

# 自然气象灾害对粮食安全的影响评估

## ——以长江沿线11省份为例

杨兆前

兰州大学资源环境学院, 甘肃 兰州

收稿日期: 2024年1月12日; 录用日期: 2024年2月22日; 发布日期: 2024年2月29日

### 摘要

随着气象灾害的频发, 粮食产量会得到影响。因此本文以长江沿线11省份为研究区域, 利用灰色关联度模型来辨析不同省份影响粮食安全的主要气象灾害和信息扩散模型来评估各省份不同气象灾害发生的概率分布, 结果表明气象灾害波动性较大且具有明显的年际变化特征, 90年代到21世纪初期受灾率较高, 但从时间尺度上看受灾率整体处于下降趋势, 粮食总产和单产整体处于上升的趋势; 大部分省份的水灾、旱灾是影响粮食产量的最主要的气象灾害; 各省受灾面积进行风险分析可得到旱灾和洪涝的成灾风险概率高于风雹和冷冻, 且水灾的受灾风险高的区域集中在整个长江沿线区域, 旱灾受灾风险高的区域主要集中在长江中下游, 而风雹受灾风险概率高的区域主要集中在西部一些地形环境较差的省份, 如青海省, 冷冻在湖北省发生的风险概率高。

### 关键词

长江沿线, 气象灾害, 粮食安全, 灰色关联, 信息扩散

# Impact Assessment of Natural Meteorological Disasters on Food Security

## —A Case Study of 11 Provinces along the Yangtze River

Zhaoqian Yang

College of Earth and Environmental Sciences, Lanzhou University, Lanzhou Gansu

Received: Jan. 12<sup>th</sup>, 2024; accepted: Feb. 22<sup>nd</sup>, 2024; published: Feb. 29<sup>th</sup>, 2024

### Abstract

With the frequent occurrence of meteorological disasters, food production will be affected. There-

fore, this paper takes 11 provinces along the Yangtze River as the study area, and uses the gray correlation model to identify the main meteorological disasters affecting food security in different provinces and the information diffusion model to assess the probability distribution of the occurrence of different meteorological disasters in each province, and the results show that the meteorological disasters are more volatile and have obvious inter-annual change characteristics, and the disaster rate is higher from the 90's to the early part of the 21st century, however, the time scale shows an overall downward trend in disaster rates and an overall upward trend in total food production and yields. Floods and droughts are the most important meteorological hazards affecting grain production in the Yangtze River Basin on a spatial scale. The areas of high probability of flood risk are concentrated along most of the entire Yangtze River. Regions with high probability of drought disaster risk are mainly concentrated in the middle and lower reaches of the Yangtze River, whereas regions with a high probability of wind and hail damage risk are mainly concentrated in some western provinces with poor topographic environments, such as Qinghai Province, and freezing has a high risk probability of occurring in Hubei Province.

## Keywords

Along the Yangtze River, Meteorological Disasters, Food Security, Gray Correlation, Information Diffusion

Copyright © 2024 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

## 1. 引言

目前, 粮食安全问题已成为世界关注的焦点。伴随着全球气候变暖的加剧, 极端天气会越来越多的出现, 导致气象灾害频发, 例如: 95 北美飓风、澳大利亚洪水、近年干旱事件等, 气象灾害是由各种气象现象所导致的灾害, 农业气象灾害则是指在农业生产过程中导致农作物显著减产的不利天气和异常气候的总称, 包括干旱、洪涝、风雹灾害、冷害、冻害等[1]。而气象灾害是影响粮食产量的重要因素, 会导致粮食减产以影响粮食安全。另外由于新冠肺炎疫情在全世界范围扩散, 导致世界上多个国家限制甚至停止粮食出口, 使全球粮食供应链受到极大冲击, 这一系列事件的发生, 世界各国都面临着灾害对粮食带来的影响和挑战。因此, 本文在已有理论和借鉴已有文献的基础上, 通过理论分析和实证检验来探究长江经济带各省份遭受的自然气象灾害对粮食安全的影响, 来提高长江经济带省份农业灾害防范能力, 优化农业生产管理方式, 减少灾害损失, 稳定粮食产量, 来筑牢国家粮食安全防线, 确保社会大局的稳定。

近些年, 国内学者针对气象灾害对于粮食安全的影响评估研究主要集中在自然气象灾害对粮食安全的影响评价和自然气象灾害发生的风险评估这两方面研究上。在自然气象灾害对粮食安全的影响评价上, 田知会[2]等人利用趋势线来分析 1949~2016 年我国粮食主产区旱灾变化趋势; 李晓雪[3]等人通过对 1971~2016 年中国粮食主产区各省区农作物播种面积和农作物干旱受灾面积, 计算得到各省区干旱受灾率时间序列, 采用经验模态分解法进行分解, 得到长江流域, 湖北省干旱受灾率变化分为三个时段; 杨艳颖等人[4]利用 Pearson 相关性统计分析、回归分析等方法来定性和定量地探讨干旱灾害对粮食生产的影响, 并以此得出我国粮食产量的多少和受灾面积的大小在空间上具有相关性, 粮食单产与干旱受灾面积呈负相关; Wang [5]利用差异 GMM 模型分析 1949 年~2007 年 27 省市的数据来研究气候变化对粮食的影响, 得出气候变化显著影响粮食安全, 而粮食价格对粮食安全没有影响; 朱萌[6]利用 CERES-Rice 模

