应用生态学报 2020年1月 第31卷 第1期 http://www.cjae.net
Chinese Journal of Applied Ecology, Jan. 2020, 31(1): 55-64 DOI: 10.13287/j.1001-9332.202001.015

2001—2017年我国森林火灾时空分布特征

乔泽宇[1,2] 房 磊[2*] 张悦楠[1,2] 杨 健[2] 江 涛[1] 袁 昊[3]
([1]山东科技大学, 山东青岛 266590; [2]中国科学院森林生态与管理重点实验室(沈阳应用生态研究所), 沈阳 110016; [3]沈阳大学, 沈阳 110044)

摘 要 基于遥感的过火面积产品可提供连续、时空特征明确的火斑信息,是研究区域尺度森林火灾分布特征的重要数据来源,但精度仍有待改进。本研究结合250 m全球过火面积产品(CCI_Fire)和30 m全球森林变化(GFC)产品,通过数据整合获取改进后的森林火斑产品(CCI_GFC),并运用已有火斑数据对CCI_GFC产品进行精度验证;结合我国宏观生态区划与网格化(0.05°×0.05°)分析,利用改进后产品对2001—2017年间全国林火特征进行分析。结果表明:CCI_GFC产品的火斑识别率(RR)、变异解释量(R^2)、均方根误差(RMSE)、均方绝对百分比误差(MAPE)等精度指标(分别为83%、0.91、0.28、8.5%)均优于原始CCI_Fire产品(分别为74%、0.86、0.36、11.8%)和MCD64A1产品(分别为35%、0.78、0.48、17.3%)。2001—2017年,全国总森林过火面积约为1211万hm^2,年过火面积呈显著下降趋势;低(0<森林过火面积比例BFR≤40%)火烧频率区为主,占总过火区域的79%,中(40%<BFR≤80%)、高(80%<BFR≤120%)火烧频率区各占11%、10%;不同生态区的林火季节性特征差异明显,温带和热带-亚热带生态区的主要林火季节分别为春、秋季(5月、10月)和春、冬季(11月至翌年3月)。

关键词 森林火灾; 过火面积产品; 遥感; 空间分布; 趋势分析; 季节特征

Spatio-temporal characteristics of forest fires in China between 2001 and 2017. QIAO Ze-yu[1,2], FANG Lei[2*], ZHANG Yue-nan[1,2], YANG Jian[2], JIANG Tao[1], YUAN Hao[3] ([1]*Shandong University of Science and Technology*, *Qingdao* 266590, *Shandong*, *China*; [2]*CAS Key Laboratory of Forest Ecology and Management*, *Institute of Applied Ecology*, *Shenyang* 110016, *China*; [3]*Shenyang University*, *Shenyang* 110044, *China*).

Abstract: The remotely sensed burned area (BA) products can provide continuous and spatiotemporally explicit characteristics of fire patches, which are critical data sources for understanding regional fire regimes. However, their accuracy remains to be improved. In this study, a global BA product (*i.e.*, CCI_Fire) at 250 m resolution was integrated with global forest change (GFC) product at 30 m to generate a refined BA product, named CCI_GFC product, whose accuracy was evaluated through comparing the BA with pre-existing fire patches data. To reveal the characteristics of forest fire in China between 2001 and 2017, we conducted a grid analysis at 0.05°×0.05° spatial resolution based on the refined BA product and the spatial pattern of eco-regions at the macro scale. The results showed that the accuracy metrics including the recognition rate (RR), variance explained (R^2), root mean squared error (RMSE), mean absolute percentage error (MAPE) of the CCI_GFC product (*i.e.*, 83%, 0.91, 0.28, and 8.5% respectively) were all superior to the CCI_Fire product (*i.e.*, 74%, 0.86, 0.36, and 11.8% respectively) and the MCD64A1 product (*i.e.*, 35%, 0.78, 0.48, and 17.3% respectively). The total burned area of forest was approximately 12.11 million hm^2 for the whole country from 2001 to 2017, while the annual burned area temporally decreased. Forest fires in China were dominated by the low-frequency [0<burned forests rate (BFR)≤40%] burns which occupied 79% of the total burned area. The medium-frequency (40%

本文由国家重点研发计划项目(2017YFA0604403)和国家自然科学基金项目(31500387)资助 This work was supported by the National Key R&D Program of China (2017YFA0604403) and the National Natural Science Foundation of China (31500387).
2019-06-25 Received, 2019-11-13 Accepted.
* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: fanglei@iae.ac.cn

<BFR≤80%) and high-frequency (80%<BFR≤120%) burns accounted for 11% and 10% of the total burned area, respectively. The seasonality of forest fires differed substantially among eco-regions. The primary fire season of the temperate eco-region was spring (May) and autumn (October). Fire season in the tropical-subtropical eco-region started from the winter to the next spring which included the months from November to next March.

Key words: forest fire; burned area product; remote sensing; spatial distribution; trend analysis; seasonality.

林火广泛分布于全球森林生态系统,是驱动森林结构与功能动态的重要自然干扰因子[1]。同时,林火也被视为世界性的林业灾害,据估计全球每年约有 1%的森林面积毁于林火[2]。作为温室气体排放的重要来源,林火每年释放约 2~4 Pg 的碳至大气,超过化石燃料燃烧排放量的 50%[3]。近年来,持续的暖干化气候以及频发的极端气象事件已导致全球北方针叶林区、美国中西部落基山脉、西班牙与希腊等多个地区的林火情势(fire regime)趋向严酷化[4],森林生态系统极有可能因此而产生功能衰退、林型转变,甚至森林退化或消失。自 1987 年以来,我国实施了严格的森林防火、灭火政策。但是,林火并未因此而消失,重大林火事件仍然时常见诸报端。因此,宏观、准确地掌握当前林火的时空分布特征,有助于深入理解我国林火发生规律、科学地认识和定义林火的生态角色与社会属性;同时,对于合理制定林火管理政策、消减林火对自然生态系统与人类社会系统的不利影响具有重要实际意义。

历史林火信息是研究林火时空分布特征的重要依据。美国、加拿大以及欧盟等国家和地区均已建成时间与空间信息相对完备的历史林火数据库[5],可提供最早至 1920s 的林火面积、火斑边界、发生时间、点火源等信息。除直接推动林火管理与林火生态相关领域的行业应用、科学研究之外,也被广泛用于大气污染物排放、灾害风险评估、气候变化研究等多个领域[6]。当前,我国公开发布的林火信息仍以各省、市、地区汇总数据为主,火斑尺度的信息通常难以获取,数据的准确度较难衡量,导致针对全国林火情势的研究空间分辨率粗糙、研究单元(多以行政单位、生态区划为主)内部空间变异被忽略。

