

1949-2015年中国典型自然灾害及粮食灾损特征

赵映慧¹, 郭晶鹏^{1,2}, 毛克彪², 项亚楠¹, 李怡函³, 韩家琪², 吴 媛⁴

(1. 东北农业大学资源环境学院, 哈尔滨 150030; 2. 中国农业科学院农业资源与农业区划研究所, 北京 100081; 3. 中国地质大学土地科学技术学院, 北京 100081; 4. 湖南科技大学资源环境与安全工程学院, 湘潭 411201)

摘要: 中国是一个自然灾害频发的国家, 研究其自然灾害演变特征及粮食灾损规律, 对实现中国社会经济可持续发展、解决中国粮食安全问题具有重要意义。本文先基于Python语言编程获取1949-2015年中国31省市自然灾害造成的受灾、成灾、绝收面积, 构建灾害强度指数分析不同灾种的时序特征分异, 利用趋势分析、ESDA方法分析不同灾种在省域空间的分布特征及冷热点; 再获取1949-2015年粮食种植数据, 通过粮食灾损估算模型、定义粮食灾损率、地理空间探测器, 计算并检验中国粮食损失时空特征及分异性。结果表明: ①相比受灾面积曲线, 本文构建的灾害程度指数能够更好揭示自然灾害时序演变特征; ②1949-2015年期间中国两大主力灾害(洪灾、旱灾)交替出现, 未来5~10年以洪灾为主; ③灾种排序旱灾 > 洪灾 > 风雹 > 低温 > 台风, 其中旱灾、洪灾受灾占比过半; ④省域不同灾种间空间趋势变化特征明显, 区域受灾面积东部 > 西部, 北部 > 南部, 且北部灾种单一、南部多灾并发; ⑤自然灾害受灾总和、旱灾、雹灾、低温空间上全局自相关性不显著, 呈随机模式分布, 洪涝、台风在空间分布上具有显著的全局自相关性, 呈集聚模式; ⑥1949-2015年灾害、灾损量、灾损率整体时序趋势呈现先升后降, 2000年为临界点, 空间分布具有异质性, 单因子解释力度差异显著, 多因子交互均呈非线性增强关系, 胡焕庸线两侧冷热点分布呈两极化且其重心向北迁移。建议政府加强除旱减雹(西北)、除旱排内涝(东北)、排涝防冻(中部)、排涝预台(东南沿海)等工程技术措施; 同时西北(环境恶劣)、东北(中国粮仓)应作为防灾减灾重点保护区, 制定专项保护方案, 以保证中国粮食丰产增收。

关键词: 自然灾害; 灾害强度指数; ESDA; 粮食灾损; q统计量; 中国

DOI: 10.11821/dlxb201707011

1 引言

自然灾害是当今学术界乃世界人民普遍面临的难题之一, 其影响严重制约经济、社会的可持续发展, 甚至威胁人类生存。20世纪80年代以来, 国际社会高度关注自然灾害问题。1981年成立的国际风险协会主要从事灾害风险分析与评估、管理与对策研究; 1987年, 联合国确立“国际减轻自然灾害十年”(IDNDR), 旨在最大限度降低灾害损失、唤起国际重视、推动各国和各地区做好防灾减灾措施; 2009年确立每年“10月13日”为

收稿日期: 2016-12-06; 修订日期: 2017-03-15

基金项目: 国家自然科学基金项目(41571427); 中国农业科学院创新群体项目(Y2017JC33) [Foundation: National Natural Science Foundation of China, No.41571427; Innovative Group Guide Project, No.Y2017JC33]

作者简介: 赵映慧(1976-), 男, 四川广元人, 博士, 副教授, 硕士生导师, 主要研究方向为城市、农村区域环境变化研究。E-mail: zhaoyhneau@163.com

通讯作者: 毛克彪(1977-), 男, 博士, 研究员, 主要从事农业大数据、气候变化、农业灾情遥感监测等方面的研究。E-mail: maokebiao@caas.cn

“国际减灾日”。中国幅员辽阔、地理环境复杂、气候波动大、生态稳定性差、灾害类型多、频次高、强度大，是世界上受自然灾害影响最为严重的国家之一^[1]。2016年1-8月份，中国各类自然灾害直接造成1.37亿人受灾，1074人死亡，270人失踪，624万人次紧急转移安置，直接经济损失2983亿元。因此，探索中国境内灾情空间分布态势，揭示典型灾种、灾损的时空演变规律，为国家制订防灾减灾、备灾、救灾等规划提供理论依据，具有较强的现实意义。

“灾害无情，人有情”诠释了自然灾害摧残人类的恐怖无情、以及人类团结互助共同抵御自然灾害的坚强决心。为此学术界对自然灾害展开大量研究^[2-5]。史培军等学者对自然灾害的理论与实践进行了讨论与探索，为后来系统研究自然灾害奠定了理论基础^[6-7]；其次，学者们对灾种的危险性程度进行评估^[8-10]、不同历史阶段自然灾害的空间特征与格局进行分析^[11-14]、孕灾环境与致灾因子分析^[15-16]、不同灾种区域组合规律研究^[17]、减灾救灾标准演变与评价^[18]等方面都进行了不同程度的探索与深入。灾害理论方面研究集中体现致灾因子论、孕灾环境论、承灾体论、成灾机制、灾害学科体系的构建等方面的探索；灾害危险性程度评价由单一灾种评价^[12]（如：洪涝、干旱、泥石流）向混合灾种评价（如：区域综合灾害评价、气象灾害评价）过渡；自然灾害时空特征研究主要从公元前180-1949年、1990-2001年、2000-2011年等不同历史时期角度展开研究^[19]；关于自然灾害的区域组合规律研究，李炳元等^[17]基于地学区划、灾害自身区划等原则，将中国划分3个一级区、12个二级区并进行宏观组合分析；减灾救灾标准演变与评价研究主要从减灾救灾标准现状与存在问题、区域差异、国内外完备性对比分析评价等方面进行研究^[18]；自然灾害对粮食安全的影响多集中在洪灾^[20-21]、旱灾^[21-22]，多灾种交互影响研究较少，且多偏于定性研究。从当前研究来看，首先对不同历史时期的灾害研究集中在建国前及最近二十年研究；其次数据多采用经济、人口统计指标，鲜有基于不同程度受灾面积、粮食单产、种植面积、粮食总产等数据研究1949-2015年中国典型自然灾害组合规律及其对粮食生产的影响；最后，灾害、灾损时空特征研究多集中在空间局域异质性，对空间分层异质性研究欠缺。

本文基于计算机数据挖掘、GIS平台，利用Python语言编程获取自然灾害、粮食种植相关统计数据，为了规避单从某种面积分析导致结论的片面性，构建灾害强度指数（多种面积加权百分比）研究灾害时序变化特征，运用空间探索数据分析方法^[23]研究不同灾种在各省域的空间分布特征及区域组合规律，透视不同灾害的时空分布差异；最后运用粮食灾损估算模型^[22]、定义灾损率、地理空间探测器^[24]等方法估算并检验粮食灾损变化时空规律及分异性，为中国建立有效的防灾减灾体系、农业粮食生产布局提供参考。

2 数据来源与方法

2.1 数据来源

由于缺少历年港澳台自然灾害的统计数据，中国大陆31个省（直辖市、自治区）作为研究区，其底图数据采用国家基础地理信息中心（<http://ngcc.sbsm.gov.cn>）提供的中国1:400万的矢量图。本研究主要分析大陆省域洪涝、旱灾、风雹、低温、台风5种常见的自然灾害的时空分异特征及对粮食灾损的影响；基础数据主要包括1949-2015年上述前4种常见灾害造成的受灾、成灾、绝收面积，2001-2015年台风造成的受灾、成灾、绝收面积，1949-2015年省市尺度上粮食种植面积、农作物种植面积、粮食单产、粮食总产等数据（缺失1967年、1968年和1969年3年数据）。灾害数据来源于国家农业部种植司官网的自然灾害数据库数据、《中国统计年鉴》、中国社会经济发展数据库；粮食相关数据来

源于农业部农作物数据库。随着科技的进步，灾害监测能力逐渐增强，为了保证数据之间的可比性，本文假设研究期内同一统计口径的数据资料统计力度一致；为了保证分析结果的可靠性，通过检验不同统计数据之间匹配性，平均匹配性高达96.34%。

2.2 研究方法

(1) 灾害强度指数 (Q)

本文构建的灾害强度指数是指一种反应灾害强度大小的多面积加权百分数；农作物成灾面积即因灾害造成作物减产三成以上的播种面积，农作物绝收面积即因灾害造成作物减产七成以上的播种面积，分别赋权重0.3、0.7于成灾面积、绝收面积，故构建的灾害强度指数Q，公式如下：

$$Q = \frac{C \times 0.3 + J \times 0.7}{S} \times 100\% \quad (1)$$

式中：C为成灾面积（ 10^4 mu）；J为绝收面积（ 10^4 mu）；S为受灾面积（ 10^4 mu）， $1 \text{ mu} = 666.67 \text{ m}^2$ ；Q为灾害强度指数。

