

# Temporal and Spatial Distribution of Heat Injury on Rice in Sichuan Province

Dongling Wang

Chengdu University of Information Technology, CUIT, Chengdu Sichuan  
Email: wangdonglingcuit@outlook.com

Received: Oct. 28<sup>th</sup>, 2019; accepted: Nov. 8<sup>th</sup>, 2019; published: Nov. 15<sup>th</sup>, 2019

---

## Abstract

Based on the daily mean temperature data and daily maximum temperature data of 103 stations in Sichuan province from 1980 to 2015 in July to August, the length of high temperature heat damage duration is calculated using mathematical statistical methods. And the frequency of different levels of high temperature heat damage on rice is analyzed. The spatial distribution characteristics of rice heat damage in Sichuan area were studied by using Surfer8.0. Changes of heat cycle in high temperature are analyzed by the Morlet wavelet analysis. The spatial and temporal distribution characteristics of rice heat damage are further explored in Sichuan province. The results showed: 1) The high temperature injury on rice in Sichuan province was concentrated in the long period of the rice growth. Most of the disasters occurred in July and August. 2) The total number of heat injury showed a trend of decline in 1980 - 1987, with a steady upward trend in 1988 - 2015, and the characteristics of interannual changes at different levels of high temperature heat damage are consistent with the trend of the total occurrences. 3) The annual occurrence times at three levels of rice heat injury fluctuated in a remarkable cyclical manner *i.e.*, slight grade fluctuated in the time scale of 5 years, about 10 years; moderate grade fluctuated significantly in 4 years, about 10 years and severe grade fluctuated in 5 years, 16 years. 4) In general, thermal disasters are obviously associated with latitude and topography; the high value area is located in the east of the Sichuan basin, and the central Sichuan region stretches from the southwest to the northeast; the heat injury occurred mainly in Luzhou, Dazhou, Guangan city, Yibin, Nanchong. The frequency of heat injury on rice is more than two times a year in these counties.

## Keywords

Heat Injury, Rice, Temporal Distribution, Spatial Distribution, Heat Damage Index

---

# 四川省水稻高温热害时空分布特征研究

王东林

成都信息工程大学, 四川 成都

## 摘要

利用四川省103个台站1980~2015年7~8月日平均气温数据、日最高气温数据资料,采用数理统计方法统计高温热害的天数,并计算出不同等级发生的频次,以此探究四川地区水稻高温热害发生的空间分布特征;采用Morlet小波分析研究高温热害周期变化,以探究四川地区水稻高温热害发生的时间分布特征。结果表明:1) 四川省水稻高温热害集中在水稻生长期的抽穗结实期,所以灾害大部分发生在每年7、8月份,其中以7月下旬和8月上旬最为严重;2) 水稻高温热害在1980~1987年里总频次呈现出下降趋势,1988~2015年呈现出平稳上升趋势,不同等级程度的高温热害发生频次的年际变化特点与总频次变化趋势一致;3) 不同等级高温热害次数呈现了不同时间尺度的周期震荡,轻度高温热害表现为5年、10年左右的周期变化,中度高温热害以4年、10年左右的周期震荡表现显著,重度高温热害则表现出5年、16年左右的周期震荡;4) 总体来说,热害灾害与纬度和地势有明显联系,四川盆地东部附近是水稻高温热害灾害重灾区,中部从西南往东北方向发展,主要分布于泸州市、达州市、广安市、宜宾市、南充市等,每年7、8月发生次数都在2次以上。

## 关键词

高温热害, 水稻, 时间分布, 空间分布, 热害指数

Copyright © 2019 by author(s) and Hans Publishers Inc.

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

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



Open Access

## 1. 引言

随着世界气温变暖的加剧,水稻热害的灾害问题渐渐引起全球人类的重视[1]。水稻是地球上最重要的粮食作物之一,为50%以上的世界人口提供了稳定的粮食来源。特别是位于亚洲地区,水稻种植面积占全球水稻总种植面积的90%以上[2]。其中,四川地区是中国十三个粮食主产区之一,也是西南地区唯一的粮食主产区,水稻常年种植范围和总体产量都位列全国各省前茅[3]。然而,极端天气会导致水稻产量出现波动,特别是极端高温引起的高温热害事件已经成为水稻生产的首要威胁。水稻对温度十分敏感,而随着全球气温升高这一趋势,四川的水稻产量和品质都将会受到不同程度影响,主要原因是水稻的授粉时间很短,仅仅只有几个小时,如果长期处于高温状态下,授粉将无法成功。同时,处于灌浆结实期的水稻会因高温而极大加快灌浆的速率,导致灌浆时长减短,毁坏籽粒应有的充实度,降低水稻精米率,糊化程度上升,胶稠度变高,食质变差。

近年来,诸多研究学者对中国不同地区水稻高温热害开展了研究。例如,熊伟[4] (2013)等根据全国水稻生产对往年气候变化的敏感性和脆弱性研究,运用产量与气候要素之间的线性回归模型和逐步回归模型,得出高温、太阳辐射以及日较差这三类气候因子对水稻生长期的发育和产量有严重影响。杨炳玉[5] (2012)根据江西省气象台站的气温资料进行了江西省水稻热害灾害的统计分析,运用气候倾向率和小波分析方法,得出我国江西省水稻高温热害发生规律。周虹[3] (2015)在四川稻谷生产情况调查中发现,

2013年7月中旬至8月初四川东北局部区域出现了严重高温干旱事件,影响水稻正常抽穗灌浆,导致部分地区水稻减产,甚至绝收。何永坤[6](2011)等就因此进行了大约50年四川盆地东部地区水稻的高温热害灾害发生规律分析,文中运用二项式系数加权平均法和ArcGIS软件中的kriging模块进行气象要素插值,得出四川盆地东部附近是水稻高温热害灾害重灾区,中部从西南往东北方向发展的结论。此文的分析在时间条件上具有一定的代表性,但是局限性比较强,区域地理位置太窄。谢志清[7](2013)等人在前人关于水稻高温热害规律探究的基础上,构建了一个综合考虑高温强度与灾害时间的高温热害综合指数指标,这与水稻产量的损失具有很好的相关联系。