遥感技术可提供不同尺度、时空特征明确的对地观测信息,是监控短期内林火事件发生、发展动态的主要技术手段[7],也是系统量化历史火烧斑块特征、完善林火信息数据库的重要信息源。在区域乃至全球尺度上,过火面积(burned area,BA)产品多基于中低分辨率遥感数据(如 MODIS、MERIS 等)开发研制[8-9];在景观尺度上,多基于中高分辨率的遥感数据(如 Landsat、SPOT、Sentinel 等)针对单场或多场林火开展信息提取或灾后评估[10]。针对林火的遥感监测由来已久且方法体系健全,现已存在多种全球性火灾产品。如:MCD64A1、CCI _ Fire、GFED4s 等全球性火斑产品,以及 MOD14、ATSR 等全球实时-近实时火点产品[11]。2018 年,我国研发了全球首套单年份(2015 年)30 m 过火面积产品[12]。随后,美国地质调查局(USGS)在 2019 年初已将过火面积制图纳入了 U.S. Landsat Analysis Ready Data 标准产品体系,面向美国本土生产 30 m 分辨率火斑产品。然而,不同空间分辨率卫星遥感技术自身存在时间或空间分辨率的不足,如何融合多源、多分辨率卫星遥感影像以获取时空特征丰富的林火产品,是当前区域乃至全球尺度林火遥感监测的热点问题。

基于历史火灾数据库或已存在的全球性火灾产品,用于对某区域的林火时空特征进行量化统计与分析是近期研究区域林火情势常用的方式之一。田晓瑞等[13]以我国主要生态地理区为统计单位,基于 2004—2012 年卫星监测热点数据和林火统计数据对各分区野火热点分布、火险期、火灾次数、面积等特征的动态变化进行详细解析;Yi 等[14]基于我国火点统计数据(1950—2010 年)和 MCD45A1 产品(2001—2012 年),运用空间统计方法对我国不同区域的火灾空间分布和时间变化进行描述;Hanes 等[15]运用 National Fire Database (NFDB) 和 Canadian Forest Service Database(CFSD)两个历史火灾数据库对加拿大 1959—2015 年间林火情势进行长时间序列分析,获得了该国林火半个世纪以来的变化规律;Vadrevu 等[16]结合多种火灾产品(MCD14ML、VNP14IMG),使用 Mann-Kendall 方法对南亚和东南亚多个国家火灾的变化趋势进行了显著性检测,并对与林火相关的气候因素(温度、降水量)进行驱动力分析。此前,我国基于遥感过火面积数据的林火研究多集中于若干重点林区或个别重点林火事

件[17]，仍然缺乏高时空分辨率、全国性的过火面积制图研究。近年来，在全球气候呈现暖干化的背景下，林火事件在我国各地频繁见诸报端[18]。借助遥感过火面积产品实现全国尺度林火时空动态（如年际间变化趋势、空间分布规律、季节性特征等）的准确量化，有助于宏观理解森林火灾的分布格局，有利于科学、合理地规划国家森林火灾管理策略。本研究结合 30 m 全球森林变化产品（GFC）对 250 m 全球过火面积产品（CCI_Fire）进行改进，基于我国宏观生态区划与网格化（0.05°×0.05°）分析，利用改进后产品对 2001—2017 年间全国林火特征进行系统性分析。

1　研究地区与研究方法

1.1　研究区概况

自天然林保护工程、“退耕还林”等重大林业工程实施以来，我国森林资源数量和质量得到了有效提升。在第八次全国森林资源清查结果中，总森林覆盖面积约 2.08 亿 hm^2，活立木总蓄积 164.33 亿 m^3，森林覆盖率达到 21.6%[19]。林火作为重要的森林干扰因子，从未从森林生态系统中消失。自大兴安岭发生“5.6”特大森林火灾以后，我国林火管理和防范措施不断加强[20]。2009—2016 年，国家财政已投入 370.77 亿元，并计划于 2016—2025 年投资 451 亿元用于提高防火基础设施及装备、完善信息化管理和建设专业队伍[21]。严格的森林防火政策已改变了森林生态系统中的火情势特征。由于长期缺乏空间信息丰富的林火数据，我国大尺度的林火动态研究基础薄弱、空间分辨率较为粗糙，导致我国近 20 年的林火空间格局并不明确。

我国不同地区的林火影响因素（气候、地形等）存在明显差异[22]。本文参照 The Nature Conservancy（TNC）全球生态区划分布（http://maps.tnc.org/files/metadata/TerrEcos.xml），将我国划分为 8 个生态区（图 1，本文图片皆采用 WGS 1984 World Mercator 投影坐标），包括 3 个以森林为主体的生态区（热带-亚热带常绿阔叶林区、温带阔叶-混交林区和温带针叶林区）、4 个以草灌植物为主体的生态区（温带草原-灌丛区、沙漠-沙漠灌木区、湿地草甸-稀树草原区和高原草甸-灌丛区）以及岩石-冰生态区。不同生态区中的森林覆盖度差异较大（表 1），其中，3 个以森林为主体的生态区约占我国陆地总面积的 45%，森林面积约占全国总林地面积的 95%。岩石-冰生态区和南海诸岛未监测到林火发生，因此本文主要针对上述 7 个有林生态区展开研究。

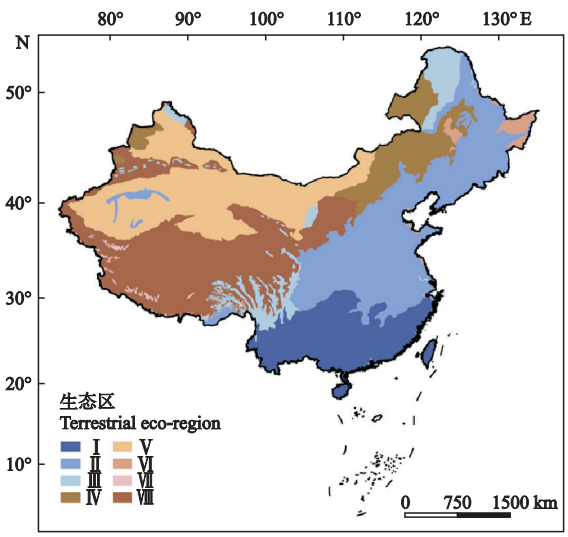


图 1　中国生态区的分布

Fig.1　Distribution of terrestrial eco-regions of China.

