

DOI: 10.5846/stxb202110132891

庞岩,任雪毓,李国宏,王梅,陈国发,王越,王鸿斌.基于发生指数的中国森林生物灾害趋势与突变特征.生态学报,2023,43(5):1822-1831.

Pang Y, Ren X Y, Li G H, Wang M, Chen G F, Wang Y, Wang H B. Trend and abrupt change analysis of forest biological disasters in China based on forest pest outbreak index. Acta Ecologica Sinica, 2023, 43(5): 1822-1831.

基于发生指数的中国森林生物灾害趋势与突变特征

庞 岩¹, 任雪毓¹, 李国宏¹, 王 梅¹, 陈国发², 王 越², 王鸿斌^{1,*}

1 中国林业科学研究院森林生态环境与自然保护研究所 国家林业和草原局森林保护学重点实验室, 北京 100091

2 国家林业和草原局生物灾害防控中心, 沈阳 110034

摘要: 监测分析森林生物灾害时空变化特征对了解森林生物灾害的动态演变和综合治理具有重要意义。基于 1998—2019 年森林有害生物灾害面积及同期森林面积增长统计数据, 计算衍生了森林有害生物发生指数(FPOI)、灾害发生率(FPOAR)两个系列指标集, 分别采用 Sen's 斜率估计(Sen+Mann-Kendall)和曼-肯德尔(Mann Kendall, M-K)突变检验、滑动 T 检验、变异系数和赫斯特指数(Hurst exponent)指数方法分析中国森林生物灾害的时空分异特征。研究表明: (1) FPOI、FPOAR 指标用于森林生物灾害不同尺度分析具备可操作与适用性, 两指标均可分析有害生物发生趋势与突变, 但表现程度有所差别。(2) 历史变化特征, 全国尺度 FPOI 森林生物灾害总体表现为下降趋势, FPOAR 表现为上升趋势, 省区尺度, 新疆、西藏、天津等局部省区森林生物灾害呈上升趋势, 而华北、东北、华东、西北等大部分省区表现为下降态势。(3) 突变特征, 全国尺度上趋势突变仅在 2001 年发生, 其它年度趋势未变。在省区尺度则大部分区域并未展现突变, 局部省区多展现一次趋势改变, 且不同省区突变时间有一致性。(4) 稳定性特征, 全国大部分省区显示稳定, 但 FPOI、FPOAR 指标衡量存在差异, 以 FPOAR 指标海南、青海、浙江、重庆、上海等 5 省区表现不稳定, 但以 FPOI 指标, 不稳定区域扩大到 11 省区, 增加了除以上省区的甘肃、西藏、山西、河南、江苏、吉林 6 省区。(5) 未来趋势特征, 全国森林生物灾害与历史趋势保持一致, 大部分省区呈现持续下降趋势。局部省区如新疆、西藏仍然显示持续增加态势。

关键词: 森林生物灾害; 发生指数; 曼-肯德尔检验; 赫斯特指数

Trend and abrupt change analysis of forest biological disasters in China based on forest pest outbreak index

PANG Yan¹, REN Xueyu¹, LI Guohong¹, WANG Mei¹, CHEN Guofa², WANG Yue², WANG Hongbin^{1,*}

1 Key Laboratory of Forest Protection of National Forestry and Grassland Administration, Ecology and Nature Conservation Institute, Chinese Academy of Forestry, Beijing 100091, China

2 Center for Biological Disaster Prevention and Control, National Forestry and Grassland Administration, Shenyang 110034, China

Abstract: Monitoring and analyzing the spatio-temporal patterns changes is of great significance for understanding the dynamic evolution and integrated management of forest biological disasters. Based on the open statistical data of forest pest disaster area and forest cover area at national and provincial scale from 1998 to 2019, two series of indicators, the Forest Pest Outbreak Index (FPOI) and the Forest Pest Occurrence Area Rate (FPOAR), were calculated and derived. The spatial and temporal differentiation characteristics of forest biological disasters in China were revealed by the indicators data analysis with various methods. Sen's Slope Estimator and Mann Kendall test, Mann Kendall mutation test, sliding T test, coefficient of variation, and Hurst exponent were adopted separately in analyzing the trend, sudden changes and stability of

基金项目: 中国林业科学研究院基本科研业务费专项(CAFYBB2016SY014, CAFYBB2020ZD001)

收稿日期: 2021-10-13; **采用日期:** 2022-06-18

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: wanghb@caf.ac.cn

#本研究尚不包括中国港澳台统计数据。

occurred disasters. The results are as follows: (1) Both of FPOI and FPOAR indicators are suitable for different scales analysis of forest biological disasters. With the clearly differentiation of the consistent spatio-temporal data of the two indicators, the characteristics of forest biological disasters could be analyzed and quantitative visualized. However, there might be partially different between the results by the two indicators. (2) Regarding the characteristics of historical trend, the FPOI indicator with more weight on severe and moderate disasters showed downward trend at the national scale, while the FPOAR indicator was an upward trend. At the provincial scale, both indicators disclosed that forest biological disasters in Xinjiang, Tibet, Tianjin and a few other provinces were on the rise. However, more provinces in most regions of North, Northeast, East, and Northwest China showed a downward trend. (3) In terms of mutation characteristics, at the national scale, the trend mutation occurred only in 2001, and there was no mutation in other years. At the provincial scale, most regions did not show abrupt changes, and a few provinces showed one trend changes in the same years. (4) According to the stability characteristics of forest biological hazards, forest pest disasters showed stable in most provinces across the country. The performance of 5 provinces included Hainan, Qinghai, Zhejiang, Chongqing, Shanghai were unstable by the FPOAR indicator, the unstable provinces numbers expanded to 11 by the FPOI indicator, 6 more provinces included Gansu, Tibet, Shanxi, Henan, Jiangsu, Jilin provinces were joined. (5) For the characteristics of the future trend, forest pest disasters at the national scale and in regions at the provincial scale are consistent with historical trends, showing a continuous downward trend in most provinces. A few provinces, such as Xinjiang and Tibet, still show a continuous upward trend.