型来分析吉林省东部水稻冷害的时空分布规律。并利用空间插值技术、M-K 趋势检验和突变分析的方法对吉林省东部水稻延迟型冷害和障碍型冷害的危险性指数进行时空特征的分析；在自然气象灾害发生的风险评估上，张铁等人[7]运用多元线性回归方法来构建长江流域七省市粮食减产量与农作物受灾情况的回归模型，并用主成分分析法来分析影响粮食产量的主要气象灾害，并对损害做出评估，得出粮食气象减产量与成灾面积关系密切且粮食气象减产量与总灾情显著相关；王学林[8]等人基于信息扩散理论模型对双季早稻种植区进行气象灾害风险评估得出小满寒和高温热害在大部分地区均表现为明显的高概率区；雷宏军[9]等人利用信息扩散模型对未来贵州省农业旱灾发生风险进行评估，得到贵州省未来旱灾成灾风险概率值总体上呈下降趋势。

通过对综述的文献进行分析可知当前对本课题的研究都集中于一方面的研究，利用不同方法来研究小范围区域内一种灾害对粮食作物的影响或对未来气象灾害进行风险评估。因此本文在上述研究的基础上扩大研究范围至长江沿线十一省并利用相应指标与灰色关联分析法来构建气象灾害与粮食产量之间的关系模型，来分析四种自然气象灾害——水灾、旱灾、风雹、冷冻对粮食的影响和采用信息扩散模型来评估气象灾害在未来发生的风险概率。

## 2. 数据来源与研究方法

### 2.1. 研究区域概况

长江是亚洲和中国的最大河，世界第三大河。发源于青海省唐古拉山，汇入东海，长江的干流，自西而东横贯中国中部，经青海、西藏、四川、云南、重庆、湖北、湖南、江西、安徽、江苏、上海 11 个省。长江流域呈多级阶梯性地形。流经山地、高原、丘陵和平原等地形，长江流域的年平均气温、年降水量分布不均匀，年平均气温呈东高西低、南高北低的分布趋势。在该区域内(图 1)气候状况、气象条件复杂，自然气象灾害易发生。在该区域内有耕地 2460 多万公顷，占全国耕地总面积的 1/4，而农业生产值占全国农业总产值的 40%，粮食产量也占全国的 40%，是我国重要的产粮区，近些年来随着旱涝灾害频率发生的增多，对该区域内粮食产量形成影响[10]。

### 2.2. 研究数据来源

本文主要应用的数据来源于中国国家统计局官网及相应省份的统计年鉴[11]。主要选取了青海省、西藏自治区、四川省、云南省、重庆市、湖北省、湖南省、江西省、安徽省、江苏省、上海市 11 个省市的 1978 年~2018 年粮食作物播种面积、粮食作物总产量、粮食作物单产以及旱灾、水灾、风雹、冷冻的相应的受灾面积、成灾面积等相应数据。

### 2.3. 研究方法

本文主要利用成灾率、受灾率、灾害强度指数等指标来量化气象灾害对粮食的影响程度，通过构建灰色关联分析法来对气象灾害对粮食产量的影响作动态分析。

#### 2.3.1. 研究指标

受灾率或成灾率[12] ( $M_i$ ):

$$M_i = \frac{C_i}{S_i} \times 100\% \quad (1)$$

公式中  $M_i$  表示受灾率或成灾率，即受灾面积或成灾面积与总播种面积的比值， $C_i$  表示为第  $i$  年受灾面积或成灾面积， $S_i$  表示第  $i$  年农作物种植总面积。



Figure 1. Overview map of the study area  
图 1. 研究区域概况图

### 2.3.2. 灰色关联分析法

灰色关联度分析法是一种多因素统计分析方法，分析系统中母因素与子因素的关系密切程度判断引起该系统发展的主要和次要因素[13]。具体计算步骤如下所示：

1) 建立比较数列和参考数列，本文分别以粮食总产量或粮食单产为参考数列，旱灾、水灾、风雹、冷冻的受灾率为比较数列。

2) 数据无量纲化处理，本文采用均值变换的方法，公式如下：

$$X_{i1} = X_i / \bar{X} \quad (2)$$

$X_{i1}$  表示消除量纲后的值， $X_i$  表示粮食总产或粮食单产第  $i$  年原始值， $\bar{X}$  表示该列数据的平均值。

绝对差序列处理得到  $Y_i$ ，即是比较数列与参考数列的绝对差。

3) 计算关联系数，关联系数的计算公式如下：

$$\xi_i = \frac{\Delta \min(Y_i) + k \Delta \max(Y_i)}{Y_i + k \Delta \max(Y_i)} \quad (3)$$

$\xi_i$  表示第  $i$  年的关联系数， $\Delta \min(Y_i)$  表示绝对差序列中最小值， $\Delta \max(Y_i)$  表示绝对差序列中最大值， $k$  表示分辨系数，在本文中取为 0.5， $Y_i$  表示第  $i$  年绝对差序列。