(2) 趋势分析

趋势分析是一种GIS平台上数据的三维透视图的方法，其揭示了不同灾种受灾面积空间总体的变化趋势，适用于大尺度研究。本文将省域的位置绘制在x、y平面上，z维中的杆的高度代表省域受灾面积，其次将z值作为散点图投影到x、z平面和y、z平面上，最后本文根据投影平面上的散点图，采用二阶多项式拟合。

(3) 空间特征

为了研究自然灾害、粮食灾损的空间特征，本文采用基于GIS平台的空间自相关^[23, 25]、Getis-Ord G_i^* ^[25]来判别不同类型灾害、灾损的空间分布模式及热点探索；同时采用自然间断法^[26]对灾害数据进行非监督离散化，并采用地理空间探测器q统计量^[24, 26]对灾损的分层异质性进行检验，主要公式如下：

$$G_i^*(d) = \frac{\sum_{j=1}^n w_{ij}(d)x_j}{\sum_{j=1}^n x_j} \quad (2)$$

$$Z(G_i^*) = (G_i^* - EG_i^*) / \sqrt{\text{Var } G_i^*} \quad (3)$$

$$P_{D,G} = 1 - \frac{1}{n\sigma^2} \sum_{i=1}^m n_i \sigma_i^2 \quad (4)$$

式中： $w_{ij}(d)$ 为i与j间的空间权重矩阵； $Z(G_i^*)$ 是对 $G_i^*(d)$ 进行标准化处理的值， $E(G_i^*)$ 与分别为 G_i^* 的数学期望与变异系数； $P_{D,G}$ 表示影响因子D对现象因子G的解释力值；n为一级区域内省份的个数； σ^2 为一级区域内粮食灾损的离散方差；m为次级区域的个数； n_i 为次级区域内省份的个数； σ_i^2 为次级区域内粮食灾损的离散方差。由于篇幅所限，详细解释参考文献[23-26]。

(4) 粮食灾损的估算模型

过去的相关研究中，国内学者提出了多个粮食灾损估算模型，但常用灾损估算模型是比重法，本文选用比重法估算粮食灾损量^[25]，公式如下：

$$S_c = \sum_{i=1}^n S_{ci} = \sum_{i=1}^n (R_i \times A_{i1} \times y_i \times P_1 + R_i \times A_{i2} \times y_i \times P_2 + R_i \times A_{i3} \times y_i \times P_3) \quad (5)$$

式中： S_c 为灾损量；n为省市数量； S_{ci} 为第i个省市的粮食灾损量； R_i 为第i个省份粮食种植面积占农作物种植面积的比例； A_{i1} 、 A_{i2} 、 A_{i3} 分别为轻灾、中灾和重灾的农作物面积； y_i 为该省市当年的粮食单产水平； P_1 、 P_2 和 P_3 分别为受灾、成灾和绝收粮食产量减产程度，详细解释参考文献[25]。灾损量 S_c 与当年粮食总产量的比值则定义为当年灾损率。

3 结果与分析

3.1 自然灾害时序变化特征

3.1.1 合计灾害时序变化特征 为揭示中国省市1949-2015年自然灾害时序特征,本文计算中国31省市的3种不同受灾强度的合计灾害平均线(图1)。根据自然灾害受灾、成灾的趋势线走势,本文将1949-2015年自然灾害时序特征大概分为3个阶段:1949-1970年为波动阶段,1970-2000年为波动上升阶段,2000-2015年为波动下降阶段;受灾面积、成灾面积趋势线除最高峰值不同步外,其整体趋势具有趋同性,整个合计受灾面积趋势线最高波峰位于1959-1961的三年自然灾害时期,而合计成灾面积最高波峰则位于1999-2002年之间;1970-2000年绝收面积趋势线整体呈现波动式上升,2000年达到峰值,2001-2015年趋势线开始波动下降。

为了更好地刻画1949-2015年中国受灾严重程度的变化,本文引入灾害强度指数Q,作出不同省域受灾强度Heatmap图、平均灾害强度指数图(图2)。结果显示:①1949-1969年期间中国灾害强度指数呈波动下降趋势,1956年、1960年、1962年呈波动上浮态势(处于三年自然灾害时期前后),1951年、1953年、1958年显露波动下沉状态;②1970-

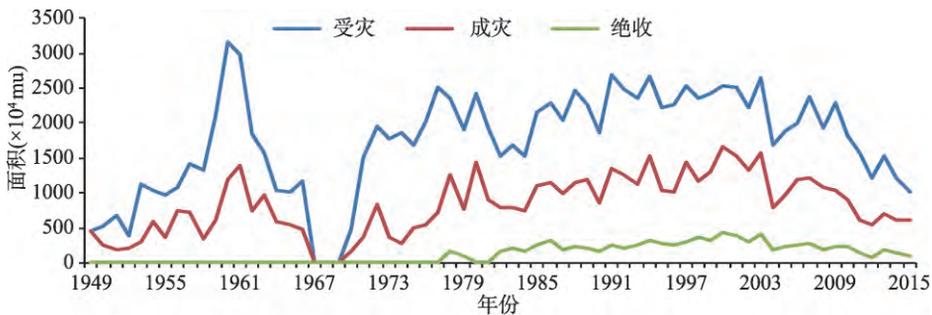


图1 1949-2015年中国灾害合计面积变化曲线

Fig. 1 Variation curve of the overall disasters in China in 1949-2015

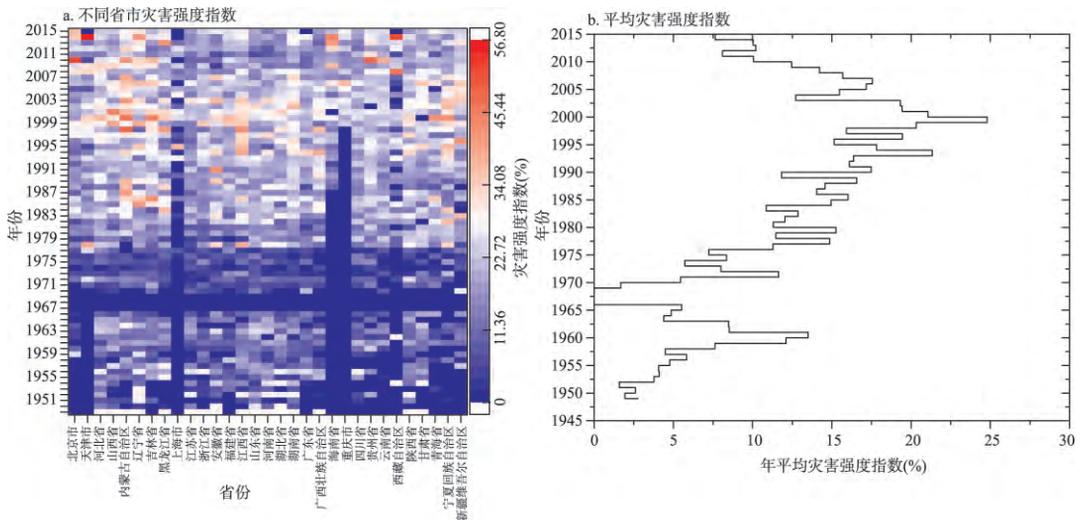


图2 1949-2015年中国不同省份灾害程度指数

Fig. 2 Intensity index of the overall disasters in China in 1949-2015

2000年期间中国灾害程度指数呈波动上升阶段, 2000年左右达到峰值, 1972年、1978年、1984年、1986年呈波动上浮趋势, 历史上这些年份都发生了一定程度的旱灾、洪涝、台风等特大灾害; ③ 2001-2010年中国灾害程度指数呈明显高频波动下降趋势, 2003年、2006年、2008年呈上扬状态; ④ 2010-2015年中国受灾面积呈相对减少趋势(图1), 但受灾强度指数Q呈上升趋势, 灾害强度指数能够更好地揭示自然灾害真实的演变特征。

3.1.2 不同灾种的时序变化特征研究 为了明晰1949-2015年不同灾种的时序变化特征, 分别做不同灾种的平均受灾面积、灾害强度指数图, 通过比较分析不同曲线的异常点、走势、拐点, 研究了不同灾种的时序变异特性。

