



水稻抽穗扬花期极端高温发生时空特征及热害风险区识别——以南充市为例

萧炜鹏, 龚建周, 崔海山, 胡月明

引用本文:

萧炜鹏, 龚建周, 崔海山, 等. 水稻抽穗扬花期极端高温发生时空特征及热害风险区识别——以南充市为例[J]. 农业资源与环境学报, 2021, 38(2): 198–207.

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.13254/j.jare.2020.0418>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

基于熵权-集对模型的耕地面源污染生态风险评价与防控——以新疆昌吉州为例

原伟鹏, 刘新平

农业资源与环境学报. 2019, 36(5): 630–639 <https://doi.org/10.13254/j.jare.2019.0076>

湖北省三峡库区不同种植模式下农田地表径流氮磷流失特征

刘方谊, 夏颖, 黄敏, 雷秋良, 刘宏斌, 范先鹏, 张富林, 吴茂前

农业资源与环境学报. 2018, 35(6): 550–558 <https://doi.org/10.13254/j.jare.2018.0030>

惠州市畜禽养殖污染耕地承载负荷估算及风险评价

宋江燕, 吴根义, 苏文幸, 余磊, 马晓蕊, 柳王荣, 袁俊杰

农业资源与环境学报. 2021, 38(2): 191–197 <https://doi.org/10.13254/j.jare.2020.0312>

宁夏贺兰县土壤重金属分布特征及其生态风险评价

周勤利, 王学东, 李志涛, 王夏晖, 何俊, 季国华

农业资源与环境学报. 2019, 36(4): 513–521 <https://doi.org/10.13254/j.jare.2018.0191>

北京市郊农田土壤中多环芳烃污染特征及风险评价

周洁, 张敬锁, 刘晓霞, 冯洋, 王鸿婷, 徐淑波, 庞博

农业资源与环境学报. 2019, 36(4): 534–540 <https://doi.org/10.13254/j.jare.2018.0203>



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

萧炜鹏, 龚建周, 崔海山, 等. 水稻抽穗扬花期极端高温发生时空特征及热害风险区识别——以南充市为例[J]. 农业资源与环境学报, 2021, 38(2): 198–207.

XIAO Wei-peng, GONG Jian-zhou, CUI Hai-shan, et al. Spatio-temporal characteristics of extremely high temperature occurrences on rice during heading-flowering stage and identification of high-temperature disaster areas: An example of Nanchong City[J]. *Journal of Agricultural Resources and Environment*, 2021, 38(2): 198–207.



开放科学 OSID

## 水稻抽穗扬花期极端高温发生时空特征及热害风险区识别——以南充市为例

萧炜鹏<sup>1</sup>, 龚建周<sup>1\*</sup>, 崔海山<sup>1\*</sup>, 胡月明<sup>2,3,4,5,6</sup>

(1. 广州大学地理科学与遥感学院, 广州 510006; 2. 华南农业大学资源环境学院, 广州 510642; 3. 广州市华南自然资源科学技术研究院, 广州 510630; 4. 自然资源部建设用地再开发重点实验室, 广州 510642; 5. 广东省土地信息工程技术研究中心, 广州 510642; 6. 广东省土地利用与整治重点实验室, 广州 510642)

**摘要:**以2000—2018年南充市水稻抽穗扬花期(7—8月)气象站点逐日最高气温数据为基础,通过年距平法、累计距平法提取南充市极端高温发生的时间特征;计算包括市域范围内及周边地区17个站点的多年水稻高温热害累积指数,并借助ANUSPLIN软件进行插值以获得南充市极端高温发生的空间特征;最终结合水稻种植范围、人口数量分布数据以及高温热害风险性分析模型识别南充市各等级水稻高温热害风险区。结果表明:2006年为研究时段极端高温发生最严重的年份,其次是2017年,极端高温发生日数较常年明显偏多。2010年为南充市气温变化的转折点,2010—2018年平均日最高气温明显高于2000—2010年,预计未来极端高温天气出现的频率和强度持续增大。蓬安县、营山县为遭受极端高温天气最频繁的两个县,其次是高坪区、南部县和西充县。水稻高温热害高风险区在高坪区、营山县分布最多,中风险区在各县均有较广泛分布,而低风险区则集中分布在南部县西北部、阆中市北部和营山县东北部的山地、丘陵。水稻高温热害风险区的识别能为人们更好地安排农业生产和政府更科学地进行城市规划与改造等提供参考依据。

**关键词:**极端高温;时空特征;ANUSPLIN;高温热害风险区;南充市

中图分类号:S511;S428

文献标志码:A

文章编号:2095-6819(2021)02-0198-10

doi: 10.13254/j.jare.2020.0418

### Spatio-temporal characteristics of extremely high temperature occurrences on rice during heading-flowering stage and identification of high-temperature disaster areas: An example of Nanchong City

XIAO Wei-peng<sup>1</sup>, GONG Jian-zhou<sup>1\*</sup>, CUI Hai-shan<sup>1\*</sup>, HU Yue-ming<sup>2,3,4,5,6</sup>

(1. School of Geography and Remote Sensing, Guangzhou University, Guangzhou 510006, China; 2. College of Natural Resources and Environment, South China Agricultural University, Guangzhou 510642, China; 3. South China Academy of Natural Resources Science and Technology, Guangzhou 510630, China; 4. Key Laboratory of Construction Land Transformation, Ministry of Natural Resources, Guangzhou 510642, China; 5. Guangdong Province Engineering Research Center for Land Information Technology, Guangzhou 510642, China; 6. Guangdong Province Key Laboratory for Land Use and Consolidation, Guangzhou 510642, China)

**Abstract:** Daily maximum temperature data during the rice heading-flowering stage (July–August) were obtained from the meteorological station for the period between 2000–2018, and the high-temperature temporal characteristics in Nanchong City were extracted using an accumulative anomaly method. The multi-year cumulative damage index of rice from heat injury was calculated in 17 stations within or

收稿日期: 2020-08-08 录用日期: 2020-10-23

作者简介: 萧炜鹏(1996—), 男, 广东中山人, 硕士研究生, 从事全球变化区域响应研究。E-mail: peng644831387@qq.com

\*通信作者: 龚建周 E-mail: gongjzh66@126.com; 崔海山 E-mail: cuihaishan@126.com

基金项目: 国家自然科学基金项目(41671175)

