

高歌,李莹,陈涛,等,2023. 2004—2019 年中国干旱多承灾体灾损风险特征评估[J]. 气象,49(5):611-623. Gao G, Li Y, Chen T, et al, 2023. Characteristics and risk assessment of drought losses for different hazard bearing bodies in China from 2004 to 2019[J]. Meteor Mon, 49(5):611-623(in Chinese).

## 2004—2019 年中国干旱多承灾体灾损风险特征评估<sup>\*</sup>

高 歌<sup>1,2</sup> 李 莹<sup>1</sup> 陈 涛<sup>3</sup> 赵珊珊<sup>1,2</sup> 黄大鹏<sup>1,2</sup>

1 中国气象局气候研究开放实验室,国家气候中心,北京 100081

2 南京信息工程大学气象灾害预报预警与评估协同创新中心,南京 210044

3 西藏自治区气候中心,拉萨 850000

**提 要:** 基于 2004—2019 年中国省级年干旱灾情和社会经济资料,对于旱农作物受灾面积、受灾人口和直接经济损失三个指标及其灾损率的时空变化规律进行分析,采用信息扩散方法开展不同承灾体的干旱灾损率风险评估,为摸清近十几年的干旱风险格局,提高灾害风险管理能力提供参考。结果表明:三个指标的年干旱灾损率均呈现下降趋势,其中年农作物受灾面积和人口受灾率减少趋势显著,年降水量增加、年干旱累积强度和干旱日数减少以及防灾抗旱能力增强为主要原因。农作物、人口和经济不同承灾体的干旱风险格局存在差异。出现农作物面积受灾率 $\geq 20\%$ 时的旱灾可能性不高,仅宁夏、山西、内蒙古、甘肃超越概率达较高等级,出现人口受灾率 $\geq 30\%$ 和直接经济损失率 $\geq 1\%$ 时的旱灾可能性更低,超越概率小,无省份达高、较高可能性等级。年农作物面积受灾率 20 年一遇水平下,干旱重灾区分布在西北地区、西南地区东部及湖北、湖南、浙江、海南。年人口受灾率 20 年一遇水平下,干旱重灾区位于西北地区中东部、西南地区东部以及安徽、山西、内蒙古。年直接经济损失率 20 年一遇水平下,干旱重灾区集中在东北、西北地区中部、西南地区东部及内蒙古、海南。

**关键词:** 干旱,承灾体,风险评估,信息扩散方法

**中图分类号:** P467

**文献标志码:** A

**DOI:** 10.7519/j.issn.1000-0526.2022.121501

## Characteristics and Risk Assessment of Drought Losses for Different Hazard Bearing Bodies in China from 2004 to 2019

GAO Ge<sup>1,2</sup> LI Ying<sup>1</sup> CHEN Tao<sup>3</sup> ZHAO Shanshan<sup>1,2</sup> HUANG Dapeng<sup>1,2</sup>

1 Laboratory for Climate Studies, National Climate Centre, CMA, Beijing 100081

2 Collaborative Innovation Center on Forecast and Evaluation of Meteorological Disasters (CIC-FEMD),

Nanjing University of Information Science and Technology, Nanjing 210044

3 Tibet Climate Center, Lhasa 850000

**Abstract:** Based on the provincial annual drought disaster losses and socio-economic data of China from 2004 to 2019, spatio-temporal variation characteristics are analyzed for the three loss indexes and their loss rates, including the crop area, population affected by drought and direct economic loss caused by droughts. Risk assessment of drought loss rates for different hazard bearing bodies are carried out by the information diffusion method so as to understand the drought risk pattern and provide reference for improving the ability of drought risk management. The results show that the annual disaster loss rates of the three indexes caused by drought tend to decrease in China during 2004 and 2019, in which the loss rates of crop area and population show decreasing trends significantly. This is the result of the increase of annual precipitation, decrease of annual drought cumulative intensity and days with moderate drought grade and

<sup>\*</sup> 国家重点研发计划(2018YFC1509002)、科学技术部—第四次气候变化国家评估报告编制工作专项共同资助

2022 年 5 月 17 日收稿; 2022 年 10 月 13 日收修定稿

第一作者:高歌,主要从事气象灾害风险评估、气候影响评价等方面的研究. E-mail: gaoge@cma.gov.cn

above, as well as the enhancement of drought resistance capacity. The drought risk patterns of the three types of hazard bearers are different. When the annual rate of crop area affected by drought to sown area is greater than and equal to 20%, only Ningxia, Shanxi, Inner Mongolia and Gansu have a higher exceeding possibility level. When the rate of population affected by drought to total population is greater than and equal to 30% and the rate of direct economic losses to GDP is greater than and equal to 1%, the exceeding probability is small and there is no province with high or higher possibility grade. Under the level of 20-year return period of annual rate of crop area affected by drought to sown area, the serious drought area distributed in the whole Northwest China, eastern Southwest China and the provinces of Hubei, Hunan, Zhejiang and Hainan. Under the level of 20-year return period of annual rate of population affected by drought to total population, the serious drought area was located in the middle and east of Northwest China, eastern Southwest China, and the provinces of Anhui, Shanxi, Inner Mongolia. Under the level of 20-year return period of annual rate of direct economic losses to GDP, the serious drought area is located in Northeast China, central Northwest China, eastern Southwest China as well as the provinces of Inner Mongolia, Hainan.

**Key words:** drought, hazard bearing bodies, risk assessment, information diffusion method

## 引 言

全球变暖背景下,大气水循环加剧,降水的演变特征表现为局地差异加剧和极端降水增加,导致洪涝和干旱事件频发(O'Gorman and Schneider, 2009),对社会经济发展造成巨大影响。干旱是世界上最严重的自然灾害之一,受季风气候的影响,中国受干旱影响尤为突出。2004—2015年平均每年干旱造成的直接经济损失高达640.7亿元(RMB,下同),2000年中国农作物因旱受灾和成灾面积为1951年以来最大,分别高达 $4054.0 \times 10^4 \text{ hm}^2$ 和 $2678.0 \times 10^4 \text{ hm}^2$ ,粮食减产5996万t,占当年粮食总产量的13.0%(郑国光,2019)。

针对中国干旱的时间、空间、范围、强度以及持续性特征等方面已有很多研究。1961—2015年,中国平均年干旱日数总体呈增加趋势,但西北中西部、东北中东部、江南大部、华南大部、青藏高原中西部及内蒙古中西部等地则呈减少趋势(廖要明和张存杰,2017)。气候变暖背景下,中国干旱强度加重、范围扩大、频次增加和持续时间增加明显(韩兰英等,2019)。陶然和张珂(2020)基于PDSI(Palmer drought severity index)对1982—2015年中国气象干旱时空特征分析表明气象干旱频次、历时和烈度呈上升趋势,半湿润、半干旱区如青海东南部、陕甘宁、山西、内蒙古北部及黑龙江北部区域干旱形势逐渐严峻,部分湿润区如四川中部、重庆、湖北及云贵

地区干旱形势也日趋加重。张棋等(2021)基于1980—2019年SPEI(standardized precipitation evapotranspiration index)干旱指数开展时空模式挖掘发现年尺度在西北地区和青藏高原旱情较严重且时空特点具有连续性,西北荒漠地区中旱和重旱频率最高,而内蒙古草原地区轻旱和极端干旱频率最高;局部异常值表明年尺度的华南西部和华中、华南湿润亚热带地区的中部全年旱情相对更严重。针对干旱灾损变化分析多基于农作物旱灾面积指标开展(张强等,2015;2018)。近几十年来,我国农业干旱灾害呈现明显周期性波动,干旱轻重灾情交替出现(杨艳颖等,2018;赵海燕等,2021)。干旱不仅对社会经济发展有深远影响,而且干旱受灾人口、经济损失还是风险转移措施保险赔付标准制定的主要参考指标,也是救灾援助的重要依据。目前干旱对全国及区域的社会、经济等方面的损失影响变化以及干旱致灾气象条件和灾损变化的关系还有待深入分析。

气候变化必然会对我国干旱风险格局产生影响,与我国水资源安全、粮食安全和生态安全以及社会经济稳定发展密切相关,有必要摸清新世纪以来干旱风险状况,对新形势下干旱防灾减灾、风险管理和应对工作具有重要的指导意义。干旱风险评估研究的方法大体分三类:一是指标体系法。主要按照风险原理从干旱致灾因子的危险性、承灾体的暴露度和脆弱性、防灾减灾能力等方面构建指标体系(屈艳萍等,2015;赵佳琪等,2021;李娜等,2021)。这类