(1) 洪涝灾害时序特征分析 洪涝受灾面积与灾害程度时间序列上呈现一定程度的异步性, 且灾害强度更加明显地刻画了洪涝的演变特征。通过分析平均受灾面积曲线, 1949-1968年洪涝受灾处于高频波动阶段, 1969-1991年洪涝受灾呈现波动上升态势, 1992-2015年平均受灾面积表现出高频波动下降趋势, 其中1991年平均受灾面积达到峰值。1949-2015年灾害强度指数曲线表明, 1949-1968年洪涝灾害程度指数波动下降, 1969-2002年灾害程度指数呈波动上升走势, 洪灾受灾强度不断增强, 2002年达到灾害强度峰值, 2003-2009年灾害程度指数波动下降, 2010-2015年平均受灾面积逐渐较少, 但是灾害严重程度指数呈波动上升趋势(图3)。

(2) 旱灾时序特征分析 旱灾受灾面积与灾害程度指数长时序性具有较强的同步性。旱灾受灾面积与灾害程度指数在1949-1961年、1969-2000年呈波动上升趋势, 1962-1968年、2001-2015年呈波动下降趋势; 1959-1961年三年旱灾形成一个小波峰, 2000年全国旱灾受灾面积与旱灾程度指数达到最大值(图4)。

(3) 风雹灾害时序特征分析 1949-2015年全国平均受灾面积呈高频小幅波动趋势, 风雹灾害程度指数显现出高频波动上升趋势, 2014年风雹灾害程度指数达到最大值。1967-2002年灾害程度指数增加速度逐渐放缓, 波动频率加大, 呈对数函数曲线形式; 2000-2015年灾害程度指数呈线性递增趋势(图5)。

(4) 低温(冷冻)灾害时序特征分析 1949-2015年全国低温受灾面积和低温灾害程度指数

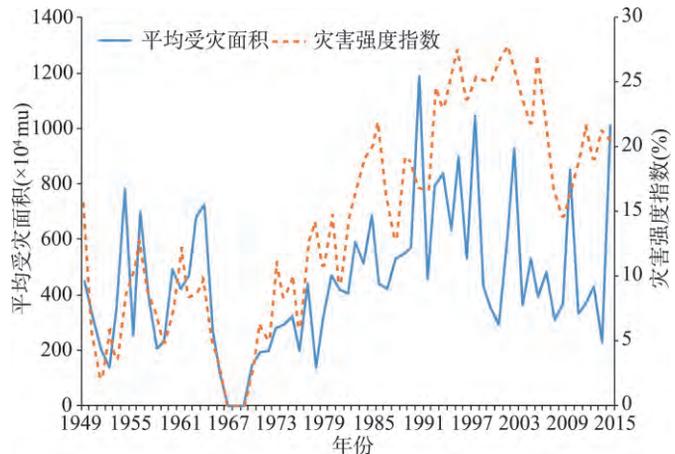


图3 1949-2015年中国洪涝灾害趋势

Fig. 3 Trend of flood disaster in China in 1949-2015

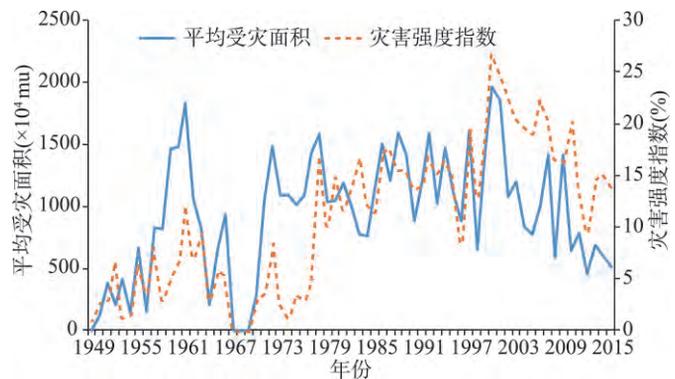


图4 1949-2015年中国旱灾趋势

Fig. 4 Trend of drought disaster in China in 1949-2015

呈微弱的上升趋势,但4个年份(1953年、1977年、1998年、2008年)低温受灾明显,2008年全国低温受灾面积达到峰值。受灾异常年份1953年、1977年、1998年、2008年期间分别相差24年、21年、10年,表明异常低温受灾周期逐渐缩短,异常低温灾害频发的态势初露端倪(图6)。

(5) 台风灾害时序特征分析

2001-2015年台风灾害受灾面积和灾害程度指数呈波动趋势,具有同步性。2005年、2012年中国台风受灾严重,期间相距8年;2001-2004年全国台风受灾微弱,波动较小,2010年全国台风受灾面积、受灾程度指数都达到最小值,2010-2015年全国台风灾害程度指数逐渐递增(图7)。

3.2 自然灾害空间局异性特征

3.2.1 灾害省域空间分布特征

(1) 省域空间灾害面积特征 为刻画1949-2015年不同灾种累积受灾面积在省市空间的数量分布状况,计算并统计不同省市不同灾种的累积受灾面积,同时绘制不同灾种受灾面积总和的堆叠图和饼状图(图8),通过可视化更直观的反映省域空间不同灾种受灾面积总和的数量空间分布特征。结果显示:①全国省域累积受灾面积分布呈“北重南轻、中东部重西部轻”格局,灾种分布由北一南、西一东逐渐复杂,南涝北旱,且东南部呈现“多灾并发”特征;②河北、山东、河南、黑龙江4个省份堆叠图最高,表明其累积受灾面积数量最大,且都以旱灾受灾为主,洪涝、风雹受灾次之,相比之下,低温、台风受灾面积略微不足道;③北京、天津、重庆、西藏、青海、宁夏、上海7个省市堆叠图较低,说明其受灾面积总和数量较少,但其灾种区域分布特征明显,北京、天津受灾面积主要由旱灾、洪涝、风雹共同造成,重庆、西藏、青海、宁夏主要受旱灾、洪涝、低温、风雹影响,上海主要洪涝为主,其他灾种差异不明显。

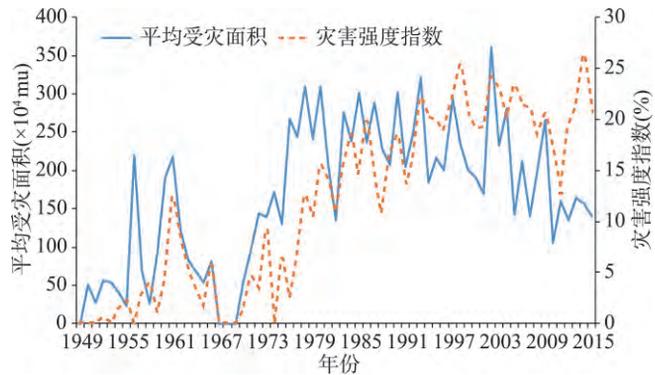


图5 1949-2015年中国风雹灾害趋势

Fig. 5 Trend of hail disaster in China in 1949-2015

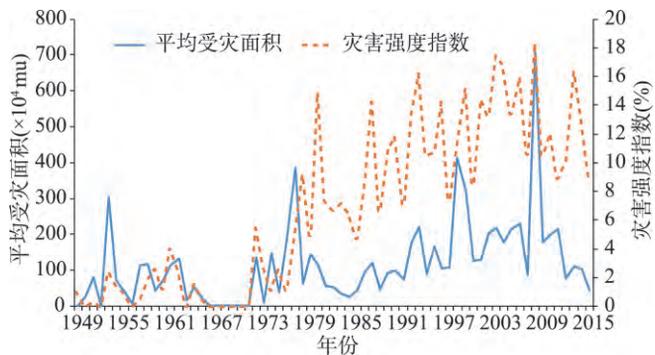


图6 1949-2015年中国低温灾害趋势

Fig. 6 Trend of low temperature disaster in China in 1949-2015

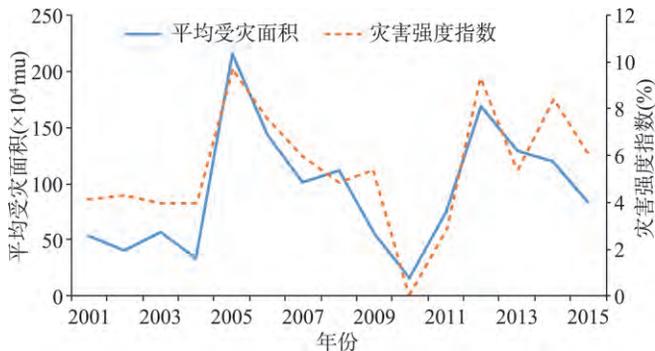


图7 2001-2015年中国台风灾害趋势

Fig. 7 Trend of typhoon disaster in China in 2001-2015

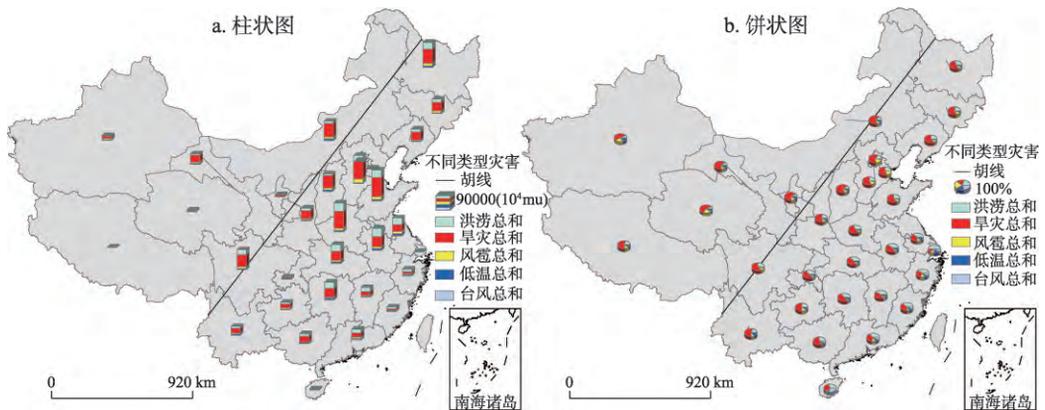


图8 1949-2015年中国自然灾害省域受灾面积

Fig. 8 The affected area of natural disasters in China by province from 1949 to 2015