Project supported: The National Natural Science Foundation of China(41671175)

around the Nanchong City, and the spatial characteristics of extremely high temperatures in Nanchong City were obtained using the ANUSPLIN interpolation software. The grade of each high-temperature disaster that occurred in rice areas of Nanchong City was eventually identified by combining the rice planting range, population distribution, and high-temperature disaster analysis model. The results showed that the year 2006 exhibited the highest intensity of extremely high temperature occurrences, which was followed by 2017; further, the number of days with extremely high temperatures was clearly higher than that observed in a year on average. The year 2010 represented the turning point of temperature change in Nanchong City; this is because the average daily maximum temperature between 2010 and 2018 was significantly higher than in the period between 2000—2010. It could be expected that the frequency and intensity of extremely high temperature occurrences would continue to increase in the near future. Peng'an and Yingshan were the two counties that were most frequently affected by extremely high temperatures, which were followed by the Gaoping District, Nanbu County, and Xichong County. The areas with high risk of heat damage were mostly distributed in the Gaoping and Yingshan counties; the areas with intermediate risk were widely distributed in all the counties, while low-risk areas were mainly distributed in the hilly regions situated toward the northwest of Nanbu, north of Langzhong, and northeast of Yingshan. Identifying high-temperature disaster areas can provide scientific references to the government for achieving a more organized agricultural sector and transforming urban areas.

**Keywords:** extremely high temperature; temporal and spatial characteristics; ANUSPLIN; high-temperature disasters areas; Nanchong City

近几十年来全球范围的气候变暖已成公认的事实,未来这种趋势预计将会进一步加速。根据联合国政府间气候变化专门委员会(IPCC)第五次报告,1880—2012年,全球平均地表温度升高了0.85℃,其中1983—2012年可能是史上最暖的30年。在气候变暖大趋势下极端高温、热浪事件发生频率呈增加趋势,严重影响甚至威胁到人类健康及社会经济发展,IPCC报告预计,未来极端气候事件的发生量级、持续时间和频率将持续增加<sup>[1-2]</sup>。

气候变暖对中国农业生产的负面影响已经逐渐显现,如果不采取适应措施,到2030年,中国种植业生产能力在总体上因气候变暖可能会下降5%~10%;到21世纪后半期,小麦、水稻、玉米等作物单产将最高下降37%<sup>[3]</sup>。气温变化一般比较连续,而极端高温具有一定的突发性,且其发生时段往往与水稻的关键生长期和高温敏感期重合,持续的高温天气导致水稻开花授粉受精不良、灌浆结实期缩短,因而直接降低水稻产量和品质,威胁区域粮食生产安全<sup>[4]</sup>。随着极端高温天气出现频率增加,极端高温发生时空特征、高温热害对水稻影响、水稻高温热害风险区提取及等级划分等受到众多学者的关注。任永建等<sup>[5]</sup>针对湖北省极端高温事件展开研究,发现湖北省极端高温发生频次呈现东西部减少、中部增加的趋势。沿淮地区高温天气也尤其频繁,且发生时段多集中在7月中旬至8月上旬,正值一季稻抽穗扬花期,会对水稻产量造成明显影响<sup>[6]</sup>。任义方等<sup>[7]</sup>利用历史气象资料和水稻生育期资料,通过分析区域不同程度高温热害发生频次,进行了江苏省水稻高温热害风险分区。此外李

娟等<sup>[8]</sup>研究表明,西南地区可能因下垫面、地形、陆表过程反馈作用,对平均温度的升高更为敏感,平均温度每升高1℃,极端高温日数增加4~9 d。2006年,四川省由于盛夏高温提前出现且持续时间长、降水少,经历了50多年来最严重的一次高温干旱灾害,全省农业受热害天气影响损失达79.6亿元<sup>[9]</sup>。何永坤等<sup>[10]</sup>分析了1960—2008年四川盆地水稻热害,发现热害重发区集中在盆地中部。刘佳等<sup>[11]</sup>分析了1981—2014年水稻抽穗扬花期和灌浆结实期高温热害的时空变化规律,结果表明四川省高温热害总次数呈上升趋势,尤以2000年后增幅最为显著,2006年和2013年监测出高温热害发生的站点最多,2010年、2014年居次。

对极端高温发生时间序列变化规律的研究主要采用线性趋势法、Mann-Kendall检验、Sen's斜率法、累计距平法等提取年(代)际的变化和发生极端高温的典型年份,而极端高温发生空间特征、水稻高温热害风险区划及定级研究,大多是通过气象站点数据和热害指数等统计结果插值,最终以地区、省、县为空间单元进行结果分析。大尺度的极端高温发生空间分布研究能揭示范围较广的总体情况,对地形变化复杂区域却不能很好反映,另外极端高温热害发生与当地居民生活、农业生产密切相关,进一步以格网尺度为空间单元进行研究能更精准地提取出频繁受极端高温影响的水稻热害风险区域,从而弥补大尺度研究的不足,也为局部地区防灾减灾措施、政策的制定与实施提供科学的参考。

本研究综合前人研究结果,以南充市为研究区,利用南充市范围内的气象站逐日最高气温数据进行

整理以提取极端高温发生典型年份和不同时段变化趋势。利用17个气象站点(南充市周边10个站点及市域范围内7个站点)2000—2018年水稻抽穗扬花期(7—8月)逐日最高温度数据计算各站点的高温热害累积指数;借助ANUSPLIN专业气象插值软件,以DEM数字高程数据为协变量进行插值,提取南充市极端高温发生的空间分布特征;最终结合南充市域水稻、人口分布栅格数据、风险性分析模型,以格网尺度进行水稻热害风险分区定级,以期为局部区域防灾减灾措施和政策的制定提供科学依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 研究区概况

南充市位于 $105^{\circ}27' \sim 106^{\circ}58' E$ 、 $30^{\circ}35' \sim 31^{\circ}51' N$ ,大部分区(县)位于盆中浅丘区,东邻达州市,南连广安市,西与遂宁市、绵阳市接壤,北与广元市、巴中市毗邻,总面积 $12\,477\text{ km}^2$ 。

研究区属于亚热带湿润季风气候,7、8月份最热,一般8月较7月气温稍高,期间多数县(市、区)的月平均气温都在 $27\text{ }^{\circ}\text{C}$ 以上,属于全省年平均气温较高且极端高温天气频发的区域之一。降水量的季节分配很不均匀,降水强度为夏季最大、冬季最小,6—8月的降水总量可占全年的 $28\% \sim 34\%$ 。研究区常年云量大、日照少,多年平均日照总时数为 $1\,369.1\text{ h}^{[12]}$ 。

南充市为国家规划定位的成渝经济区北部中心城市,四川省东北城市群双核之一,人口数量居全省第二<sup>[13-14]</sup>。近年来,城市经济建设不断发展扩大,下垫面改变剧烈,可以预见未来高温热害天气的出现会