Key Words: forest biological disaster; forestry pest outbreak index; Mann Kendall test; Hurst exponent

近 30 年来,中国是全球森林资源增长最多的国家,森林覆盖率已由 20 世纪 80 年代初的 12%提高到目前的 23.04%,森林蓄积量提高到 175.6 亿立方米,人工林面积稳居全球第一^[1-2]。从生态系统稳定性来看,人工林生态系统较天然林更易受到有害生物的攻击^[3],导致我国森林生物灾害表现为发生种类的多样性,发生时间与空间的复杂性与不均衡性^[4],使生物灾害预测评估困难,尤其缺少定量化指标与方法进行全局分析^[5]。我国森防测报机构近些年一直在推广建立不同类型的生物灾害的发生监测体系^[6-8],组建了 1000 多个国家级测报中心对 300 多种重要林业生物灾害进行持续的监测^[9-10],对不同种类建立标准化灾害评估方法,形成了不同程度发生面积的统计报告^[11-12],但如何利用这些系列发生面积数据产生精准化的全局性比较分析尚无统一认识。

时间序列数据分析是统计学中一类几乎在所有领域都广泛应用的分析手段。针对数据的平稳性、波动幅度、周期性、随机性等特征,分析检验方法众多,经济统计领域尤甚。而气象、灾害等领域时间序列数据,针对其波动幅度大、非正态数据分布等特性,目前对于其趋势分析主要方法有曼-肯德尔(Mann Kendall, M-K)趋势检验、创新性趋势分析(ITA)、稳健回归^[13-14]等;对于其突变分析主要方法有 M-K 突变检验、累计距平法以及滑动 T 检验^[15]等;对于其稳定性分析常用变异系数^[16];而对于未来持续性分析则常用 Hurst 指数^[17]。在不同区域和种类的农林害虫灾害趋势和突变预测中得到应用。

对于我国森林生物灾害的整体趋势,常采用病情指数、虫情指数^[18]、发生率等来反映有害生物危害的严重程度,后相继提出了森林病虫指数^[19]、为害指数^[20]、发生指数^[21-22]、森林病虫基指数^[23]、成灾率^[24]等指标,但均在局部、单种灾害应用或仅是概念的提出,未能建立可在全局不同尺度时空分析应用的统一系列时间数据集。由于全局性历史灾害数据调查获取与系列时间数据建立的难度,如何利用现有森林有害生物发生面积统计数据,建立时间序列数据集,验证其在全局灾害趋势与突变分析的应用价值,促进今后的相关持续数据产出和应用是本文研究的出发点。本研究有效利用森林灾害发生面积统计数据,计算衍生了森林有害生物发生指数(FPOI)、灾害发生率(FPOAR)两个系列指标集。并选用非参数 M-K 检验、滑动 T 检验、变异系数、Hurst 指数方法,分析评估我国不同省区森林生物灾害的趋势特征、突变特征、稳定性和持续性特征在时间和

空间上的同步与差异,为未来森林有害生物灾害全局性合理分析评估与持续监测提供了借鉴。

1 数据来源与处理方法

1.1 灾害指数集构建方法

1998—2019 年森林有害生物发生面积和森林面积数据源于《中国林业统计年鉴》和《中国林业和草原统计年鉴》^[25—27],有害生物发生面积包括轻度、中度、重度及总计面积,在森林有害生物的划分上,根据林业有害生物发生及成灾标准(LY/T 1681—2006)^[28],将森林病虫害危害程度划分为轻度、中度、重度三个等级。本文结合危害程度与发生面积,计算了森林有害生物发生指数(FPOI)、灾害发生率(FPOAR)两个指标集。其中 FPOI 权衡了有害生物灾害的轻、中、重度发生的影响,FPOAR 为同期森林生物灾害发生总计面积与森林面积的比值,不考虑灾害程度的权重。FPOI 参考文献^[21]及专利^[22],将公式中该树种面积替换为森林面积,以 FPOI 和 FPOAR 比全国森林有害生物在时间层面、空间格局上的发生及变化情况。计算公式如下:

$$\text{FPOI 发生指数} = (1 \times \text{轻度发生面积} + 2 \times \text{中度发生面积} + 3 \times \text{重度发生面积}) / (3 \times \text{森林面积}) \quad (1)$$

$$\text{FPOAR 灾害发生率} = \text{森林生物灾害发生总计面积} / \text{森林面积} \times 100\% \quad (2)$$

1998—2019 年全国森林有害生物数据中,对于异常数据采取删除处理。由于行政区域的划分,1998—2003 年四川的数据中包含重庆,因此计算 1998—2003 年四川、重庆 FPOI、FPOAR 时均除以四川省森林面积;西藏缺失 1998—2001、2003—2004 年数据;2001—2002 年全国合计不包括龙江集团,2003—2005 年不包括龙江集团和新疆兵团。由于本文主要针对省区级有害生物,因此未将龙江集团、新疆兵团、大兴安岭数据列入分析中。森林资源数据(森林面积)源于第四至九次全国森林资源清查(1989—1993、1994—1998、1999—2003、2004—2008、2009—2013、2014—2018)结果。将单位统一为:公顷。本研究尚缺中国港澳台统计数据。

1.2 分析方法

1.2.1 灾害趋势分析

Sen's 斜率估计与 M-K 趋势检验已成为时间序列数据变化趋势及显著性趋势检验的重要方法^[29—30],本文利用 Sen's 斜率估计和 M-K 检验判断森林生物灾害 FPOI、FPOAR 时间序列的变化趋势,当 Sen's 斜率估计斜率大于 0 时,表示森林生物灾害呈上升趋势,反之呈下降趋势。以 M-K 方法进行变化显著性检验,对统计检验量 Z ,在 0.05 置信水平,若 $|Z| \geq 1.96$,表示序列变化趋势显著;在 0.01 的置信水平,若 $|Z| \geq 2.58$ 时表明序列变化极显著。在 RStudio 调用 trend 包采用 sens.slope、mk.test 函数计算。