(2) 不同灾种省域空间趋势变化 采用趋势分析法，以正东和正北方向为X和Y轴，以不同灾种省域空间累积受灾面积为Z轴，制作三维透视图，更好揭示中国不同灾种累积受灾面积在空间上的变化趋势特征（图9）。结果表明：① 自然灾害累积受灾面积总和空间分布趋势上，东西方向由西—东呈幂函数递增趋势，南北方向上呈“南—北线性递增”趋势；② 洪涝灾害空间分布趋势上，东西方向上由东—西呈抛物线曲线递减，西部洪涝受灾不显著，南北方向上呈“中部>南部>北部”，递减趋势平缓；③ 旱灾累积受灾面积空间分布趋势上，东西方向上“东部=中部>西部”，递减趋势微弱，南北方向上“中部>北部>南部”，南部鲜受旱灾影响，递减趋势明显；④ 风雹灾害累积受灾面积空间分布上，东西方向上由西—东呈指数函数曲线递增，中部—东部递增明显，南北方向上“北部>中部>南部”，呈线性递减趋势，递减趋势显著；⑤ 低温灾害累积受灾面积空间分布上，东西方向上“中部低东西高”，但差异不显著，南北方向上“中部>北部>南部”，南北差异显著，中部—南部递减趋势显著；⑥ 台风灾害累积受灾面积空间分布上，东西方向上由东—西呈递减趋势，整体受灾影响较小，递减趋势微弱，南北方向上由北—南呈指数函数曲线递增，递增显著，南北差异明显。

(3) 自然灾害全局空间相关性分析 空间自相关系受地理单元粒度大小与分区方法

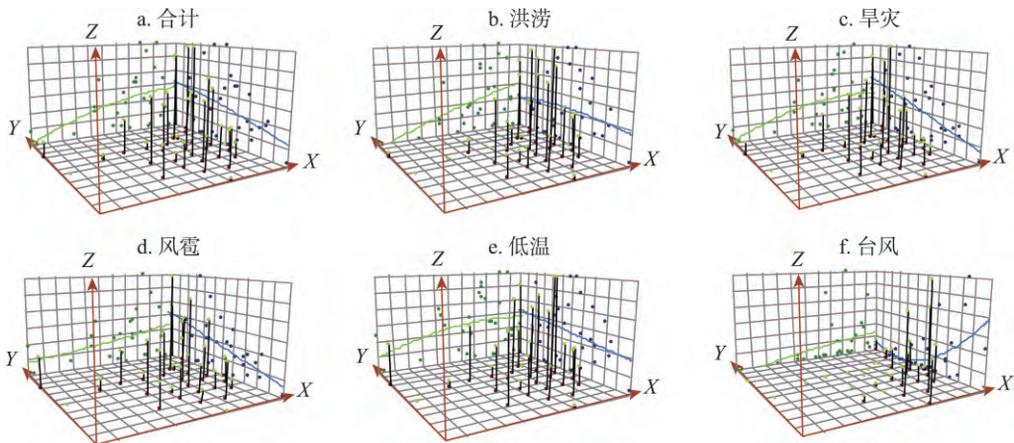


图9 中国自然灾害受灾面积全局趋势分析

Fig. 9 Overall trends of natural disasters affected area in China

有关，根据陈江平等^[23, 25]认为MAUP效应对空间自相关的影响与权重矩阵的选择有关，县尺度上的自相关系数可能更可靠，但整体趋势一样，差异不大；由于目前本文能够获得省域尺度上最全的统计数据，虽然结果上有些偏差，但仍可以反映不同灾害空间集聚特征，故本文选用省域尺度上的统计数据进行空间集聚特征研究。

为了更全面反映中国省域不同灾种空间分布差异与格局分布特征，本文引用G统计量分析了不同灾种省域空间分布的集聚性特征。自然灾害受灾面积总和的全局G统计量值为0.075268 ($P < 0.1$)，表明中国自然灾害发生在省域空间具有90%显著水平的空间集聚特征，呈空间正相关；洪涝、台风灾害的G统计量值分别为0.089017 ($P < 0.01$)、0.109471 ($P < 0.05$)，反映出洪涝、台风在省域空间分布上分别有99%、95%显著水平的空间集聚特性；旱灾、风雹、低温灾害的G统计量值分别为0.072803 ($P > 0.1$)、0.067230 ($P > 0.1$)、0.068274 ($P > 0.1$)，表明旱灾、风雹、低温空间分布呈现随机分布特征，集聚特性不显著（图10）。

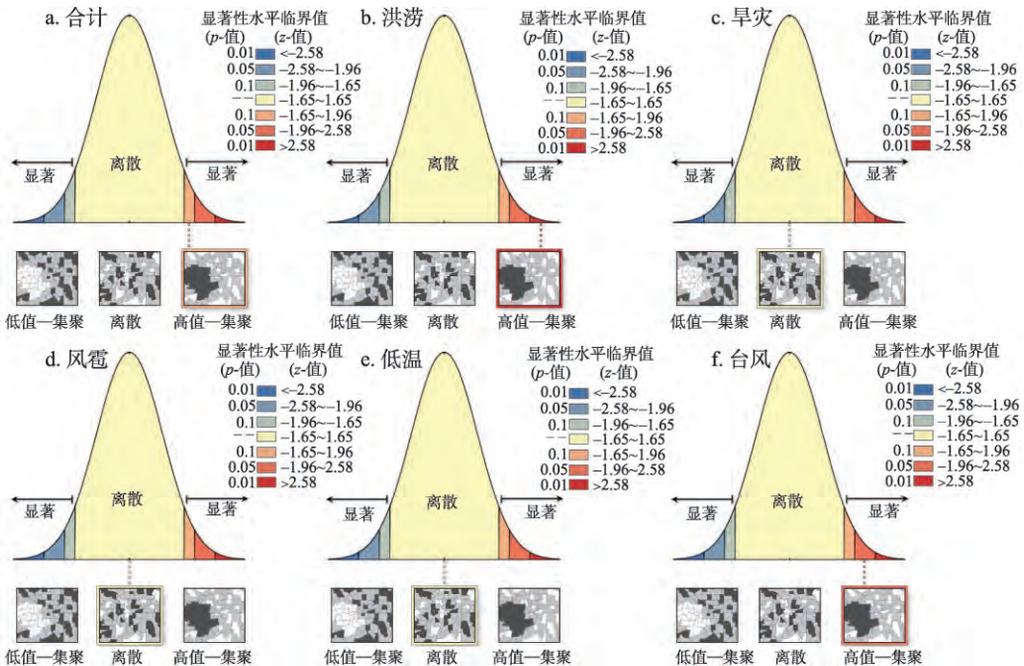


图10 中国自然灾害的空间相关性分析

Fig. 10 Global autocorrelation index of natural disaster in China

(4) 灾害空间分布热点分析 利用空间优化热点分析工具将中国不同灾种的省域空间受灾区的聚类格局划分为冷点区、次冷区、次热区、热点区（图11）与胡焕庸线叠加分析。中国自然灾害空间冷热区分布具有一定地带性特征，除旱灾、雹灾外其他灾种的冷区、次冷区主要集中分布在胡焕庸线西侧，热区、次热区聚集在胡焕庸线东侧，其中大陆31个省及直辖市中多种灾害受灾面积总和、洪涝、旱灾、风雹、低温、台风的冷点、次冷点、次热点、热点区的数量比分别为：7:10:4:10、8:10:7:6、6:7:10:8、4:8:13:6、6:9:7:9、8:9:6:8。自然灾害受灾面积总和的热点区主要分布在华北、华东的大部分地区及黑龙江省，次热点分布在陕西、重庆、江西、吉林省份，次冷点主要分布在内蒙古、辽宁、宁夏、及西南、华东部分地区，冷点区主要分布在华南、西北大部分地区及西藏自治区；洪涝灾害的热点区主要分布在长江中下游地区，次热点主要分布在