综上,对四川地区高温热害的研究,有助于对水稻高温热害进行有效防范,使水稻减产得到有效缓解。研究高温热害的时空分布特征,不仅仅针对于四川水稻的灾害研究,还对四川各种其他农作物的防护有重要意义。

## 2. 资料概况与研究方法

### 2.1. 资料概况

气象数据来自于四川省103个气象台站1980~2015年日最高气温和日平均气温资料(缺测资料用五日滑动平均法进行插补)。农业气象资料主要来源于四川省1980~2012年24个农业气象观测站和两个农业气象试验站数据的生长期(移栽、分蘖、拔节、孕穗、抽穗、成熟)资料。

### 2.2. 研究方法

#### 2.2.1. 水稻分区及生育时间的界定

四川地区水稻主要种植在盆地、盆地附近山区及西南部山地区域,因此根据四川省地形地貌特点及种植区域形成的条件,将其划分为七处种植区和一处非种植区[8](图1)。

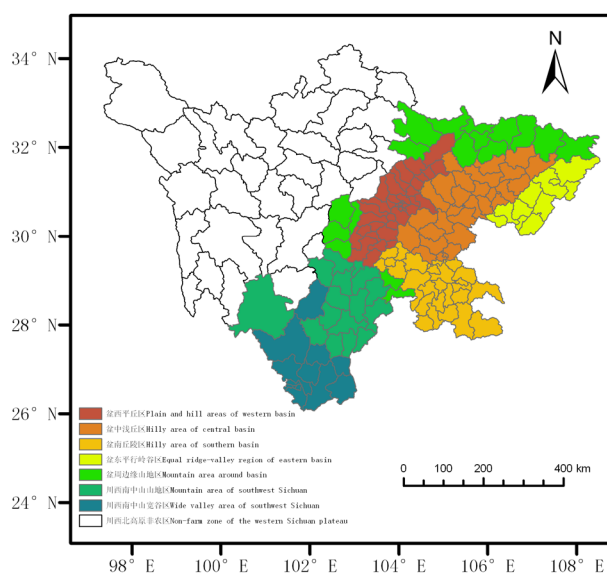


Figure 1. Rice planting area division in Sichuan Province

图 1. 四川省水稻种植区域划分

结合农业气象观测站和农业气象试验站对水稻生长发育状况的观测记录,参考大田生产调查,确定各区域水稻移栽-成熟期及水稻移栽-分蘖期、分蘖-拔节期、拔节-孕穗期、孕穗-抽穗期、抽穗-成熟期的时间(表1)。

**Table 1.** Division of rice development periods in different regions of Sichuan Province  
**表 1.** 四川省不同地区水稻发育时段划分

区域	移栽——成熟	移栽——分蘖	分蘖——拔节	拔节——孕穗	孕穗——抽穗	抽穗——成熟
盆西平丘区	5 中~9 上 5.11~9.10	5 中~5 下 5.11~5.31	6 上~6 中 6.1~6.20	6 下~7 中 6.21~7.20	7 下~8 上 7.21~8.10	8 中~9 上 8.11~9.10
盆中浅丘区	5 中~9 上 5.11~9.10	5 中~5 下 5.11~5.31	6 上~6 中 6.1~6.20	6 下~7 中 6.21~7.20	7 下 7.21~7.31	8 上~9 上 8.1~9.10
盆南丘陵区	4 中~8 上 4.11~8.10	4 中~5 上 4.11~5.10	5 中~5 下 5.11~5.31	6 上~6 下 6.1~6.30	7 上 7.1~7.10	7 中~8 上 7.11~8.10
盆东平行岭谷区	5 中~8 下 5.11~8.31	5 中~5 下 5.11~5.31	6 上~6 中 6.1~6.20	6 下~7 中 6.20~7.20	7 下~8 上 7.21~8.10	8 中~8 下 8.11~8.31
盆周边缘山地区	5 下~9 下 5.21~9.30	5 下~6 上 5.21~6.10	6 中~6 下 6.11~6.30	7 上~7 中 7.1~7.20	7 下~8 中 7.21~8.20	8 下~9 下 8.21~9.30
川西南中山山地区	5 上~9 上 5.1~9.10	5 上~5 中 5.1~5.20	5 下~6 中 5.21~6.20	6 下~7 中 6.21~7.20	7 下~8 上 7.21~8.10	8 中~9 上 8.11~9.10
川西南中山宽谷区	5 中~9 上 5.11~9.10	5 中~5 下 5.11~5.31	6 上~6 下 6.1~6.30	7 上~7 中 7.1~7.20	7 下~8 上 7.21~8.10	8 中~9 上 8.11~9.10

**2.2.2. 高温热害灾害等级指标的界定**

因为高温热害灾害主要集中发生于水稻生长周期中的孕穗 - 抽穗期、抽穗 - 成熟期，所以从表 2 中研究得出，本文的研究时间范围定于 7 月到 8 月之间。

从四川省气象部门所采用的关于水稻高温热害灾害判定方式来看，采用日最高气温  $\geq 35^{\circ}\text{C}$ ，日平均气温  $\geq 30^{\circ}\text{C}$ ，并且持续 3 天以上为一次高温过程的研究指标对于四川地区来说比较合适[4]，因此本文采用日最高气温和日平均气温作为研究对象。另外，本研究将高温热害根据其持续日数的长短，将它分为 3 个等级(轻、中、重度)，如下表所示：