Ⅰ：热带-亚热带常绿阔叶林 Tropical and subtropical moist broadleaf forests；Ⅱ：温带阔叶-混交林 Temperate broadleaf and mixed forests；Ⅲ：温带针叶林 Temperate conifer forests；Ⅳ：温带草原-灌丛 Temperate grasslands，savannas and shrublands；Ⅴ：沙漠-沙漠灌木 Deserts and xeric shrublands；Ⅵ：湿地草甸-稀树草原 Flooded grasslands and savannas；Ⅶ：岩石-冰 Rock and ice；Ⅷ：高原草甸-灌丛 Montane grasslands and shrublands.

表 1　各生态区森林面积统计

Table 1　Statistics of forest area of eight terrestrial eco-regions（×10⁶ hm²）

生态区 Terrestrial eco-region	陆地面积 Land area	森林面积 Forest area
热带-亚热带常绿阔叶林 Tropical and subtropical moist broadleaf forests	139.59	88.19
温带阔叶-混交林 Temperate broadleaf and mixed forests	240.67	69.43
温带针叶林 Temperate conifer forests	56.51	30.70
温带草原-灌丛 Temperate grasslands，savannas and shrublands	73.16	3.26
沙漠-沙漠灌木 Deserts and xeric shrublands	185.44	0.11
湿地草甸-稀树草原 Flooded grasslands and savannas	12.41	1.24
岩石-冰 Rock and ice	5.56	0.02
高原草甸-灌丛 Montane grasslands and shrublands	247.12	5.61

1.2　数据来源

1.2.1 遥感过火面积产品　准确的过火面积分布信息是明确区域林火时空动态特征的重要基础资料。目前，已公开发表的全球过火面积产品约有 12 种，其中，针对过火面积的年度连续监测数据主要有 MCD45A1、MCD64A1、CCI_Fire 等 10 种[5]。该类数据产品多基于中低空间分辨率气象卫星或资源卫星

数据研制,具有较高的时间分辨率(可精确到日),其中,MCD64A1 和 CCI_Fire 产品是此类产品中应用最广泛的两种产品[23]。

MCD64A1 是 NASA 发布的全球月度过火面积产品,空间分辨率为 500 m,时间跨度为 2000 年至今(图 2A),可提供火灾发生时的年积日(day of year,DOY)信息[24]。CCI_Fire 是当前最高空间分辨率的连续、全球性月度过火面积产品,由 ESA Climate Change Initiative(CCI)计划资助研发,时间跨度为 2001—2017 年(图 2B)。针对 MCD64A1 与 CCI_Fire 的对比研究表明,CCI_Fire 比 MCD64A1 在错分率和遗漏率方面皆有所提升[25]。但是,实际应用中发现,CCI_Fire 数据仍然存在火斑边缘信息不准确、部分小型火斑信息缺失的情况。因此,本研究将主要以空间信息更为准确的 CCI_Fire 产品为基础数据源,重点针对 CCI_Fire 存在问题进行改进,同时采用原始 MCD64A1、CCI_Fire 数据产品作为参考数据,辅证全国尺度林火空间分布动态的特征分析。

1.2.2 全球森林变化产品　全球森林变化数据集(global forest change,GFC)是美国马里兰大学基于 Landsat 数据绘制的全球 30 m 森林干扰与恢复动态变化数据集[26],由森林损失数据、森林增加数据、森林覆盖度等数据构成。该产品能够提供逐年森林损失与增加信息,时间跨度为 2001—2018 年,具有空间精度高、边界信息准确等优点(图 3)。由于 Landsat 卫星重访周期较长,GFC 产品仅提供森林干扰发生的年度信息,且不能区分具体森林干扰类型(如采伐、火灾和病虫害等)。GFC 产品提供的森林覆盖度数据是基于 2000 年前后 Landsat 数据研制的全球森林覆盖度(即所有高度超过 5 m 的植被冠层的郁闭度)产品,常被用作全球森林分布参考信息广泛应用于森林资源管理、森林干扰信息制图等领域。本研究利用 GFC 产品中的森林覆盖度数据构建森林掩膜,通过阈值分割方法对森林像元与非森林像元进行区分。Potapov 等[27]采用 25%森林覆盖度作为全球北方森林判断阈值。本研究考虑到我国森林类型以温带和亚热带森林为主,树木覆盖度高于林冠郁闭度较低的北方森林,故采用 40%森林覆盖度作为分割阈值以保证获取的森林区域具有较高的置信度。基于上述方法统计的我国森林面积约 1.99 亿 hm^2,介于第六次(1999—2003 年,约 1.75 亿 hm^2)与第八次(2009—2013 年,约 2.08 亿 hm^2)全国森林资源清查结果之间。

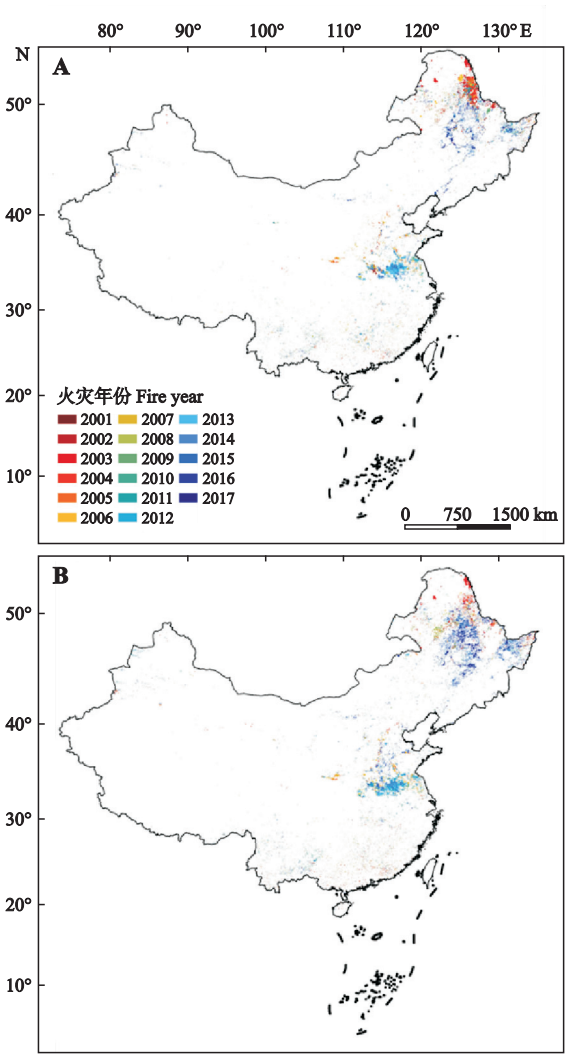


图 2　分别基于 MCD64A1(A)和 CCI_Fire(B)绘制的 2001—2017 年全国火灾分布图

Fig. 2　National fires atlas (2001-2017) based on the MCD64A1 (A) and CCI_Fire (B) products.

