

成渝地区农田生产力对骤旱敏感性分析^{*}

赵逸飞^{1,2}, 姜亮亮^{1,2}, 刘睿^{1,2}, 李奇锦^{1,2}, 唐思怡^{1,2}

(1. 重庆师范大学 地理与旅游学院; 2. 重庆师范大学 地理信息系统应用研究重庆市高校重点实验室, 重庆 401331)

摘要:干旱是对农田生产力影响较大的气象灾害,且正在更多地以骤旱形式表现出来。利用 2000—2020 年的土壤湿度、总初级生产力和农作物类型数据,基于游程理论和植被敏感指数分析了旱情较为严重的 2006 和 2010 年成渝地区农田生产力对骤旱敏感性,并结合地理加权回归模型确定了对农田生产力影响最大的骤旱特征参数。研究结果显示:1) 2010 年成渝地区骤旱持续时间和骤旱间隔时间总体较 2006 年时更长,骤旱烈度和骤旱严重度总体较 2006 年时更高,但骤旱次数与 2006 年时相比差异较小;2) 成渝地区农田生产力对骤旱敏感性在 2006 年总体上较为均一、空间差异性较小,在 2010 年则呈现出明显的“西高东低”空间分异格局;德阳市和绵阳市的农田生产力对骤旱敏感性高于该地区其他区域;3) 成渝地区水稻型和其他农作物型农田的生产力对骤旱敏感性相对较高;4) 骤旱持续时间与骤旱烈度为影响成渝地区农田生产力的主要因素;5) 季季稻农田的生产力对骤旱敏感性明显高于单、双季稻农田,灌溉农田的生产力对骤旱敏感性明显低于雨养农田。研究结果可为成渝地区的骤旱防治和农业结构调整工作提供科学依据。

关键词:骤旱;农田生产力;敏感性;成渝地区

中图分类号:Q175

文献标志码:A

文章编号:1672-6693(2025)03-0077-13

干旱是全球范围内发生频率高、持续事件长、造成危害大^[1]、对农田生产力影响较大的气象灾害。联合国政府间气候变化专门委员会第 6 次评估报告指出,极端干旱正在逐渐成为全球变暖带来的各种灾害中最大的灾害^[2]。有研究显示,气候变暖正在改变干旱的发生频率和强度^[3-4],并加剧了干旱的危害性^[5]。有关植物生理生态学的研究表明,干旱胁迫会影响植物体内水分和养分的运输,并使植物光合速率减慢、细胞受损,进而导致植株叶片枯萎、生长缓慢甚至死亡^[6-11]。有研究指出极端干旱将使全球植被总初级生产力(gross primary productivity, GPP)下降幅度从 1850—1999 年的 28% 增至 2075—2099 年的 49%^[12]。干旱对农业生产有着极大影响。据统计,全球每年因干旱造成的直接经济损失达到近百亿美元,其中农业损失占了绝大部分^[13]。在中国,干旱造成的直接经济损失逐年增长,且居于各类自然灾害造成损失的前列^[14]。更为关键的是,目前干旱正更多地以突发性强、发展迅速、强度高^[15]的骤旱形式表现出来,并频发于中国南方半湿润区和湿润区。据估计,骤旱发生频率在未来仍有明显上升的趋势^[16-17]。因此,为了提升农业生产的稳定性和完善对骤旱的应对策略,加强关于骤旱对农田影响的研究十分必要。

成渝地区地理位置独特、地形地貌复杂,区域气候为亚热带季风性湿润气候,干旱发生频率较高^[18],例如该地区于 2006 年经历了特大伏旱,在 2009—2011 年又经历了罕见的持续性干旱^[19-20]。根据张峰^[21]的研究,近些年来在成渝地区由高温骤旱导致的农作物受灾面积约为 $1.33 \times 10^6 \text{ hm}^2 \cdot \text{a}^{-1}$;尤其在 2006 年夏季,成渝地区遭受了 1951 年来同期最严重的干旱,农作物受灾面积达 $2.493 \times 10^6 \text{ hm}^2$,绝收面积达 $6.86 \times 10^5 \text{ hm}^2$,粮食减产超过 $3 \times 10^6 \text{ t}$,农业经济损失高达 162.15 亿元。因此,开展成渝地区农田生产力对骤旱敏感性的研究对于当地农业的发展十分重要,同时也体现了此类研究对于生态系统保护与维持的重要性^[22]。