**Table 2.** Sichuan high temperature heat damage grade index  
**表 2.** 四川省水稻高温热害等级指标

等级	轻度	中度	重度
日最高气温	$\geq 35^{\circ}\text{C}$	$\geq 35^{\circ}\text{C}$	$\geq 35^{\circ}\text{C}$
日平均温度	$\geq 30^{\circ}\text{C}$	$\geq 30^{\circ}\text{C}$	$\geq 30^{\circ}\text{C}$
持续时间/d	3 d~5 d	6 d~8 d	>8 d

**2.2.3. 统计分析方法**

根据表 2 水稻热害灾害等级指标的界定，用数理统计的方法统计了四川省各地区共 103 个气象台站 1980 年~2015 年高温热害灾害发生的总次数和不同等级(轻、中、重度)的总频次。

1) 水稻高温热害的时间分布(发生年份的频次、概率)，采用数理统计的方法来筛选和计算。

2) 水稻高温热害的时间变化，包括年际变化与周期变化。利用二项式 9 点滑动平均法[9] [10]结合高温热害频次来研究年际变化特点，周期变化采用 Morlet 小波分析[11] [12] [13] [14] [15]的方法。

运用以下公式来进行小波方差分析，判断每个时间序列中的主要周期，即

$$W_f(s, \tau) = \int f(t)\varphi(s, t - \tau)dt \tag{1}$$

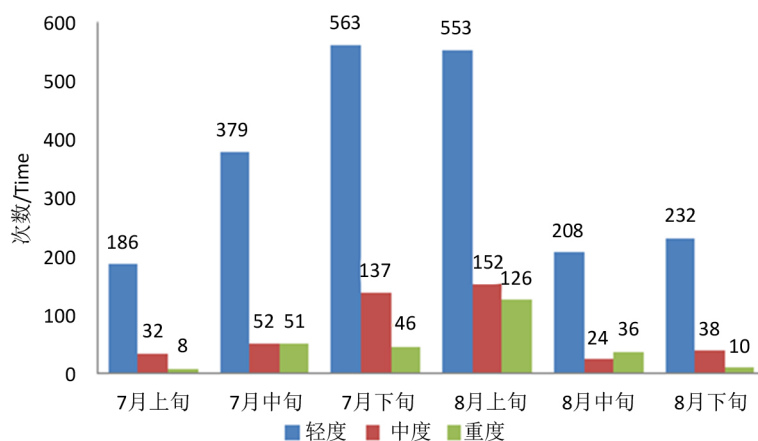
该式中，t 为时间，s 为伸缩的尺度， $\tau$  为平移的参变量， $W_f(s, \tau)$  是小波系数， $W_p(s)$  是小波的方差，i 是虚数的单位， $\omega$  是圆频率。

3) 水稻高温热害的空间分布(对典型灾害等级的频次和总发生次数做空间分布分析)，运用数理统计分别计算各个站点轻度、中度、重度热害灾害发生频次，作出不同等级高温热害空间分布图。

### 3. 水稻热害灾害时间变化规律

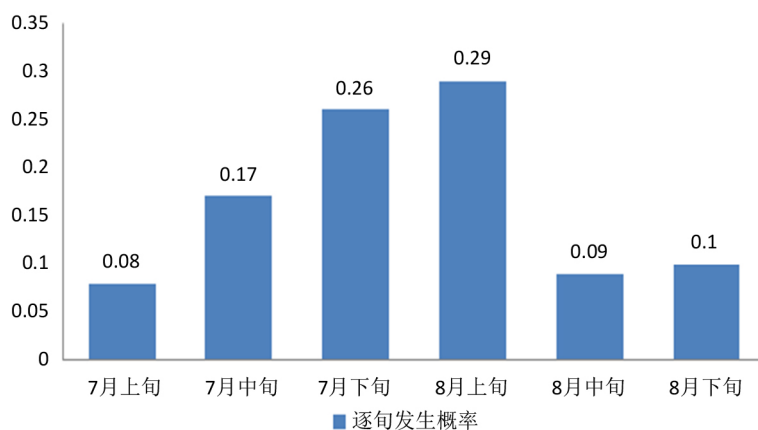
#### 3.1. 高温热害灾害发生时间段分析

因为高温热害具有延时效应，即每次高温热害灾害都是在一个时间段内发生才记为一次而不是针对某天来说，因此按旬作为时间单位，这样才对本研究来说更有意义。另外，对于跨月或者跨旬的情况，则将其纳入下月或者下一旬中。如某年7月30日至8月5日满足一次高温热害灾害指标，则将其记录为8月上旬发生过一次高温热害灾害。



**Figure 2.** The total number of high-temperature heat damages of different grades from July to August in July-August

**图 2.** 1980~2015 年 7~8 月各旬不同等级高温热害总次数



**Figure 3.** The total number of heat disasters of different grades from July to August in July-August

**图 3.** 1980~2015 年 7~8 月各旬不同等级高温热害灾害逐旬发生概率

从每旬各等级高温热害总次数(图 2)分析，轻度高温热害除了 7 月上旬，其他各旬频次都在 200 次以上，其中 7 月下旬发生频次最多，达到 563 次；中度高温热害在 7 月下旬到 8 月上旬的次数总和达 289 次，远远超过其他各旬的总和，属于中度高温热害的高发期；而重度高温热害在 8 月上旬发生次数最多，36 年来一共发生了 126 次，其余各旬发生频次都相对较少，总次数几乎都在 50 次以下。从图 3 中可以看出，近 36 年来，7 月份中、下旬以及 8 月份月上旬发生概率最大，分别达到 17%、26%和 29%，属于水稻高温热害的重灾期，其中 8 月上旬最为严重。