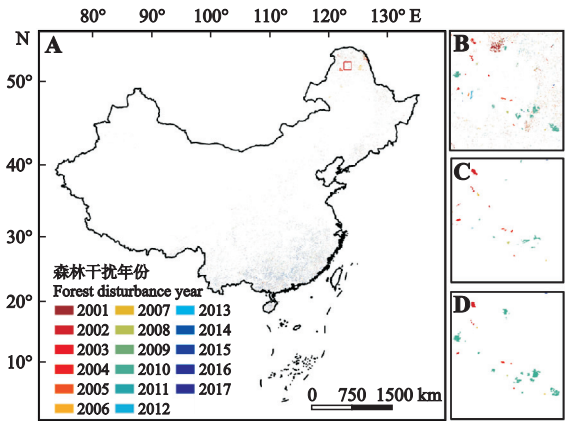


图 3　2001—2017 年全国森林干扰分布(A,数据源:GFC 数据集)、以及 GFC(B)、CCI_Fire(C)和 MCD64A1(D)3 种产品对于森林火斑的识别结果对比

Fig.3　Spatial distribution of forest disturbances during 2001-2017 mapped from Global Forest Change (GFC) dataset (A) and comparison case of identified burned patches in GFC (B), CCI_Fire (C) and MCD64A1 (D) products, respectively.

1.3　研究方法

1.3.1 过火面积信息提取　为构建准确的过火面积本底数据集，针对 CCI_Fire 产品中存在的火斑边界信息不准确、部分小火斑缺失等问题，本文结合 GFC 产品中的森林损失信息进行改善，技术流程如图 4 所示。CCI_Fire 产品能够较好地检测到年际间的重复性火烧，本文在统计森林过火面积时采用逐年统计的方式，因此对于同一区域内的重复性火烧将全部考虑在内。

1.3.2 过火面积精度评价　由于缺乏全国范围的森林过火面积空间数据，过火面积产品的精度验证采用现有大兴安岭地区 2001—2017 年间林火斑块信息进行对比验证。该实测数据是利用该时段内森林火点统计数据与 Landsat 地表反射率数据，结合 dNBR指数与目视解译绘制而成，共包括 248 场林火，总过火面积为 46.6 万 hm^2（表 2）。依据我国 2009 年开始实施的《森林防火条例》[28] 中关于森林火灾等级划分标准，对实测数据中的林火进行分级，可分为：155 场较大森林火灾（1～100 hm^2）、71 场重大森林火灾（100～1000 hm^2）、以及 22 场特别重大森林火灾（1000 hm^2以上）。本研究使用的遥感产品空间分辨率为 250 m，所能检测到的最小过火面积大于 5 hm^2，因此在构建实测数据集时未选用一般森林火灾（1 hm^2以下）的林火。

实测数据中不同火斑的面积相差较大，火斑的数量随火斑面积的增加而较少（呈现幂次分布规律），分布形式不遵从正态分布，常规适用于正态分布的精度评估参数可能因此而失效。因此，本研究

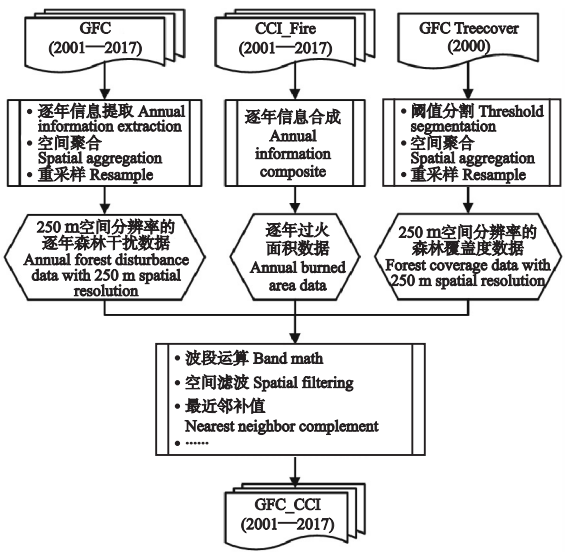


图 4　产品改进流程图

Fig.4　Flow chart of product improvement.

表 2　实测数据统计

Table 2　Statistics of measrued data

年份 Year	火灾数量 Number of fires	过火面积 Burned area（hm^2）	年份 Year	火灾数量 Number of fires	过火面积 Burned area（hm^2）
2001	6	778	2010	30	14503
2002	27	12321	2011	3	44
2003	11	167818	2012	5	1585
2004	10	2443	2013	7	361
2005	48	2286	2014	10	912
2006	14	239629	2015	4	793
2007	17	2380	2016	17	1486
2008	23	17092	2017	10	1190
2009	6	514			

在精度验证过程中分别对实测数据以及 3 种过火面积产品进行对数转换，以减小误差的尺度依赖性，使误差统计分布相对稳定。精度验证包括火斑识别能力与火斑面积识别两方面。首先，根据已识别火斑个数对比 3 类产品对火斑的识别能力；其次，对比实测数据与遥感产品识别的火斑面积，通过线性模型分别计算均方根误差（root mean square error，RMSE）、均方绝对百分比误差（mean absolute percentage error，MAPE）以及变异解释量（R^2）来评估 3 种产品火斑精度。RMSE、MAPE 和 R^2 计算公式如下：

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{m}\sum_{i=1}^{m}(y_i - \hat{y_i})^2}$$

$$MAPE = \sum_{i=1}^{m}\left|\frac{y_i - \hat{y_i}}{y_i}\right| \times \frac{100\%}{m}$$

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^{m}(y_i - \hat{y_i})^2}{\sum_{i=1}^{m}(y_i - \bar{y})^2}$$

$$\bar{y} = \frac{1}{m}\sum_{i=1}^{m} y_i$$

式中：y_i 和 $\hat{y_i}$ 分别是实测数据与遥感产品识别的单场林火面积；m 为识别的火斑个数。

1.3.3 林火的时空分布特征　基于验证后精度最高的遥感过火面积产品，对林火相关参数进行量化，明确我国林火的空间分布、年度动态和季节特征，揭示其时空分布规律。

1）总森林过火比例（burned forests rate，BFR）和年均森林过火比例（mean annual burned forests rate，MABFR）。BFR 为区域内多年林火发生的累积面积，MABFR 可表征区域内林火发生的频率。通过空