计算关联度  $r_i$ ，关联度公式如下：

$$r_i = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \xi_i \tag{4}$$

### 2.3.3. 信息扩散原理

信息扩散模型属于以历史灾情资料为依据，将样本进行集值化的一类模糊数学方法。该模型对概率分布未知、样本数量较少的自然灾害具有良好的适用性。具体步骤如下所示[14]：

设  $X$  为风险指标实际观测值的样本集合  $X = \{x_1, x_2, \dots, x_m\}$ ， $U$  为信息论域集合  $U = \{u_1, u_2, \dots, u_n\}$ ，则一个单值观测样本点：

$$f(u_j) = \frac{1}{h\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(x-u_j)^2}{2h^2}} \tag{5}$$

$h$  为扩散系数，其值与选取的观测值样本数  $m$  有关。设观察样本集合  $X$  的最小值为  $a$ ，最大值为  $b$ ，则  $h$  的计算公式为：

$$h = \begin{cases} 0.8146(b-a) & m=5 \\ 0.5690(b-a) & m=6 \\ 0.4560(b-a) & m=7 \\ 0.3860(b-a) & m=8 \\ 0.3362(b-a) & m=9 \\ 0.2986(b-a) & m=10 \\ 2.6851(b-a) & m>10 \end{cases} \tag{6}$$

令

$$C_i = \sum_{j=1}^n f_i(u_j) \tag{7}$$

则相应的模糊子集的隶属函数是

$$u_x(u_j) = \frac{f_i(u_j)}{C_i} \tag{8}$$

$u_x(u_j)$  为样本点的归一化信息分布，再令

$$Q = \sum_{j=1}^m q(u_j) \tag{9}$$

$Q$  是  $u_j$  上样本点数的总和，因此样本点落在  $u_j$  处的频率值，即概率的估计值  $p(u_j)$  为

$$P(u_j) = \frac{q(u_j)}{Q} \tag{10}$$

因此超越概率估计值  $P(u_j)$  为

$$P(u_j) = \sum_{k=j}^m p(u_k) \tag{11}$$

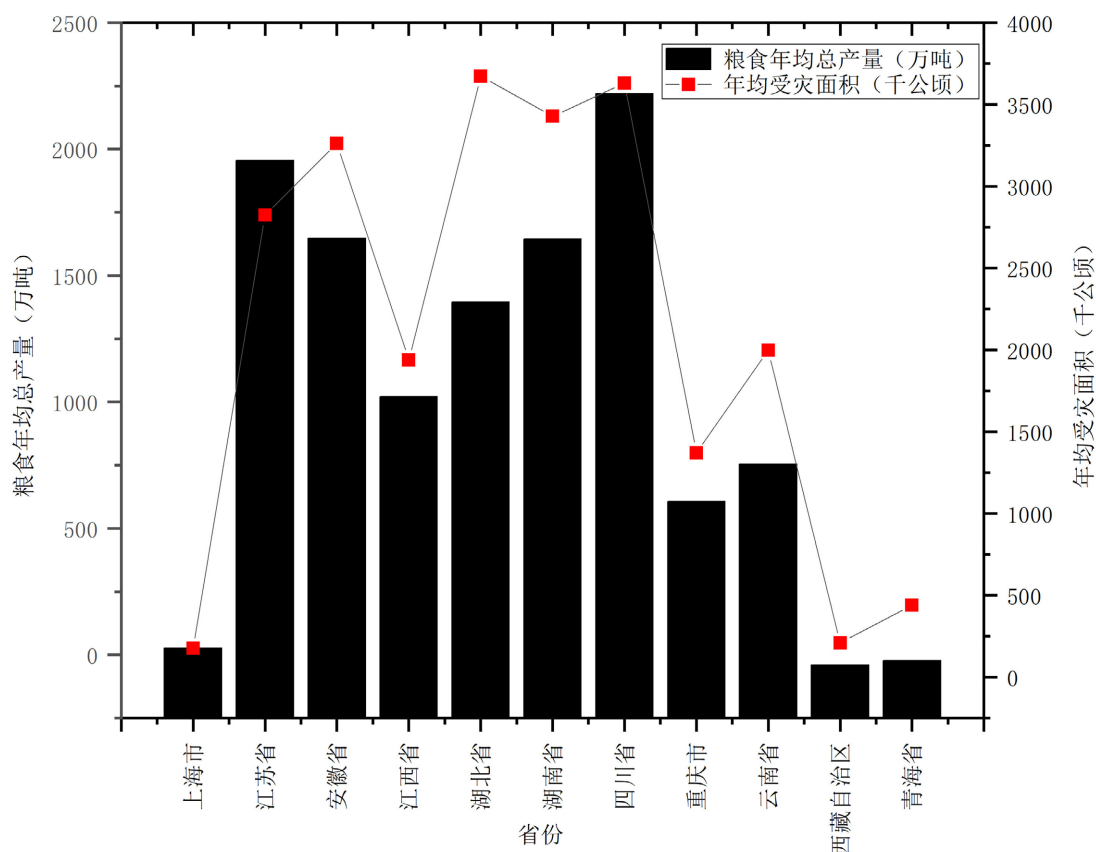
## 3. 结果分析

### 3.1. 农业气象灾害与粮食产量时空变化特征分析

#### 3.1.1. 粮食总产、受灾面积变化分析

由图 2 可知，长江沿线各省份粮食总产与受灾面积在走势上大致具有一致性，粮食产量的多少与大多数省份受灾面积具有相关性，粮食年均总量高的省份，年均受灾面积也较大，且年均受灾面积大和粮