### 3.2. 水稻高温热害时间变化特征

#### 3.2.1. 水稻高温日数的年际变化

在 1980~2015 年之间，四川省水稻抽穗扬花期至灌浆成熟期的高温热害总次数和不同等级高温热害次数的变化趋势具有大致相同的性质，四者展示出相似的变化规律(图 4~图 7)，103 个不同地区的气象台站都在每年中出现了不同等级程度的高温热害灾害事件，36 年里共出现高温热害 2823 站次，平均每站出现高温热害灾害为 0.76 次/年。出现站次最多的年份为 2006 年，这一年中全省各地区一共出现不同程度的高温热害达 333 次；其次是 2013 年，总计出现了 203 次；高温热害灾害出现次数最少的年份为 1987 年，仅仅发生了 3 次轻度灾害。

从不同程度的高温热害时间变化图(图 5~图 7)来看，轻度高温热害在统计的 36 年里所有年份都有发生，其中 2002 年和 2001 年发生频次最多，分别达到 202 次和 163 次轻度高温热害，1983 年和 1987 年最少，都只有 3 次轻度高温热害发生；中度高温热害除了 1980 年、1985 年、1989 年外，整个 80 年代发生频次相对较少，90 年代只有在 1992 年有个突出峰值，总计发生了 33 次中度高温热害，但从 2000 年以后，发生中度高温热害的次数比之前更多、更频繁；重度高温热害在整个 80 年代和 90 年代初几乎从

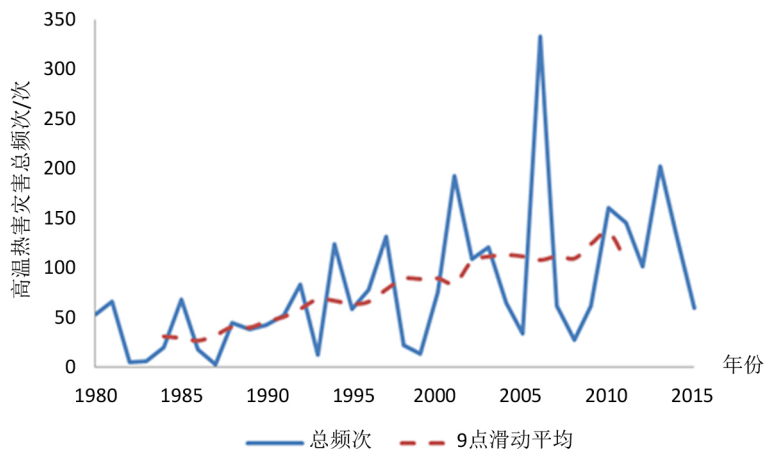


Figure 4. Total frequency cumulative frequency of high temperature heat damage from 1980 to 2015

图 4. 在 1980~2015 年高温热害的发生的总频次

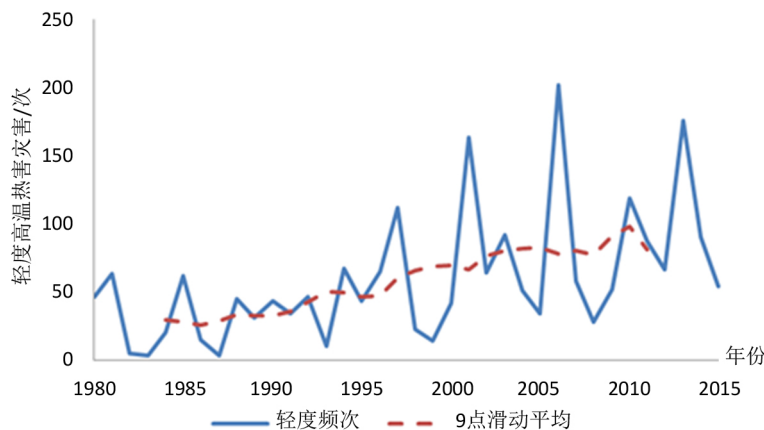
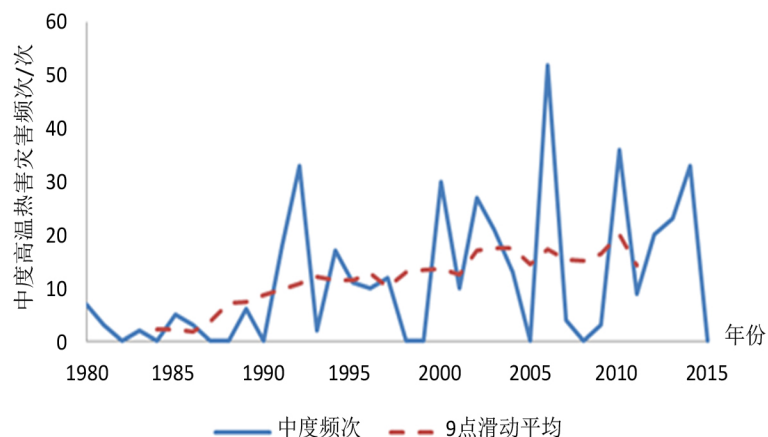


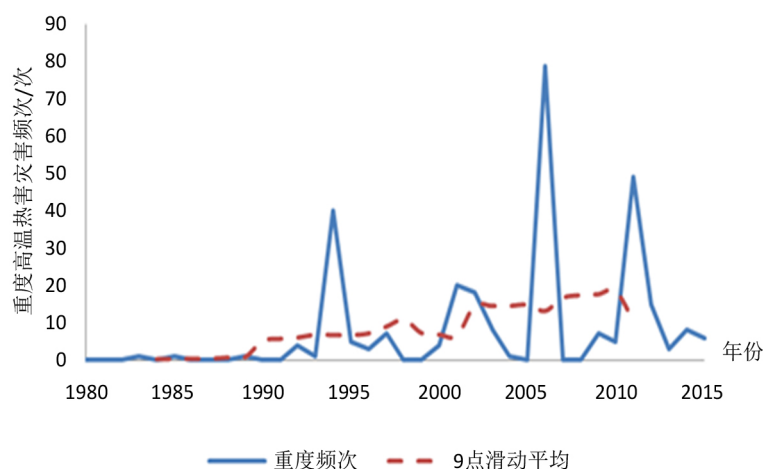
Figure 5. Mild cumulative frequency of high temperature heat damage from 1980 to 2015