方法在指标的优选取舍、权重确定、评估指数构架、评估等级划分方面人为主观因素影响大,风险评估结果仅能给出灾害风险的相对高低。二是基于灾损曲线的定量风险评估。可以基于干旱指数识别干旱事件,建立干旱频率-灌溉水平-旱灾损失率分布曲线(孙可可等,2013)。继而利用不同作物品种的灾损脆弱性曲线,对旱灾风险进行评估,绘制不同致灾水平下的成灾风险系列图谱(贾慧聪等,2011)。该方法基于致灾机理,风险评估量化程度较高,但需要大量的数据研制针对不同承灾体的脆弱性曲线,否则会大大降低风险评估的准确性,总体可操作性较差。三是概率统计方法。信息扩散技术是针对概率分布未知、小样本或数据不完备的情况,通过适当的扩散函数,将历史资料样本数据点转化为模糊集,达到提高概率估算精度的目的(黄崇福,2001)。该方法在旱灾风险评估中得到广泛应用并不断发展,常以干旱造成的农作物受灾、成灾面积和播种面积等为基础建立的评估指标,对省或市、县等(张竟竟,2012;江懿等,2016;陈建杰和余锦华,2016;白夏等,2017)以及不同区域,如:粮食主产区(刘亚彬等,2010)、南方地区(王莺等,2016)、中国丝绸之路经济带(Yu et al, 2020)及全国范围(李孟刚等,2017)等,进行不同干旱农作物受灾程度下的超越概率或不同重现期水平下农作物受灾范围严重程度的风险评估。Jiang et al(2018)和 Niu et al(2019)采用信息扩散法估计干旱强度的概率密度,并用二维正态信息扩散法构建干旱强度与旱灾损失之间的脆弱性关系,估算西南地区和粮食主产区的干旱农业风险。在已有基于信息扩散方法的干旱风险评估研究中,多以农作物为主,承灾体对象单一,针对其他承灾体的干旱风险评估较少涉及。徐洋(2013)基于黑龙江省干旱直接经济损失开展各市(县)干旱灾害经济损失风险评估。随着社会经济的发展,与农作物干旱风险相比可能会有明显不同,针对人口和经济的干旱风险评估越来越受到重视,需要进一步深入研究。

本文拟根据收集到的2004—2019年的年干旱农作物受灾面积、受灾人口和直接经济损失,开展全国省级尺度的不同承灾体的干旱灾损时空格局分析,并采用信息扩散方法进行风险评估,拟为各地面向干旱的防灾减灾部署、应对措施制定、灾害风险转移等提供科学依据。

## 1 资料和方法

### 1.1 资料

基于中国气象局编制的《中国气象灾害年鉴》(2005—2020年)(<https://data.cnki.net/v3/Trade/yearbook/single/N2021120059?zcode=Z008>),收集全国2004—2019年各省年尺度干旱灾情资料,主要包括:农作物受灾面积、绝收面积、受灾人口、饮水困难人口、直接经济损失等。还收集了同期各省(自治区、直辖市)历年年值统计数据,主要包括:农作物总播种面积、年末常住人口、地方生产总值(gross domestic product, GDP)和居民消费者价格指数(consumer price index, CPI, 上年=100)、有效灌溉面积、水库数及水库容量等。统计数据来自中华人民共和国国家统计局《中国统计年鉴》(<http://www.stats.gov.cn/tjsj/ndsj/>)以及国家数据查询系统(<http://data.stats.gov.cn>)。

采用国家气象信息中心提供的2419个站的2004—2019年逐日降水量、气温等资料,并根据中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局和中国国家标准化委员会(2017)及张存杰等(2014)方法计算逐日综合气象干旱指数(meteorological drought composite index, MCI),该指数在气象干旱监测业务服务研究中广泛应用(杨帆等,2015;高睿娜等,2021)。在此基础上探讨干旱气象致灾因子与旱灾损失变化的关系。

### 1.2 方法

#### 1.2.1 直接经济损失价格折算以及损失率计算

考虑年际间的价格变化影响,合理比较不同年份的直接经济损失,采用各省(自治区、直辖市)年CPI指数,将直接经济损失统一修订为2019年价格进行分析。为增加各省的可比性,还采用干旱灾损率(受灾率或损失率)指标进行分析,定义如下:

$$\text{农作物受灾率}(C) = \frac{\text{农作物受灾面积}}{\text{农作物总播种面积}} \quad (1)$$

$$\text{人口受灾率}(R) = \frac{\text{受灾人口}}{\text{年末常住人口}} \quad (2)$$

$$\text{直接经济损失率}(L) = \frac{\text{直接经济损失}}{\text{生产总值}} \quad (3)$$

基于历年省级年干旱灾情和农业、人口和经济资料,按年求和获取全国年统计值,然后再按式(1)~式(3)计算全国历年的各项损失率。

### 1.2.2 趋势统计及显著性检验

要素序列的变化趋势和幅度采用 Theil-Sen 方法(Theil,1950a;1950b;1950c;Sen,1968)计算的倾斜度表示:

$$\beta = \text{Median} \left[ \frac{x_i - x_j}{i - j} \right] \quad (4)$$

式中:Median 为中位数函数; $i$  和  $j$  为序列样本序号, $1 < j < i < m$ , $m$  为样本数;当  $\beta > 0$  时,表示为增加趋势,反之下降趋势, $\beta = 0$ ,无趋势。显著性检验采用 Mann-Kendall 方法,显著性水平取  $\alpha = 0.05$ ,分析时考虑了序列自相关的影响及序列修订。

### 1.2.3 风险概率估计和风险等级

计算风险概率时,考虑到有些地方某些年份无干旱影响,采用下式进行风险概率估计:

$$P(X \geq x) = P(X = \text{致灾}) \times P(X \geq x | X = \text{致灾}) \quad (5)$$

式中: $P(X \geq x)$  为  $n$  年中的灾损(率)值  $\geq x$  的超越概率; $P(X = \text{致灾})$  为致灾频率:致灾年份/ $n$  年; $P(X \geq x | X = \text{致灾})$  为致灾年份中灾损(率)值  $\geq x$  的超越概率。由于研究时段为 2004—2019 年,时间序列长度仅 16 a,尤其湿润地区干旱少发的省份致灾样本更少,常用的概率统计分布函数难确定,因此采用信息扩散模型进行分析,具体算法参考文献(黄崇福,2001;张竟竟,2012;高歌等,2019)。本文灾害指数论域  $U$  的取值范围为:序列最小值至(最大值+间距),等间距设 100 个控制点。每个观测样本可将其所携带信息扩散给  $U$  中的所有点,采用正态扩散模型。

干旱风险评估以两种方式反映干旱可能的损失,一是分析不同灾损率严重程度水平下的超越概率,根据超越概率大小,划分 4 个可能性等级,具体见表 1;二是统计不同承灾体不同重现期水平下的灾损率,根据灾损率的大小,划分为 4 级严重程度,见表 2。

表 1 超越概率可能性等级划分

Table 1 Risk grades of exceeding probability

可能性等级	低	中	较高	高
超越概率( $P$ )	$P < 0.25$	$0.25 \leq P < 0.5$	$0.5 \leq P < 0.75$	$0.75 \leq P$

表 2 不同承灾体灾损率严重程度划分

Table 2 Grades of disaster loss rate caused by drought for different hazard bearing bodies

程度等级	轻灾	中灾	较重灾	重灾
农作物受灾率( $C$ )	$C < 5\%$	$5\% \leq C < 10\%$	$10\% \leq C < 20\%$	$20\% \leq C$
人口受灾率( $R$ )	$R < 10\%$	$10\% \leq R < 20\%$	$20\% \leq R < 30\%$	$30\% \leq R$
直接经济损失率( $L$ )	$L < 0.1\%$	$0.1\% \leq L < 0.5\%$	$0.5\% \leq L < 1\%$	$1\% \leq L$

## 2 结果分析

### 2.1 干旱灾情时空变化特征

#### 2.1.1 全国干旱灾情时间变化特征

2004—2019 年,年干旱农作物受灾面积、受灾人口和价格修订后的直接经济损失平均值分别为  $1480 \times 10^4 \text{ hm}^2$ 、10774.3 万人、574.7 亿元。2011—2019 年与 2004—2010 年平均值相比,年农作物受灾面积、受灾人口和直接经济损失等各项损失减少

分别为  $894.6 \times 10^4 \text{ hm}^2$ 、5414.4 万人以及 67.8 亿元。年干旱农作物面积和人口受灾率、直接经济损失率平均值分别为 9.33%、8.08%、0.15%,2014 年以来,三者均呈现下降趋势,下降速率分别为 5.5%/10 a、5.6%/10 a、0.16%/10 a,前两者通过 0.05 的显著性水平检验。年干旱农作物面积和人口受灾率、直接经济损失率最大值分别为 19.2% (2007 年)、17.4% (2009 年) 和 0.32% (2006 年),最小值分别为 4.6%、2.0% 和 0.03%,均出现在 2018 年(图 1a~1c)。不同承灾体灾损率年际变化大体一致,相关显著。