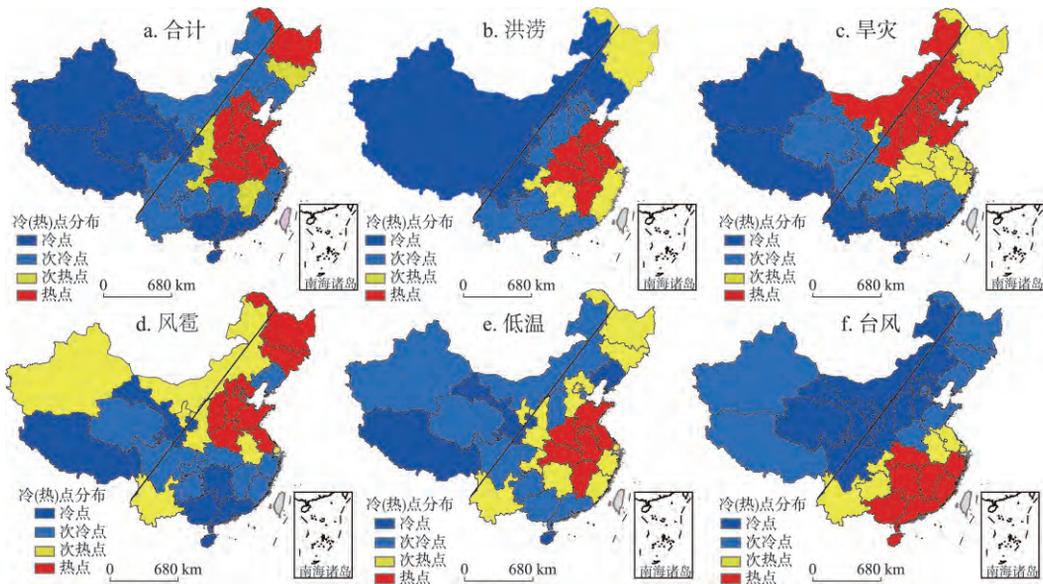


图 11 1949-2015年中国自然灾害空间分布

Fig. 11 Spatial pattern of natural disasters in China from 1949 to 2015

重庆、湖南、上海、浙江、福建、黑龙江、吉林省份，次冷点主要分布在华北、华南、西南大部分地区，冷点主要分布在内蒙古、辽宁及西北、西南部分地区；旱灾的热点区主要分布在华北、西北的部分地区，次热点分布在长江中下地区及东北地区，次冷区主要分布在福建、湖南、江西、重庆、四川、青海省份，冷点主要分布在新疆及西南、华南地区；风雹灾害热点区主要分布在山东、江苏、江西及华中地区，次热点主要分布在华北、华东、东北、西南等部分地区，次冷点分布在内蒙古及西北地区，冷点分布在西藏、辽宁省份；低温灾害的热点区主要分布在华北、华中及东北地区，次热点发生在云南及西北地区，次冷点主要发生在西南、华东地区，冷点集中分布在西藏、华南地区；台风热点区集中在华东部分地区及华南地区，次热点集中在西南、华东部分地区，次冷点、冷点集中分布在内陆地区，不断递进。

3.3 粮食灾损研究

3.3.1 自然灾害对粮食生产的影响 为了分析1949-2015年中国自然灾害对粮食产量的影响，运用粮食灾损估算模型分别评估中国31个省市不同灾害对粮食产量的影响，并做不同省市的粮食灾损量、灾损率变化图（图12，图13）、不同灾种影响占比变化雷达图（图14）。结果表明：比较图12、图13可知，1949-2015年自然灾害对粮食影响时序特征大概分为3个阶段：1949-1970年、1970-2000年、2000-2015年。1949-1970年间，除1959-1961年3年左右时间具有较大的粮食损失量、损失率外，中国年均粮食灾损变化不大，稳定在较低水平；1970-2000年中国年均粮食灾损呈线性递增趋势，增幅明显；2000年中国省市平均粮食灾损量、灾损率均达到最大值（ $3.30 \times 10^6 t$ 、24.8%），2001-2015年中国平均粮食灾损量呈波动下降态势。同时，1949-2015年中国单年灾损率大于50%的省市有吉林（2次）、山西（2次）、安徽（1次）、青海（1次）、海南（1次），时间多发生在2000年左右，2000年青海灾损率达到全国最大值65.3%。1949-2015年中国不同灾种对粮食生产影响比重排序为旱灾灾损量 > 洪灾灾损量 > 风雹灾损量 > 低温灾损量 > 其他灾损量 > 台风灾损量。1949-2015年间中国共有6年洪灾灾损量占总灾损量大于50%，1949-

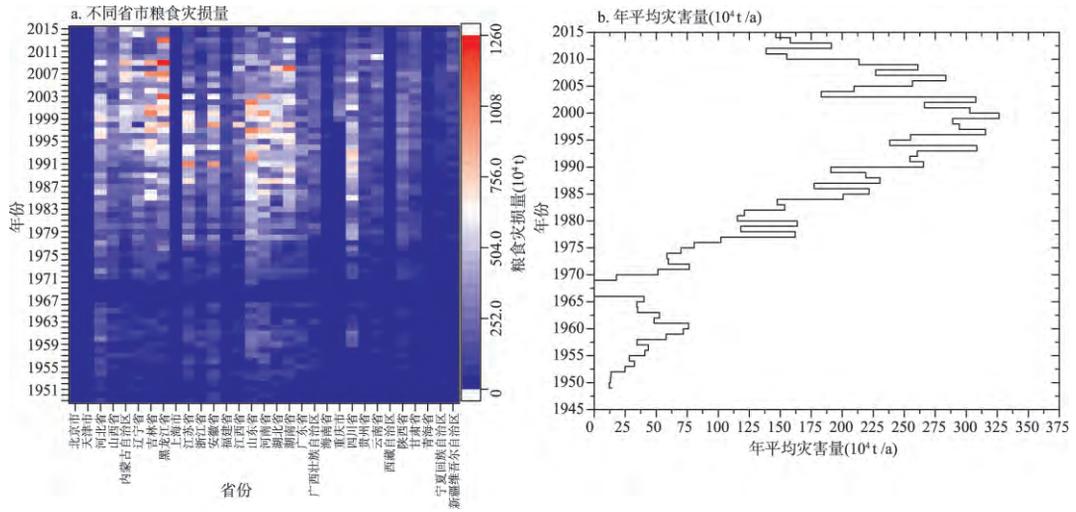


图 12 1949-2015年中国省市粮食灾损量

Fig. 12 Changes of grain disaster loss amount by province in China in 1949-2015

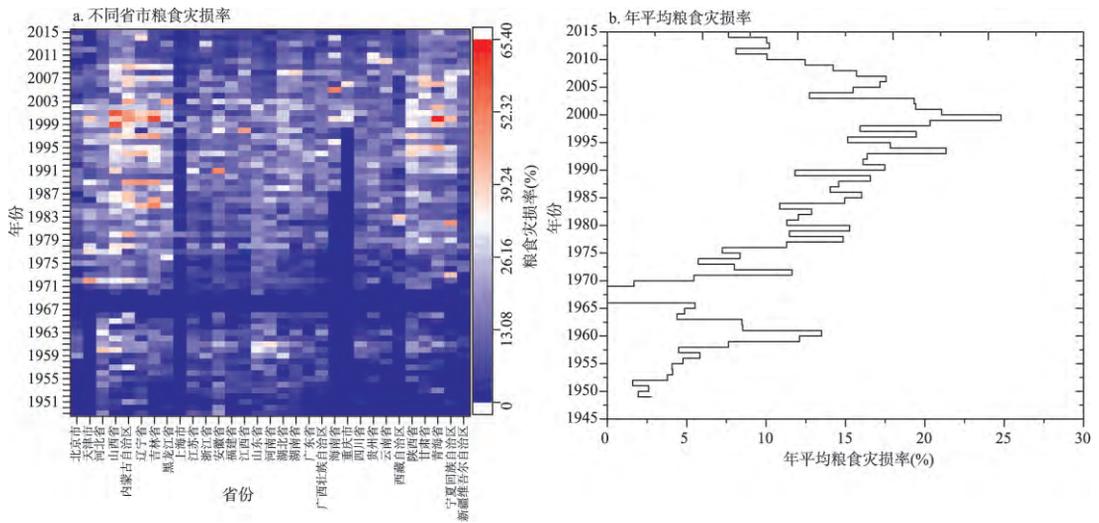


图 13 1949-2015年中国省份粮食灾损率变化

Fig. 13 Changes of grain disaster loss rate in China by province in 1949-2015

1966年、1991-1998年、2010-2015年为洪灾频发的几个阶段；除1960年左右3年时间中国受干旱影响较大外，1949-1966年中国的粮食损失主要由洪灾造成，其中1949年、1950年、1954年、1964年洪灾灾损均占到总灾损70%以上，1949年洪灾灾损占比最大(99.36%)，1998年洪灾对农业生产最为严重，中国洪灾粮食灾损量高达 4.9×10^7 t；同时，1949-2015年间中国共有36年旱灾灾损量占总灾损量超过50%，1970-1990年、1999-2009年为旱灾频发的两个阶段，2000年旱灾最为严重，最大占比为76.47%；历年来中国风雹灾损占比最大值为1990年16.90%，2008年低温占比历年最大(38.63%)。