1.2.2 灾害突变分析

M-K 检验是已广泛使用的非参数的统计检验方法^[31—32],文中将其用于时段内森林有害生物变化趋势和突变出现时间研究。M-K 突变检验通过计算统计量时间序列 UF 和 UB 判断所检验时间序列是否存在突变点,当 UF_k 和 UB_k 交点位于临界线内时,交点对应的时刻便是突变的时间($P < 0.05$),若其超过临界线,即存在明显的变化趋势。 $UF_k < 0$ 或 $UF_k > 0$ 表示有害生物发生呈下降或上升趋势。为增强突变结果可信度,辅以滑动 T 检验法对突变点进行可信度检验^[33]。在 R 中编写 M-K 突变检验代码,在 Python 环境下编写滑动 T 检验代码分别对全国生物灾害逐一检验,以确定具体的突变年份。

1.2.3 灾害稳定性分析

变异系数可用于表示全国各省区森林生物灾害的相对波动程度,其值越大,说明该省区有害生物受到的干扰多、不稳定,反之,则处于相对稳定状态^[34—35]。其计算公式为:

$$CV = \frac{\sigma}{\bar{x}} \quad (3)$$

式中, CV 是变异系数, σ 为标准差, $\bar{x}$ 为各省区 FPOI、FPOAR 的平均值。

1.2.4 灾害未来持续性分析

Hurst 指数是预测时间序列数据相对于过去未来发展趋势的一个重要指数。在 M-K 检验的基础上,常采

用重标极差(R/S)计算序列的 Hurst 指数,广泛应用于气象、水文等领域^[36-37]。运用 Hurst 指数来定量描述 FPOI、FPOAR 时间序列变化的持续性或反持续性。

Hurst 指数 H 的取值范围为 $[0,1]$,当 $0 \leq H \leq 0.5$ 时,具有反向持续性, H 越接近 0,反持续性越强;当 $H=0.5$ 时,表明独立随机状态;当 $0.5 \leq H \leq 1$,表明该时间序列未来变化趋势具有正向持续性,即森林有害生物未来变化趋势与过去 22 年的趋势一致, H 值越接近 1,正向持续性越强。根据文献^[38]将 Hurst 指数定义如下等级:反持续性($H < 0.5$),弱持续性($0.5 < H \leq 0.65$),强持续性($0.65 < H < 1$)。在 R 中调用 prama 包采用 hurstexp 函数进行计算。

1.2.5 统计学分析

使用 Excel 2016 整理森林有害生物数据;在 R 4.0.2、RStudio 中计算森林有害生物 FPOI、FPOAR,应用 trend 包进行灾害趋势分析,prama 包进行 Hurst 指数分析,ggplot2 包对数据进行可视化;Python 3.9 用于计算变异系数、滑动 T 检验。

2 结果与分析

2.1 指数集 FPOI、FPOAR 的构成与特征

本研究计算了 1998 至 2019 年森林有害生物 FPOI、FPOAR 两个系列指标集,数据集由有害生物发生面积包括轻度、中度、重度及总计面积和森林面积构成,包含 698 条数据。全国合计 FPOI 数据集波动范围:0.24—0.36;FPOAR 数据集波动范围:4.82%—6.91%。省区尺度指数波动范围明显大于全国尺度。1998—2019 各省年均 FPOI、FPOAR 按从低到高排列见图 1,全国尺度 FPOI 与省区尺度年均 FPOI 时间序列变化见图 2。

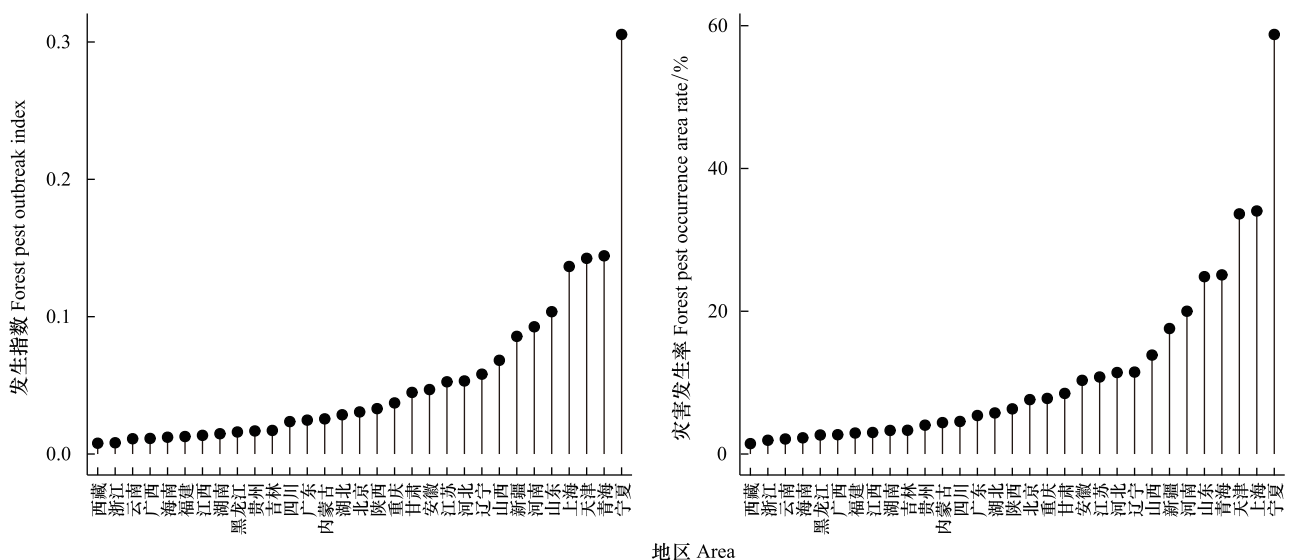


图 1 1998—2019 年各省年均 FPOI、FPOAR 序列

Fig.1 Average annual FPOI and FPOAR sequences of provinces from 1998 to 2019

FPOI:发生指数 Forest pest outbreak index;FPOAR:灾害发生率 Forest pest occurrence area rate