更加频繁且强度增大<sup>[15-16]</sup>。

### 1.2 数据来源

本研究逐日气象数据来源于中国气象信息共享平台(<http://data.cma.cn/data/>),共选取2000—2018年17个国家级气象观测站点,包括南充市域范围内的阆中站、仪陇站、南部站、西充站、蓬安站、营山站、高坪站等7个站点,以及南充市周边的平昌、巴中、渠县、岳池、广安、苍溪、盐亭、射洪、蓬溪、遂宁等10个站点,其分布如图1所示。用于提取南充市水稻种植区的多期Landsat系列遥感影像来源于地理空间数字云平台(<http://www.gscloud.cn/>)。2016年1 km格网人口分布数据来自于英国南安普敦大学WorldPop数据集(<http://www.worldpop.org/>)。空间分辨率30 m的DEM数字高程数据及行政区划矢量数据来自中国资源环境科学数据中心(<http://www.resdc.cn/Default.aspx>)。

### 1.3 研究方法

本研究从两个方面展开:一是南充市极端高温发生时间特征分析,包括极端高温发生异常年份的提取;二是南充市极端高温发生空间分布特征和水稻高温热害风险区识别定级。

#### 1.3.1 极端高温发生异常年份识别

一般地,对极端性天气事件的识别主要有两种方法:一是特定阈值法,参考气象要素的影响程度,将日最高气温 $\geq 35\text{ }^{\circ}\text{C}$ 定义为极端高温日<sup>[7]</sup>;二是基于统计概率分析(如均值、方差、统计分布等)计算得到判定阈值,本研究采用该方法进行极端高温发生异常年份的识别。

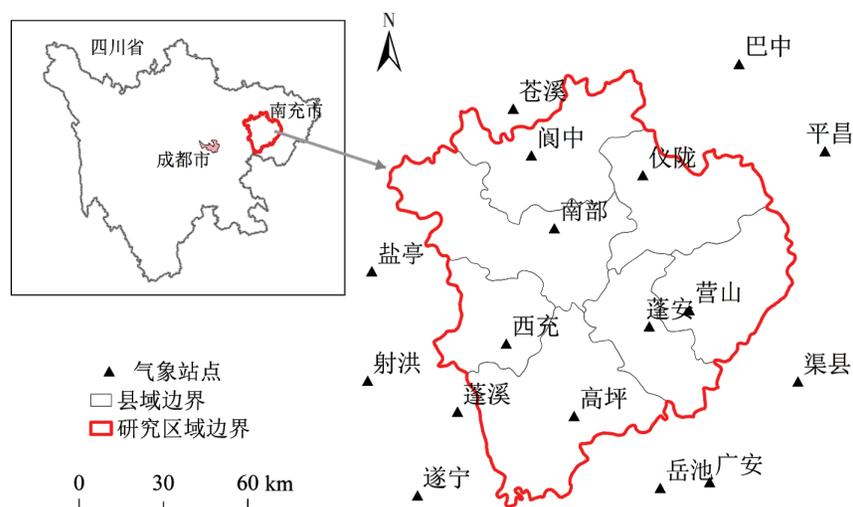


图1 研究区域气象站点分布图

Figure 1 Distribution map of meteorological stations in the research area

引入年距平、累计距平法以获取判定阈值。其中,气温年距平是指某一年气温均值与研究时段内气温平均值的差,因此年距平有正距平和负距平之分,用于描述该年气温相对于平均值是偏高或偏低。在气象上,常用年距平值的逐年累加,即气温累计距平,得到相邻年份的气温变动情况,另外气温累计距平也能反映气温在较长时间序列是持续增加、持续减少或比较稳定。年距平、累计距平计算公式<sup>[18-19]</sup>如下:

$$LT_i = \sum_{i=1}^n \Delta T_i \quad (1)$$

$$\Delta T_i = T_i - (\sum_{i=1}^n T_i) / n \quad (i=1, 2, \dots, n) \quad (2)$$

式中:LT<sub>i</sub>为第*i*年的气温累计距平;Δ*T*<sub>i</sub>为第*i*年的气温距平;*T*<sub>i</sub>为第*i*年的7—8月逐日最高气温平均值。

按时间序列绘制Δ*T*<sub>i</sub>柱状图和LT<sub>i</sub>变化曲线,即气温距平柱图和累计距平曲线。由于年距平有正负之分,气温距平为正,累计距平曲线向上表明年际气温增加;气温距平为负,曲线呈下降趋势,表明年际气温减小;当曲线持平,则年际气温保持稳定不变。根据Δ*T*<sub>i</sub>和LT<sub>i</sub>曲线,将距平值明显高于平均值、累计距平值增加显著的年份,识别为极端高温发生异常年份。

### 1.3.2 多年高温热害累积指数计算及ANUSPLIN软件空间插值

#### (1) 水稻抽穗扬花期高温热害累积指数

以日最高气温35℃作为危害水稻正常生长的临界温度,此外综合考虑相对湿度的影响,参考阳园燕等<sup>[20]</sup>的研究,定义单一年份水稻抽穗扬花期高温热害累积指数HIS<sub>*f*</sub>的计算公式为:

$$HIS_f = \sum_{i=1}^n D_{fi} \times \left( \frac{T_{imax} - T_{Dmax}}{T_{max} - T_{Dmax}} + \frac{RH_i - RH_D}{RH_{min} - RH_D} \right) \quad (3)$$

$$D_{fi} = \frac{m-1}{m} \quad (m=1, 2, \dots, 62) \quad (4)$$

式中:*T*<sub>*D*max</sub>和RH<sub>*D*</sub>分别为致害最高气温(℃)和空气相对湿度(%),本研究取35℃和70%;*T*<sub>*imax*</sub>、RH<sub>*i*</sub>分别为水稻抽穗扬花期(7—8月)第*i*个极端高温日的日最高气温(℃)和该日的最低空气相对湿度;*T*<sub>*max*</sub>、RH<sub>*min*</sub>为研究时段内(2000—2018年)水稻抽穗扬花期(7—8月)日最高气温(℃)的极大值和最低相对湿度(%)的极小值;*n*为各年水稻抽穗扬花期(7—8月)极端高温日数总和;*D*<sub>*fi*</sub>为某个极端高温日对应的高温危害权重系数;*m*代表该极端高温日为7—8月中的第*m*天,最大取值62(7—8月天数总和)。

研究时段(2000—2018年)多年高温热害累积指

数则将各年得到指数结果求和,作为反映区域近20年极端高温热害发生的频率与强度指标,其公式如下:

$$\sum HIS_{f(N)} = HIS_{f(2000)} + HIS_{f(2001)} + \dots + HIS_{f(2017)} + HIS_{f(2018)} \quad (5)$$