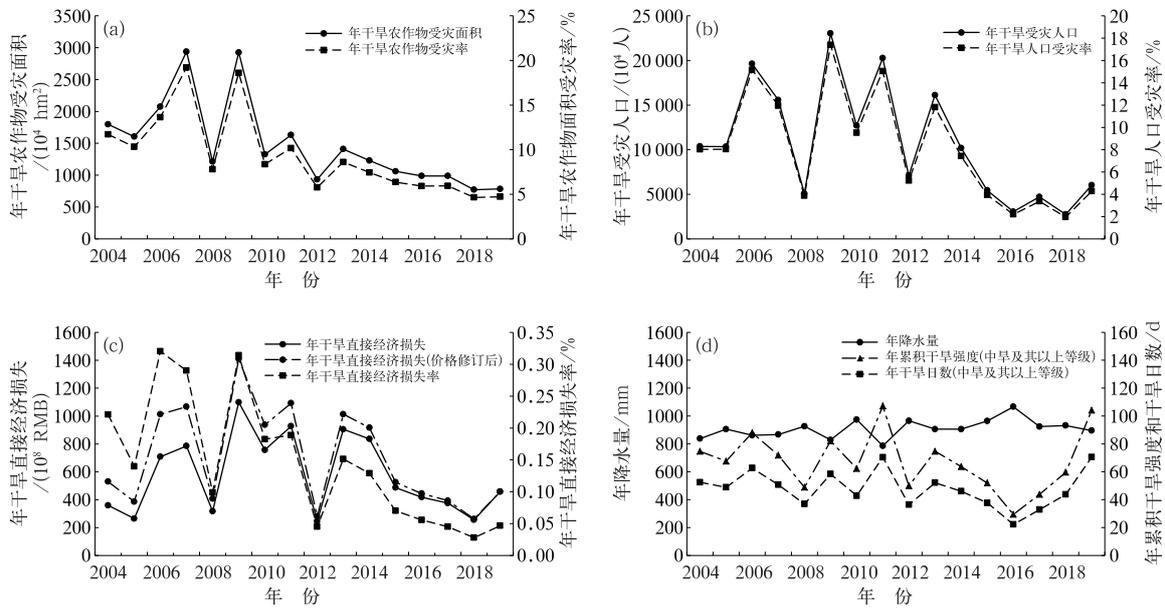


图 1 2004—2019 年全国干旱(a)农作物受灾面积及受灾率,(b)受灾人口及受灾率, (c)直接经济损失及损失率和(d)干旱气象致灾因子历年变化

Fig. 1 Time series of (a) annual crop area and rate to sown area, (b) population and rate to total population, (c) direct economic losses and rate to GDP and (d) affected by drought and meteorological factors causing drought in China during 2004—2019

### 2.1.2 省级灾情特征

2004—2019 年三个承灾体灾损指标的多年平均年值,如:年干旱农作物受灾面积、受灾人口和直接经济损失之间、各灾损率之间空间相关显著。受各省份播种面积、人口和地方生产总值基数的影响,绝对损失量与相对损失量在空间分布上又存在差异。年干旱农作物受灾面积,内蒙古、黑龙江最多,超过  $150 \times 10^4 \text{ hm}^2$ ,存在南北两个主要干旱区,北方旱区广,涉及东北地区及内蒙古、华北地区的山西、河北、河南、山东、西北地区的甘肃、陕西等地,南方地区则以云南受灾面积最大,其次为湖北、湖南、四川。年干旱农作物受灾率以内蒙古、山西、甘肃、宁夏、辽宁较大,超过播种面积的 20%(图 2a)。年干旱受灾人口以西南地区的四川、云南、贵州及河南为最多,而受灾率则以西北地区的甘肃、宁夏、西南地区的贵州、云南及内蒙古最多,超过总人口的 15%(图 2b)。价格修订后的年直接经济损失以东北地区的吉林、黑龙江及内蒙古、云南最多,均超过 45 亿元,损失率最大的为内蒙古,其次为宁夏、吉林、贵州、云南,均超过 10%(图 2c)。图 2d 为各省干旱致灾年份,华北地区的河北、山西、山东,西南地区的四川、贵州,西北地区的陕西、甘肃及内蒙古、湖北每年均有干旱致灾损失发生。

## 2.2 不同承灾体受灾(损失)率风险评估

### 2.2.1 干旱农作物面积受灾率

干旱常常造成农作物受灾,甚至绝收,严重时直接造成粮食减产,干旱灾害对我国粮食生产具有显著的消极影响(杨艳颖等,2018)。统计年干旱农作物面积受灾率  $\geq 5\%$ 、 $\geq 10\%$  和  $\geq 20\%$  三种程度下的超越概率,根据超越概率值大小,参照表 1 划分可能性等级,空间分布见图 3。由图可见,随着受灾率严重程度的增加,各省超越概率均有减小,低可能性等级范围增加,高可能性等级范围减少。受灾率  $\geq 5\%$  程度时,仅福建、上海发生的可能性为低等级,京津地区及河南、山东、苏皖、浙江、广东和西藏发生的可能性为中等等级,黑龙江、河北、江西、湖南、四川、重庆、贵州、广西、海南以及新疆发生可能性较高,东北地区中南部、西北地区中东部省份及内蒙古、山西、湖北、云南等地超越概率在 0.76~0.99,发生可能性高(图 3a)。受灾率  $\geq 10\%$  的程度时,发生可能性为低等级的省份增至 12 个,大多数省份的可能性等级较受灾率  $\geq 5\%$  程度时降低一个等级,内蒙古、山西、甘肃超越概率均超过 0.8,为高可能性等级(图 3b)。受灾率  $\geq 20\%$  程度时的可能性等级,有 71% 的省份属于低级,部分省超越概率甚至降为 0,而内蒙古、山西、宁夏、甘肃超越概率超过 0.5,发生可能性达较高等级(图 3c)。三种受灾损失程度下,