食年均总产量较多的省份主要集中在湖北省、湖南省、四川省、安徽省、江苏省五省，该五省地势条件较好，是农业大省。



**Figure 2.** Distribution of total grain production and affected area by provinces in the Yangtze River basin  
**图 2.** 长江流域各省粮食总产、受灾面积分布

### 3.1.2. 不同气象灾害的受灾率

由图 3 可知，长江沿线 11 省份的旱灾受灾率和水灾受灾率较大，且波动较为明显，风雹、冷冻的受灾率变化不是特别明显，受灾率基本在 5% 以下，旱灾和洪涝是影响长江流域粮食安全的主要灾害。旱灾受灾率在多数年份高于其他气象灾害的受灾率，但在某些年份如 1991 年、1998 年、2009 年长江沿线水灾受灾率远远高于其他气象灾害的受灾率。在 2008 年，冷冻受灾率远远高于其他三种气象灾害的受灾率，此次冰冻灾害强度受灾接近 15%，是由于在 2008 年 1 月中旬至 2 月初，我国南方广大地区遭受 50 年一遇大范围低温雨雪冰冻天气[15]。

### 3.2. 粮食产量与气象灾害的关联分析

由表 1 可知，从整体来看四种气象灾害受灾率与总产的灰色关联度大致位于 0.4-0.8 之间，说明发生的四种自然灾害对粮食总产的影响都较大，大部分省份的粮食总产与受灾率的灰色关联度排序最高的是水灾和旱灾，这表明水灾和旱灾是对长江沿线各省粮食安全影响最严重的气象灾害，湖北省、湖南省、重庆市、四川省、云南省、青海省、西藏自治区关联度最大的都为旱灾，江西省、安徽省、上海市关联度最大的都为水灾，江苏省关联度最大的为风雹，青海省风雹关联度大于水灾，排名第二，风雹灾害成为该省份的主要气象灾害，原因可能是长江流域处于季风气候区，且江苏沿海，容易受到台风影响，



且往往强降水会伴随着风雹，强降水可能形成水灾，而风雹出现的时间短、来势猛、强度大，对农作物的收成破坏性更大[16]。

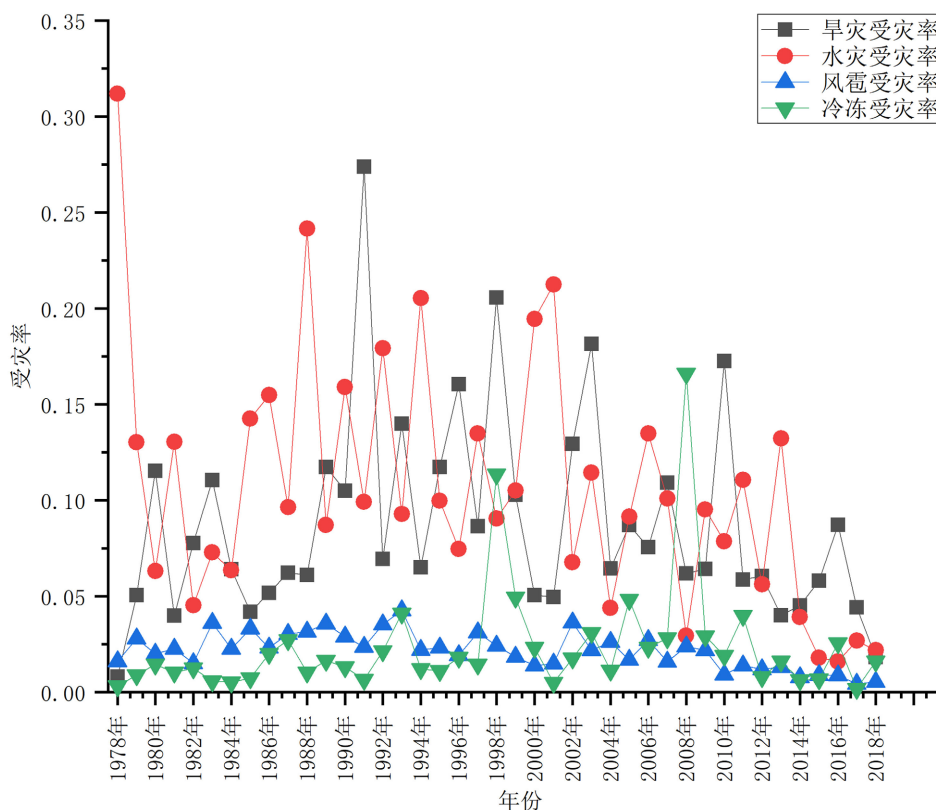


Figure 3. Trends of different meteorological disasters along the Yangtze River with inter-annual changes in damage rates

图 3. 长江沿线不同气象灾害受灾率随年际变化趋势

Table 1. Gray correlation analysis between total food production and disaster rate