3.3.2 粮食灾损空间特征 为了分析灾损空间分布特征，通过计算不同阶段自然灾害对中国粮食生产的年平均灾损量、灾损率，进行空间可视化分析(图15)。基于前文自然灾害对粮食产量影响时序特征分析可知，时序特征大概分为3个阶段：1949-1970年、1970-

2000年、2000-2015年，故分别计算不同阶段31省市的年均灾损量、灾损率。结果显示：1949-1970年河北、山东、河南省份的年均灾损量比较大，其他省市年均灾损量相对较小，华北地区省份的年均灾损率较大，此阶段华北地区受灾相对较为严重，年均灾损率均达到10%~15%之间；相比1949-1970年这一阶段，1970-2000年中国省市年均灾损量、灾损率都呈现出大幅度提升，且受灾重心逐渐开始向北方移动，山西、内蒙、辽宁、吉林等省份受灾较为严重，年均灾损率均达到20%~25%；相比前两阶段，2000-2015年的年均灾损量、灾损率略微上升，中国粮食受灾重心大体向西北移动，西北地区的粮食年均灾损率均达到22%~30%，而京津冀地区的年均粮食灾损率下降，仅在10%~13%之间，且最近十几年南方地区的湖南、湖北粮食受灾比较明显；不同地区之间粮食灾损差异较大，华中、华北部分地区、西北、东北地区的年平均粮食灾损量、灾损率明显大于京津冀地区、上海、广州、西南地区的年平均平均值；不同省份之间粮食灾损差异特征明显，1949-1970年河北省粮食灾损最为严重，1970-2000年山东省粮食受自然灾害影响明显，2000-2015年黑龙江、内蒙古粮食灾损最为严重，2000-2015年

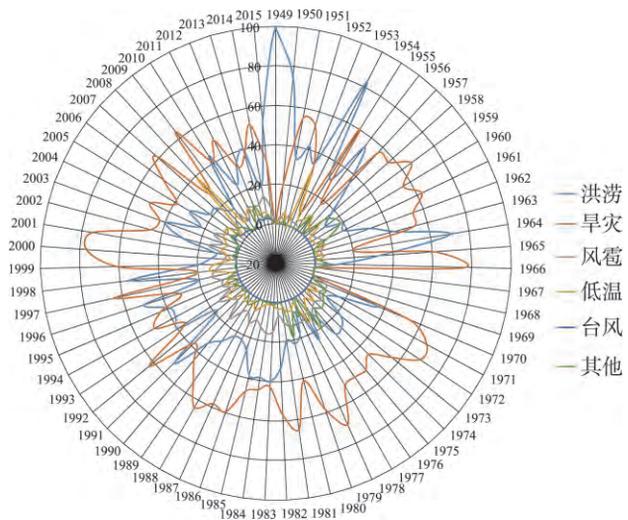


图14 1949-2015年中国不同灾损占比变化(%)
Fig. 14 Variation of different disaster loss in China from 1949 to 2015 (%)

不同地区之间粮食灾损差异较大，华中、华北部分地区、西北、东北地区的年平均粮食灾损量、灾损率明显大于京津冀地区、上海、广州、西南地区的年平均平均值；不同省份之间粮食灾损差异特征明显，1949-1970年河北省粮食灾损最为严重，1970-2000年山东省粮食受自然灾害影响明显，2000-2015年黑龙江、内蒙古粮食灾损最为严重，2000-2015年

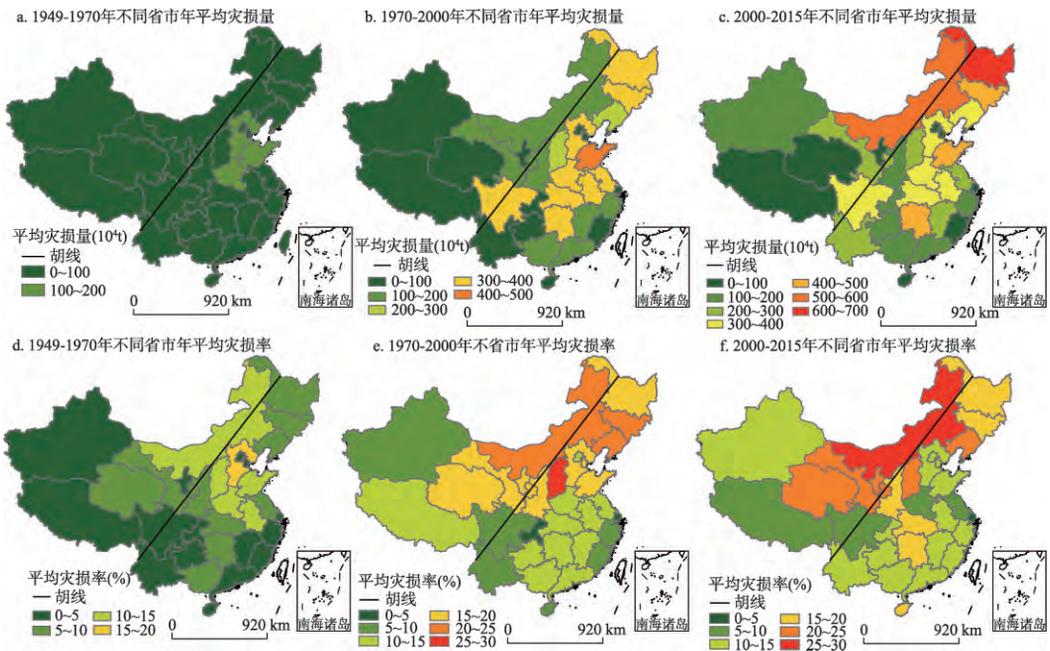


图15 1949-2015年中国不同阶段省市的年均灾损量与灾损率

Fig. 15 Spatial distribution of grain loss amount and rate in China by province from 1949 to 2015

黑龙江省平均灾损量 (6.41×10^6 t) 大于2015年宁夏 (3.73×10^6 t)、西藏 (1.01×10^6 t) 与青海 (1.03×10^6 t) 粮食总产量之和。综上, 1949-2015年31省市粮食的最大年均灾损量、灾损率由 1.30×10^6 t 增到 6.41×10^6 t、由 15.97% 到 28.95%, 自然灾害对中国粮食产量产生越来越严重的影响。通过对粮食灾损的空间特征分析, 为响应“国家粮食丰产增效科技创新”计划、保证国家粮食安全, 建议未来应逐步做好宁夏、青海、内蒙、东北、湖南、湖北等省份的灾害防护, 湖南、湖北主要预防洪涝灾害, 西北地区主要预防干旱及突发性雹灾, 东北地区主要除旱防内涝。

为了检验粮食灾损的空间分异性, 利用地理空间探测器对洪涝/旱灾/风雹/低温/台风受灾面积 (HL/HZ/FB/DW/TF-SZ)、洪涝/旱灾/风雹/低温/台风成灾面积 (HL/HZ/FB/DW/TF-CZ)、洪涝/旱灾/风雹/低温/台风绝收面积 (HL/HZ/FB/DW/TF-JS) 数据进行了单因子、交互因子探测, 揭示各因子对灾损空间差异解释力 (表1)。结果显示: 旱灾受灾面积 (HZ-SZ)、洪涝成灾面积 (HL-CZ)、洪涝受灾面积 (HL-SZ) 的 P 值排在前三位, 说明灾损空间分布差异受上述3种单因子影响较大, 间接说明中国粮食产量主要受旱灾、洪灾影响; 交互因子探测分析表明各因子对灾损空间分布差异并不是单独起作用, 而是各因子交互作用的结果, 且任意单因子与其他因素交互后的因子对灾损空间差异解释力都强于原来单因子的解释力。

4 结论与讨论

通过计算机Python语言编程进行数据获取, 分析1949-2015年中国5种典型自然灾害造成的受灾、成灾、绝收面积的时空分异特征, 估算并检验了粮食灾损的空间特征及分异性, 认为不同灾种、灾损在时序变化、空间分布特征明显, 主要包括:

(1) 1949-2015年自然灾害时序趋势整体呈先升后降, 2000年为临界点。1949-1970年中国自然灾害经历一个小的波动周期, 1970-2000年中国自然灾害受灾面积、灾害强度指数均呈波动上升态势, 2001-2015年中国自然灾害受灾面积呈明显下降趋势, 2001-2015年中国自然灾害强度指数表现出先降后升的趋势, 其中2011年为灾害强度指数的拐点, 2011-2015年中国灾害强度指数呈显著线性单调递增, 灾害程度逐渐恶化。