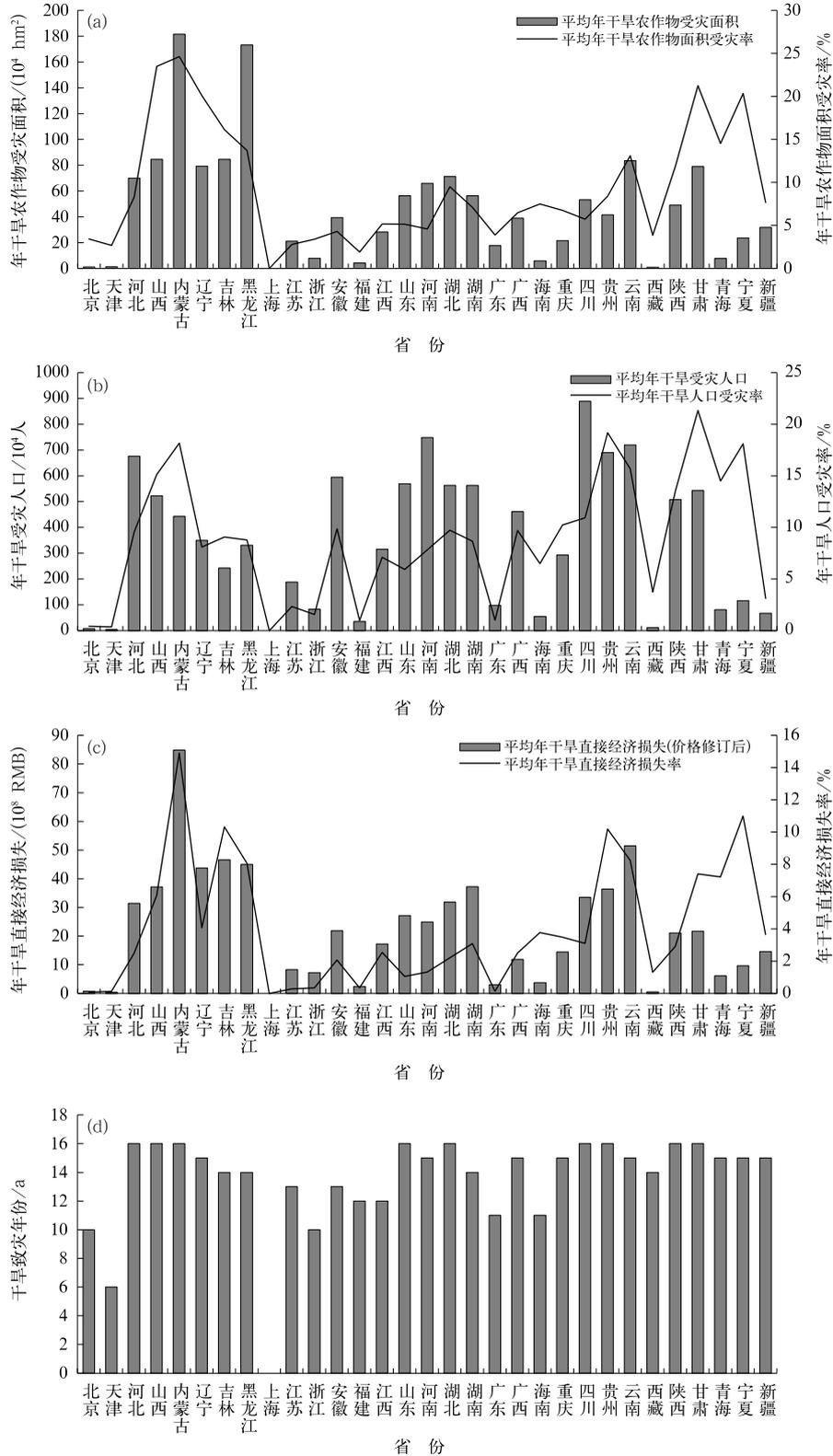


图 2 2004—2019 年 31 个省份多年平均干旱(a)农作物受灾面积及受灾率, (b)受灾人口及受灾率,(c)直接经济损失及损失率和(d)干旱致灾年数  
 Fig. 2 Annul (a) crop area and rate to sown area, (b) population and rate to total population, (c) direct economic losses and rate to GDP and (d) number of years affected by drought in 31 provinces averaged during 2004—2019

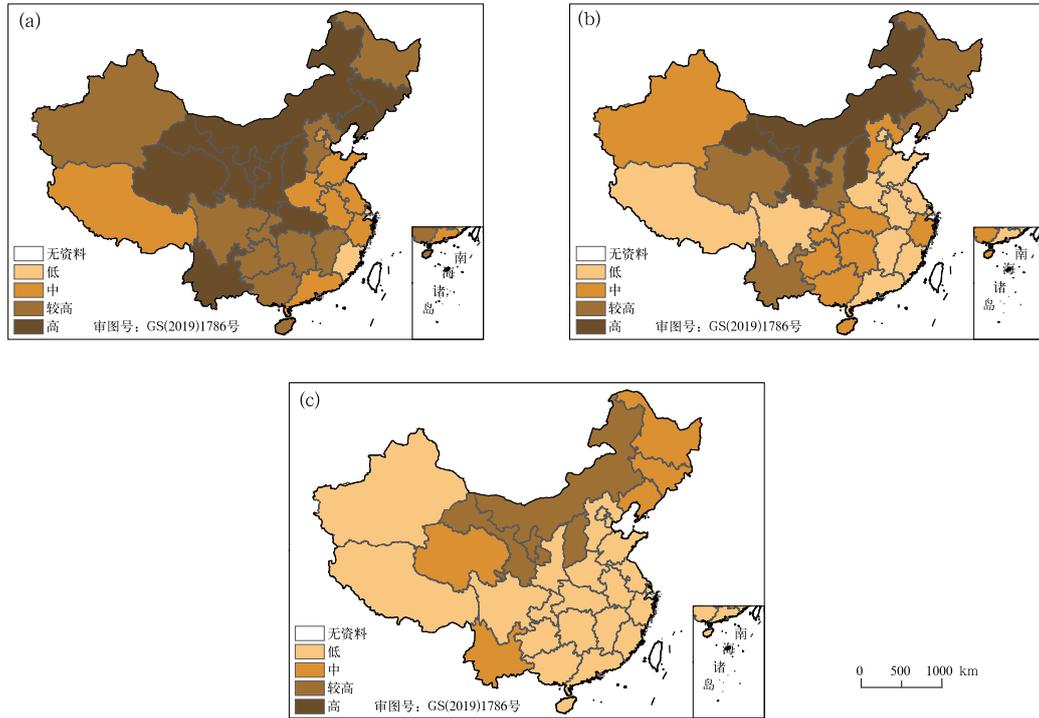


图 3 不同年干旱农作物面积受灾率水平下, (a)  $\geq 5\%$ , (b)  $\geq 10\%$ , (c)  $\geq 20\%$  超越概率可能性等级分布  
 Fig. 3 Distributions of possibility grades evaluated by exceeding probability under conditions with annual drought-affected crop area rate greater than or equal to (a) 5%, (b) 10% and (c) 20% in China

内蒙古超越概率均为全国最高。

统计 5 年、10 年、20 年一遇水平下年干旱农作物面积受灾率, 根据值的大小, 参照表 2 进行严重程度划分, 空间分布见图 4。随重现期时长的增加, 各省受灾率也逐渐增大, 轻灾区缩小, 重灾区扩大。5 年一遇水平下, 轻灾至重灾各等级的省份比例为 6%、26%、39% 和 29%, 重灾区分布在东北三省、西北地区中部及内蒙古、山西、云南等地, 受灾率为 24.0%~39.6% (图 4a)。10 年一遇水平下, 较重、重灾范围明显增加, 超过全国省份的 90%, 陕西、重庆、贵州、海南由较重转为重灾, 辽宁受灾率最大接近 50% (图 4b)。20 年一遇水平下, 重灾省份超过全国省份的 58%, 主要分布在东北三省、西北地区、西南地区东部及内蒙古、山西、湖北、湖南、浙江、海南等地, 山西、内蒙古、吉林、辽宁受灾率超过 50% (图 4c)。三种重现期水平下, 辽宁受灾率均为全国最大。

### 2.2.2 干旱人口受灾率

干旱发生对社会有影响, 严重时会对人们的正常生活造成困难甚至生存造成威胁。统计年干旱人口受灾率  $\geq 10\%$ 、 $\geq 20\%$  和  $\geq 30\%$  三种程度下的超越概率, 可能性等级空间分布见图 5。受灾率  $\geq 10\%$  的情况下, 京津地区、山东及其以南的沿海省

份和新疆、西藏发生的可能性低, 东北三省、华中各省及河北、安徽、江西、广西、海南发生的可能性为中等等级, 西南地区东部、西北地区中东部省份及山西、内蒙古则为较高、高可能性等级, 其中甘肃、内蒙古、宁夏超越概率超过 0.75 (图 5a)。受灾率  $\geq 20\%$  的情况下, 各省的超越概率均明显减少, 发生的可能性降低, 西北地区中东部、西南地区东部及山西、内蒙古等地为中等可能性等级, 甘肃超越概率最大, 为较高可能性等级 (图 5b)。受灾率  $\geq 30\%$  的情况下, 各省均少有发生, 其中有 18 个省份概率为 0, 仅贵州和甘肃发生的可能性达中等等级 (图 5c)。三种程度下, 上海、北京、天津、浙江、广东超越概率均为 0。

统计 5 年、10 年、20 年一遇水平下年干旱人口受灾率, 严重等级空间分布见图 6。5 年一遇水平下, 轻灾分布在三个区域: 京津地区、江苏至广东等沿海省份、新疆和西藏, 中灾区域集中在东北三省、华中地区及河北、山东、江西和海南, 其余省份为较重灾和重灾, 贵州、甘肃年干旱人口受灾率超过 35% (图 6a)。10 年一遇水平下, 各省年干旱人口受灾率均有所增加, 较重灾和重灾省份增多, 西南地区东部省份及甘肃、内蒙古为重灾区 (图 6b)。20 年一遇水平下, 较重灾和重灾范围进一步扩大, 山西、陕