表 1. 粮食总产与受灾率的灰色关联分析

地区	旱灾	风雹	冷冻	水灾
上海市	0.9421	0.9368	0.9388	0.9519
	2	4	3	1
江苏省	0.8711	0.8773	0.8513	0.87
	2	1	4	3
安徽省	0.8909	0.8992	0.8876	0.8988
	3	1	4	2
江西省	0.8664	0.874	0.8576	0.8896
	3	2	4	1
湖北省	0.8818	0.8872	0.8654	0.8908
	3	2	4	1
湖南省	0.9178	0.9291	0.8999	0.9383
	3	2	4	1

续表

重庆市	0.8	0.8146	0.7419	0.8533
	3	2	4	1
四川省	0.829	0.8445	0.8114	0.8664
	3	2	4	1
云南省	0.8444	0.8506	0.8151	0.844
	2	1	4	3
西藏自治区	0.861	0.8865	0.8482	0.9052
	3	2	4	1
青海省	0.7495	0.8177	0.7207	0.7884
	3	1	4	2

### 3.3. 气象灾害风险评估

用风险概率  $R$  ( $R = 1/P$ )来表示在一定受灾率下气象灾害风险概率的水平。当  $R = 1$  时气象灾害为 1a 一遇, 当  $1 < R \leq 2$  时气象灾害为 1-2a 一遇, 当  $R > 5$  时气象灾害为大于 5a 一遇, 为便于分析与评价长江流域 11 省份之间的气象灾害风险空间分布特征, 参照刘亚彬[17]等的水旱灾害等级划分方法( $R = 1/P$ ), 结合表 5.1 中各种气象灾害风险估计值, 制定长江流域气象灾害风险评估等级(见表 2)。

**Table 2.** Criteria for risk hazard levels

**表 2.** 风险灾害等级标准

成灾率	高风险	中高风险	中风险	中低风险	低风险
5%	$1 \leq R < 2$	$2 \leq R < 3$	$3 \leq R < 4$	$4 \leq R < 5$	$R \geq 5$
10%	$1 \leq R < 2$	$2 \leq R < 3$	$3 \leq R < 5$	$5 \leq R < 7$	$R \geq 7$

基于信息扩散理论的风险评估模型和长江沿线 11 省份农业气象灾害在表 2 风险等级划分标准下, 以四种气象灾害受灾率在 5%、10% 下的风险评估结果, 运用 Arc GIS 绘制出不同气象灾害的风险评估图。

运用信息扩散理论, 对长江沿线十一省份四类气象灾害进行概率分析, 得到表 3, 从表 3 中可以看出各省气象灾害发生风险概率差异较大, 但整体上旱灾和洪涝的受灾风险概率高于风雹和冷冻。而发生水灾和旱灾的风险概率主要集中在受灾率比例在 5% 左右, 且随着受灾率增加至 10%, 大多数省份风险概率呈显著下降的趋势, 当受灾率在 5% 时, 四川省、青海省发生水灾的风险概率为 1-1.1a 一遇, 江西省发生旱灾的风险概率为 1-1.1a 一遇, 湖北省、安徽省发生冷冻的风险概率为 1-2a 一遇, 当受灾率在 10% 时, 湖北省、湖南省发生水灾的风险概率增加, 且与安徽省、江西省发生水灾的风险概率较高, 大约在 2.5a-4.5a 一遇。

**Table 3.** Risk probability of agro-meteorological disasters with 5% and 10% exposure rate

**表 3.** 农业气象灾害受灾率为 5% 和 10% 的风险概率

地区	水灾		旱灾		风雹		冷冻	
	5%	10%	5%	10%	5%	10%	5%	10%
上海市	0	0	0.0047	0	0	0	0.1064	0
江苏省	0.4298	0.0604	0.4418	0.0839	0	0	0.0559	0



续表

安徽省	0.3306	0.2192	0.3976	0.0070	0	0	0.6565	0.0060
江西省	0.4258	0.3483	0.9747	0.0228	0	0	0.0178	0.0047
湖北省	0.1902	0.2279	0.3764	0.3302	0	0	0.7177	0.2201
湖南省	0.0344	0.2851	0.5959	0.0012	0	0	0.4828	0.0220
重庆市	0.4245	0.0629	0.4177	0.2315	0.0001	0	0.0006	0
四川省	0.9962	0	0.2575	0.0006	0	0	0	0
云南省	0.4978	0	0.2435	0.0140	0	0	0.0177	0.0233
西藏自治区	0.7276	0.1065	0.4554	0.0827	0.0004	0	0.1478	0.0002
青海省	1	0	0.1026	0.1202	0.1993	0.4693	0.0001	0

从图4、图5中可得，在受灾率为5%时，旱灾高风险区是江西省、湖南省，水灾发生概率风险高的区域为四川省、青海省、西藏自治区，青海省、西藏自治区水灾发生概率风险高是由于当地的地质环境，容易发生冰湖溃坝而形成局部水灾[18]，而风雹发生的风险在整个长江沿线都为低风险区，而发生冷冻的风险概率较高的为湖北省、安徽省，湖南省为中高风险区，其他都为低风险区。而当受灾率为10%时，风险区域空间格局发生变化，旱灾中风险区为湖北省、重庆市，其它都为低风险区，水灾中高风险区为江西省，中风险区为湖北省、湖南省、安徽省，青海省上升为风雹发生的中高风险区，主要是由于西部地形环境且气候条件较差，容易产生风雹[19]，冷冻中风险区为湖北省。