图 5. 在 1980~2015 年高温热害的发生的轻度累计频次



**Figure 6.** Moderate cumulative frequency of high temperature heat damage from 1980 to 2015

**图 6.** 在 1980~2015 年高温热害的发生的中度累计频次



**Figure 7.** Severe cumulative frequency of high temperature heat damage from 1980 to 2015

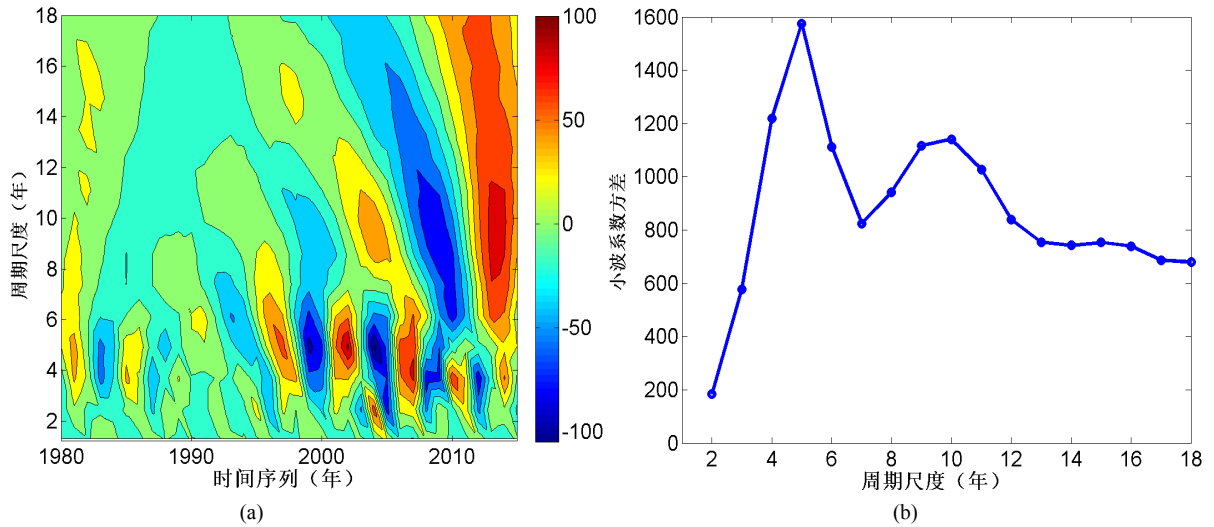
**图 7.** 在 1980~2015 年高温热害的发生的重度累计频次

未发生,只是在 1994 年以后发生频次相对较多,三个较明显的峰值出现在 1994 年、2006 年和 2011 年,其中 2006 年是发生次数最多的年份,属于重灾年。

通过二项式九点滑动平均曲线分析,随着年际的变化,轻度高温热害发生的频次有波动上升的趋势;中度高温热害发生的频次有波动上升的趋势,但上升趋势不及轻度灾害;重度高温热害发生的频次在 1994 年以后同样也有波动上升趋势,但趋势相对来说比其他等级更加平缓。

### 3.2.2. 高温热害的周期变化

1) 轻度高温热害。由图 8 分析可知,轻度高温热害频次的年际中尺度的周期震荡比年际小尺度的周期变化更加显著(图 8a),其方差值在 5 年、10 年左右时间尺度上出现波峰(图 8b)。其中在 10 年时间尺度中,周期性变化特点十分显著,出现了 2 个偏多期和 1 个偏少期,根据等值线的变化分析,预计在 2015 年后,轻度高温热害灾害次数在未来一段时间内偏少,之后将进入高温热害灾害偏多期。在 5 年尺度中,1998 年~2008 年前后,小波系数等值线密集,周期性变化特征明显,并且小尺度的一些变化表现为嵌套在较大尺度的一些结构里,使得轻度高温热害的周期更为复杂。

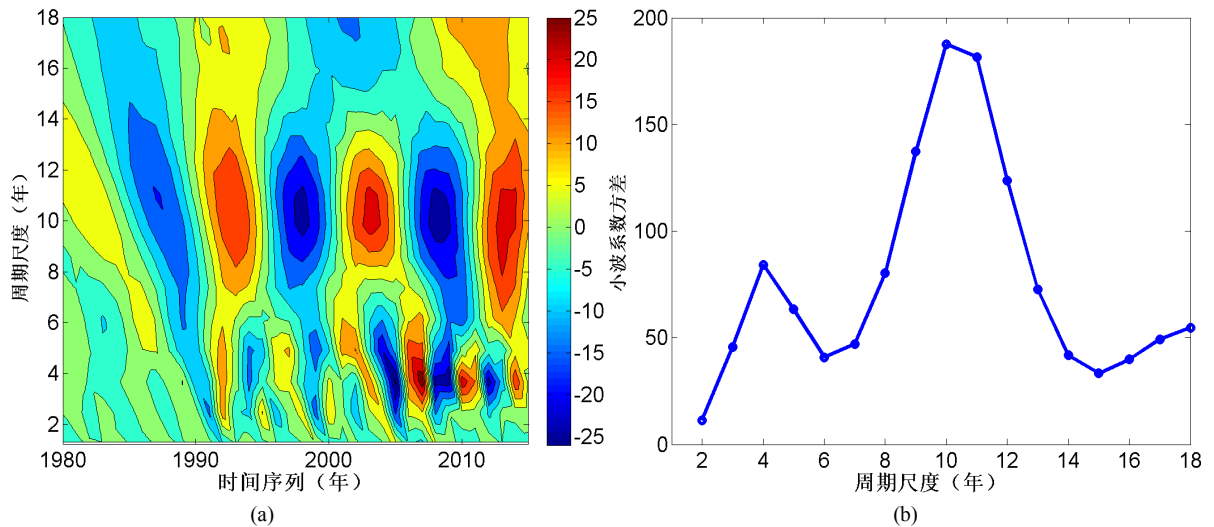


**Figure 8.** Wavelet transformation (a) and variance (b) of mild thermal disasters in Sichuan Province from July 1980 to July-August 2015