在已有的关于农田生产力与干旱关系的研究中,一部分研究者重点探讨了农作物的时空分布格局、抗旱能力以及对干旱的监测和预防^[23-25];也有部分研究者以定量的方法探索了植被对干旱的响应,研究方法包括但不限于残差分析、相关性分析、分离趋势和季节项的突变点方法^[26-28]。这些研究成果丰富了人们在植被生产力对

^{*} 收稿日期:2024-11-18 修回日期:2025-03-10 网络出版时间:2025-06-13T16:50

资助项目:国家自然科学基金青年科学基金项目(No. 42201124);重庆市自然科学基金创新发展联合基金项目(No. CSTB2024NSCQ-LZX0064);中国博士后科学基金项目(No. 2023M740433)

第一作者简介:赵逸飞,男,研究方向为时空地理大数据分析,E-mail:1115387415@qq.com;通信作者简介:姜亮亮,男,副教授,博士,E-mail:jiangliang@cqnu.edu.cn

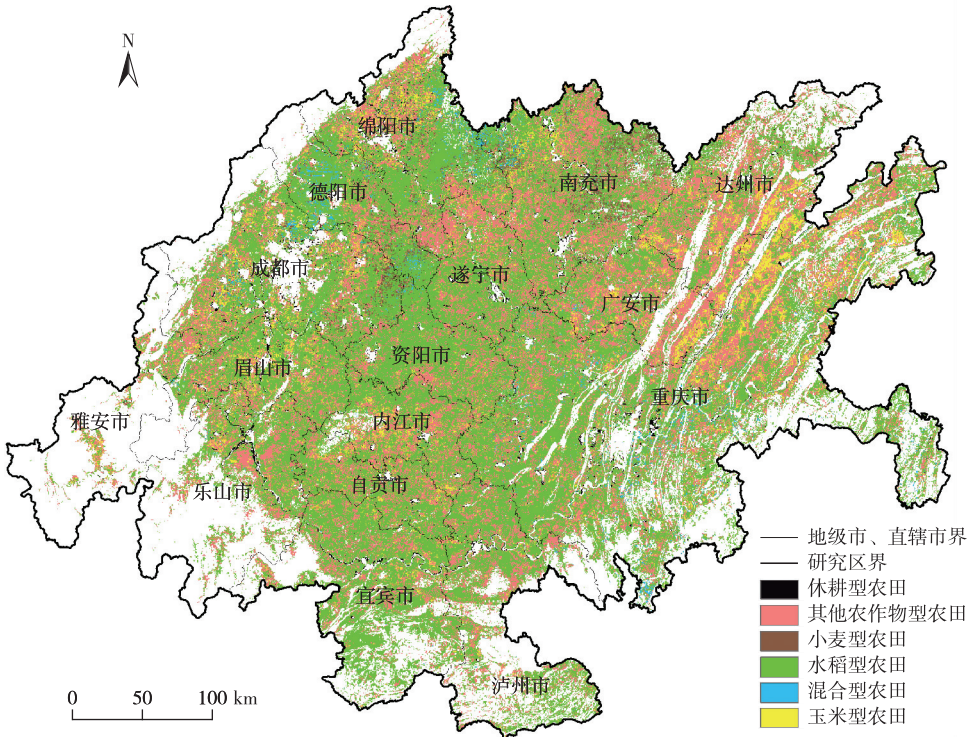
网络出版地址:https://link.cnki.net/urlid/50.1165.N.20250613.1537.002