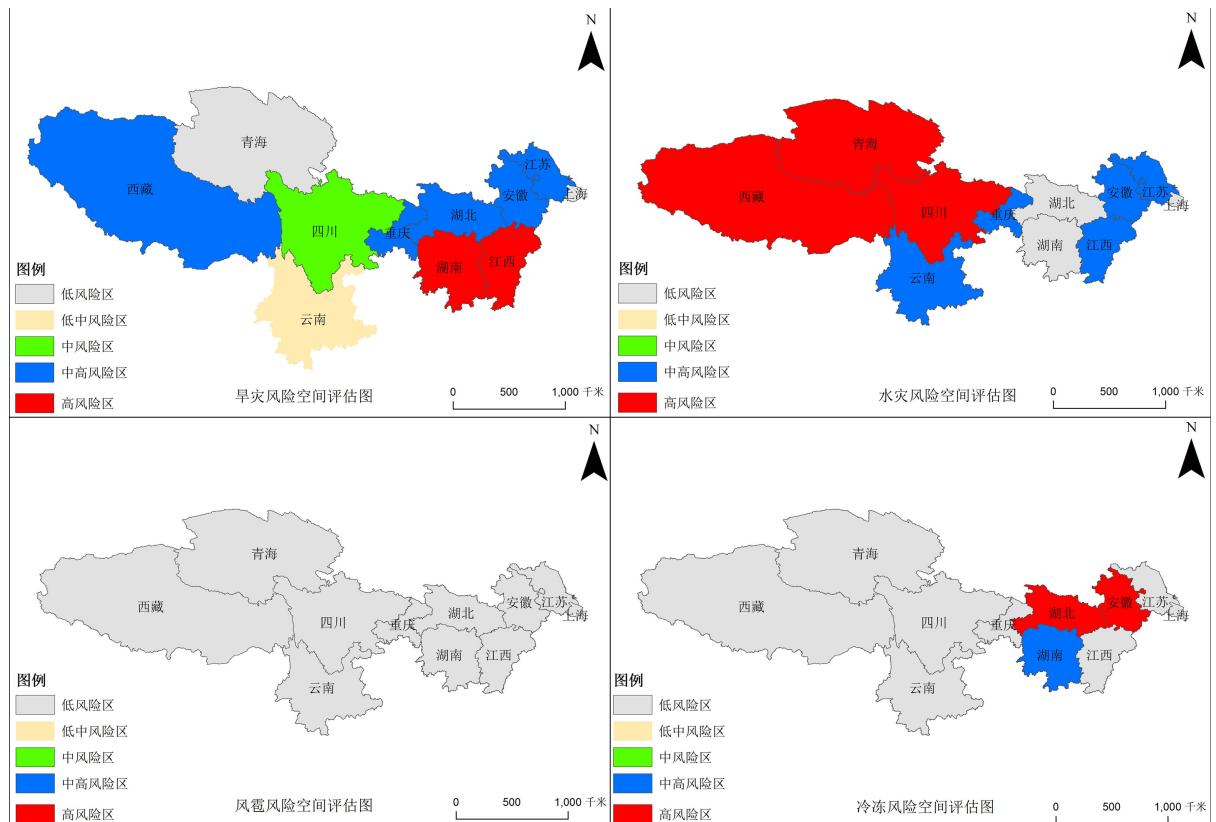


Figure 4. Spatial assessment of meteorological disaster risk at 5% exposure rate  
图4. 受灾率5%时气象灾害风险空间评估图