间聚合技术对全国进行网格化(0.05°×0.05°)处理与统计,逐网格计算获取 BFR 和 MABFR,分析热点区域的空间分布。计算公式如下:

$$BFR = \frac{1}{FA}\sum_{i=1}^{m} BA_i \times 100\%$$

$$MABFR = \frac{BFR}{m}$$

式中:FA 和 BA_i 分别为区域内森林面积和年过火面积;m 为总年数(本研究为 17 年)。

2)年际趋势。基于 3 种产品的统计结果,运用 Mann-Kendall 趋势检验法分别从全国尺度、生态区尺度上解析林火面积的年际变化趋势。作为一种非参数统计方法,Mann-Kendall 对于呈现非正态分布的时间序列数据具有较好的适应性[29]。在本文中,当 $P<0.05$ 时,即判断研究序列存在统计显著性。

3)季节性分析。将过火面积产品中的 DOY 信息转换为对应的季节和月份信息,分别对各生态区内林火发生的季节和月份进行统计分析,从而确定各生态区内林火发生的主要季节与月份。

2 结果与分析

2.1 过火面积提取精度验证

CCI_GFC 产品相比原始 CCI_Fire 和 MCD64A1 产品具有更高的火斑识别能力和火斑面积识别精度。CCI_GFC 产品共计识别出 116 个火斑,识别火斑面积(38 hm^2)占总验证面积的 83%;原始 CCI_Fire 产品共计识别出 112 个火斑,识别火斑面积(34 hm^2)占比为 74%;MCD64A1 产品仅识别出 86 个火斑,识别火斑面积(16 hm^2)仅为 35%。CCI_GFC 产品未识别出的火斑总面积为 9161 hm^2,包括重大森林火灾 12 场、较大森林火灾 120 个。对于已识别出的火斑,CCI_GFC 产品的火斑面积与实测数据的吻合度最高,其各精度指标明显优于 CCI_Fire 和 MCD64A1(图 5)。

2.2 林火空间分布

基于 CCI_GFC 产品对 2001—2017 年森林过火面积进行合成与制图(图 6A),结果表明我国林火发生地主要集中于东北(主要分布温带针叶和温带阔叶-混交林)和南方(主要分布热带-亚热带常绿阔叶林)地区。其中,东北地区火斑面积较大,多分布于大兴安岭西部与东部、小兴安岭西北部地区,尤其在 2003—2006 年间发生多场大火(图 6B)。南方地区是我国近几年主要的林火发生地,但过火面积普遍较小,其中,华南与东南地区的林地过火面积明显多于西南地区(图 6C,6D)。

对全国 2001—2017 年森林总过火面积进行格网化处理与分析(图 7),结果显示:森林过火区域主要分布于黑龙江省漠河-云南省腾冲线以东林区。我国林火以低火烧频率(0<BFR≤40%)为主,占总过火网格数量的 79%,中(40%<BFR≤60%)、中-高(60%<BFR≤80%)火烧频率区分别占总过火区域的 7%、4%,高(80%<BFR≤100%)、极高(100%<BFR≤120%)火烧频率网格共占 10%。其中,南部地区的森林过火区域沿东西和南北方向跨度较大,以低火烧频率区为主,火烧频率相对高(BFR>40%)的区域主要分布于云南省东部以及广东省北部和江西省南部区域;东北地区过火区域相对集中,主要分布于黑龙江省大、小兴安岭交界区域以及大兴安岭西部林区,我国极高火烧频率区主要聚集在小兴安岭地区。

2.3 林火面积的年际动态

由图 8A 可以看出,2001—2017 年间,基于 3 种产品的全国年林火面积均呈显著下降趋势。根据 CCI_GFC产品结果,研究期间我国总森林过火面积

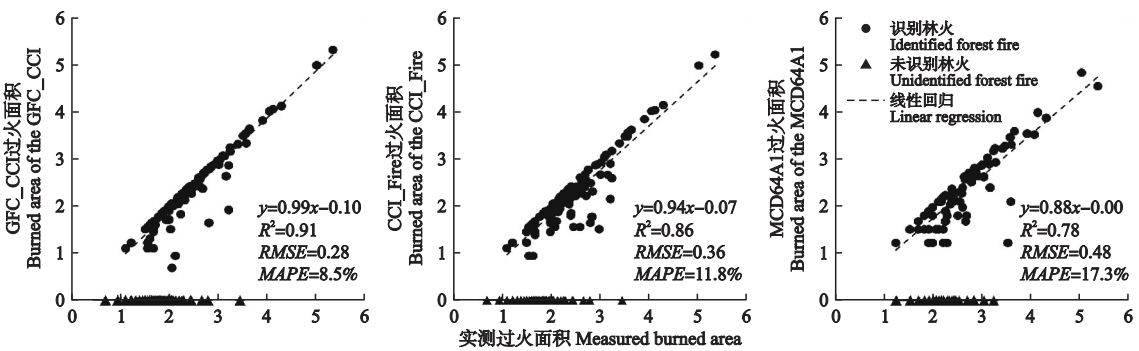


图 5 火斑面积精度验证

Fig.5 Accuracy validations of burned area.

图中数据为过火面积的对数值 The data in the figure was the logarithm of the burned area.

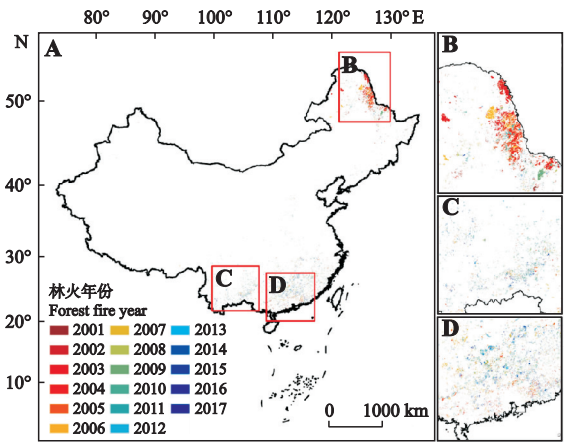


图 6　2001—2017 年全国森林火灾分布

Fig.6　National atlas of forest fires between 2001 and 2017.

A：全国林火 Nationwide forest fires；B：东北地区林火 Forest fires in the northeast；C：西南地区林火 Forest fires in the southwest；D：东南地区林火 Forest fires in the southeast.