式中:HIS<sub>*f(N)*</sub>为某一年份的高温热害累积指数,*N*取值范围为2000—2018年。

#### (2) 基于多年高温累积指数的ANUSPLIN软件插值

考虑到气温的区域相关性,本研究用于插值的站点不仅含市域范围内7个站点,还包括周边区域的10个站点(图1)。ANUSPLIN软件为专业气象插值软件,由澳大利亚科学家Hutchinson编写,其内置的薄板样条法(Spline),区别于反距离权重法(IDW)、泰森多边形法、克里金插值(Kriging),可以引入经度、纬度、高程等多个因子作为协变量,从而实现插值结果逼真度和光滑度的最佳平衡,更加适用于地形变化较复杂的地区插值,其计算公式<sup>[21]</sup>为:

$$Z_i = f(x_i) + b^T y_i + e_i \quad (i=1, 2, \dots, N) \quad (6)$$

式中:*Z*<sub>*i*</sub>为空间*i*点的因变量;*f*为待估算的关于*x*<sub>*i*</sub>的未知平滑函数;*x*<sub>*i*</sub>为样条独立变量矢量;*y*<sub>*i*</sub>为独立协变量;*b*<sup>*T*</sup>为独立协变量系数;*e*<sub>*i*</sub>为随机误差。

### 1.3.3 水稻高温热害风险性分析

本研究的风险性分析从致灾危险性和承灾体暴露性两方面进行考虑,致灾危险性由多年高温热害累积指数反映,而承灾体暴露性则是以水稻种植面积和人口分布密度来体现。新建研究区2.5 km×2.5 km大小格网作为计算单元,探讨格网尺度下不同区域的水稻高温热害风险性,并根据计算结果进行分等定级。

#### (1) 风险性分析模型

多年高温热害累积指数越高、水稻面积和人口密度越大表示该格网内遭受高温热害概率和因热害发生导致的损失越大,即风险程度高,风险性模型如下:

$$R = H \times (w_{r1} \times S + w_{r2} \times P) \quad (7)$$

式中:*H*表示多年高温热害累积指数;*S*表示水稻种植面积;*P*表示人口数量;*w*<sub>*r1*</sub>取值0.7、*w*<sub>*r2*</sub>取值0.3,分别对应水稻种植面积和人口数量的权重。为了便于计算,将各指标进行归一化处理。

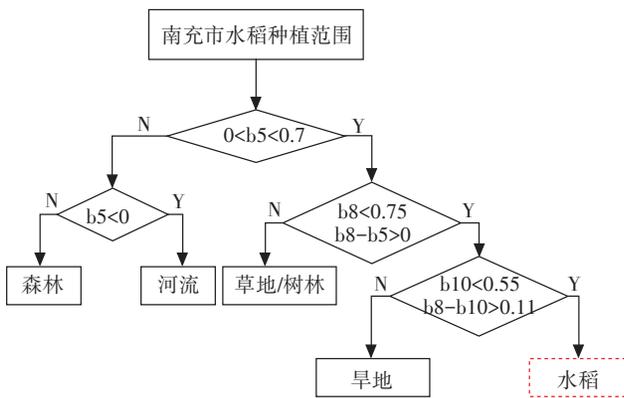
#### (2) 南充市水稻种植区的提取

水稻与旱地作物、林地等自然植被的光谱特征相似<sup>[22]</sup>,借助单一指数或一期遥感影像很难准确区别;而利用水稻生长特征、耕作收获时期与其他自然植被、旱地作物的差异,则能较好地将它们区分。决策树分类通过专家经验总结、数学统计和归纳等方法获

得分类规则,其最大的特点是将多时期及多源数据综合利用以提高分类精度<sup>[23]</sup>。然而,南充市常年云雾天气较多,难以获取到同一年份多期可见度高(云量少)的遥感影像,还需借助相邻年份影像作为补充。因此,本研究对南充市水稻种植范围的提取利用2017年5月26日、2014年8月6日及10月25日,行列号为(38,128)、(39,128)的6景空间分辨率为30 m的TM遥感影像。对下载完成的遥感影像进行辐射定标、大气校正、几何校正、图像拼接和研究区裁剪等一系列预处理后;分析三期影像(5、8、10月)中不同地物时序NDVI数值变化特征以设定决策树各节点阈值,最终将各类地物区分并提取出水稻种植范围(图2)。分类结果则是利用田野调研获得的GPS样点数据和Google高分辨率卫星地图进行精度验证。

(3)水稻高温热害风险区分等级

以格网为空间分析单元,风险区识别基于公式



b5、b8、b10分别为5、8、10月NDVI值

图2 水稻种植面积决策树提取模型

Figure 2 Decision tree model for extrating rice area

(7)计算结果进行,其结果不仅反映不同区域2000—2018年极端高温天气发生的频率、强度(即致灾因子的危险性),还体现了因高温热害造成损失的可能性大小(即受灾体的暴露性)。运用自然断点法对风险性分析计算结果进行重新分类,将值介于0~0.09、0.09~0.23、0.23~0.61的区域分别定义为水稻高温热害低、中、高风险区。

2 结果与分析

2.1 年距平、累计距平对高温异常年份的识别结果

研究区2000—2018年逐日最高气温的年距平及累计距平曲线如图3所示。从距平柱图可知,2006、2011、2013、2016、2017年和2018年的水稻抽穗扬花期(7—8月)平均日最高气温明显高于多年均值水平(19年均值),其中2006、2017年高于多年均值2℃以上;2016、2018年高于多年均值1℃以上;2011、2013年则高出0.5℃以上。参考中国气象局《全国气候影响评价》标准,计算日均最高气温距平值 $\Delta T_i$ 与标准差 $Q$ 的比值( $\Delta T_i/Q$ ),结果显示2006年 $\Delta T_i/Q$ 值大于2,属于气温异常偏高年份;2017年 $\Delta T_i/Q$ 值大于1.5,属气温显著偏高年份;2016、2018年 $\Delta T_i/Q$ 值大于1,属气温偏高年份。因此,可以推测2006年为研究时段南充市极端高温发生最严重的年份,其次为2017年,极端高温天气出现日数显著偏多,2011、2013、2016年和2018年也较常年明显偏多。

从累计距平曲线可以看出,2000—2010年累计距平曲线仅在2006年有短暂大幅上升,其余年份走势不断向下;而2010—2018年累计距平曲线仅在2012年有小幅下降,其余年份不断上升。累计距平值由2000年的-1.38℃降至2010的-6.61℃再升至