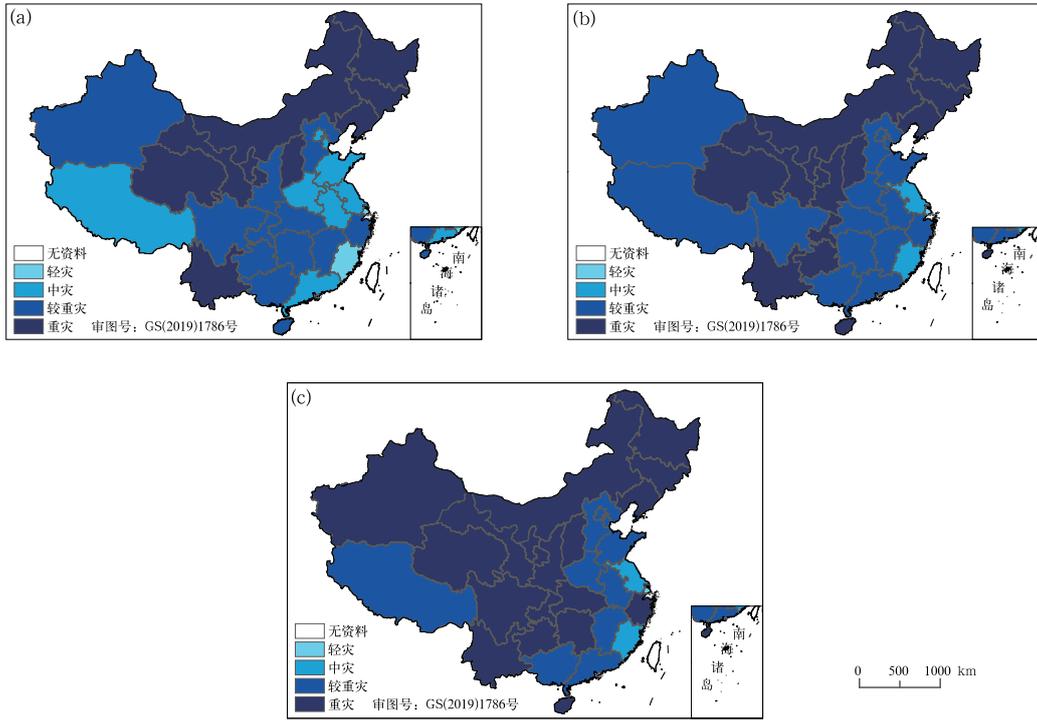


图 4 不同重现期水平下, (a) 5 年, (b) 10 年, (c) 20 年一遇年干旱农作物面积受灾率严重等级分布  
 Fig. 4 Grades distribution of annual drought-affected crop area rate under conditions of (a) 5-year, (b) 10-year and (c) 20-year return periods in China

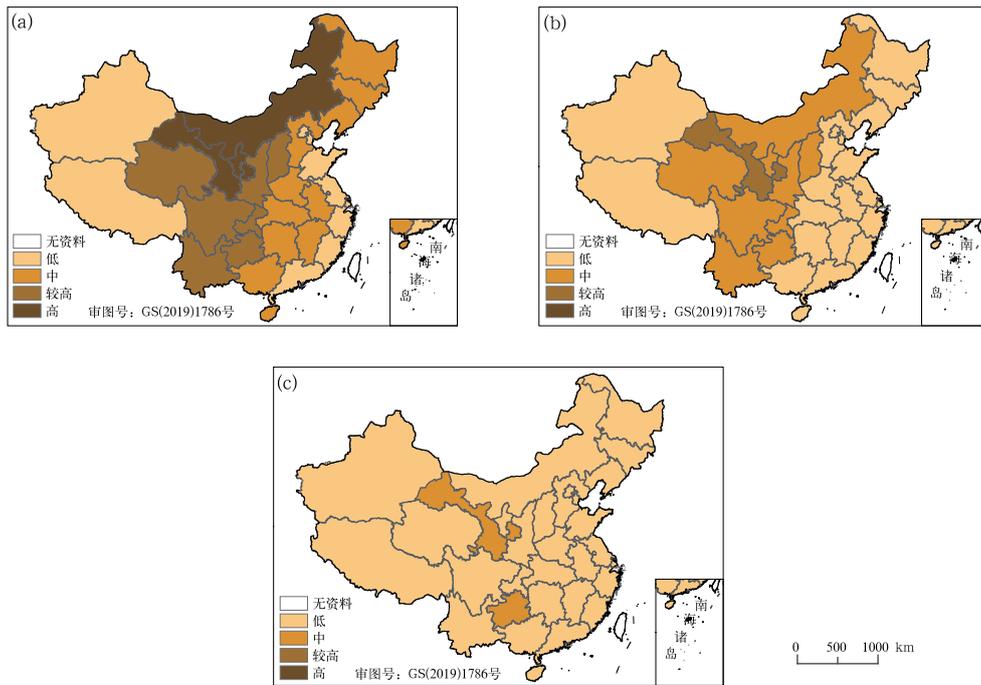


图 5 不同年干旱人口受灾率水平下, (a)  $\geq 10\%$ , (b)  $\geq 20\%$ , (c)  $\geq 30\%$  超越概率可能性等级分布  
 Fig. 5 Distributions of possibility grades evaluated by exceeding probability under conditions with annual population affected rate by drought greater than or equal to (a) 10%, (b) 20% and (c) 30% in China

西、青海、安徽提升为重灾程度, 甘肃、重庆、贵州年干旱人口受灾率超过 50% (图 6c)。三种重现期水平下, 贵州年干旱人口受灾率均为全国最大。

### 2.2.3 干旱直接经济损失率风险评估

干旱影响社会各个行业, 极易造成较大损失, 不利社会可持续发展。统计年干旱直接经济损失率

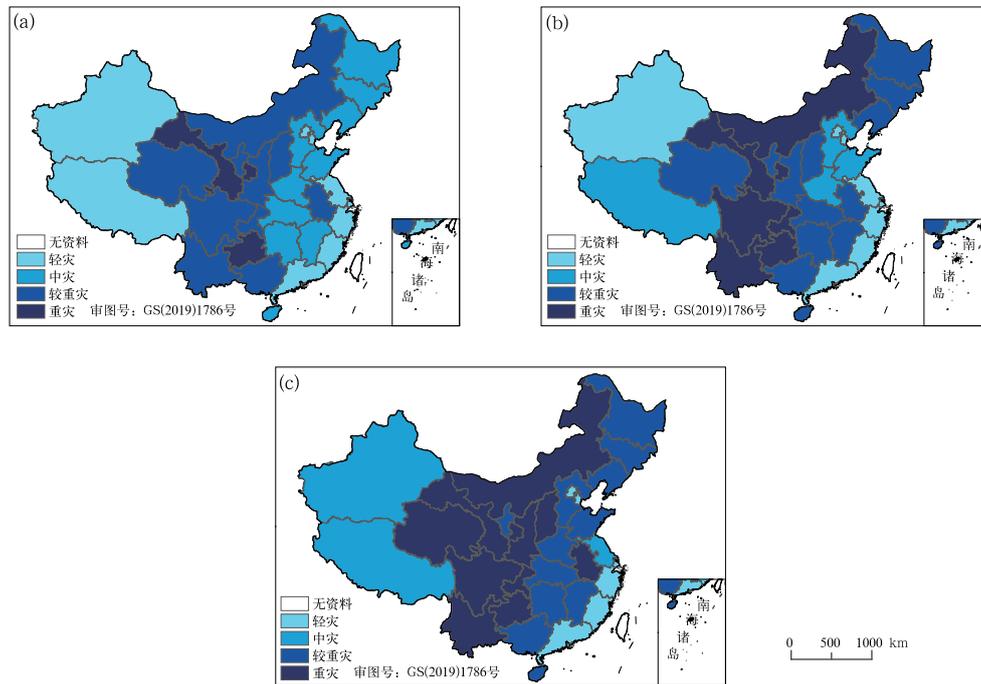


图 6 不同重现期水平下, (a) 5 年, (b) 10 年, (c) 20 年一遇年干旱人口受灾率严重等级分布

Fig. 6 Grades distribution of annual drought-affected population rate under conditions of (a) 5-year, (b) 10-year and (c) 20-year return periods in China

$\geq 0.1\%$ 、 $\geq 0.5\%$ 和 $\geq 1\%$ 三种程度下的超越概率,可能性等级空间分布见图 7。随着干旱直接经济损失率程度的增加,各省超越概率逐渐减小。当损失率 $\geq 0.1\%$ 时,有 22 个省份发生的可能性为较高及高等级,其中有 12 个省份为高等级,集中在东北三省、西北地区中部、西南地区东部省份及内蒙古、山西;山东和河南发生的可能性为中等等级;京津地区和江苏至广东等沿海省份发生的可能性小,为低等级(图 7a),一方面原因是由于沿海地区气候湿润,干旱发生少,另一方面是抗旱能力强,比如京津地区,为保障用水安全,可进行跨流域调水。损失率 $\geq 0.5\%$ 时,有两个区域发生的可能性较高,一是黑龙江、吉林、内蒙古、宁夏,另一个是贵州、云南,西北地区中部及山西、重庆、海南发生的可能性为中等等级(图 7b)。当损失率 $\geq 1\%$ 时,各省超越概率均进一步减小,无高、较高可能性等级的省份出现,黑龙江、吉林、内蒙古、宁夏、贵州、云南发生的可能性为中等等级,其余省份发生的可能性低,有 19 个省份超越概率为 0(图 7c)。三种直接经济损失率水平下,内蒙古超越概率均为全国最大,上海、北京、天津、广东则最小为 0。