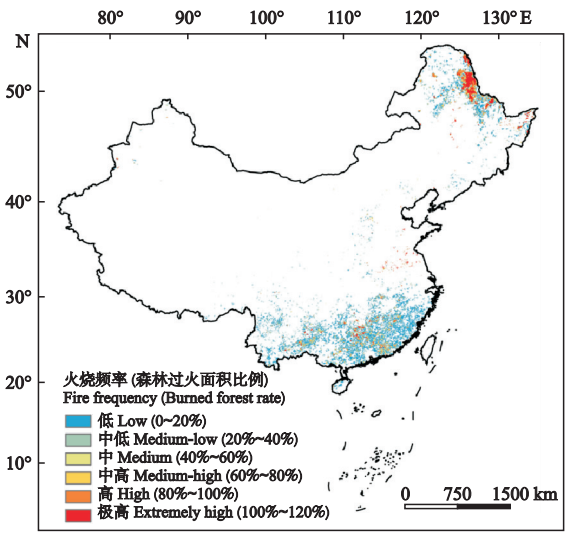


图 7　全国林火热点区域(0.05°×0.05°)分布

Fig.7　Spatial distribution of forest fire hotspots (0.05°×0.05°) of China.

约为 1211 万 hm^2，约占 2000 年全国森林面积总数的 6.1%，年均森林过火面积为 71 万 hm^2。其中，2003 和 2004 年森林过火面积远高于其他年份，分别为 171 万和 190 万 hm^2。

各生态区年度过火面积存在不同的年际趋势（图 8B、8C）。其中，温带阔叶-混交林区和温带针叶林区的过火面积均呈显著下降趋势；热带-亚热带常

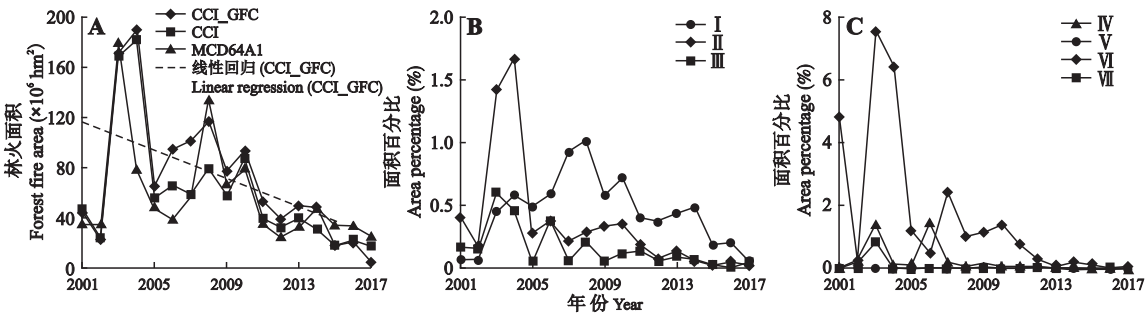


图 8　各生态区过火面积的年际变化动态

Fig.8　Inter-annual dynamics of burned area among terrestrial eco-regions.

A：全国 Nation；B：森林生态系统 Forest ecosystems；C：草灌生态系统 Grass-shrub ecosystems. Ⅰ：热带-亚热带常绿阔叶林 Tropical and subtropical moist broadleaf forests；Ⅱ：温带阔叶-混交林 Temperate broadleaf and mixed forests；Ⅲ：温带针叶林 Temperate conifer forests；Ⅳ：温带草原-灌丛 Temperate grasslands, savannas and shrublands；Ⅴ：高原草甸-灌丛 Montane grasslands and shrublands；Ⅵ：湿地草甸-稀树草原 Flooded grasslands and savannas；Ⅶ：沙漠-沙漠灌木 Deserts and xeric shrublands. 下同 The same below.

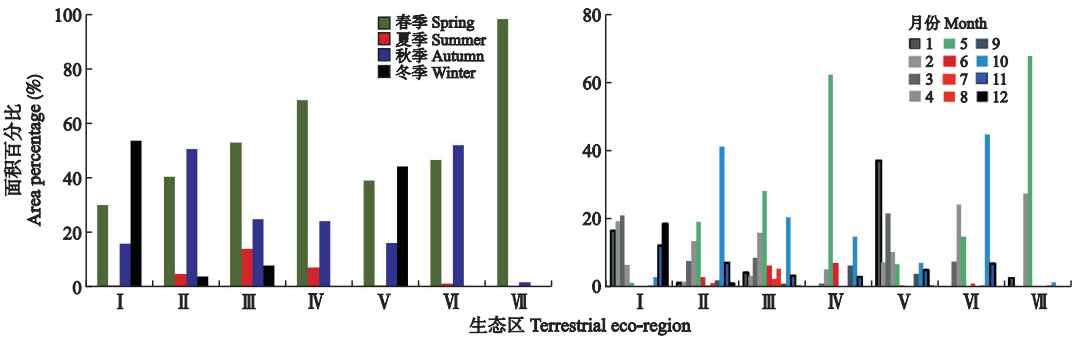


图 9　各生态区的林火季节性特征

Fig.9　Seasonality of forest fires in seven terrestrial eco-regions.

绿阔叶林区未体现出显著的单调变化趋势,2008 年以前年度森林过火面积呈上升趋势,之后则呈逐年递减趋势;以草灌植被为主体的生态区中,湿地草甸-稀树草原区和温带草原-灌丛区的年度过火面积均呈显著下降趋势;湿地草甸-稀树草原区的年际间波动明显,2003 年森林过火面积约占该区森林总面积的 8%;高原草甸-灌丛区和沙漠-沙漠灌木区的年度过火面积较少且年际间波动不明显。

2.4 林火面积的季节变化特征

不同生态区之间林火发生的季节性特征存在较大差异。温带针叶林区、温带草原-灌丛区和沙漠-沙漠灌木区在春季发生火灾面积的比例远高于其他季节,分别为 53%、69%和 98%,且均为 5 月前后达到峰值。热带-亚热带常绿阔叶林区的林火高发期最长(11 月至翌年 3 月),发生于冬季的森林过火面积超过全年总过火面积的 50%(图 9)。高原草甸-灌丛区的林火集中在 1—5 月,其中,1 月占比最高。温带阔叶-混交林区和湿地草甸-稀树草原区则是秋季林火频发,分别占全年的 51%和 52%,主要的发生月份为 3—5 和 10 月。