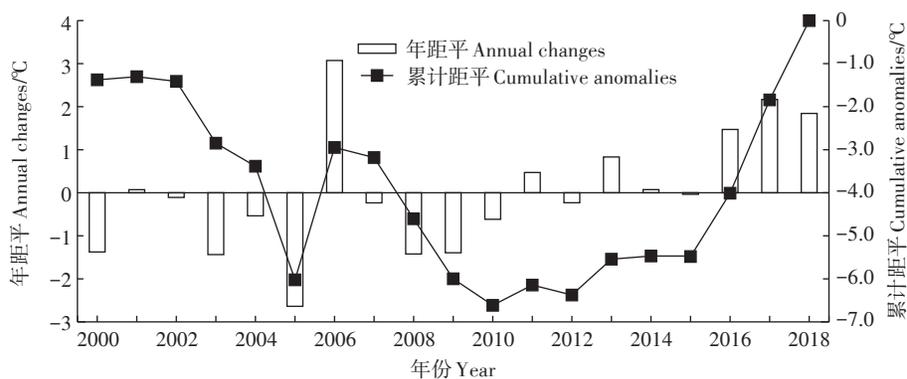


图3 2000—2018年南充市水稻抽穗扬花期平均日最高气温年距平及累计距平图

Figure 3 Diagram of annual changes and cumulative anomalies of extremely high temperature during rice heading-flowering in Nanchong City from 2000 to 2018

2018年的接近0℃,表明2010年为南充市气温变化的转折点。2015—2018年连续4年累计距平曲线大幅上升,可以预见,未来南充市极端高温天气出现的频率和发生的强度持续增大。

### 2.2 县域尺度极端高温发生空间分布特征

基于公式(5)计算得出17个站点的多年高温热害累积指数,利用ANUSPLIN软件进行插值并裁剪出研究区范围,结果如图4所示。总体上,受纬度地带性及地形、地势影响,南部各县(区)水稻抽穗扬花期(7—8月)高温热害累积指数值高于北部各县(市);县域范围内有较广山地分布,其热害累积指数值的差异较大。通过对近20年气象数据整理得出南充市各气象站点极端高温发生累计天数及高温累计度数,蓬安县、营山县为南充市遭受极端高温天气最频繁的两个县,极端高温日数累计(日最高气温大于35℃的天数之和)均超过400d,极端高温累计度数(各极端高温日的当日最高气温与35℃差值求和)均超过700℃;其次为高坪区、南部县和西充县,高温累计日数均超过300d,且高温累计度数均超过570℃。位于市域范围最北部的阆中市虽极端高温累计天数也超过300d,但其累计度数明显小于偏南部的县(区),表明该市极端高温发生强度普遍不高。位于市域东北部的仪陇县则是经受极端高温热害最小的县,极端高温日数为109d,高温累计度数仅为50℃,均较大幅度低于其他县(区)。结合图4B可知,县内地形主要以山地、丘陵为主,且相邻的营山县东北部也分布着较广山地,因而可以有效阻挡和缓解高温热浪的深入和影响。

### 2.3 水稻高温热害风险区识别

对水稻高温热害累积指数插值结果、南充市水稻

和人口分布栅格图分别在2.5 km×2.5 km格网的尺度下进行分区统计,并对统计值进行归一化处理输入至对应的格网单元。引入风险性分析模型,利用三个格网图层统计结果进行计算,最终得出南充市各等级水稻高温热害风险区分布图,如图5所示。

#### (1) 水稻种植区分布

利用决策树分类提取南充市水稻种植范围(图5B),共提取水稻种植面积1.439×10<sup>5</sup>hm<sup>2</sup>,与统计年鉴结果相近。通过实地调研和Google高分辨地图生成的验证样本进行精度检验,显示决策树分类总体精度为83.5%,提取结果较为理想。南充市各县(市、区)均有较密集的水稻种植区分布(格网值大于0.3),其在高坪区、蓬安县和营山县呈集中连片式分布,在阆中市、仪陇县和南部县则是沿河流、谷地呈较明显的条带状分布。南部县西北部、阆中市北部及仪陇县东北部为地势较高的山地,该区域由于地形的限制几乎很少有水稻种植区分布(格网值小于0.19)。

#### (2) 人口分布

根据南充市1 km分辨率人口分布栅格图(图5C)可知,南充市人口分布具有明显的中心性,各县(市、区)的河谷平原地带均有明显的人口密集分布区域,且与周边格网值差异巨大。水稻分布的高密集区一定程度上与人口分布密集区域重合,说明极端高温天气的发生不仅威胁了大面积的水稻生产,也影响了众多人群的生活品质。

#### (3) 各类水稻高温热害风险区识别

根据风险性分析结果(图5D)对三类风险区比例及其在各县(市、区)分布情况进行统计(表1)。从表1可知,南充市近半数区域为水稻高温热害的中、高风险区,其中高坪区、营山县分布着数量最多的热害高风险