2.2 森林生物灾害历史趋势特征

根据趋势检验结果(表 1),近 22 年全国森林生物灾害 FPOI 和 FPOAR 分别有 21、20 个省区以及全国合计通过趋势检验(95%置信区间),在以下计算中出现的百分比指占省区个数(31 个省)的百分比,下同。

以 FPOI 指标,全国尺度呈极显著下降趋势($P < 0.01$)。省区尺度森林生物灾害呈显著增加趋势占比 9.68%,主要分布在新疆、西藏、天津等地;呈显著下降的省区为 58.06%,其中极显著下降的省区为 48.39%,集中分布在华北(北京、河北、山西)、东北(黑龙江)、华东(上海、江苏、福建、山东)、中南(河南、广东、海南)、

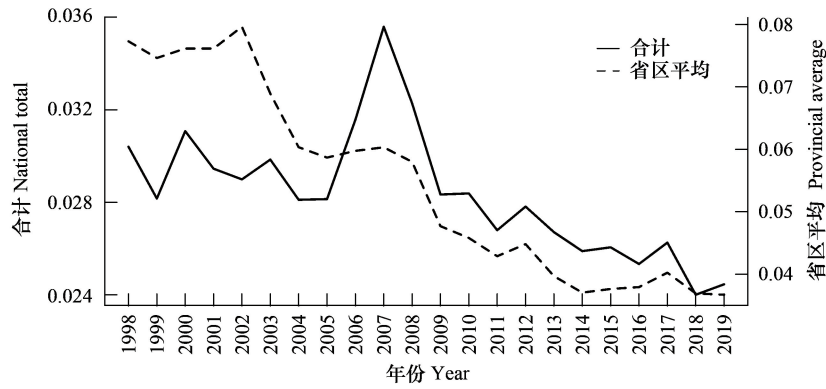


图2 我国31个省市自治区总体尺度FPOI与省区尺度年均FPOI时间序列

Fig.2 National-scale FPOI and provincial-scale annual average FPOI time series

表1 1998—2019年FPOI、FPOAR趋势检验

Table 1 FPOI and FPOAR trend test from 1998 to 2019

区域 Regions	发生指数 FPOI			灾害发生率 FPOAR		
	Sen's slope	Z	P	Sen's slope	Z	P
合计 Total	-0.00028	-3.8349	0.000126 **	0.033779	2.143	0.03211 *
安徽	-0.00055	-1.6355	0.1019	0.057862	1.1843	0.2363
北京	-0.00142	-5.2448	0.0000001564 **	-0.17561	-2.5942	0.009481 **
福建	-0.00028	-2.425	0.01531 *	-0.04372	-1.4663	0.1426
甘肃	-0.00138	-3.3838	0.000715 **	-0.12199	-2.5942	0.009481 **
广东	-0.00154	-4.3425	0.00001409 **	-0.24833	-4.1169	0.0000384 **
广西	0.00006899767	0.84594	0.3976	0.015746	1.0715	0.2839
贵州	-0.00078	-2.0303	0.04233 *	-0.14342	-1.6919	0.09067
海南	-0.00033	-1.9739	0.0484 *	-0.04087	-1.0151	0.31
河北	-0.00118	-3.6093	0.000307 **	-0.02973	-0.45117	0.6519
河南	-0.0046	-4.7936	0.000001638 **	-0.64643	-4.3989	0.00001088 **
黑龙江	-0.00043	-3.6093	0.000307 **	-0.04545	-3.2146	0.001306 **
湖北	0.00006902605	0.50756	0.6118	0.099273	3.6093	0.000307 **
湖南	0.000178	1.2971	0.1946	0.071919	3.1582	0.001588 **
吉林	0.000174	0.39477	0.693	0.026553	0.28198	0.778
江苏	-0.00351	-3.7785	0.000158 **	-0.44534	-3.2146	0.001306 **
江西	0.00002640067	0.22558	0.8215	0.026615	0.78954	0.4298
辽宁	-0.00054	-1.0715	0.2839	0.0561	0.39477	0.693
内蒙古	-0.00018	-0.95873	0.3377	0.022059	0.73315	0.4635
宁夏	-0.01279402	-4.0766	0.0000457 **	-2.007577	-2.7988	0.005129 **
青海	-0.00276	-4.3989	0.00001088 **	-0.43099	-4.0605	0.00004897 **
山东	-0.00447	-5.414	0.00000006163 **	-0.71355	-4.5681	0.000004922 **
山西	-0.00501	-5.3012	0.000000115 **	-0.78732	-5.3012	0.000000115 **
陕西	-0.00166	-5.7524	0.0000000088 **	-0.15275	-4.3425	0.00001409 **
上海	-0.01393	-3.3838	0.000715 **	-2.73003	-2.8198	0.004805 **
四川	-0.00057	-4.0041	0.00006225 **	-0.06074	-3.3274	0.000877 **
天津	0.004196	3.1018	0.001924 **	1.515074	3.3838	0.000715 **
西藏	0.000775	2.7942	0.005202 **	0.118615	3.2449	0.001175 **
新疆	0.002808	2.1994	0.02785 *	0.943144	3.3838	0.000715 **
云南	-0.00031	-3.1018	0.001924 **	-0.01378	-1.1843	0.2363
浙江	-0.0000371518	-0.11279	0.9102	0.030691	0.95873	0.3377
重庆	0.001882	1.5227	0.1278	0.356129	2.7634	0.00572 **

* $P < 0.05$, ** $P < 0.01$; FPOI:发生指数 Forest pest outbreak index; FPOAR:灾害发生率 Forest pest occurrence area rate