统计 5 年、10 年、20 年一遇水平下的年干旱直接经济损失率,严重等级空间分布见图 8。各省随着重现期时长的增加,直接经济损失率逐渐增大,严

重程度随之增加。5 年一遇水平下,损失率为较重和重等级的范围涉及 12 个省份,主要集中在南北两个区域,北方区域为东北三省及内蒙古、山西、甘肃、宁夏、青海,南方区域为云南、贵州和重庆,内蒙古年直接经济损失率最大为 1.7%;其余为中灾和轻灾程度,京津地区以及江苏至广东等沿海省份为轻灾(图 8a)。10 年一遇水平下,损失率达较重和重等级的省份增至 15 个,集中在东北三省、西北地区中西部、西南地区东部及内蒙古、山西、湖南、海南等地;轻灾范围缩小,分布在京津地区及江苏、上海、广东(图 8b)。20 年一遇水平下,达较重和重等级的省份增至 19 个,范围向西和向东扩展,重灾省份有 12 个,涉及东北三省、西北地区中部、西南地区东部省份及内蒙古、海南;中灾范围减小(图 8c)。贵州年直接经济损失率在 10 年和 20 年一遇水平下均为最大,分别达 2.3%和 2.6%。

### 2.3 讨论

杨艳颖等(2018)分析的中国年农作物干旱受灾面积 1949—2016 年平均空间格局与本文相比有明显差异,超过  $133.3 \times 10^4 \text{ hm}^2$  的省份集中在山东、河南、河北、黑龙江、内蒙古和山西等省份,而 2004—2019 年平均仅内蒙古、黑龙江两省份超过,且此时段全国干旱农作物受灾总体处于 1949 以

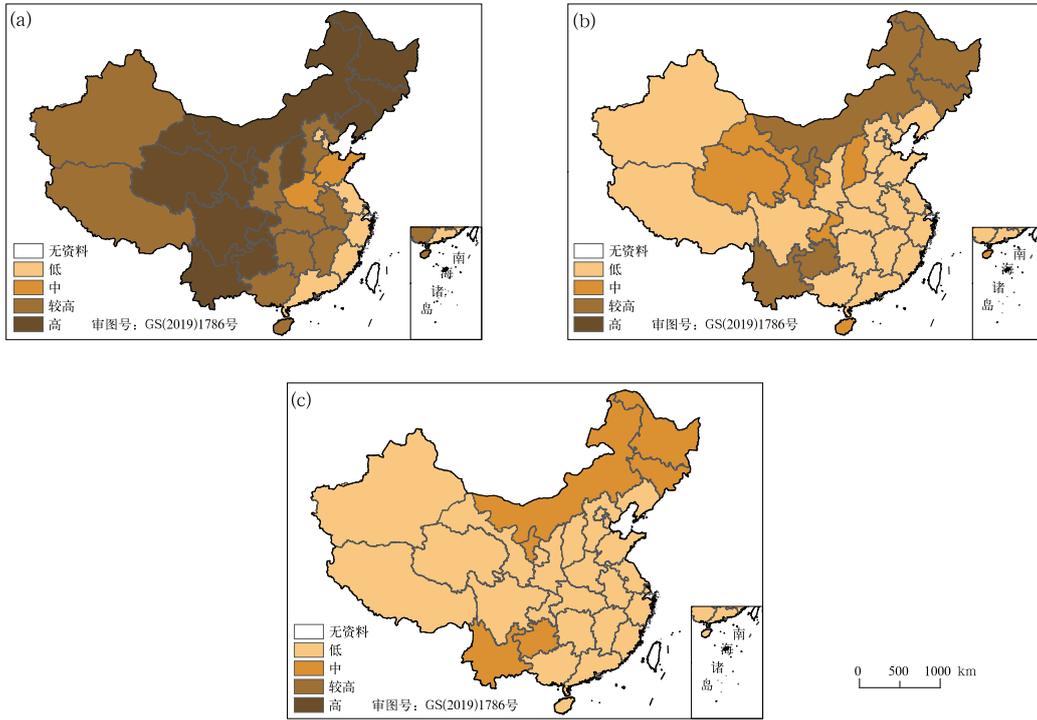


图 7 不同年干旱直接经济损失率水平下, (a)  $\geq 0.1\%$ , (b)  $\geq 0.5\%$ , (c)  $\geq 1\%$  超越概率可能性等级分布  
 Fig. 7 Distributions of possibility grades evaluated by exceeding probability under conditions with annual drought-affected direct economic loss rate greater than or equal to (a) 0.1%, (b) 0.5% and (c) 1% in China

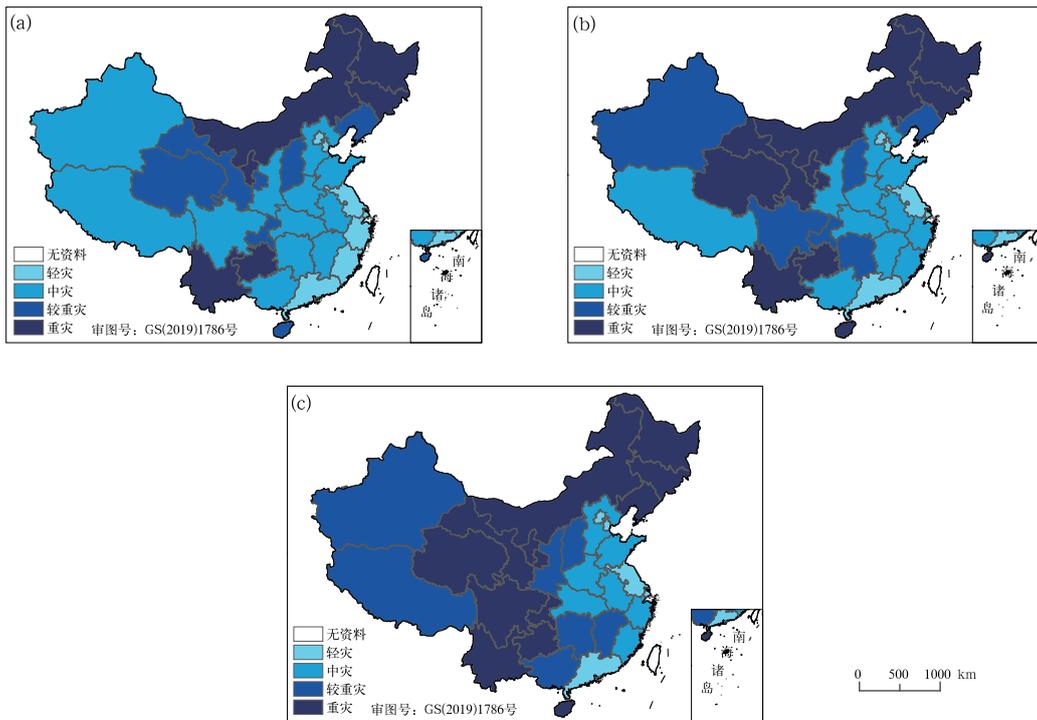


图 8 不同重现期水平下, (a) 5 年, (b) 10 年, (c) 20 年一遇年干旱直接经济损失率严重等级分布  
 Fig. 8 Grades distribution of annual drought-affected direct economic loss rate under conditions of (a) 5-year, (b) 10-year and (c) 20-year return periods in China

来的第三个波动下降阶段(杨艳颖等, 2018; 赵海燕等, 2021), 基于此时段开展的干旱农作物面积受灾

率风险格局会具有一定的时期适用性。

选择年降水量、年累积干旱强度和年干旱日数

为年尺度干旱气象致灾因子指标,探讨其变化与干旱灾损率的关系。这里累积干旱强度定义为某时段内气象干旱指数 MCI 达中旱及其以上等级的绝对值的和,干旱日数为满足这个条件的日数(廖要明和张存杰,2017)。2004—2019 年,全国区域平均年降水量总体呈现增加趋势,增加速率为 58.6 mm/10 a (图 1d),与年干旱不同承灾体灾损率呈反相关,相关系数分别为-0.6、-0.7、-0.6,均通过 0.05 的显著性水平检验。2004 年以来,年累积干旱强度和干旱日数均呈减少趋势(图 1d)。干旱致灾气象条件减弱为各类承灾体干旱损失减少的主要原因之一。近些年来,随着社会经济发展及各级部门防灾减灾重视程度和干旱应对措施加强,比如 2004—2019 年全国灌区有效灌溉面积、水库数及水库容量均呈显著增加趋势,线性增加幅度分别为  $493.7 \times 10^3 \text{ hm}^2/\text{a}$ 、1172 座/a、258.1 亿  $\text{m}^3/\text{a}$ ,使得全国因干旱造成的损失呈现较为明显的减少。