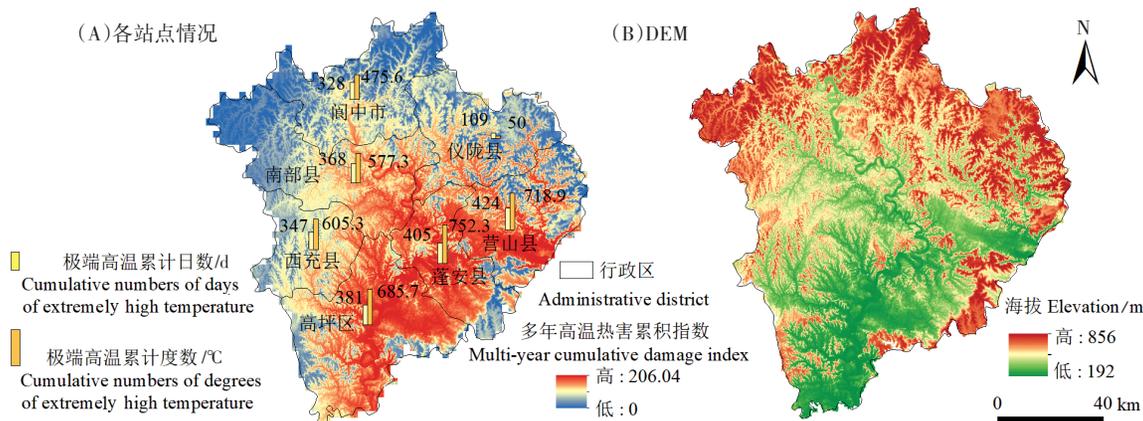
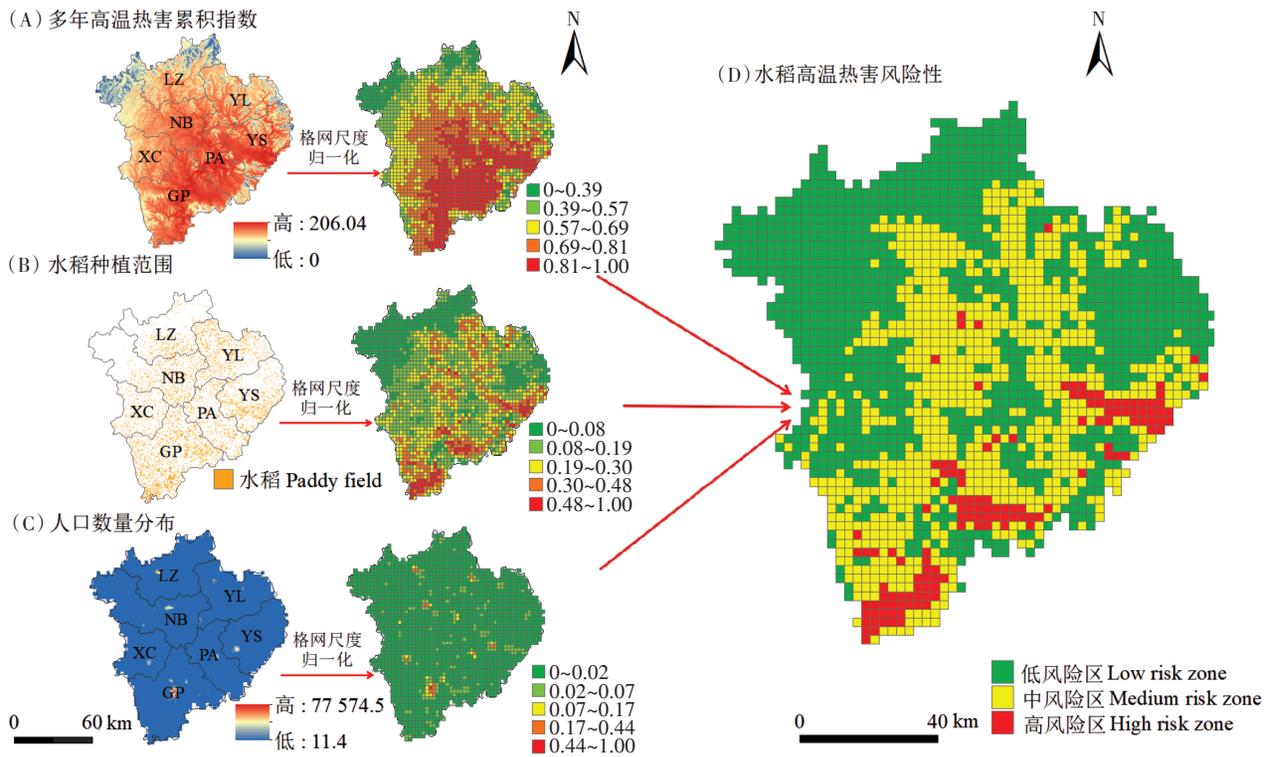


图4 研究区高程图及各地站点极端高温发生累计日数和累计度数

Figure 4 DEM maps of study area and cumulative number of days and degrees of extremely high temperature at each site



图中字符含义分别是:LZ-阆中市;NB-南部县;YL-仪陇县;YS-营山县;XC-西充县;GP-高坪区;PA-蓬安县  
The characters in the diagram mean:LZ-Langzhong;NB-Nanbu;YL-Yilong;YS-Yingshan;XC-Xichong;GP-Gaoping;PA-Peng'an

图5 各等级水稻高温热害风险区的分布

Figure 5 Distribution of high, medium and low risk areas of high-temperature disasters

区,此外,南部县、蓬安县和仪陇县也有少量高风险区分布;水稻高温热害中风险区在各县均有分布且数量差异较明显,高坪区分布数量最多,其次是仪陇县、南部县、蓬安县,营山县、阆中市和西充县也有一定数量分布;低风险区为占比最大的水稻高温热害风险区类型,阆中市、南部县分布着近1/4市域面积的低风险区,仪陇县、营山县、西充县也有大片热害低风险区分布。结合图5D及南充市高程图可知,热害低风险区主要位于市域西北部、北部和东北部的丘陵和山地;热害中风险区主要位于市域中部的河谷地区;热害高风险区则处在市域南部和东南部的平原地区。说明高温热浪从城市偏南部进入,频繁影响市域南部的县(区),在进一步向北部县(市)移动时,受纬度地带性和地形阻挡影响导致发生强度逐渐减弱,从而使偏北部县的水稻密集种植区经受高温热害的频次和强度较南部的县(区)明显减少。另外,海拔较高的山地、丘陵地带由于地形限制,可供利用的耕地面积稀少,因而该区域为水稻高温热害低风险区。

表1 各县(市、区)三类高温热害风险区网格占比(%)

Table 1 Proportion of three types of high temperature disaster grids in all counties

县(市、区) County	低风险区 Low risk zone	中风险区 Medium risk zone	高风险区 High risk zone
高坪	4.03	11.52	3.99
蓬安	4.78	6.03	0.27
营山	6.69	4.47	1.86
仪陇	6.82	7.00	0.04
阆中	11.79	2.79	—
南部	11.52	6.87	0.31
西充	6.87	2.35	—
合计	52.50	41.03	6.47

### 3 讨论

#### 3.1 ANUSPLIN 插值结果验证

以ANUSPLIN插值软件为代表的区域精细化方法在国内外得到了广泛的应用,钱永兰等<sup>[24]</sup>基于中国境内667个基本和基准地面气象观测站点的气象资

料进行插值,并使用未参与插值的全国1 667个站点作为精度检测站点,将ANUSPLIN的样条插值结果与反距离权重法和普通克里格法的插值结果进行对比,显示ANUSPLIN软件插值的误差最小,其结果同样表明,适当增加站点数和提高DEM精度可进一步提高插值精度。

实际验证法是目前应用较为广泛的一种空间插值精度评价方法,其将部分气象站点作为建模数据,用于插值计算;另一部分站点作为验证数据,不参与插值计算。本研究采用该方法对ANUSPLIN软件生成的多年高温热害累积指数插值结果验证,选择已获取的17个气象站点中的14个作为插值数据,其余3个站点作为验证站点,分别为阆中站、蓬安站和广安站。根据插值结果,提取3个检测站点的软件估算值,将其与实际计算值进行对比,从而获得绝对误差和相对误差(表2)。