**图 8.** 四川省 1980 年~2015 年 7 月~8 月轻度热害灾害小波变换(a)和方差(b)

2) 中度高温热害。四川省中度高温热害频次的小波分析如图 9 所示。从图 9b 可知，方差值在 4 年、10 年左右时间尺度上出现波峰，结合图 9a 可以说明，在 10 年时间尺度上，经历了发生频次“偏少 - 偏多”6 个循环交替，且在整体分析时段内均表现稳定，预计 2015 年以后未来一段时间中度高温热害的发生次数将偏少。在 4 年时间尺度上的周期变化在 2002 年往后比较明显且等值线密集，另外，它的中心周期几乎没有发生偏移

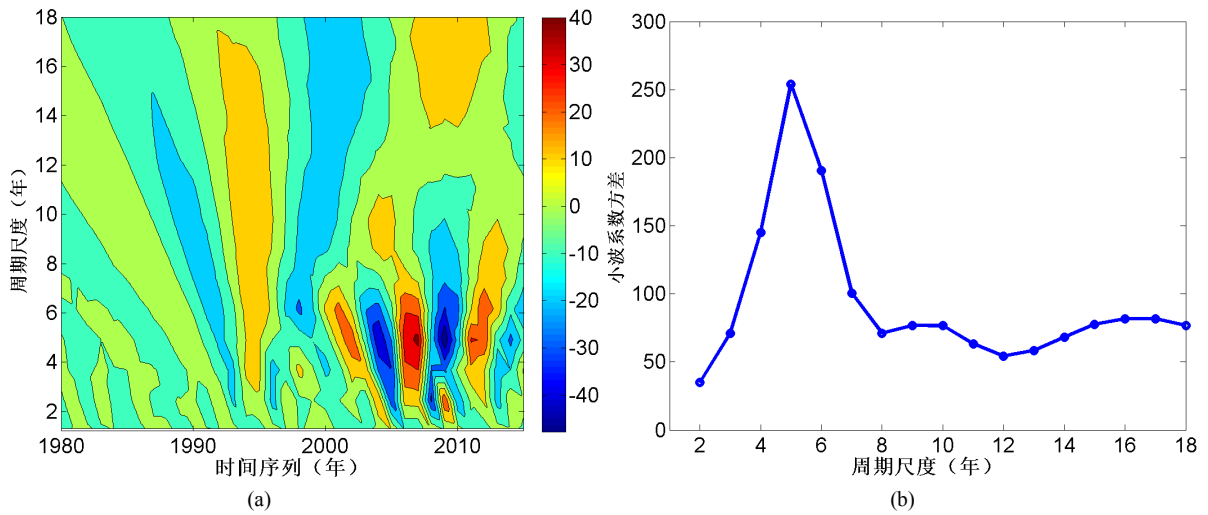
3) 重度高温热害。四川省重度高温热害频次的小波分析如图 10 所示。由图 10b 发现，方差值在 5 年、16 年左右时间尺度上出现峰值。结合图 10a 可以分析出，在 16 年时间尺度上，直到 2015 年以后等值线未闭合，表明未来一段时间上，重度高温热害频次将有所降低。在 5 年时间尺度上，周期变化非常显著，且在 2003 年以后的时间段内中心周期几乎未发生偏移。



**Figure 9.** Wavelet transformation (a) and variance (b) of moderate thermal disasters in Sichuan province from July 1980 to July-August 2015

**图 9.** 四川省 1980 年~2015 年 7 月~8 月中度热害灾害小波变换(a)和方差(b)





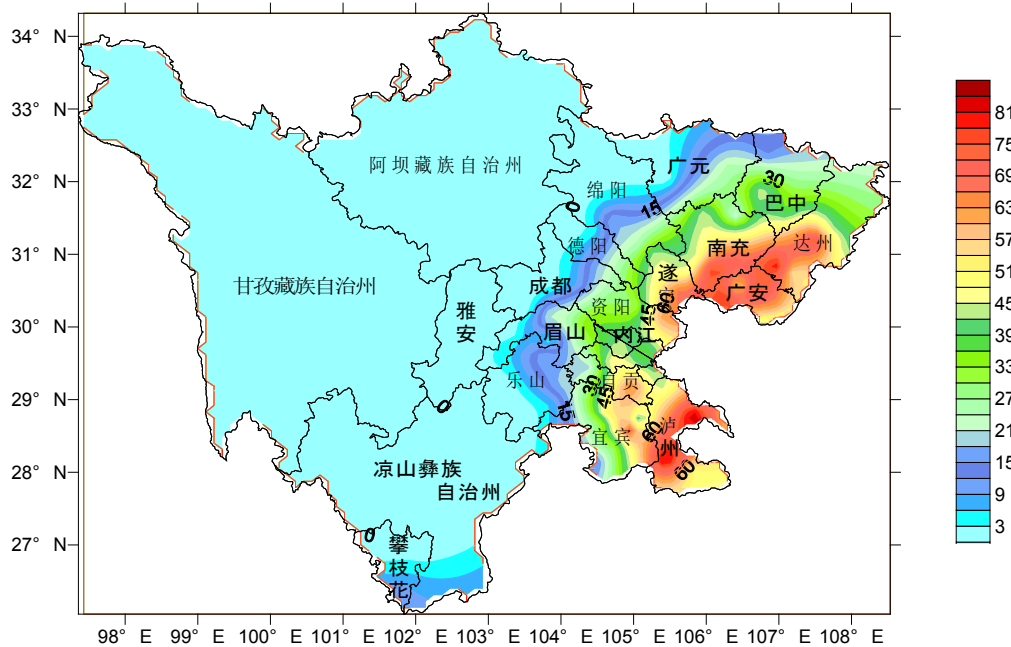
**Figure 10.** Wavelet transform (a) and variance (b) of severe thermal disasters in Sichuan province from July 1980 to July-August 2015