西南(四川、贵州、云南)以及西北(陕西、甘肃、青海、宁夏)地区。近三分之一的省区(安徽、广西、湖北、湖南、吉林、江西、辽宁、内蒙古、浙江、重庆, $-1.96 \leq Z < 1.96$)变化趋势不明显。

以 FPOAR 指标,全国尺度呈显著上升趋势($P < 0.05$)。省区尺度森林生物灾害有 19.35% 的省区呈极显著上升趋势,具体表现为天津、湖北、湖南、西藏、新疆、重庆等地区极显著增加;呈极显著下降趋势的省区为 41.94%,分布于华北(北京、山西)、东北(黑龙江)、华东(上海、江苏、山东)、西北(陕西、甘肃、青海、宁夏)以及广东、河南、四川等地;无显著变化趋势省区占 38.71%(安徽、福建、广西、贵州、海南、河北、吉林、江西、辽宁、内蒙古、云南、浙江, $-1.96 \leq Z < 1.96$)。

2.3 森林生物灾害突变分析

为进一步诊断全国森林生物灾害序列的突变特征,采用 M-K 突变检验和滑动 T 检验法对各省区 FPOI、FPOAR 序列进行突变性检验,检验结果见表 2,给定显著性水平 $\alpha = 0.05$ 。

以 FPOI 指标,综合两检验结果共 8 个省份发生突变。在 2003、2007、2012、2017 年天津、新疆、西藏、湖北等分别发生了突变;湖南、广西、江西、重庆等地在各自临界线内存在多个交点,湖南在 1998—2014 年内有多个交点,表明 1999、2004、2009、2011、2013 年是潜在的突变点,根据滑动 T 检验显示其在 2009 年出现突变,综合两种检验其突变时间为 2009 年。同理,在 2001 年广西发生了突变;江西的突变点为 2002 年;重庆 2014 年发生突变;天津、新疆、西藏地区呈上升趋势;广西、湖北、湖南、江西、重庆等地变化趋势不显著。

以 FPOAR 指标,全国合计突变点在 2001 年呈上升趋势,此外 M-K 检验显示 13 个省份发生了突变,根据滑动 T 检验辽宁、内蒙古、浙江地区统计量未超出临界线,不存在突变点,综合两检验结果共 10 个省份发生突变。在 2007、2009、2012 年湖北、湖南、西藏分别发生了突变;2004 年为天津、重庆的突变点;2010 年为安徽、新疆的突变点;广西、江西、吉林等地在各自临界线内存在多个交点,借助滑动 T 检验,广西的突变点为 2001 年和 2002 年;江西和吉林的突变时间均为 2014 年。湖北、湖南、天津、西藏、新疆、重庆地区表现为上升趋势;安徽、广西、江西、吉林变化不明显。

FPOI、FPOAR 突变结果有所差别,就突变省份而言,FPOI 指标表明天津、新疆、西藏具突变年份有害生物呈上升趋势,而广西、湖北、湖南、江西、重庆等虽具突变年份但无显著性;FPOAR 指标显示湖北、湖南、天津、西藏、新疆、重庆地区及全国合计均发生突变灾害呈上升趋势,安徽、广西、江西、吉林等虽在不同年份具突变点但无显著性。这与 M-K 趋势检验结果一致。就突变年份而言,全国合计 FPOI 未发生突变,湖北、江西、重庆三个省份 FPOI、FPOAR 突变点差异较大。

表 2 森林有害生物 FPOI、FPOAR 突变检验统计表

Table 2 Statistics of FPOI and FPOAR mutation test of forest pests

区域 Region	FPOI 突变年度 FPOI mutation years	FPOAR 突变年度 FPOAR mutation years	区域 Region	FPOI 突变年度 FPOI mutation years	FPOAR 突变年度 FPOAR mutation years
合计 Total		2001	吉林		2014
安徽		2010	天津	2003	2004
广西	2001	2001、2002	新疆	2007	2010
湖北	2017	2007	西藏	2012	2012
湖南	2009	2009	重庆	2014	2004
江西	2002	2014			

2.4 森林生物灾害稳定性分析

基于变异系数法分析中国森林生物灾害空间格局稳定性(图 3),可以看出这 22 年间森林生物灾害整体情况较为稳定,FPOI 变异系数的变化范围为 0.095—1.55,均值为 0.45 ± 0.3 ;FPOAR 变异系数的变化范围为 0.078—1.43,均值为 0.38 ± 0.29 。变异系数低于 0.5 以下 FPOI 占 64.52%,主要分布在华北、华东、西南、西北等部分地区;FPOAR 低于 0.5 以下的区域占 83.87%,除海南、青海、浙江、重庆、上海地区外其他省区较为稳定。海南、青海地区 FPOI、FPOAR 变异系数较高,说明该地区森林有害生物灾害交替发生概率大、不稳定。

FPOI、FPOAR 变异系数存在差异,FPOAR 指标衡量海南、青海、浙江、重庆、上海等 5 省区表现不稳定,但以 FPOI 指标,增加到除以上省区的甘肃、西藏、山西、河南、江苏、吉林 11 省区,其他地区为低值区。