表2 插值结果误差验证

Table 2 Error validation of interpolation results

站名 Station name	插值结果 Interpolation results	实际计算结果 Calculation results	绝对误差 Absolute error	相对误差 Relative error/%
阆中	123.04	116.21	6.83	5.9
蓬安	163.40	153.08	10.32	6.7
广安	121.00	123.44	2.44	2.0

根据表2中的绝对误差可知,ANUSPLIN插值结果与实际观测值偏离较小;相对误差(绝对误差/实际计算结果)为2.0%~6.7%,表明ANUSPLIN插值结果精度较高。另外,利用ANUSPLIN软件插值完成后,还会输出.log日志文件和.grid栅格文件,分别用于记录插值过程和输出栅格的标准差大小,均可作为插值结果精度和可信度的判断依据。

### 3.2 风险区对下垫面的考虑

本研究基于高温热害风险性分析模型计算结果对南充市各等级水稻高温热害风险区域进行识别,该模型综合考虑致灾因子的危险性和承灾体的暴露性。其中致灾体危险性是基于多年高温热害累积指数值大小进行判别,其反映了南充市2000—2018年水稻高温热害天气发生的频率及强度。而承灾体的暴露性则是由水稻面积和人口数量分布大小体现,因此灾害分区结果较为科学、可信。但不足的是,研究中并未考虑到下垫面对于风险区划的影响,根据前人研究成果可知,城市不透水面会产生热岛效应,对区域增温有较大的贡献率<sup>[25-26]</sup>;相反,水体、绿地则对局部地

表增温具有缓冲作用<sup>[27]</sup>。除此以外,区域内的社会经济水平、基础设施状况等体现风险应对能力的指标也是影响水稻高温热害风险区划的重要因素。因此,在未来工作中可以进一步结合地表覆被、社会经济状况等进行更全面的水稻高温热害风险性分析,从而为人们合理趋利避害、城市规划改造、农业生产安排等提供参考和借鉴。

## 4 结论

(1)在2000—2018年研究时段内,2006、2016、2017年和2018年南充市水稻抽穗扬花期(7—8月)平均日最高气温均明显高于常年水平,其中2006年属于气温异常偏高年份,2017年属于气温显著偏高年份,2016年和2018年则是气温偏高年份。由此可得,2006年为极端高温发生强度最大的年份,其次为2017年,2016年和2018年极端高温发生日数和高温累积度数也较常年明显偏多。

(2)2010年为研究时段南充市气温变化的转折点,2010—2018年水稻抽穗扬花期平均日最高气温明显高于2000—2010年。2015—2018年气温累计距平曲线逐年向上,从2015年的-5.48℃升至2018年的接近0℃。可以预见,未来南充市极端高温天气出现的频率和强度将持续增大。

(3)2000—2018年,蓬安县、营山县为南充市遭受极端高温天气最频繁的两个县,其次为高坪区、南部县和西充县。位于市域北部的阆中市极端高温发生天数虽也累计超过300d,但其高温累积度数明显偏小,出现的极端高温天气强度普遍不高。

(4)水稻分布的高密集区域在一定程度上与人口分布密集区重合,说明极端高温天气发生不仅会威胁大面积的水稻生产,同时也影响了众多人群的生活品质。

(5)南充市近半数区域为水稻高温热害的中、高风险区,其中高风险区在高坪区、营山县分布数量最多;中风险区在各县均有较广泛分布,其中高坪区分布数量最多,其次是仪陇县、南部县、蓬安县和营山县;低风险区主要位于南部县西北部、阆中市北部和营山县东北部的山地、丘陵。由此可得,地形地势是影响水稻高温热害区划的重要因素。

### 参考文献:

- [1] IPCC. Climate change 2013: The physical science basis[M]. Cambridge: Cambridge University Press, 2013.