**图 10.** 四川省 1980 年~2015 年 7 月~8 月重度热害灾害小波变换(a)和方差(b)

#### 4. 水稻高温热害空间分布特征

##### 4.1. 高温热害总体分布特征分析

由图 11 可以看出，四川省水稻高温热害总体空间分布特征在空间格局上大体呈现出东西向分布，与各个地区所在经度有明显联系；四川盆地东部附近是水稻高温热害灾害重灾区，中部从西南往东北方向发展。结合前文四川省地理概况来看，从地形分布上说，高原地区基本不会发生热害灾害，四川省整体呈现出高原少，平原多；山地少、丘陵多的格局。



**Figure 11.** Spatial distribution of total frequency of rice in high temperature and heat damage in Sichuan province in 36 years

**图 11.** 四川省水稻高温热害 36 年总频次空间分布

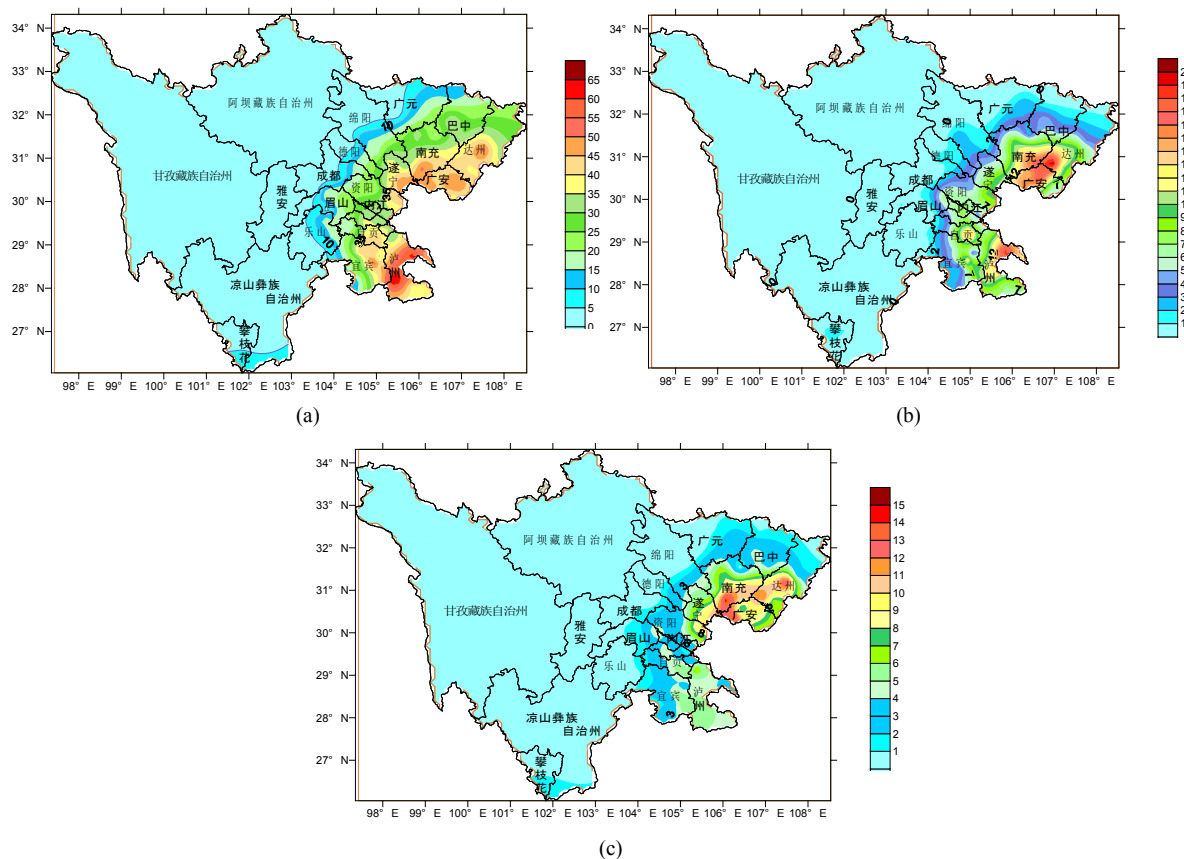
### 4.2. 不同等级热害灾害的空间分布特征及分析

由图 12(a)~图 12(c)这三类不同等级分布特征中可以发现,四川省水稻高温热害轻度、中度、重度发生频次空间分布特征基本与总体灾害特点大致相同。分别观察来看,1980~2015 这 36 年中,轻度热害灾害发生最频繁的地方位于四川省东南部的泸州市叙永地区,有 67 次轻度灾害;中度热害灾害发生最频繁的地方位于四川省东北部的达州市渠县地区,有 20 次中度灾害;而重度热害灾害发生最频繁的地方位于四川省东北部的南充市高坪地区,有 15 次重度灾害。