2011—2019 年与 2004—2010 年两时段平均值相比(图 9),不同承灾体的干旱灾损率大多数省份均减少,仅个别省份的部分灾损率指标有增加,如安徽的农作物面积和人口受灾率、河南和江苏的人口受灾率、浙江的农作物面积受灾率及湖北的三个灾损率。造成干旱灾损率变化的因子各地有所不

同,与干旱气象致灾因子、极端干旱出现的时段、抗旱能力变化等均有关系。2011—2019 年共有 26 个省份年降水量增加,其中有 17 个省份的年累积干旱强度和干旱日数减少,总体对减少干旱损失有利,有 9 个省份年累积干旱强度和干旱日数有增加,灾损率变化却有增有减,比如安徽、湖北、江苏个别灾损率指标呈现增加,主要原因是后一时段中这些地方出现了极端干旱导致部分灾损率指标为 2004 年以来最大,如:安徽 2013 年作物受灾率、直接经济损失率和 2011 年人口受灾率,湖北 2013 年灾损率、江苏 2011 年人口受灾率和直接经济损失率等;河南、辽宁、山东、西藏、云南后一研究时段年降水量减少,年累积干旱强度和干旱日数增加,导致河南人口受灾率有增加,但其他四省份由于后一时段无极端干旱损失发生或抗旱能力不断增加,致使干旱灾损率减少。

### 3 结 论

本文对 2004—2019 年中国干旱灾害损失的时空变化特征及趋势进行了探讨,并基于信息扩散方法开展不同承灾体的干旱灾损率风险评估。得出以下结论:

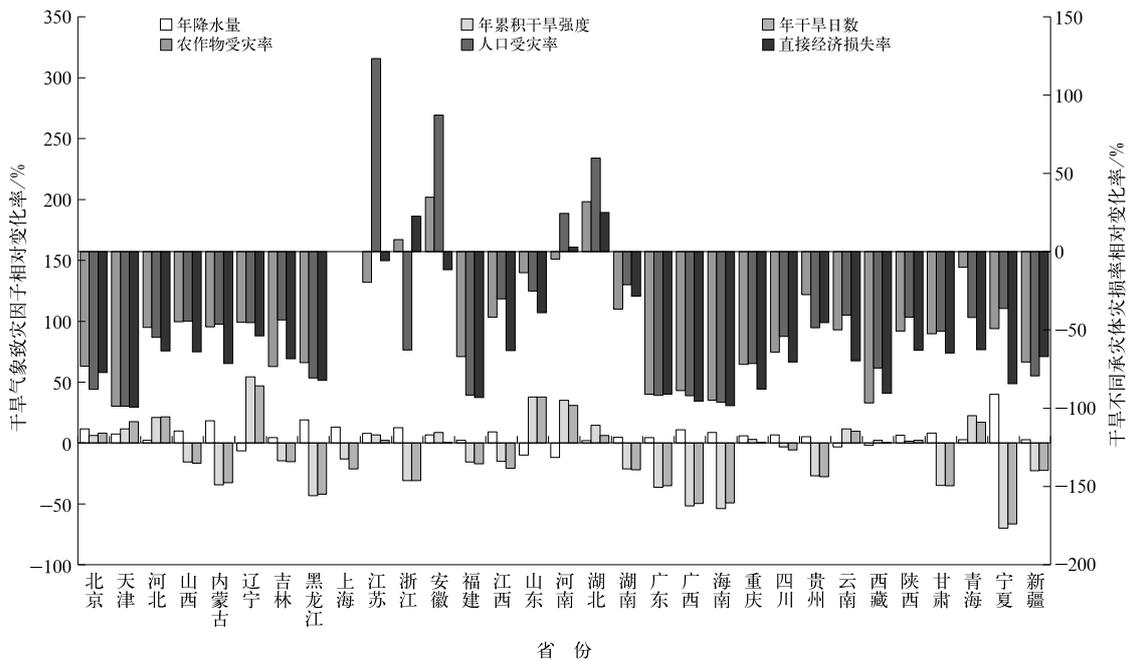


图 9 31 个省份干旱气象致灾因子与不同承灾体灾损率 2011—2019 年与 2004—2010 年两时段相对变化率

Fig. 9 Comparison of relative change rate in meteorological factors causing drought and loss rates of different hazard bearing bodies during 2011—2019 and 2004—2010 in 31 provinces

(1)2004—2019年,年干旱农作物面积和人口的受灾率、直接经济损失率三者均呈现下降趋势,减少速率分别为5.5%/10a、5.6%/10a、0.16%/10a,前两者减少趋势显著。年降水量增加、年累积干旱强度和干旱日数减少以及总体抗旱能力增强是干旱灾损率显著减少的原因。

(2)省级年干旱农作物受灾面积、受灾人口和直接经济损失之间及各灾损率之间空间相关显著,绝对和相对损失量在空间分布上存在差异。2011—2019年与2004—2010年平均值相比,大多数省份不同承灾体的灾损率均呈减少态势,与该时段年降水量平均值增加、累积干旱强度和干旱日数减弱减少等因素有关。极端干旱事件影响大,安徽、湖北、江苏等地虽年降水量增加,但因后一时段出现的极端干旱而造成损失率加大。

(3)农作物、人口、经济等不同承灾体对象的干旱风险格局存在差异。年干旱农作物受灾率 $\geq 20\%$ 程度时,仅宁夏、山西、内蒙古、甘肃发生的可能性较高,年干旱人口受灾率 $\geq 30\%$ 的情况下和直接经济损失率 $\geq 1\%$ 时,无省份发生的可能性达高、较高等级。年干旱农作物面积受灾率20年一遇水平下,重灾区分布在西北地区、西南地区东部省份及湖北、湖南、浙江、海南等地。年干旱人口受灾率20年一遇水平下,重灾区位于西北地区中东部、西南地区东部省份以及安徽、山西、内蒙古等地。年干旱直接经济损失率20年一遇水平下,重灾区集中在东北、西北地区中部、西南地区东部省份及内蒙古、海南。上述区域应着重加强干旱的风险管理能力,采取工程性和非工程性抗旱措施,减小各类承灾体脆弱性,进一步提升抗旱水平。

## 参考文献

白夏,戚晓明,杨兰,等,2017.基于信息扩散与适线法的区域农业旱灾风险评估[J].蚌埠学院学报,6(5):5-8. Bai X, Qi X M, Yang L, et al, 2017. Assessment of regional agricultural drought disaster risk based on the information diffusion theory and curve-fitting method[J]. J Bengbu Univ, 6(5): 5-8(in Chinese).

陈建杰,余锦华,2016.基于信息扩散理论的四川盆地农业旱灾风险评估[J].大气科学学报,39(5):712-720. Chen J J, Yu J H, 2016. Risk assessment of drought on agricultural land in the Sichuan Basin based on information diffusion theory[J]. Trans Atmos Sci, 39(5): 712-720(in Chinese).

高歌,黄大鹏,赵珊珊,2019.基于信息扩散方法的中国台风灾害年月尺度风险评估[J].气象,45(11):1600-1610. Gao G, Huang D P, Zhao S S, 2019. Annual and monthly risk assessment of typhoon disasters in China based on the information diffusion method[J]. Meteor Mon, 45(11): 1600-1610(in Chinese).

高睿娜,王素艳,高娜,等,2021. CI 和 MCI 干旱指数在宁夏的适应性对比[J]. 干旱气象, 39(2): 185-192. Gao R N, Wang S Y, Gao N, et al, 2021. Application comparison of CI and MCI drought indexes in Ningxia[J]. J Arid Meteor, 39(2): 185-192(in Chinese).

韩兰英,张强,贾建英,等,2019. 气候变暖背景下中国干旱强度、频次和持续时间及其南北差异性[J]. 中国沙漠, 39(5): 1-10. Han L Y, Zhang Q, Jia J Y, et al, 2019. Drought severity, frequency, duration and regional differences in China[J]. J Desert Res, 39(5): 1-10(in Chinese).

黄崇福,2001. 自然灾害风险分析[M]. 北京:北京师范大学出版社. Huang C F, 2001. Risk Assessment of Natural Disaster[M]. Beijing: Beijing Normal University Publishing(in Chinese).

贾慧聪,王静爱,潘东华,等,2011. 基于 EPIC 模型 的黄淮海玉米旱灾风险评估[J]. 地理学报, 66(5): 643-652. Jia H C, Wang J A, Pan D H, et al, 2011. Maize drought disaster risk assessment based on EPIC model: a case study of maize region in Northern China[J]. Acta Geogr Sin, 66(5): 643-652(in Chinese).

江懿,陈磊,陈娟,等,2016. 安徽省农业旱灾风险评估与区划[J]. 中国农学通报, 32(5): 178-183. Jiang Y, Chen L, Chen J, et al, 2016. Assessment and regionalization of agricultural drought disasters in Anhui Province[J]. Chin Agri Sci Bull, 32(5): 178-183(in Chinese).

