥感的冀南城市群工业能耗及大气污染[J].中国环境科学,2019,39(7):3120-3129.]
- [4] Qiu Jun, Li Lingjun, Lu Haifeng, *et al.* Estimation of air pollution emission from cement plant in Beijing based on thermal anomaly detection[J]. Research of Environmental Sciences, 2020, 33(10):2265-2271.[邱昀,李令军,鹿海峰,等.基于热异常探测的北京水泥厂大气污染排放评估[J].环境科学研究,2020,33(10):2265-2271.]
- [5] Jin Quanfeng, Wang Wenhui, Ma Xiangqing, *et al.* Temporal and spatial dynamics of pollutants emission from forest fires in Fujian during 2000~2010[J]. China Environmental Science, 2017, 37(2):476-485.[靳全锋,王文辉,马祥庆,等.福建省2000~2010年林火排放污染物时空动态变化[J].中国环境科学,2017,37(2):476-485.]

- [6] Yang Xiajie, Ma Yuanfan, Peng Xujian, *et al.* Dynamic changes of pollutants released from forest fire in Southern forested region during 2000~2016[J]. *China Environmental Science*, 2018, 38(12):4687-4696.[杨夏捷, 马远帆, 彭徐剑, 等. 南方林区 2000~2016 年林火释放污染物动态变化研究[J]. *中国环境科学*, 2018, 38(12):4687-4696.]
- [7] Li Feng, Cui Ximin, Sun Guangtong, *et al.* Approach of detecting coal fires by unmanned aerial vehicle thermal infrared remote sensing technology[J]. *Safety in Coal Mines*, 2017, 48(12):97-100.[李峰, 崔希民, 孙广通, 等. 无人机热红外遥感煤火探测方法[J]. *煤矿安全*, 2017, 48(12):97-100.]
- [8] 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.
- [9] Verma S, Dar J A, Malasiya D, *et al.* A MODIS-based spatiotemporal assessment of agricultural residue burning in Madhya Pradesh, India[J]. *Ecological Indicators*, 2019, 105(c): 496-504.
- [10] 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(1):42-50.[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(1):42-50.]
- [11] Yu K, Qiu L, Wang J J, *et al.* Winter wheat straw return monitoring by UAVs observations at different resolutions[J]. *International Journal of Remote Sensing*, 2017, 38(8-10): 2260-2272.
- [12] Hu Mei, Qi Shuhua, Shu Xiaobo, *et al.* Monitoring fire from crop residues burning with MODIS data in North China plain [J]. *Journal of Geo-information Science*, 2008, 10(6):6802-6807.[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[J]. *地球信息科学*, 2008, 10(6): 6802-6807.]
- [13] Devkota Jyoti U. Statistical analysis of active fire remote sensing data: examples from South Asia[J]. *Environmental Monitoring and Assessment*, 2021, 193(9):608-608.
- [14] Zhang Yan, Liu Ting, Li Bing, *et al.* Monitoring of autumn crop straw burning fire points in Henan Province based on MODIS data[J]. *Journal of Henan Agricultural Sciences*, 2016, 45(11):149-154.[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[J]. *河南农业科学*, 2016, 45(11):149-154.]
- [15] Yang Dan, Hong Qianqian. Based on MODIS fire burning monitoring and air quality of straw burning in Jilin Province impact analysis[J]. *Geomatics & Spatial Information Technology*, 2019, 42(9):151-153,159.[杨丹, 洪倩倩. 基于 MODIS 的吉林省秸秆焚烧火点监测及空气质量影响分析[J]. *测绘与空间地理信息*, 2019, 42(9):151-153,159.]
- [16] Hang Xin, Li Yachun, Zhang Mingming, *et al.* Study on the spatial and temporal distribution of AOD in Jiangsu Province influenced by straw burning based on satellite remote sensing [J]. *Ecology and Environmental Sciences*, 2017, 26(01): 111-118.[杭鑫, 李亚春, 张明明, 等. 基于遥感的秸秆焚烧对江苏省气溶胶光学厚度时空分布的影响研究[J]. *生态环境学报*, 2017, 26(01):111-118.]
- [17] Zhou Mei, Guo Guangmeng, Song Dongmei, *et al.* A discussion about fire monitoring with MODIS data[J]. *Journal of Arid Land Resources and Environment*, 2006(3): 180-183.[周梅, 郭广猛, 宋冬梅, 等. 使用 MODIS 监测火点的几个问题探讨[J]. *干旱区资源与环境*, 2006(3):180-183.]
- [18] Qiu Xionghui, Duan Lei, Chai Fahe, *et al.* Deriving high-resolution emission inventory of open biomass burning in China based on satellite observations[J]. *Environmental Science & Technology*, 2016, 50:11779-11786.
- [19] Li Zhaoliang, Duan Sibao, Tang Bohui, *et al.* Review of methods for land surface temperature derived from thermal infrared remotely sensed data[J]. *Journal of Remote Sensing*, 2016, 20(5):899-920.[李召良, 段四波, 唐伯惠, 等. 热红外地表温度遥感反演方法研究进展[J]. *遥感学报*, 2016, 20(5): 899-920.]
- [20] Peterson D, Wang J, Ichoku C, *et al.* A sub-pixel-based calculation of fire radiative power from MODIS observations: 1: algorithm development and initial assessment [J]. *Remote Sensing of Environment*, 2013, 129:262-279.
- [21] Xu Qingyun, Gu Weiwei, Xie Tao, *et al.* Crop straw fire remote sensing monitoring and its algorithm implementation[J]. *Remote Sensing Technology and Application*, 2017, 32(4): 728-733.[许青云, 顾伟伟, 谢涛, 等. 秸秆焚烧火点遥感监测算法实现[J]. *遥感技术与应用*, 2017, 32(4):728-733.]
- [22] Kaufman Y J, Kleidman R G, King M D. SCAR-B fires in the tropics: properties and remote sensing from EOS-MODIS [J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 1998, 103(D24):31955-31968.
- [23] 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):273-282.
- [24] Xie H, Du L, Liu S C, *et al.* Dynamic monitoring of agricultural fires in China from 2010 to 2014 using MODIS and Globe Land30 data[J]. *ISPRS International Journal of Geo-Information*, 2016, 5(10):14.
- [25] Wang Jinwu, Tang Han, Wang Jinfeng, *et al.* Comprehensive