- [2] Pachauri R K, Allen M R, Barros V R, et al. Climate change 2014: Synthesis report. Contribution of working groups I, II and III to the fifth assessment report of the intergovernmental panel on climate change[R]. IPCC, 2014.
- [3] 气候变化与贫困:中国案例研究(摘选)[J]. 世界环境, 2009(4):50-53. Climate change and poverty: A case study of China (Abstract)[J]. *World Environment*, 2009(4):50-53.
- [4] 田小海, 松井勤, 李守华, 等. 水稻花期高温胁迫研究进展与展望[J]. 应用生态学报, 2007, 18(11):2632-2636. TIAN Xiao-hai, Tsutomu Matsu, LI Shou-hua, et al. High temperature stress on rice anthesis: Research and progress and prospects[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2007, 18(11):2632-2636.
- [5] 任永建, 杜良敏, 肖莺, 等. 近49年来湖北省极端高温事件及其对区域增温的贡献[J]. 气象, 2012, 38(9):1145-1149. REN Yong-jian, DU Liang-min, XIAO Ying, et al. The extreme high temperature events and contribution to regional warming in recent 49 years in Hubei Province[J]. *Meteorological Monthly*, 2012, 38(9):1145-1149.
- [6] 冯德花, 蒋跃林, 杨太明, 等. 沿淮地区高温热害分布特征及其对水稻产量的影响[J]. 安徽农业科学, 2011, 39(16):9680-9682, 9716. FENG De-hua, JIANG Yue-lin, YANG Tai-ming, et al. Distribution characteristics of high temperature damage and its influence on the rice yield in the area along Huaihe River[J]. *Journal of Anhui Agricultural Sciences*, 2011, 39(16):9680-9682, 9716.
- [7] 任义方, 高苹, 林磊, 等. 水稻高温热害气象风险区划和评估[J]. 自然灾害学报, 2017, 26(5):62-70. REN Yi-fang, GAO Ping, LIN Lei, et al. Meteorological risk divisions and assessments of high temperature disaster on rice[J]. *Journal of Natural Disasters*, 2017, 26(5):62-70.
- [8] 李娟, 闫会平, 朱志伟. 中国夏季极端气温与降水时间日数随平均气温变化的定量分析[J]. 高原气象, 2020, 39(3):532-542. LI Juan, YAN Hui-ping, ZHU Zhi-wei. Quantitative analysis of changes of summer extremes temperature and precipitation days over China with respect to the mean temperature increase[J]. *Plateau Meteorology*, 2020, 39(3):532-542.
- [9] 潘建华, 刘晓琼. 四川省2006年盛夏罕见高温干旱分析[J]. 四川气象, 2006, 26(4):12-14. PAN Jian-hua, LIU Xiao-qiong. Analysis of the unusual high temperature & drought during midsummer in Sichuan in 2006[J]. *Journal of Sichuan Meteorology*, 2006, 26(4):12-14.
- [10] 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), 2011, 33(12):39-43. HE Yong-kun, FAN Li, YANG Yuan-yan. Study on the occurrence of high temperature-induced heat damage in rice in the east of Sichuan basin in the past 50 years[J]. *Journal of Southwest University (Natural Science)*, 2011, 33(12):39-43.
- [11] 刘佳, 陈超, 张玉芳, 等. 四川单季稻抽穗扬花期和灌浆结实期高温热害时空特征[J]. 中国农业气象, 2018, 39(1):46-58. LIU Jia, CHEN Chao, ZHANG Yu-fang, et al. Space-time distribution of high temperature disasters on single-cropping rice during heading-flowering stage and filling-harvest stage in Sichuan Province[J]. *Chinese Journal of Agrometeorology*, 2018, 39(1):46-58.
- [12] 南充市地方志办公室. 南充年鉴[M]. 北京: 中国文史出版社, 2017:102. Nanchong Local Records Office. Nanchong yearbook[M]. Beijing: Chinese Literature and History Press, 2017:102.
- [13] 四川省人民政府办公厅. 成渝经济区成都城市群发展规划(2014—2020)[EB/OL]. <http://www.sc.gov.cn/10462/10464/10927/10928/2014/7/1/10306214.shtml>, 2014-07-01. General Office of the Sichuan Provincial People's Government. Chengdu urban agglomeration development plan (2014—2020)[EB/OL]. <http://www.sc.gov.cn/10462/10464/10927/10928/2014/7/1/10306214.shtml>, 2014-07-01.
- [14] 张寒, 潘安, 罗芳. 基于遥感生态指数的南充市生态环境质量评价[J]. 西华师范大学学报(自然科学版), 2020, 41(4):395-403. ZHANG Han, PAN An, LUO Fang. Ecological environment quality evaluation of Nanchong City based on remote sensing ecological index[J]. *Journal of China West Normal University (Natural Sciences)*: 2020, 41(4):395-403.
- [15] 何泽能, 高阳华, 上官昌贵, 等. 盛夏重庆下垫面温度及对热岛效应的影响浅析[J]. 气象灾害防御, 2018, 25(2):14-17, 48. HE Ze-neng, GAO Yang-hua, SHANGGUAN Chang-gui, et al. Analysis on temperature and influence on heat island effect of underlying surface in Chongqing in summer[J]. *Meteorological Disaster Prevention*, 2018, 25(2):14-17, 48.
- [16] 郑祚芳, 高华, 王在文, 等. 城市化对北京夏季极端高温影响的数值研究[J]. 生态环境学报, 2012, 21(10):1689-1694. ZHENG Zuo-fang, GAO Hua, WANG Zai-wen, et al. Numerical simulation for the urbanization effects on a heat wave event around Beijing City[J]. *Ecology and Environmental Sciences*, 2012, 21(10):1689-1694.
- [17] 徐金芳, 邓振镛, 陈敏. 中国高温热浪危害特征的研究综述[J]. 干旱气象, 2009, 27(2):163-167. XU Jin-fang, DENG Zhen-yong, CHEN Min. A summary studying on characteristics of high temperature and heat wave damage in China[J]. *Journal of Arid Meteorology*, 2009, 27(2):163-167.
- [18] 李克让, 林贤超, 王维强. 近四十年来我国气温的长期变化趋势[J]. 地理研究, 1990, 9(4):26-37. LI Ke-rang, LIN Xian-chao, WANG Wei-qiang. The long-range variation trend of temperature in China from 1951 to 1988[J]. *Geographical Research*, 1990, 9(4):26-37.
- [19] 鲁菁, 张玉虎, 高峰, 等. 近40年三江平原极端降水时空变化特征分析[J]. 水土保持研究, 2019, 26(2):272-282. LU Jing, ZHANG Yu-hu, GAO Feng, et al. Temporal and spatial variation characteristics of extreme precipitation in the Sanjiang Plain in recent 40 years[J]. *Research of Soil and Water Conservation*, 2019, 26(2):272-282.
- [20] 阳园燕, 何永坤, 罗攀攀, 等. 三峡库区水稻高温热害监测预警技术研究[J]. 西南农业学报, 2013, 26(3):1249-1254. YANG Yuan-yan, HE Yong-kun, LUO Zi-zi, et al. Study on monitoring and early warning technology of rice heat injury in the Three Gorges Reservoir area[J]. *Southwest China Journal of Agricultural Sciences*, 2013, 26(3):1249-1254.
- [21] Price D T, Mc Kenney D W, Nalder I A, et al. A comparison of two statistical methods for spatial interpolation of Canadian monthly mean climate data[J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2000, 101(2/3):81-94.

- [22] 刘元亮,李艳,吴剑亮.基于LSWI和NDVI时间序列的水田信息提取研究[J].地理与地理信息科学,2015,31(3):32-37. LIU Yuan-liang, LI Yan, WU Jian-liang. Study on extraction of paddy fields based on LSWI and time-series NDVI[J]. *Geography and Geo-Information Science*, 2015, 31(3):32-37.
- [23] Pal M, Mather P M. An assessment of the effectiveness of decision tree methods for land cover classification[J]. *Remote Sensing of Environment*, 2003, 86(4):554-565.
- [24] 钱永兰,吕厚荃,张艳红.基于ANUSPLIN软件的逐日气象要素插值方法应用与评估[J].气象与环境学报,2010,26(2):7-15. QIAN Yong-lan, LÜ Hou-quan, ZHANG Yan-hong. Application and assessment of spatial interpolation method on daily meteorological elements based on ANUSPLIN software[J]. *Journal of Meteorology and Environment*, 2010, 26(2):7-15.
- [25] 赵酉龙,周顺武,郑丹,等.城市化对南京气候影响的数值模拟研究[J].气象与环境科学,2019,42(2):1-9. ZHAO You-long, ZHOU Shun-wu, ZHENG Dan, et al. Numerical simulation study on climate impacts of urbanization in Nanjing[J]. *Journal of Meteorology and Environment*, 2019, 42(2):1-9.
- [26] 潘莹,崔林林,刘昌脉,等.基于MODIS数据的重庆市城市热岛效应时空分析[J].生态学杂志,2018,37(12):3736-3745. PAN Ying, CUI Lin-lin, LIU Chang-mai, et al. Spatiotemporal distribution of urban heat island effect based on MODIS data in Chongqing, China [J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2018, 37(12):3736-3745.
- [27] 曾素平,时琢,赵梅芳,等.城市水体对热岛的缓冲性能沿河岸距离的变化规律[J].生态学报,2020,40(15):5190-5202. ZENG Su-ping, SHI Zhuo, ZHAO Mei-fang, et al. The variation of buffer performance of water bodies on urban heat island along riverbank distance[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2020, 40(15):5190-5202.