3 讨 论

连续、时空信息明确的森林火灾监测数据产品能够改善人类社会对于林火自然特征、社会属性的认识和理解。中低分辨率遥感卫星对地观测是当前全球、连续性林火监测的重要技术手段和数据来源。本研究表明,通过融合不同时空分辨率遥感信息能够改进现有过火面积产品的准确度,尤其对于中小型火斑的补充方面效果明显。但是,受限于原始过火面积产品自身的局限性,改进后的数据产品仍存在不足之处,主要体现为小火识别率提升不明显、时间跨度短。由于林火蔓延过程以及卫星过境观测过程中存在众多不确定性,可能对于林火的准确识别产生重大影响。例如,基于 MODIS 数据的过火面积产品多结合基于地表温度异常值提取的实时火点(active fire)信息和图像上下文关系(如光谱、纹理、土地利用类型等特征)进行研判。过火面积的识别准确率极大受制于实时火点的识别精度以及后续输入影像的数据质量。Giglio 等[30]研究表明,MODIS 火点的判别存在显著的尺度依赖性,识别精度伴随火斑面积的减小而呈非线性骤减趋势。由于小型火灾产生烟尘能够产生遮挡效果,而且其火线较短,产生的热量辐射在 1 km 分辨率的瞬时视场情形下可能难以被相应波段探测到。当前过火面积产品多以发射于 2000 年 9 月的 MODIS 传感器为主要数据源,后续的研究拟通过引进国家林火统计数据和 Landsat 历史存档数据(最早至 1970s),以求构建时空信息完备的我国的林火数据产品。

经典火三角理论认为,在不同时空尺度上,林火的控制因素存在差异。在景观尺度上,单场林火主要受地形、气象和可燃物因素影响,而在区域尺度上,林火情势受气候、植被和点火源的限制。本研究通过观测表明,由于地带性植被类型差异以及温度、降水量等气候因素的不同,各个生态区内林火的季节性特征、火斑规模亦存在差异。华南与西南地区广泛分布以常绿阔叶和常绿针叶为主的森林类型,火斑面积通常较小。我国东北地区主要分布温带针叶林、阔叶林和混交林,相比华南地区气候干燥、地形起伏度小,可燃物含水量年际和年内动态受大陆性季风气候影响显著,森林景观中分布厚密的灌丛、草本植物以及泥炭层等细可燃物,故而容易引发大型森林火灾。热带-亚热带的林火面积在冬季和春季占比高,火灾高发期较长(11 月至翌年 3 月),而温带林火则多发生于春季和秋季,集中于 5 月和 10 月前后,该结果与此前基于历史火点记录数据的研究结果一致[13]。

由于我国尚缺乏公开发布的火灾斑块数据及相应数据库,本研究中的精度验证工作拓展到全国范围存在较大困难,故仅利用现有大兴安岭地区火斑资料开展验证。由于实测数据涵盖了数公顷级至数千公顷级的火斑规模,能够为本研究所涉及的 3 种过火面积产品的火斑制图精度提供较为客观、一致的评价。但是,相比以大兴安岭地区为代表的温带森林生态系统,华南与西南地区森林火灾的平均过火面积较小(图 6)。尽管通过融合更高分辨率的森林变化数据集对小型火灾制图中存在的漏分误差实现了较大改善,但是受限于产品自身的空间分辨率以及直接实测数据的缺乏,仍然不能排除验证精度不适于华南地区的可能性。

在全球气候暖干化背景下,美国、加拿大等国家近年来频繁爆发灾难性林火,森林过火面积呈增加趋势。受严格的林火防控政策影响,我国林火的发生面积呈显著下降趋势。这表明近 20 年来我国积极的森林防火、灭火政策取得了显著成绩,但同时也深刻改变了自然林火情势。持续的暖干化气候和禁伐导致可燃物快速累积,必然会加剧林火发生的可能性和灾害强度,使当前的森林防火形势愈加严峻。现阶段,我国的林火主要分布于漠河-腾冲一线以东

区域，与我国人口密度对比线（即爱辉-腾冲一线）基本重合，区内人口密度高，是我国农业、社会、经济高度发展区域，同时也是我国林业资源主要分布区。频繁的人类活动（例如农业秸秆焚烧、野外用火、祭祀风俗等）与极端气候、气象事件的发生将为森林火灾的发生和发展提供重要点火源和成灾要素[14]。因此，为保证我国林火保持在可控状态，需要根据不同区位内林火动态变化科学、合理地规划林火管理与防控策略，实现森林资源的可持续管理与防火资源的优化配置。例如：增强可燃物管理、加强森林火险预测预报和提高扑救技术水平和装备等[18,20]。

4　结　　论

本研究表明，结合 GFC 产品可有效改善全球过火面积产品中林火部分的制图精度。2001—2017 年，我国森林火灾年均总过火面积约为 71 万 hm^2，呈现显著下降趋势。在全国 3 个以森林为主体的生态区中，温带阔叶-混交林区和温带针叶林区均呈显著下降趋势，而热带-亚热带常绿阔叶林区则以 2008 年为时间节点呈先增后降趋势。我国林火以低火烧频率为主，热点区域主要分布于大、小兴安岭地区以及华南与西南林区，各区内林火的火斑特点、季节性特征存在明显差异。温带地区的森林火灾多发生于春季和秋季，多集中于 5 月和 10 月前后；热带-亚热带的林火面积在冬季和春季占比较高，火灾高发期延续时间较长（11 月至翌年 3 月）。

参考文献

[1] Turner MG, Hargrove WW, Gardner RH, *et al*. Effects of fire on landscape heterogeneity in Yellowstone National Park, Wyoming. *Journal of Vegetation Science*, 2010, **5**: 731-742

[2] Obschatko ESD, Foti MP, Román ME, *et al*. Global forest resources assessment 2010: Main report. *FAO Forestry Paper*, 2010

[3] 胡海清, 魏书精, 孙龙, 等. 气候变化、火干扰与生态系统碳循环. 干旱区地理, 2013, **36**(1): 57-75 [Hu H-Q, Wei S-J, Sun L, *et al*. Interaction among climate change, fire disturbance and ecosystem carbon cycle. *Arid Land Geography*, 2013, **36**(1): 57-75]

[4] De Groot WJ, Flannigan MD, Cantin AS. Climate change impacts on future boreal fire regimes. *Forest Ecology and Management*, 2013, **294**: 35-44

[5] Chuvieco E, Mouillot F, van der Werf GR, *et al*. Historical background and current developments for mapping burned area from satellite Earth observation. *Remote Sensing of Environment*, 2019, **225**: 45-64

[6] 杨伟, 姜晓丽. 森林火灾火烧迹地遥感信息提取及应用. 林业科学, 2018, **54**(5): 138-145 [Yang W, Jiang X-L. Review on remote sensing information extraction and application of the burned forest areas. *Scientia Silvae Sinicae*, 2018, **54**(5): 138-145]

[7] 覃先林, 陈小中, 钟祥清, 等. 我国森林火灾预警监测技术体系发展思考. 林业资源管理, 2015(6): 45-48 [Qin X-L, Chen X-Z, Zhong X-Q, *et al*. Development of forest fire early warning and monitoring technique system in China. *Forest Resources Management*, 2015(6): 45-48]