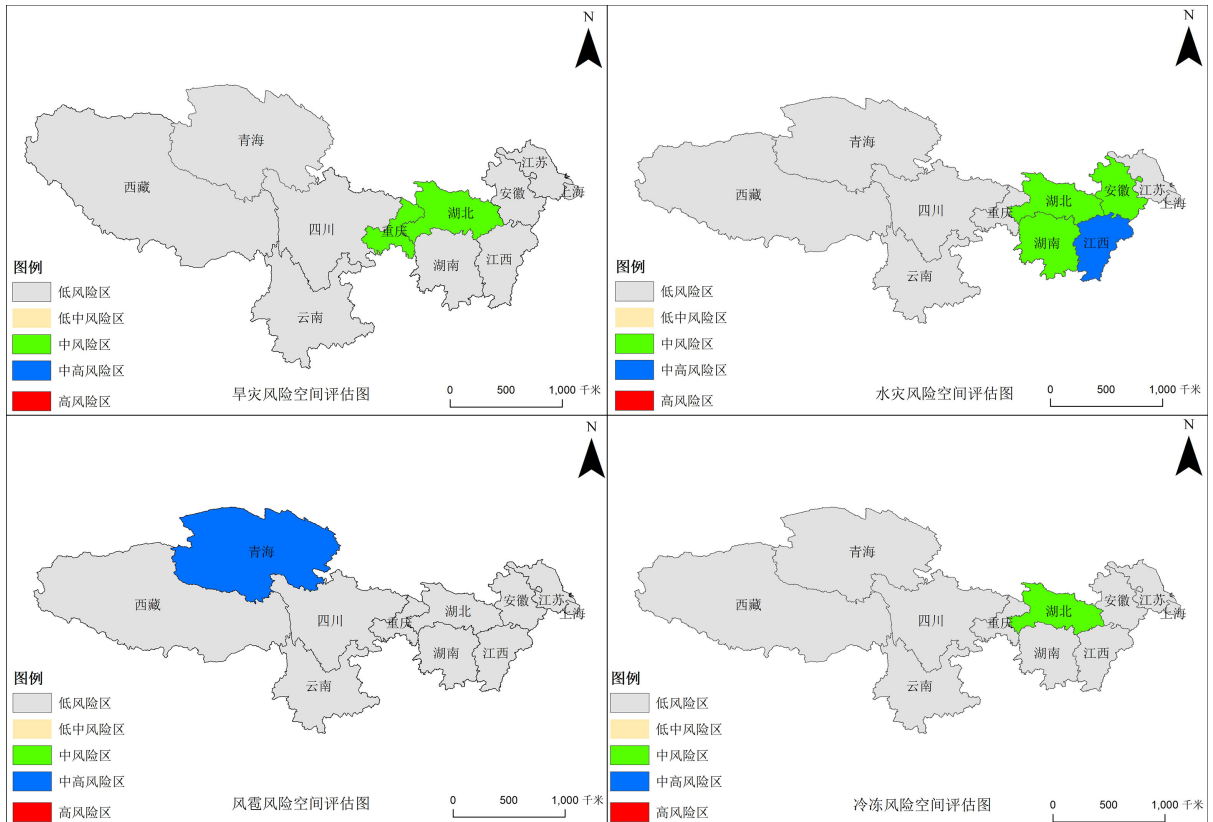


Figure 5. Spatial assessment of meteorological disaster risk at 10 per cent exposure rate

图 5. 受灾率 10% 时气象灾害风险空间评估图

## 4. 结论与讨论

### 4.1. 结论

在气象灾害频发背景下，气象灾害会对粮食产量产生影响进而对粮食安全产生重大影响，因此本研究以长江沿线 11 省份为研究区，使用了灰色关联度和信息扩散模型来评估气象灾害对粮食产量的影响。得到主要结论如下：

1) 从灰色关联度分析结果中得知大部分省份的粮食单产、总产与受灾率的灰色关联度排序较高的是水灾和旱灾，而江苏省粮食单产、总产与受灾率的灰色关联度排序最高的是风雹，这说明水灾和旱灾是影响大部分省份粮食产量的主要气象灾害，但也有因为地理条件的因素而使其他的气象灾害成为影响粮食安全的主导灾害。

2) 对未来气象灾害发生风险概率去进行评估，可以得出在受灾面积比例 5% 下水灾和旱灾在大部分省份发生概率较大，但在受灾比例 10% 下发生概率显著下降，这与农业技术水平和科学技术水平的提升有关；在受灾率为 5% 时，旱灾高风险区是江西省、湖南省，水灾发生概率风险高的区域为四川省、青海省、西藏自治区，风雹发生的风险概率很低，在整个长江沿线都为低风险区，发生冷冻的风险概率较高的为湖北省、安徽省，中高风险区为湖南省，其他都为低风险区。而当受灾率为 10% 时，风险区域空间格局发生变化，旱灾中风险区为湖北省、重庆市，其它都为低风险区，水灾中高风险区为江西省，中风险区为湖北省、湖南省、安徽省，青海省上升为风雹发生的中高风险区，冷冻中风险区为湖北省。

## 4.2. 讨论

在极端气候突变的背景下, 研究气象灾害对粮食产量的影响对维护粮食安全具有重要意义。

首先, 水灾和旱灾是影响我国粮食产量的主要气象灾害, 但旱灾的受灾率在下降, 这与于小兵等人[20]的研究结论一致。这是由于一方面在气候变化背景下极端天气气候事件增多, 尤其是高温事件的时常发生容易造成旱灾的形成, 从而导致旱灾事件的时常发生; 另一方面过去几十年中国处于一个大基建的时代, 注重水利基础设施的建设, 使受灾面积下降, 但对于重大灾害的抗御能力仍然不足。

其次, 冷冻的灾害风险在未来部分省市会上升, 不容忽视。中国农业气象灾害频发、重发是农业生产中最大的外部制约因素[21], 在这样的农业生产条件下, 长江流域未来应加强对农业气象灾害发生风险的监测与预警, 通过粮食生产结构的优化布局, 科学防灾减灾, 以期提高防灾抗灾能力。

目前我们的研究, 一方面主要集中于不同气象灾害对总的粮食作物的影响, 而没有研究不同的气象灾害对不同的粮食作物的分析, 不同的粮食作物对不同的灾害抵抗能力不同, 因此在未来应考虑将粮食作物分为水稻[22]、油菜[23]、小麦[24]、大豆[25]等多种粮食作物来研究; 另一方面, 气象灾害对粮食作物产量确实有影响, 本文只考虑受灾率这一个指标来对未来气象灾害发生的风险概率进行预估, 而未考虑在社会经济条件[26]等因素影响下气象灾害对粮食作物的影响, 结果可能会存在一定的不准确性, 在未来应考虑多风险评估方法, 使灾害风险概率评估结果更准确。