- sive utilization status and development analysis of crop straw resource in Northeast China[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2017, 48(5):1-21.[王金武, 唐汉, 王金峰. 东北地区作物秸秆资源综合利用现状与发展分析[J]. 农业机械学报, 2017, 48(5):1-21.]
- [26] Zhou Jing, Wu Haitao, Ding Shijun, *et al.* Analysis of seasonal variation in crop residue harvest and sustainability of its energy supply[J]. Resources Science, 2011, 33(8):1537-1545.[周晶, 吴海涛, 丁士军, 等. 秸秆资源收获季节性及其能源供应持续性分析[J]. 资源科学, 2011, 33(8):1537-1545.]
- [27] Mao Huiqin, Zhang Lijuan, Li Qing, *et al.* Study on open burning of crop residues and its emissions of PM_{2.5} in Northeast China based on satellite[J]. Chinese Journal of Agricultural Resources and Regional Planning, 2018, 39(4):59-66.[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.]
- [28] Li Lili, Wang Kun, Jiang Junqiu, *et al.* Emission inventory and the temporal and spatial distribution of pollutant for open field straw burning in Heilongjiang Province[J]. China Environmental Science, 2018, 38(9):3280-3287.[李莉莉, 王琨, 姜琚秋, 等. 黑龙江省秸秆露天焚烧污染物排放清单及时空分布[J]. 中国环境科学, 2018, 38(9):3280-3287.]
- [29] 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.[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.]
- [30] Chen Dong, Huang Xucai, Tang Qiyuan. Crop straw yield and its utilization by herbivores in Hunan Province[J]. Chinese Journal of Animal Science, 2019, 55(12):163-166.[陈东, 黄胥莱, 唐启源. 湖南省农作物秸秆产量及草食动物对其利用现状[J]. 中国畜牧杂志, 2019, 55(12):163-166.]
- [31] Lin Yongchao, Liu Sanxiong, Zeng Xiang, *et al.* Investigation on rice production situation, development trend and countermeasures in Hunan Province[J]. Hunan Agricultural Science, 2008(2):129-133.[黎用朝, 刘三雄, 曾翔, 等. 湖南水稻生产概况、发展趋势及对策探讨[J]. 湖南农业科学, 2008(2):129-133.]
- [32] Liao Xiaolian. Study on cross-regional work for rice combine[D]. Changsha: Hunan Agricultural University, 2007.[廖晓莲. 水稻联合收获机跨区作业研究[D]. 长沙: 湖南农业大学, 2007.]
- [33] Lin Zhong, Li Dan, Zhang Huanyu, *et al.* Status quo of utilization of agricultural wastes in Hunan Province[J]. Hunan Agricultural Science, 2012(5):169-172.[林中, 李丹, 张焕裕, 等. 湖南省农业废弃物利用现状研究[J]. 湖南农业科学, 2012(5):169-172.]
- [34] Wu Wenyu, Zhang Hao, He Binfang, *et al.* Spatiotemporal characteristics of criteria air pollutants during the critical period of straw burning in Huaihe River basin[J]. Journal of Meteorology and Environment, 2019, 35(4):33-39.[吴文玉, 张浩, 何彬方, 等. 淮河流域秸秆焚烧关键期主要大气污染物浓度时空分布特征[J]. 气象与环境学报, 2019, 35(4):33-39.]
- [35] Li Qiuju. Study on the Comprehensive utilization of straw in Guangxi[D]. Nanning: Guangxi University, 2013.[李秋菊. 广西秸秆综合利用研究[D]. 南宁: 广西大学, 2013.]
- [36] Yang Xiejie, Ma Yuanfan, Ju Yuanhua, *et al.* Temporal and spatial distribution of air pollutants emitted from field burning of straw crops in Southern China during 2005~2014[J]. Journal of Agro-Environment Science, 2018, 37(2):358-368.[杨夏捷, 马远帆, 鞠园华, 等. 华南农产品主产区2005—2014年秸秆露天燃烧污染物排放估算及时空分布[J]. 农业环境科学学报, 2018, 37(2):358-368.]
- [37] Lin Xiuqun, Ge Ying. Temporal-Spatial variation of carbon source-sink of farmland ecosystem in the Southwestern China[J]. Jiangsu Journal of Agricultural Sciences, 2016, 32(5):1088-1093.[林秀群, 葛颖. 中国西南地区农田生态系统碳源/汇时空差异研究[J]. 江苏农业学报, 2016, 32(5):1088-1093.]
- [38] Jansky S H, Jin L P, Xie K Y, *et al.* Potato production and breeding in China[J]. Potato Research, 2009, 52(1):57.
- [39] Wang B, Shen X, Chen S, *et al.* Distribution characteristics, resource utilization and popularizing demonstration of crop straw in southwest China: A comprehensive evaluation[J]. Ecological Indicators, 2018, 93:998-1004.
- [40] Dai Qingxiu. Evaluation of positive externality of cotton straw resource recycling in Xinjiang and improvement of subsidy Policy[D]. Alaer: Tarim University, 2019.[戴清秀. 新疆棉花秸秆资源循环利用的正外部性价值评估与补贴政策完善[D]. 阿拉尔: 塔里木大学, 2019.]
- [41] Ran Jincheng, Ma Huilian, Su Yang. A study on agricultural carbon emission and carbon emission reduction potential in five provinces in Northwest China[J]. Acta Agriculturae Universitatis Jiangxiensis, 2017, 39(3):623-632.[冉锦成, 马惠兰, 苏洋. 西北五省农业碳排放测算及碳减排潜力研究[J]. 江西农业大学学报, 2017, 39(3):623-632.]
- [42] Lü Xin, Guo Qingbiao, Jiang Chuanli, *et al.* Monitoring of straw burning in autumn and its influence on air pollution in three provinces of Northeast China from 2015 to 2017[J]. Environmental Pollution & Control, 2021, 43(5):611-613, 663.[吕鑫, 郭庆彪, 姜传礼, 等. 2015~2017年秋季东三省秸秆