其中典型灾害站点合江、叙永、渠县、武胜、高坪这五个地区年均发生次数达 2 次以上,轻、中、重度高温热害发生总次数分别为 48~67 次,12~20 次,4~14 次,即每 0.5~0.75 年出现一次轻度高温热害,每 1.8~3 年出现一次中度高温热害,每 2.5~9 年出现一次重度高温热害。从南充、达州、广安等地区不同等级高温热害来看,其发生频次均高于四川省其他地区,属于重灾区;四川省东南部的泸州、宜宾等地则以轻度高温热害为主,中度、重度热害灾害并不常出现,属于一般灾害区。

另外,统计的数据中值得注意的是,南充市南部县、泸州市泸县这两个城市,发生灾害的总频次并不多,一共仅发生 46 次和 43 次,但重度热害灾害分别有 8 次和 7 次,所占比重特别高,频次并不比重灾区低很多,所以,在防范水稻热害灾害上面,也不能够忽略这些地区。

总体来说,四川省水稻高温灾害频次在空间分布特征上与地形地势和经纬度有明显关联。因此科学的选择水稻种植区域十分关键,有助于对水稻高温热害进行有效防范,使水稻减产得到有效缓解。



**Figure 12.** Spatial distribution of occurrences of high temperature heat damage in all grades of rice in Sichuan Province in 36 years: (a) Mild (b) Moderate (c) Severe

**图 12.** 四川省 36 年水稻各等级高温热害发生次数空间分布: (a) 轻度; (b) 中度; (c) 重度

## 5. 结论

本文利用了四川地区水稻高温热害灾害指标的界定和计算统计方法,分析了在气候变化背景下,四川省水稻高温热害的时间分布规律和空间分布规律,初步研究出了四川地区水稻高温热害的特点。结果表明:

1) 绝大部分水稻热害灾害发生在生育期中的抽穗-成熟期,其中,7月份中、下旬以及8月份月上旬发生概率最大,为水稻热害灾害发生最频繁的时期。

2) 整个四川水稻种植地区高温热害总频次和各个等级发生频次都表现出缓慢增加的年际变化特征。其中轻度高温热害和中度高温热害上升趋势明显,重度高温热害上升趋势则相对平缓。在统计的36年里,2006年出现过一次大规模的灾情,全省103个台站总发生频次达333次,属于重灾年。

3) 通过小波分析发现,在四川省各个等级高温热害发生频次中均有体现出明显的周期震荡变化规律。轻度高温热害表现为5年、10年左右的周期变化,中度高温热害以4年、10年左右的周期震荡表现显著,重度高温热害则表现出5年、16年左右的周期震荡。除此之外,根据5年时间尺度的周期变化趋势可推测,2015年以后一段时间范围内,轻、中、重度高温热害将处于偏少期。

4) 四川省水稻高温热害轻度、中度、重度发生频次的空间分布特征基本一致相同,空间格局大体上呈东西向分布,与地区所在经度有明显联系。从地形关系上来看,整体呈现出高原少,平原多;山地少、丘陵多的格局。四川盆地东部附近是水稻高温热害灾害重灾区,中部从西南往东北方向发展。

## 基金项目

成都信息工程大学本科教学工程项目(BKJX2019007, BKJX2019013, BKJX2019042, BKJX2019056, BKJX2019062, BKJX2019081, BKJX2019089, BKJX2019120 和 JY2018012)支持。

## 参考文献

- [1] 周锡跃, 徐春春, 李凤博, 等. 世界水稻产业发展现状、趋势及对我国的启示[J]. 农业现代化研究, 2010, 31(5): 525-528.
- [2] 兰君. 国外杂交水稻生产概况与发展预测[J]. 云南农业, 2000(5): 21.
- [3] 周虹. 2014年四川省稻谷生产情况分析 & 展望[J]. 四川农业科技, 2015(6): 5-7.
- [4] 熊伟, 杨婕, 吴文斌, 黄丹丹, 曹阳. 中国水稻生产对历史气候变化的敏感性和脆弱性[J]. 生态学报, 2013, 33(2): 509-518.
- [5] 杨炳玉, 申双和, 陶苏林, 李倩, 邹学智. 江西省水稻高温热害发生规律研究[J]. 中国农业气象, 2012, 33(4): 615-622.
- [6] 何永坤, 范莉, 阳园燕. 近50年来四川盆地东部水稻高温热害发生规律研究[J]. 西南大学学报(自然科学版), 33(12): 39-43.
- [7] 谢志清, 杜银, 高苹, 等. 江淮流域水稻高温热害灾损变化及应对策略[J]. 气象, 2013, 39(6): 774-781.
- [8] 王明田. 气候变化背景下四川农业季节性干旱的发展趋势及应对措施[D]: [博士学位论文]. 雅安: 四川农业大学, 2012.
- [9] 侯伟芬, 王谦谦. 江南地区近50年地面气温的变化特征[J]. 高原气象, 2004, 23(3): 400-406.
- [10] 李少娟, 何大明, 傅开道. 澜沧江与下湄公河水位过程的关联分析[J]. 科学通报, 2006, 51(增刊): 40-47.
- [11] 孙卫国, 程炳岩. 交叉小波变换在区域气候分析中的应用[J]. 应用气象学报, 2008, 19(4): 479-487.
- [12] 邵晓梅, 许月卿, 严昌荣. 黄河流域降水序列变化的小波分析[J]. 北京大学学报(自然科学版), 2006, 1(1): 2-7.
- [13] 徐桂玉, 杨修群. 中国南方冰雹气候特征的三维 EOF 分析[J]. 热带气象学, 2002, 18(4): 383-392.
- [14] 包云轩, 王莹, 高苹, 等. 江苏省冬小麦春霜冻害发生规律及其气候风险区划[J]. 中国农业气象, 2012, 33(1): 134-141.

- [15] 罗强, 李阿安, 李畅, 向玉元, 杨靖祥. Matlab7.0 复 Morlet 小波分析操作实例[J]. 文摘版: 自然科学, 2015(5): 92-92.