## 参考文献

- [1] 程纯枢. 中国的气候与农业[M]. 北京: 气象出版社, 1991: 542-603.
- [2] 田志会, 李晓雪. 1949-2016年我国粮食主产区旱灾变化趋势分析[J]. 中国农业大学学报, 2019, 24(12): 159-167.
- [3] 田志会, 李晓雪. 基于灾情的中国粮食主产区旱灾变化周期研究[J]. 灾害学, 2020, 35(1): 38-43.
- [4] 杨艳颖, 毛克彪, 韩秀珍, 杨军, 郭晶鹏. 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, 2018, 30(5): 76-90.
- [5] Wang, J.T. (2010) Food Security, Food Prices and Climate Change in China: A Dynamic Panel Data Analysis. *Agriculture and Agricultural Science Procedia*, 1, 321-324. <https://doi.org/10.1016/j.aaspro.2010.09.040>
- [6] 朱萌. 基于 CERES-Rice 模型的吉林省东部水稻冷害风险动态评估[D]: [硕士学位论文]. 长春: 东北师范大学, 2016.
- [7] 张轶, 刘布春, 杨晓娟, 刘园, 白薇, 董博超. 基于农作物灾情的长江中下游地区粮食产量损失评估[J]. 中国农业气象, 2018, 39(4): 280-291.
- [8] 王学林, 黄琴琴, 柳军. 基于信息扩散理论的南方双季早稻气象灾害风险评估[J]. 中国农业气象, 2019, 40(11): 712-722.
- [9] 雷宏军, 程运平, 艾鹏睿, 潘红卫, 徐建新. 基于信息扩散理论的贵州省农业旱灾风险评估[J]. 人民黄河, 2016, 38(7): 146-148.
- [10] [https://baike.baidu.com/item/%E9%95%BF%E6%B1%9F%E6%B5%81%E5%9F%9F/721919?fr=ge\\_ala](https://baike.baidu.com/item/%E9%95%BF%E6%B1%9F%E6%B5%81%E5%9F%9F/721919?fr=ge_ala)
- [11] <http://www.stats.gov.cn/>
- [12] 吴洪珍. 基于主导因子的湖南省农业灾害风险评价[J]. 中国农业资源与区划, 2019, 40(9): 84-91.
- [13] 张晓娜. 我国服务业与城镇化的灰色关联度实证考察[J]. 统计与决策, 2020, 36(19): 97-101. <https://doi.org/10.13546/j.cnki.tjyc.2020.19.021>
- [14] 张继国, 王慧敏. 基于信息扩散原理的区域洪水灾害风险评价模型[J]. 水资源与水工程学报, 2010, 21(5): 37-39.
- [15] 赵珊珊, 高歌, 黄大鹏, 何文平. 2004-2013年中国气象灾害损失特征分析[J]. 气象与环境学报, 2017, 33(1): 101-107.
- [16] 吕凯, 陈磊, 高振魁, 张彩丽, 李继红. 安徽省农业气象灾害时间分布特征与灰色关联分析[J]. 中国农学通报, 2017, 33(23): 83-88.
- [17] 刘亚彬, 刘黎明, 许迪, 章少辉. 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, 2010, 26(8): 1-7.

- 
- [18] 邹新华. 不同尺度洪灾风险评估的对比研究[D]: [硕士学位论文]. 西宁: 青海师范大学, 2014.
- [19] 强中发. 青海省干旱及冰雹灾情趋势的灰色灾变预测[J]. 农业系统科学与综合研究, 1991(3): 168-170.
- [20] 于小兵, 卢逸群, 吉中会, 等. 近 45a 来我国农业气象灾害变化特征及其对粮食产量的影响[J]. 长江流域资源与环境, 2017, 26(10): 1700-1710.
- [21] 刘园, 刘布春, 梅旭荣. 区域粮食产量因灾损失评估之长江流域灾情-产量模型再检验[J]. 中国农业气象, 2023, 44(12): 1114-1126.
- [22] 谭诗琪, 范嘉智, 颜石, 陶笑笑, 欧晋辉, 罗红梅. 长时间尺度下气象灾害对湖南水稻产量影响分析[J]. 中国农学通报, 2020, 36(19): 104-113.
- [23] 陆魁东, 彭莉莉, 黄晚华, 周伟. 气候变化背景下湖南油菜气象灾害风险评估[J]. 中国农业气象, 2013, 34(2): 191-196.
- [24] 张朝, 王品, 陈一, 张帅, 陶福祿, 刘晓菲. 1990 年以来中国小麦农业气象灾害时空变化特征[J]. 地理学报(英文版), 2014, 24(3): 387-396.
- [25] 温丹苹, 李静, 何朋飞. 黑龙江省农业气象灾害与大豆产量的灰色关联分析[J]. 自然灾害学报, 2017, 26(4): 56-62. <https://doi.org/10.13577/j.jnd.2017.0407>
- [26] Xu, L., Zhang, Q., Zhang, J., Zhao, L., Sun, W. and Jin, Y.-X. (2017) Extreme Meteorological Disaster Effects on Grain Production in Jilin Province, China. *Journal of Integrative Agriculture*, **16**, 486-496. [https://doi.org/10.1016/S2095-3119\(15\)61285-0](https://doi.org/10.1016/S2095-3119(15)61285-0)