[8] Giglio L, Randerson JT, Werf GRVD. Analysis of daily, monthly, and annual burned area using the fourth-generation global fire emissions database (GFED4). *Journal of Geophysical Research Biogeosciences*, 2013, **118**: 317-328

[9] Chuvieco E, Yue C, Heil A, *et al*. A new global burned area product for climate assessment of fire impacts. *Global Ecology and Biogeography*, 2016, **25**: 619-629

[10] Fang L, Crocker E, Yang J, *et al*. Competition and burn severity determine post-fire sapling recovery in a nationally protected boreal forest of China: An analysis from very high-resolution satellite imagery. *Remote Sensing*, 2019, **11**: 603

[11] Giglio L, Boschetti L, Roy DP, *et al*. The collection 6 MODIS burned area mapping algorithm and product. *Remote Sensing of Environment*, 2018, **217**: 72-85

[12] Long T, Zhang Z, He G, *et al*. 30 m resolution global annual burned area mapping based on Landsat images and Google Earth Engine. *Remote Sensing*, 2019, **11**: 489

[13] 田晓瑞, 舒立福, 赵凤君, 等. 中国主要生态地理区的林火动态特征分析. 林业科学, 2015, **51**(9): 71-77 [Tian X-R, Shu L-F, Zhao F-J, *et al*. Dynamic characteristics of forest fires in the main ecological geographic districts of China. *Scientia Silvae Sinicae*, 2015, **51**(9): 71-77]

[14] Yi K, Bao Y, Zhang J. Spatial distribution and temporal variability of open fire in China. *International Journal of Wildland Fire*, 2017, **26**: 122-135

[15] Hanes CC, Wang X, Jain P, *et al*. Fire regime changes in Canada over the last half century. *Canadian Journal of Forest Research*, 2018, **49**: 256-269

[16] Vadrevu KL, Kristofer G, Louis S, *et al*. Trends in vegetation fires in South and Southeast Asian Countries. *Scientific Reports*, 2019, **9**: 7422

[17] 胡海清, 苏志杰, 魏书精, 等. 利用不同时相遥感影像估算大兴安岭北部火干扰后 NPP. 森林工程, 2013, **29**(2): 1-7 [Hu H-Q, Su Z-J, Wei S-J, *et al*. Estimation of net primary productivity of northern great Xing'an Mountain after fire disturbance using multitemporal remote seining images. *Forest Engineering*, 2013, **29**(2): 1-7]

[18] 孙龙, 王千雪, 魏书精, 等. 气候变化背景下我国森林火灾灾害的响应特征及展望. 灾害学, 2014, **29**(1): 12-17 [Sun L, Wang Q-X, Wei S-J, *et al*. Response characteristics and prospect of forest fire disasters in the context of climate change in China. *Journal of Catastrophology*, 2014, **29**(1): 12-17]

[19] 国家林业局. 第八次全国森林资源清查结果. 林业资源管理, 2014(1): 1-2 [State Forestry Administration. The results of the 8th national forest inventories. *Forest Resources Management*, 2014(1): 1-2]
[20] 田晓瑞, 刘斌. 林火动态研究与林火管理. 世界林业研究, 2011, **24**(1): 46-50 [Tian X-R, Liu B. Research achievements of fire regime and fire management. *World Forestry Research*, 2011, **24**(1): 46-50]
[21] 翟洪波, 魏晓霞, 赵鹏武, 等. 中国森林防火形势分析林产工业, 2018, **45**(4): 45-50 [Zhai H-B, Wei X-X, Zhao P-W, *et al*. The situation analysis of forest fire control in China. *China Forest Products Industry*, 2018, **45**(4): 45-50]
[22] 田晓瑞, 赵凤君, 舒立福, 等. 1961—2010 年中国植被区的气候与林火动态变化. 应用生态学报, 2014, **25**(11): 3279-3286 [Tian X-R, Zhao F-J, Shu L-F, *et al*. Changes of climate and fire dynamic in China vegetation zone during 1961-2010. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2014, **25**(11): 3279-3286]
[23] Fornacca D, Ren G, Xiao W. Performance of three MODIS fire products (MCD45A1, MCD64A1, MCD14ML), and ESA fire_CCI in a mountainous area of Northwest Yunnan, China, characterized by frequent small fires. *Remote Sensing*, 2017, **9**: 1131
[24] Giglio L, Loboda T, Roy DP, *et al*. An active-fire based burned area mapping algorithm for the MODIS sensor. *Remote Sensing of Environment*, 2009, **113**: 408-420
[25] Chuvieco E, Lizundia-Loiola J, Pettinari ML, *et al*. Generation and analysis of a new global burned area product based on MODIS 250 m reflectance bands and thermal anomalies. *Earth System Science Data*, 2018, **10**: 2015-2031
[26] Hansen M, Potapov P, Margono B, *et al*. High-resolution global maps of 21st-century forest cover change. *Science*, 2014, **342**: 850-853
[27] Potapov P, Hansen MC, Stehman SV, *et al*. Combining MODIS and Landsat imagery to estimate and map boreal forest cover loss. *Remote Sensing of Environment*, 2008, **112**: 3708-3719
[28] 中华人民共和国国务院. 中华人民共和国森林防火条例.中华人民共和国国务院令第 541 号. 北京: 中华人民共和国国务院, 2008 [State Council of the People's Republic of China. Regulations of the People's Republic of China on Forest Fire Prevention. Order of the State Council of the People's Republic of China No. 541. Beijing: State Council of the People's Republic of China, 2008]
[29] 袁丽华, 蒋卫国, 申文明, 等. 2000—2010 年黄河流域植被覆盖的时空变化. 生态学报, 2013, **33**(24): 7798-7806 [Yuan L-H, Jiang W-G, Shen W-M, *et al*. The spatio-temporal variations of vegetation cover in the Yellow River Basin from 2000 to 2010. *Acta Ecologica Sinica*, 2013, **33**(24): 7798-7806]
[30] Giglio L, Schroeder W, Justice CO. The collection 6 MODIS active fire detection algorithm and fire products. *Remote Sensing of Environment*, 2016, **178**: 31-41

作者简介 乔泽宇, 男, 1995 年生, 硕士研究生。主要从事遥感与 GIS 应用研究。E-mail: 15726207460@126.com

责任编辑 杨 弘
开放科学(资源服务)标识码(OSID):



乔泽宇, 房磊, 张悦楠, 等. 2001—2017 年我国森林火灾时空分布特征. 应用生态学报, 2020, **31**(1): 55-64
Qiao Z-Y, Fang L, Zhang Y-N, *et al*. Spatio-temporal characteristics of forest fires in China between 2001 and 2017. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2020, **31**(1): 55-64