(2) 1949-2015年不同灾种时序趋势特征差异显著。洪涝、旱灾、风雹、低温、台风受灾面积最大值年份分别是1991年、2000年、2002年、2008年、2005年, 灾害强度指数最大值年份分别为2002年、2000年、2015年、2008年、2005年, 旱灾、低温、台风灾害受灾面积最大与灾害强度最大相吻合。

(3) 1949-2015年不同灾种空间异质性显著。5种灾害排序旱灾 > 洪灾 > 风雹 > 低温 > 台风, 灾种在省域空间分布由北—南逐渐多样化, 东南部省域呈现多灾并发格局; 不同灾种受灾面积在由西—东、南—北的空间变化曲线各异、特征明显, 这些特征与区域环境、经济产业关系密切。洪涝、台风空间分布上显著正相关, 呈显著集聚分布模式, 说明这些灾种发生更依赖孕灾环境, 自然灾害总和、旱灾、风雹、低温在省域空间分布上相关性显著水平较低, 呈随机分布格局; 灾害冷热点分布具有一定地带性特征, 冷点、次冷点多集中分布在胡焕庸线西北侧, 热点、次热点聚集在胡焕庸线东南侧。

(4) 粮食灾损时空分异性特征显著, 其中旱涝灾害对粮食生产影响较大, 且灾损重心逐渐北移。1949-1966年、1991-1998年、2010-2015年中国主要受洪灾影响, 1970-1990年、1999-2009年中国主要受旱灾影响更频繁; 1949-2015年中国粮食的灾损量、灾损率均呈先上升后下降的趋势, 2000年达到峰值; 旱灾灾损量占总灾损量大于50%的年份共出现36次, 洪灾仅6次占总灾损大于50%; 吉林、山西、安徽、青海等省份单年灾

表1 各影响因子探测结果
Tab. 1 The detection of all the influencing factors

	交互探测														P值	
	HL-SZ	HZ-SZ	FB-SZ	DW-SZ	TF-SZ	HL-CZ	HZ-CZ	FB-CZ	DW-CZ	TF-CZ	HL-JS	HZ-JS	FB-JS	DW-JS		TF-JS
HL-SZ	0.8503															0.8503
HZ-SZ	0.9700	0.8792														0.8792
FB-SZ	0.9810	0.9380	0.7607													0.7607
DW-SZ	0.9346	0.9790	0.9021	0.6780												0.6780
TF-SZ	0.9570	0.9819	0.9740	0.9246	0.3442											0.3442
HL-CZ	0.8951	0.9849	0.9744	0.9360	0.9521	0.8717										0.8717
HZ-CZ	0.9702	0.8973	0.8979	0.9790	0.9580	0.9848	0.7968									0.7968
FB-CZ	0.9872	0.9153	0.8541	0.8579	0.8986	0.9791	0.8931	0.7441								0.7441
DW-CZ	0.9328	0.9494	0.9451	0.8211	0.9290	0.9773	0.9465	0.9824	0.6033							0.6033
TF-CZ	0.9560	0.9788	0.9720	0.9174	0.4149	0.9439	0.9548	0.8926	0.9280	0.3833						0.3833
HL-JS	0.9370	0.9675	0.9903	0.9214	0.9442	0.9503	0.9493	0.9637	0.8976	0.9133	0.7645					0.7645
HZ-JS	0.9689	0.9261	0.8455	0.8416	0.8449	0.9896	0.8792	0.8050	0.9580	0.8494	0.9654	0.6948				0.6948
FB-JS	0.9693	0.9534	0.8555	0.8801	0.9412	0.9769	0.8805	0.8411	0.8676	0.9430	0.9315	0.8240	0.6201			0.6201
DW-JS	0.9682	0.9621	0.9293	0.8766	0.9152	0.9846	0.9693	0.9200	0.8051	0.8973	0.8859	0.8092	0.8118	0.5412		0.5412
TF-JS	0.9398	0.9426	0.9402	0.8209	0.4598	0.9518	0.8874	0.8509	0.7582	0.5472	0.9019	0.8458	0.7644	0.9316	0.1803	0.1803

损率多次达到50%以上,黑龙江、山东、河北等省份粮食灾损量比较大;HZ-SZ、HL-CZ、HL-SZ等单因子对灾损空间分异性解释力度最大,多因子交互均呈非线性增强关系。

(5) 建议政府加强西北地区除旱减雹,东北地区除旱排内涝、东南沿海排涝防冻预防台等措施,制定专项保护方案,以保证中国粮食丰产增收。宁夏、青海、内蒙古、黑龙江、湖南、湖北等省份未来应逐步加强自然灾害防护。湖南、湖北主要预防洪涝灾害,西北地区主要预防干旱及突发性雹灾,东北地区主要除旱防内涝。农业部门应从自然灾害预警、防灾减灾、灾后救援、农业保险等多方面对灾害热点区、粮食主产区制定专项保护方案,以确保国家粮食安全。

本文通过计算机Python编程语言进行数据采集,构建灾害强度指数分析自然灾害的时序特征,利用ESDA、粮食灾损估算模型、地理空间探测器 q 统计等方法研究灾害、灾损的时空特征及灾损的空间分异性,取得以上结论,但由于不同阶段灾害监测技术有差异,如何降低统计数据间误差,还需进一步研究探讨,除此由于资料受限、技术方法不完善,后续研究仍待逐步提高。随着计算机数据挖掘与深度学习逐渐智能化,有关自然灾害时空分布研究的数据应由农业、人口、经济等传统的统计数据向网络、新闻、社交等多源数据过渡,方法应由传统地学方法结合(循环、卷积)神经网络构建空间识别模型,逐步完善自然灾害时空规律的研究与监测体系;同时研究自然灾害发生机制也具有重大意义,自然灾害的爆发是气候变化引起的,究其本源是地表温度变化,人类活动、植被变化、星体间空间位置的移动(如:地潮、海潮、气潮)都会导致地表温度的变化,而不应仅仅停留在自然灾害爆发与人口、GDP、降雨、城市化率等因素方面的相关性研究,努力从宇宙空间大尺度分析灾害爆发驱动机制将是未来研究努力拓展的方向,以期更好地为农业服务。

参考文献(References)

- [1] Wang Jing'ai, Shi Peijun, Wang Ping, et al. Spatial-temporal Pattern of Natural Disasters in China. Beijing: Science Press, 2006. [王静爱, 史培军, 王平, 等. 中国自然灾害的时空格局. 北京: 科学出版社, 2006.]
- [2] Du Xindong, Jin Xiaobin, Yang Xilian, et al. Spatial-temporal pattern changes of main agriculture natural disasters in China during 1990-2011. *Journal of Geographical Sciences*, 2015, 25(4): 387-398.
- [3] Liu Yi, Yang Yu, Li Li. Major natural disasters and their spatio-temporal variation in the history of China. *Journal of Geographical Sciences*, 2012, 22(6): 963-976.
- [4] Quan Ruisong. Risk assessment of flood disaster in Shanghai based on spatial-temporal characteristics analysis from 251 to 2000. *Environmental Earth Sciences*, 2015, 72: 4627-4638.
- [5] Jia Huicong, Pan Donghua, Wang Jing'ai, et al. Wang Risk mapping of integrated natural disasters in China. *Natural Hazards*, 2016, 80: 2023-2035.
- [6] Lansigan F P, de los Santos W L, Coladilla J O. Agronomic impacts of climate variability on rice production in the Philippines. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 2000, 82: 129-137.
- [7] Shi Peijun. Theory on disaster science and disaster dynamics. *Journal of Natural Disasters*, 1996, 5(4): 6-14. [史培军. 再论灾害研究的理论与实践. *自然灾害学报*, 1996, 5(4): 6-14.]
- [8] Shi Peijun. Theory on disaster science and disaster dynamics. *Journal of Natural Disasters*, 2002, 11(3): 1-9. [史培军. 三论灾害研究的理论与实践. *自然灾害学报*, 2002, 11(3): 1-9.]
- [9] Liu Bintao, Tao Heping, Liu Shaoquan, et al. Assessment and analysis of natural hazards danger degree in the Sichuan-Yunnan-Guizhou bordering area of Southwest China. *Geographical Research*, 2015, 33(2): 225-236. [刘斌涛, 陶和平, 刘邵权, 于慧. 川滇黔接壤地区自然灾害危险度评价. *地理研究*, 2015, 33(2): 225-236.]
- [10] Ma Guobin, Jiang Weiguo, Li Jing, et al. Assessment and validation of short-term flood hazards in China. *Geographical Research*, 2012, 31(1): 34-44. [马国斌, 蒋卫国, 李京, 等. 中国短时洪涝灾害危险性评估与验证. *地理研究*, 2012, 31(1): 34-44.]
- [11] Yan Xuxian. Assessment of social vulnerability to natural disasters in the midwest of China. *Economic Geography*, 2014, 34(5): 34-40. [闫绪娟. 中西部地区自然灾害社会易损性空间特征分析. *经济地理*, 2014, 34(5): 34-40.]