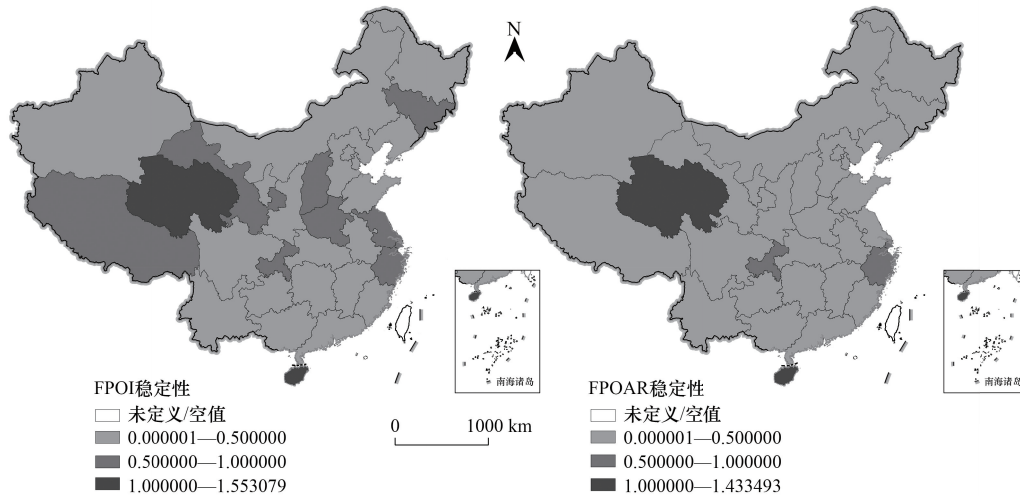


图3 各省区森林生物灾害 FPOI、FPOAR 变异系数

Fig.3 Variation coefficient of FPOI and FPOAR of forest biological disaster in provinces and regions

2.5 森林生物灾害未来变化趋势

1998—2019 年,全国合计 FPOI 的 Hurst 指数为 0.67;全国合计 FPOAR 的 Hurst 指数为 0.69,全国 FPOI 的 Hurst 指数值域 0.52—0.74,均值为 0.67 ± 0.06 ;FPOAR 的 Hurst 指数值域 0.55—0.73,均值为 0.67 ± 0.05 ,FPOI、FPOAR 的 Hurst 值大于 0.5 的省区均占比为 100%,说明全国森林生物灾害未来的变化呈正向持续。FPOI、FPOAR 的 Hurst 指数强弱持续性不同,主要表现在湖南、黑龙江、广西、湖北、浙江、山东、云南等地,FPOI 显示前三个省份为弱持续性,后四个省份表现为强持续性,FPOAR 与之相反。

为揭示我国森林有害生物变化趋势与持续性,将 1998—2019 年 Sen+Mann-Kendall 趋势分析与 Hurst 指数结果叠加,将不显著增加-强持续、不显著增加-弱持续、不显著减少-强持续、不显著减少-弱持续 4 个等级定义为不显著区域,得到变化趋势与持续性的耦合结果(图 4)。1998—2019 年间,FPOI 各省份变化趋势所占的比例从大到小依次是:显著减少-强持续(45.16%)>不显著(32.26%)>显著减少-弱持续(12.90%)>显著增加-强持续(9.68%);FPOAR 变化趋势比例:不显著(38.71%)>显著减少-强持续(35.48%)>显著增加-强持续(16.13%)>显著减少-弱持续(6.45%)>显著增加-弱持续(3.23%)。

3 讨论

森林生物灾害目前已受到学者的广泛关注^[39-40]。许多研究表明,森林生物灾害面积居高不下呈高发频发态势,局地成灾^[41-42],与以往有关森林生物灾害趋势研究结论有所不同,研究显示全国有害生物呈下降趋势省区数量明显多于上升省区数量。主要原因有:(1)森林生物灾害面积在不断增长的同时,同期森林面积也在增长,森林面积由第四次(1989—1993)全国森林清查的 133703500 公顷提高到第九次(2014—2018)的 220446200 公顷,灾害面积增加相对于森林面积呈下降态势,而天津、西藏、新疆等显著增加首先是数据本身反映的,其次可能发生新的病虫害或环境因子所导致;(2)时间序列的差异性,不同时间序列下的生物灾害发生程度不同;(3)所用方法的差异性,方法间的原理机制、计算步骤不同,对灾害趋势的估算结果各异。(4)数据源、调查方式以及所用指标的不同,会影响灾害统计分析结果,因此在以后的研究中需结合地域特征使数据标准化、规范化以减小误差。

FPOI、FPOAR 指标适用于森林生物灾害发生趋势和突变特征的分析,其结果略有差异。从森林生物灾害

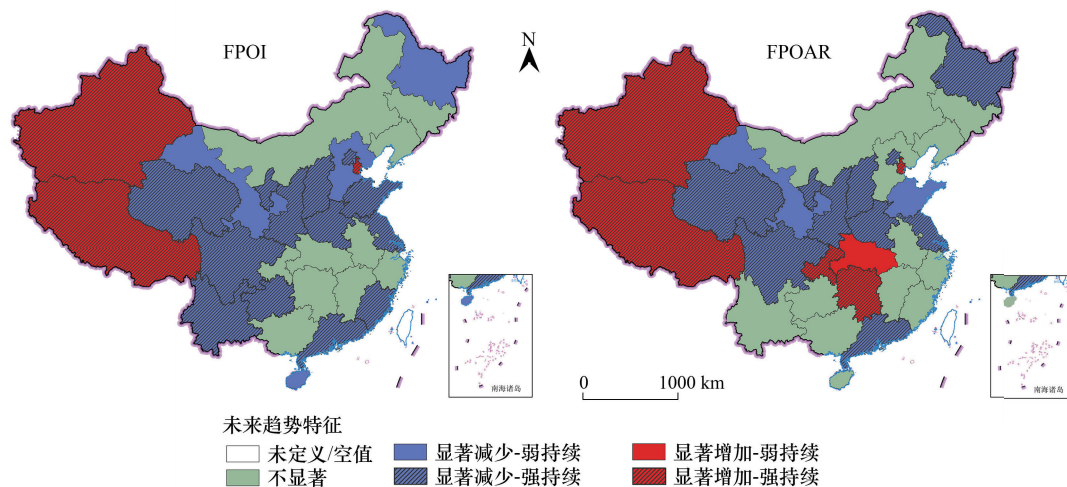


图4 各省区森林生物灾害未来持续性变化趋势

Fig.4 Future sustainable change trend of forest biological disasters in provinces regions