焚烧监测及其空气污染效应分析[J]. 环境污染与防治, 2021, 43(5):611-613,663.]

[43] Li R M, Chen W W, Zhao H M, *et al.* Inventory of atmo-

spheric pollutant emissions from burning of crop residues in China based on satellite-retrieved farmland data [J]. Chinese Geographical Science, 2020, 30(2):266-278.

Research on the Temporal and Spatial Cistribution Characteristics of Thermal Anomalies in China from 2001 to 2018

Ge Qiang^{1,3}, Shen Wenju^{2,3}, Li Ran⁴, Li Shenshen⁵, Cai Kun^{1,3}, Zuo Xianyu^{2,3},
Qiao Baojun^{1,3}, Zhang Yunzhou⁶

(1.Henan Key Laboratory of Big Data Analysis and Processing, Kaifeng 475004, China;

2.Henan Engineering Laboratory of Spatial Information Processing, Kaifeng 475004, China;

3.School of Computer and Information Engineering, Henan University, Kaifeng 475004, China;

4.Earth Observation System and Data Center, CNSA, Department of Achievement Transformation,
Beijing 100101, China;

5.State Key Laboratory of Remote Sensing Science, Institute of Remote Sensing and Digital Earth, Chinese
Academy of Sciences, Beijing 100101, China;

6.State Administration of Cultural Heritage of China, Beijing 100010, China)

Abstract: In recent years, environmental pollution problems caused by straw burning and industrial emissions have become more serious. The use of satellite thermal abnormal products to analyze the temporal and spatial distribution of thermal abnormalities plays an important role in environmental monitoring. Based on MODIS standard products from 2001 to 2018, the temporal and spatial distribution characteristics of thermal anomalies in China and seven major regions are studied. The results showed that: in terms of spatial distribution, thermal anomalies are mainly distributed in most areas except Northwest and East China. In terms of inter-annual trends, the number of thermal anomalies continued to increase from 2001 to 2014 years, with an average annual growth rate of 15.01%, 2015 years After that, it decreased year by year, with an average annual decline rate of 14.96%. On month and season scales, thermal anomalies occur most frequently in spring and autumn (spring: 551 716, autumn: 416 698), Spring and autumn are relatively most distributed in Northeast China (spring: 164 898, autumn: 186 727). The highest in October (118 274); the lowest number of hot anomalies in summer (290 793), mostly distributed in East China (120 455), the average monthly number in East China is the highest in June (76 465); the number in winter is 358 483, South China has the most distribution (108 209), and South China has the highest monthly average number in January (37 770). This research is helpful to master forest and grassland fires in typical regions of China, as well as changes in thermal abnormalities caused by straw burning and industrial emissions, and then provide technical support for regional disaster prevention and environmental monitoring.

Key words: Thermal anomaly; Straw burning; Temporal and distribution; MODIS