- [12] Liu Fenggui, Zhang Haifeng, Zhou Qiang, et al. Distribution features of hail disasters and its formation analysis of the Three-River Headwaters Region. *Arid Land Geography*, 2013, 36(2): 238-244. [刘峰贵, 张海峰, 周强, 等. 三江源地区冰雹灾害分布特征及其成因. *干旱区地理*, 2013, 36(2): 238-244.]
- [13] Liu Yi, Yang Yu. Spatial distribution of major natural disasters of China in historical period. *Acta Geographica Sinica*, 2012, 67(3): 291-300. [刘毅, 杨宇. 历史时期中国重大自然灾害时空分异特征. *地理学报*, 2012, 67(3): 291-300.]
- [14] Cao Luodan, Li Jialin, Ye Chiyue, et al. Spatial-temporal variations in natural disasters of the coastal regions in Zhejiang province during Ming and Qing dynasties. *Geographical Research*, 2015, 33(9): 1778-1790. [曹罗丹, 李加林, 叶持跃, 等. 明清时期浙江沿海自然灾害的时空分异特征. *地理研究*, 2015, 33(9): 1778-1790.]
- [15] Wang Jingai, Shi Peijun, Zhu Li. A research on regional distribution of major natural hazards in China. *Acta Geographica Sinica*, 1994, 49(1): 18-26. [王静爱, 史培军, 朱骊. 中国主要自然灾害致灾因子的区域分异. *地理学报*, 1994, 49(1): 18-26.]
- [16] Cheng Weiming, Xia Yao, Cao Yuyao, et al. Regional hazard assessment of disaster environment for debris flows: Taking Jundu Mountain, Beijing as an example. *Geographical Research*, 2013, 32(4): 595-606. [程维明, 夏遥, 曹玉尧, 等. 区域泥石流孕灾环境危险性评价: 以北京军都山区为例. *地理研究*, 2013, 32(4): 595-606.]
- [17] Li Bingyuan, Li Juzhang, Wang Jianjun. Areal association of natural hazard in China. *Acta Geographica Sinica*, 1996, 51(1): 1-11. [李炳元, 李钜章, 王建军. 中国自然灾害的区域组合规律. *地理学报*, 1996, 51(1): 1-11.]
- [18] Zhou Yang, Li Ning, Wu Jidong et al. Complete assessment of disaster reduction and relief standards in China. *Resources Science*, 2012, 34(9): 1741-1749. [周扬, 李宁, 吴吉东, 等. 中国自然灾害减灾救灾标准完备性评价. *资源科学*, 2012, 34(9): 1741-1749.]
- [19] Gu Xihui, Zhang Qiang, Zhang Sheng. Spatio-temporal properties of flood/drought hazards and possible causes and impacts in 1961-2010. *Scientia Geographica Sinica*, 2016, 36(3): 439-447. [顾西辉, 张强, 张生. 1961-2010年中国农业洪旱灾害时空特征. 成因及影响. *地理科学*, 2016, 36(3): 439-447.]
- [20] Li Chanjuan, Chai Yuanqing, Yang Linsheng, et al. Spatio-temporal distribution of flood disasters and analysis of influencing factors in Africa. *Natural Hazards*, 2016, 82: 721-731.
- [21] Gao Maosheng, Fan Jianzhong, Wu Qingli. Influence of drought and flood disasters on grain production in Shaanxi Province. *Journal of China Agricultural University*, 2012, 17(3): 149-153. [高茂盛, 范建忠, 吴清丽. 旱涝灾害对陕西省粮食生产的影响研究. *中国农业大学学报*, 2012, 17(3): 149-153.]
- [22] Li Wenjuan, Qin Zhihao, Lin Lü. Quantitative analysis of agro-drought impact on food security in China. *Journal of Natural Disasters*, 2010, 19(3): 111-118. [李文娟, 覃志豪, 林绿. 农业旱灾对国家粮食安全影响程度的定量分析. *自然灾害学报*, 2010, 19(3): 111-118.]
- [23] Wang Jinfeng, Ge Yong, Li Lianfa, et al. Spatiotemporal data analysis in geography. *Acta Geographica Sinica*, 2014, 69(9): 1326-1345. [王劲峰, 葛咏, 李连发, 等. 地理学时空数据分析方法. *地理学报*, 2014, 69(9): 1326-1345.]
- [24] Wang Jinfeng, Xu Chengdong. Geodetector: Principle and prospective. *Acta Geographica Sinica*, 2017, 72(1): 116-134. [王劲峰, 徐成东. 地理探测器: 原理与展望. *地理学报*, 2017, 72(1): 116-134.]
- [25] Chen Jiangping, Zhang Yao, Yu Yuanjian. Effect of MAUP in spatial autocorrelation. *Acta Geographica Sinica*, 2011, 66(12): 1597-1606. [陈江平, 张瑶, 余远剑. 空间自相关的可塑性面积单元问题效应. *地理学报*, 2011, 66(12): 1597-1606.]
- [26] Xie Shuai, Liu Shibin, Duan Jianbo, et al. Spatial distribution characteristics of OSDS registered users and its influencing factor. *Journal of Geo-Information Science*, 2016, 18(10): 1332-1340. [谢帅, 刘士彬, 段建波, 等. OSDS注册用户空间分布特征及影响因素分析. *地球信息科学学报*, 2016, 18(10): 1332-1340.]

Spatio-temporal distribution of typical natural disasters and grain disaster losses in China from 1949 to 2015

ZHAO Yinghui¹, GUO Jingpeng^{1,2}, MAO Kebiao², XIANG Yanan¹, LI Yihan³,
HAN Jiaqi², WU Nei⁴

(1. College of Resources and Environment, Northeast Agricultural University, Harbin 150030, China; 2. Institute of Agricultural Resources and Regional Planning, Chinese Academy of Agricultural Sciences, Beijing 100081, China; 3. School of Land Science and Technology, China University of Geosciences, Beijing 100081, China;

4. School of Resource, Environment and Safety Engineering, Hunan University of Science and Technology,
Xiangtan 411100, Hunan, China)

Abstract: Prone to natural disasters, China badly needs a research into its spatio-temporal distribution of natural disasters and the corresponding grain loss to improve grain security and achieve sustainable development. By means of Python Programming Language and on the basis of grain production loss over Chinese 31 provinces from 1949 to 2015, this paper first constructed disaster intensity index to analyze temporal features of different natural disasters, and with trend analysis as well as ESDA to analyze spatial characteristics in different provinces. Then the paper collected crop planting data to calculate and test the spatio-temporal characteristics in grain loss through estimation model on grain loss, defining grain loss rate and geodetector. The conclusions of paper are: (1) compared with the curve of disaster-affected areas, disaster intensity index constructed in this paper could better present temporal changes of natural disasters; (2) China alternately suffered from flood and drought between 1949 and 2015 and in the coming 5 to 10 years the main suffering would be flood; (3) the ranking of natural disasters is: drought>flood>low temperature >hail> typhoon, among which, the areas affected by drought and flood occupied more than half of the total; (4) natural disasters show clear spatial characteristics and the ranking of regional areas prone to disasters is: eastern region>western region; northern region > southern region. Generally speaking, northern region is prone to only one particular natural disaster while southern region tends to suffer from several natural disasters in the meantime; (5) the sum of natural disasters, drought, hail and low temperature, with their random distribution in space, presented unclear spatial autocorrelation, while flood and typhoon, with their clustering model in space distribution, showed clear spatial autocorrelation; (6) from 1949 to 2015, the general temporal changes of disasters, grain loss amount and loss rate showed a feature that the figures would rise first, and then dropped with the critical point in 2000. Meanwhile, they had significant heterogeneity in spatial distribution, great difference in single-factor explanation power, and multi-factor interaction showed a nonlinear enhancement relation. The distribution of hot and cold spots on both sides of the Hu Line presented a polarization pattern and the gravity center of grain loss gradually moved northward. Accordingly, this paper proposes that our government should adopt different precautionary measures in different regions of China: measures against drought and hail in Northwest China; measures against drought and waterlogging in Northeast China; measures against flood and low temperature in Central China; measures against waterlogging and typhoon in coastal areas of Southeast China. And our government should show more concern to and formulate feasible protection plans for hostile-environment Northwest China and high-grain-production Northeast China so that a good harvest in grains could be guaranteed.

Keywords: natural disaster; disaster intensity index; ESDA; grain disaster losses; q-statistic; China