历史趋势角度,FPOAR 显示重庆、湖北、湖南呈显著上升趋势,而 FPOI 则不显著;FPOI 显示福建、贵州、海南、河北、云南呈下降态势,而 FPOAR 则不显著,主要源于两个指标概念的差异,FPOI 强调有害生物灾害的轻度、中度、重度发生的影响,FPOAR 则不考虑灾害程度的权重,权重赋值不同也会导致结果不同,两指标均表明我国森林生物灾害区域化特征明显。从森林生物灾害突变角度,森林生物灾害是生物和非生物因素共同作用的结果,环境因素是诱发森林灾害的原因之一^[43-44],特别是温度、降水、林分结构等因子,这可能是造成各省区森林生物灾害发生突变的原因。全国尺度上趋势突变发生在 2001 年,而在 2001 年全国只有广西发生突变,这可能是由于全国 1998—2000 年有害生物累加结果导致,根据突变结果突变年份恰好是厄尔尼诺、拉尼娜年或其次年,厄尔尼诺-南方涛动(ENSO)现象所形成的几种气象灾害都与有害生物的生存、繁殖、蔓延和流行有关^[45]。研究表明 ENSO 事件与马尾松毛虫、稻飞虱以及萎蔫病等的发生有显著关联^[46-47],因此如何定量分析这些因素对森林生物灾害的影响等也需进一步深入研究。

森林生物灾害的数据源于历史资料,由于调查者专业受限这类数据往往会受到质疑^[48]。由于部分省区数据缺失、数据异常等,导致结果会存在一定误差。另外本文仅 31 个省市数据进行分析如果以地区、县或 1000 个测报中心的数据进行将更准确,但所应用的 Sen+Manna-Kendall 检验、M-K 突变检验、变异系数、Hurst 指数等研究方法准确把握了全国森林生物灾害的动态变化被证明是切实可行的。在开发沿用以往灾害数据利用基础上,今后加强原始数据产生的规范性、准确性,采用数据点更均匀及更密集尺度等前提下,此指标及方法将可以更直观准确显示我国森林生物灾害整体趋势。以便更为深刻地认识森林有害生物的发生规律。

4 结论

通过森林有害生物 FPOI、FPOAR 分析了中国 22 年来森林生物灾害变化趋势与突变特征,探讨了灾害发生的可能影响因素,得出以下结论:FPOI、FPOAR 指标用于森林生物灾害分析切实可行,显著程度有所差别,从灾害变化显示度,强调灾害权重因子 FPOI 优于 FPOAR;1998—2019 年森林生物灾害华北、东北、华东、西北等大部分省区表现为下降态势,而新疆、西藏、天津等地森林生物灾害呈上升趋势;突变检验中局部区域突变时间节点具有一致性,而大部分省区并未展现突变;华北、华东、西南、西北等地区生物灾害形势较稳定,海南、青海地区稳定性差;Hurst 指数显示未来森林有害生物灾害变化以正向持续为主,与历史趋势保持一致。

参考文献(References):