李孟刚,周长生,连连,2017. 基于熵信息扩散理论的中国农业水旱灾害风险评估[J]. 自然资源学报, 32(4): 620-631. Li M G, Zhou C S, Lian L, 2017. Agricultural flood and drought risk assessment in China based on entropy information diffusion theory[J]. J Nat Resour, 32(4): 620-631(in Chinese).

李娜,霍治国,钱锦霞,等,2021. 山西省干旱灾害风险评估与区划[J]. 中国农业资源与区划, 42(5): 100-107. Li N, Huo Z G, Qian J X, et al, 2021. Risk analysis and zoning of drought disaster in Shanxi[J]. Chin J Agric Resour Reg Plan, 42(5): 100-107(in Chinese).

廖要明,张存杰,2017. 基于 MCI 的中国干旱时空分布及灾情变化特征[J]. 气象, 43(11): 1402-1409. Liao Y M, Zhang C J, 2017. Spatio-temporal distribution characteristics and disaster change of drought in China based on meteorological drought composite index[J]. Meteor Mon, 43(11): 1402-1409(in Chinese).

刘亚彬,刘黎明,许迪,等,2010. 基于信息扩散理论的中国粮食主产区水旱灾害风险评估[J]. 农业工程学报, 26(8): 1-7. Liu Y B, Liu L M, Xu D, et al, 2010. Risk assessment of flood and drought in major grain-producing areas based on information diffusion theory[J]. Trans CSAE, 26(8): 1-7(in Chinese).

屈艳萍,高辉,吕娟,等,2015. 基于区域灾害系统论的中国农业旱灾风险评估[J]. 水利学报, 46(8): 908-917. Qu Y P, Gao H, Lü J, et al, 2015. Agricultural drought disaster risk assessment in China based on the regional disaster system theory[J]. J Hydraul Eng, 46(8): 908-917(in Chinese).

孙可可,陈进,许继军,等,2013. 基于 EPIC 模型的云南元谋水稻春季旱灾风险评估方法[J]. 水利学报, 44(11): 1326-1332. Sun K K, Chen J, Xu J J, et al, 2013. Study on the assessment method of spring drought risk for rice in Yuanmou County, Yunnan Province based on the EPIC model[J]. J Hydraul Eng, 44(11):

- 1326-1332(in Chinese).
- 陶然,张珂,2020.基于PDSI的1982—2015年我国气象干旱特征及时空变化分析[J].水资源保护,36(5):50-56. Tao R,Zhang K,2020. PDSI-based analysis of characteristics and spatiotemporal changes of meteorological drought in China from 1982 to 2015 [J]. Water Resour Prot,36(5):50-56(in Chinese).
- 王莺,张强,韩兰英,2016.基于信息扩散理论的中国南方水旱灾害风险特征[J].干旱气象,34(6):919-926. Wang Y,Zhang Q,Han L Y,2016. Risk characteristics of flood and drought disaster in southern China based on the information diffusion theory[J]. J Arid Meteor,34(6):919-926(in Chinese).
- 徐洋,2013.黑龙江省干旱灾害经济损失风险评估与分析[J].哈尔滨师范大学自然科学学报,29(2):80-85. Xu Y,2013. Risk assessment and zoning of drought economic losses in Heilongjiang Province[J]. Nat Sci J Harbin Normal Univ,29(2):80-85(in Chinese).
- 杨帆,陈波,张超,等,2015.新气象干旱综合监测指数(MCI)在黔东南本地化应用[J].高原山地气象研究,35(3):56-61. Yang F, Chen B,Zhang C,et al,2015. Application of the new compound drought index in southeast Guizhou Province[J]. Plateau Mountain Meteor Res,35(3):56-61(in Chinese).
- 杨艳颖,毛克彪,韩秀珍,等,2018.1949-2016年中国旱灾规律及其对粮食产量的影响[J].中国农业信息,30(5):76-90. Yang Y Y, Mao K B,Han X Z,et al,2018. Characteristics of drought disaster and its impact on grain production in China from 1949 to 2016[J]. China Agri Inform,30(5):76-90(in Chinese).
- 张存杰,王胜,宋艳玲,等,2014.我国北方地区冬小麦干旱灾害风险评估[J].干旱气象,32(6):883-893. Zhang C J,Wang S,Song Y L,et al,2014. Research of drought risk assessment for winter wheat in Northern China[J]. J Arid Meteor,32(6):883-893(in Chinese).
- 张竟竟,2012.基于信息扩散理论的河南省农业旱灾风险评估[J].资源科学,34(2):280-286. Zhang J J,2012. Assessment of risks of agricultural drought disasters in Henan Province based on the information diffusion theory[J]. Resour Sci,34(2):280-286(in Chinese).
- 张棋,许德合,丁严,2021.基于SPEI和时空立体的中国近40年干旱时空模式挖掘[J].干旱地区农业研究,39(3):194-201. Zhang Q,Xu D H,Ding Y,2021. Spatio-temporal pattern mining of the last 40 years of drought in China based on SPEI index and spatio-temporal cube[J]. Agri Res Arid Areas,39(3):194-201(in Chinese).
- 张强,韩兰英,郝小翠,等,2015.气候变化对中国农业旱灾损失率的影响及其南北区域差异性[J].气象学报,73(6):1092-1103. Zhang Q,Han L Y,Hao X C,et al,2015. On the impact of the climate change on the agricultural disaster loss caused by drought in China and the regional differences between the North and the South[J]. Acta Meteor Sin,73(6):1092-1103(in Chinese).
- 张强,韩兰英,王胜,等,2018.影响南方农业干旱灾损率的气候要素关键期特征[J].科学通报,63(23):2378-2392. Zhang Q,Han L Y,Wang S,et al,2018. The affected characteristic of key period's climate factor on the agricultural disaster loss caused by drought in the South China[J]. Chin Sci Bull,63(23):2378-2392(in Chinese).
- 赵海燕,张文千,邹旭恺,等,2021.气候变化背景下中国农业干旱时空变化特征分析[J].中国农业气象,42(1):69-79. Zhao H Y,Zhang W Q,Zou X K,et al,2021. Temporal and spatial characteristics of drought in China under climate change[J]. Chin J Agrometeorol,42(1):69-79(in Chinese).
- 赵佳琪,张强,朱秀迪,等,2021.中国旱灾风险定量评估[J].生态学报,41(3):1021-1031. Zhao J Q,Zhang Q,Zhu X D,et al,2021. Quantitative assessment of drought risk in China[J]. Acta Ecol Sin,41(3):1021-1031(in Chinese).
- 郑国光,2019.中国气候[M].北京:气象出版社:197. Zheng G G,2019. Climate of China [M]. Beijing: China Meteorological Press:197(in Chinese).
- 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局,中国国家标准化管理委员会,2017.气象干旱等级:GB/T 20481—2017[S].北京:中国标准出版社. General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People's Republic of China, Standardization Administration of the People's Republic of China,2017. Grades of meteorological drought:GB/T 20481—2017 [S]. Beijing:Standards Press of China(in Chinese).
- Jiang S Z,Yang R X,Cui N B,et al,2018. Analysis of drought vulnerability characteristics and risk assessment based on information distribution and diffusion in Southwest China[J]. Atmosphere,9(7):239.
- Niu K J,Hu Q F,Zhao L,et al,2019. Analysis of agricultural drought risk based on information distribution and diffusion methods in the main grain production areas of China[J]. Atmosphere,10(12):764.
- O'Gorman P A,Schneider T,2009. The physical basis for increases in precipitation extremes in simulations of 21st-Century climate change[J]. Proc Natl Acad Sci USA,106(35):14773-14777.
- Sen P K,1968. Estimates of the regression coefficient based on Kendall's Tau[J]. J Am Stat Assoc,63(324):1379-1389.
- Theil H,1950a. A rank-invariant method of linear and polynomial regression analysis,I[J]. Proceedings of the Koninklijke Nederlandse Akademie Wetenschappen,Ser A Mathemat Sci,53:386-392.
- Theil H,1950b. A rank-invariant method of linear and polynomial regression analysis,II[J]. Proceedings of the Koninklijke Nederlandse Akademie Wetenschappen,Ser A Mathemat Sci,53:512-525.
- Theil H,1950c. A rank-invariant method of linear and polynomial regression analysis,III[J]. Proceedings of the Koninklijke Nederlandse Akademie Wetenschappen,Ser A Mathemat Sci,53:1397-1412.
- Yu X B,Yu X R,Li C L,et al,2020. Information diffusion-based risk assessment of natural disasters along the Silk Road Economic Belt in China[J]. J Clean Prod,244:118744.

(本文责编:俞卫平)