- [1] 樊宝敏, 董源. 中国历代森林覆盖率的探讨. 北京林业大学学报, 2001, 23(4): 60-65.
- [2] 韩郸, 李秉略. “维护木材安全”背景下扩大我国速生丰产人工林种植面积必要性分析. 林产工业, 2021, 58(7): 113-115.
- [3] 张星耀, 骆有庆, 叶建仁, 孙江华, 梁军. 国家林业新时期的森林生物灾害研究. 中国森林病虫, 2004, 23(6): 8-12.
- [4] 梁倩玲, 刘萍, 陈梦, 刘忠军, 盛兆湖, 苏延乐. 林业有害生物灾害损失评估研究进展. 林业资源管理, 2015(2): 139-144.
- [5] 张星耀, 吕全, 梁军, 田呈明, 赵莉茜, 刘振宇. 中国森林保护亟待解决的若干科学问题. 中国森林病虫, 2012, 31(5): 1-6, 12.
- [6] 骆有庆, 刘宇杰, 黄华国, 俞琳锋, 任利利. 应用遥感技术评价森林健康的路径和方法. 北京林业大学学报, 2021, 43(9): 1-13.
- [7] 周玉江, 张旭东, 柴守权, 景天忠, 杨静莉. 林业有害生物预警等级指标. 东北林业大学学报, 2012, 40(2): 103-105.
- [8] 刘萍, 梁倩玲, 陈梦, 刘忠军, 盛兆湖, 苏延乐. 林业有害生物灾害损失评估指标体系构建. 林业科学, 2016, 52(6): 101-107.
- [9] 武红敢, 曾庆伟. 林业生物灾害的监测调查技术研究进展. 灾害学, 2008, 23(4): 106-109.
- [10] 董振辉, 张旭东. 全国大区域林业生物灾害预警系统研究. 中国森林病虫, 2012, 31(4): 11-14.
- [11] 李静. 林业典型病虫害的分析与预测——以四川省阿坝州理县、茂县为例[D]. 成都: 电子科技大学, 2017.
- [12] 张颖, 丁昱菲. 我国森林灾害的空间分布分析. 北京林业大学学报, 2019, 41(3): 68-79.
- [13] Huang J, Li J. Spring phenology of cotton bollworm affects wheat yield. Ecology and Evolution, 2017, 7(4): 1078-1090.
- [14] 孟清. 秦岭山地降水的时空变化及栅格数据集的获取[D]. 西安: 西北大学, 2021.
- [15] 姚天. 近 60 年淮河流域极端气候事件变化特征分析[D]. 济南: 济南大学, 2021.
- [16] Forkner R E, Marquis R J, Lill J T, Corff J L. Timing is everything? Phenological synchrony and population variability in leaf-chewing herbivores of *Quercus*. Ecological Entomology, 2008, 33(2): 276-285.
- [17] Bao Y B, Wang F, Tong S Q, Na L, Han A R, Zhang J Q, Bao Y H, Han Y C, Zhang Q M. Effect of drought on outbreaks of major forest pests, pine caterpillars (*Dendrolimus* spp.), in Shandong Province, China. Forests, 2019, 10(3): 264.
- [18] 赵惠燕. 昆虫研究方法. 北京: 科学出版社, 2010: 77-84.
- [19] 赵铁良, 董振辉, 于治军, 赵清山, 蒋凤燕. 中国森林病虫指数的研究. 林业科学, 2003, 39(3): 172-176.
- [20] 汤金仪, 姜玉英, 王建强, 朱叶芹, 蒋学辉, 廖华明, 许红, 金晓华, 沈丽, 郭玉人, 谈孝凤, 王华生. 病虫害发生表征新方法——为害指数的定义与应用. 植保技术与推广, 2003, 23(11): 3-7.
- [21] 景天忠, 张海侠, 董瀛谦, 王志英. 林业生物灾害预警的内涵. 灾害学, 2012, 27(3): 102-106.
- [22] 景天忠, 王志英, 齐凤慧. 一种预测林业有害生物发生程度的方法: 中国, CN103155836A. 2011-12-16.
- [23] 胡瑞瑞. 森林病虫基指数模型的建立及验证[D]. 北京: 中国林业科学研究院, 2019.
- [24] 邱立新, 卢修亮, 范世奇, 程通通, 刘阳, 常国彬. 我国林业有害生物成灾率指标分析与建议. 林业资源管理, 2021(4): 49-53.
- [25] 国家林业和草原局. 中国林业统计年鉴-2017, 2017. 北京: 中国林业出版社, 2018.
- [26] 国家林业和草原局. 中国林业和草原统计年鉴-2018, 2018. 北京: 中国林业出版社, 2019.
- [27] 国家林业和草原局. 中国林业和草原统计年鉴-2019. 北京: 中国林业出版社, 2020.
- [28] 中华人民共和国国家林业局. 林业有害生物发生及成灾标准: LY/T 1681—2006. 北京: 中国标准出版社, 1-6.
- [29] Zhao C C, Pan J H, Zhang L L. Spatio-temporal patterns of global population exposure risk of PM_{2.5} from 2000-2016. Sustainability, 2021, 13(13): 7427.
- [30] Tali P A, Bhat M M, Lone F A. Seasonal spatio-temporal variability in temperature over north Kashmir Himalayas using Sen slope and Mann-Kendall test. Journal of Climatology & Weather Forecasting, 2021, 9(5): 1-12.
- [31] Sun J Q, Wang X J, Yin Y X, Shahid S. Analysis of historical drought and flood characteristics of Hengshui during the period 1649-2018; a typical city in North China. Natural Hazards, 2021, 108(2): 2081-2099.
- [32] Bao Z X, Zhang J Y, Wang G Q, Chen Q W, Guan T S, Yan X L, Liu C S, Liu J, Wang J. The impact of climate variability and land use/cover change on the water balance in the Middle Yellow River Basin, China. Journal of Hydrology, 2019, 577: 123942.
- [33] 刘恒, 汤弟伟, 孙毅, 宋鄂平, 常胜, 刘小芳. 武陵山区植被生长季 NDVI 时空变化及其对气候变化的响应. 水土保持研究, 2021, 28(5): 245-253.
- [34] 刘凤, 曾永年. 2000—2015 年青海高原植被碳源/汇时空格局及变化. 生态学报, 2021, 41(14): 5792-5803.
- [35] 吴玥葶, 郭利丹, 曾天山, 李琼芳, 井沛然. 渭河径流多时间尺度变化特征研究. 中国农村水利水电, 2021(10): 42-49.
- [36] Kang Yao, Guo EnLiang, Wang YongFang, Bao YuLong, Bao YuHai, Na RenMandula. Application of temperature vegetation dryness index for

- drought monitoring in Mongolian Plateau.. The journal of applied ecology, 2021, 32(7): 2534-2544
- [37] Tran T V, Tran D X, Nguyen H, Latorre-Carmona P, Myint S W. Characterising spatiotemporal vegetation variations using LANDSAT time-series and Hurst exponent index in the Mekong River Delta. Land Degradation & Development, 2021, 32(13): 3507-3523.
- [38] 徐浩杰, 杨太保. 柴达木盆地植被生长时空变化特征及其对气候要素的响应. 自然资源学报, 2014, 29(3): 398-409.
- [39] 梁军, 张星耀. 森林有害生物生态控制. 林业科学, 2005, 41(4): 168-176.
- [40] 阎合. 中国东北地区杨树腐烂病时空流行特点与风险分析[D]. 北京: 北京林业大学, 2020.
- [41] 郭亚楠. 山东省聊城市林业有害生物及天敌多样性调查[D]. 泰安: 山东农业大学, 2019.
- [42] 孙红, 周艳涛, 李晓冬, 张玉洲, 王越. 2020 年全国主要林业有害生物发生情况及 2021 年发生趋势预测. 中国森林病虫, 2021, 40(2): 45-48.
- [43] Büntgen U, Liebhold A, Nievergelt D, Wermelinger B, Roques A, Reinig F, Krusic P J, Piermattei A, Egli S, Cherubini P, Esper J. Return of the moth: rethinking the effect of climate on insect outbreaks. Oecologia, 2020, 192(2): 543-552.
- [44] 罗娜. 土沉香人工林林分结构与林下植被多样性对病虫害的影响[D]. 长沙: 中南林业科技大学, 2016.
- [45] 张知彬, 王祖望. ENSO 现象与生物灾害. 中国科学院院刊, 1998, 13(1): 34-38.
- [46] 李袭杰. 2015—2016 年强厄尔尼诺背景下稻飞虱的迁飞动态研究[D]. 南京: 南京农业大学, 2017.
- [47] Olatinwo R O, Paz J O, Kemerait R C Jr, Culbreath A K, Hoogenboom G. El Niño-Southern Oscillation (ENSO): impact on tomato spotted wilt intensity in peanut and the implication on yield. Crop Protection, 2010, 29(5): 448-453.
- [48] 景天忠, 李田宇. 森林害虫发生的空间模式研究进展. 生态学报, 2018, 38(10): 3414-3421.