干旱响应方面的认知,但它们更多偏重于利用植被遥感数据和气象数据来探讨植被对于干旱的年际或季节平均水平的响应,而有关植被对于干旱连续响应过程的研究较为缺乏,以成渝地区为研究区域的研究则甚为罕见。由于成渝地区是中国重要的粮食生产区域之一,特别是当地大面积种植的水稻可能存在长期的“水分记忆”^[29-30],从而对于干旱尤其是骤旱的发生可能更加敏感;因此本研究基于上述研究背景,通过一系列参数^[31-32]量化骤旱的基本特征,利用农田 GPP 异常变化量化农田生产力对骤旱敏感性,并剖析了它的特征。本研究不仅有助于深化有关骤旱对农田生产力影响的认知,同时也为成渝地区今后开展基于骤旱背景下的农业结构调整工作提供科学依据和参考。

1 数据与方法

1.1 研究区概况

成渝地区位于长江上游,地处四川盆地,东邻湘鄂、西通青藏、南连云贵、北接陕甘;成渝地区城市群是中国西部地区发展水平最高、发展潜力较大的城镇化区域^[33],是实施长江经济带和“一带一路”倡议的重要组成部分;建设成渝地区双城经济圈,对于促进新形势下的区域协调发展,引领西部地区高质量发展有重要意义。成渝地区主要植被类型为农田,覆盖面积约为区内所有植被类型覆盖面积的 77.25%;农田含水量来源主要为降雨,且容易受骤旱影响。成渝地区是骤旱最为频发的地区之一,也是农业生产对气候条件依赖性较强的区域。成渝地区农作物种植格局较为复杂,不同农田类型的空间分布如图 1 所示。其中其他农作物型农田以接近 60%的面积占比排名第 1;其次为水稻型农田,面积占比超过 30%;玉米型、小麦型、混合型和休耕型农田面积占比较小(表 1)。



注:地图底图来源于自然资源部(<http://bzdt.ch.mnr.gov.cn/>),审图号:GS(2019)1822 号,下同。

图 1 成渝地区不同类型农田的空间分布示意图

Fig. 1 The illustrative map of spatial distribution of different farmland types in Chengdu-Chongqing Region

表 1 成渝地区不同农田类型的面积占比

Tab. 1 Area share of different farmland type in Chengdu-Chongqing Region

农田类型	面积/km ²	面积占比	农田类型	面积/km ²	面积占比
休耕型农田	1 391.25	1.07%	小麦型农田	1 948.50	1.50%
玉米型农田	8 390.25	6.45%	混合型农田	867.00	0.67%
水稻型农田	39 537.50	30.38%	其他农作物型农田	78 007.50	59.93%

1.2 研究数据来源

1.2.1 土壤湿度数据

土壤湿度是表示土壤干湿程度的物理量,通常用土壤含水量占干土质量的百分比表示。土壤湿度决定了农作物的水分供应状况。土壤湿度过低意味着土壤出现干旱,作物光合作用不能正常进行,进而影响农田生产力。参考文献[34],本研究用土壤湿度数据来源于中国国家青藏高原科学数据中心的“基于站点观测的中国 1 km 土壤湿度日尺度数据集(2000—2022)”(<https://data.tpdc.ac.cn/zh-hans/data/49b22de9-5d85-44f2-a7d5-a1ccd17086d2>)。该数据集包含了本研究所需的 2000—2020 年、日尺度、以 10 cm 为间隔 10 层深度(10~100 cm)的高时空分辨率土壤湿度数据。

1.2.2 植被 GPP 数据

植被 GPP 是绿色植被在单位时间和单位面积内通过光合作用固定太阳能合成的有机物质总量,能够反映植被的生产能力。参考文献[35],本研究利用植被 GPP 数据来衡量农田生产力状况,该数据来源于中国国家青藏高原科学数据中心的“中国区域 PML-V2 水碳耦合的陆地蒸散发与总初级生产力数据集”(<https://data.tpdc.ac.cn/zh-hans/data/40f57c67-33a6-402d-bd37-6ede91919f23>),其中包括 GPP、植被蒸腾、土壤蒸发、冠层截流蒸发和水体及冰雪蒸发共 5 个要素的数据;该数据集的时空分辨率为 1 d、500 m,时间跨度为 2000—2020 年。

1.2.3 农作物类型数据

本研究选用中国种植模式数据^[36]来区分不同地区农田类型。该数据提供了 2015—2021 年的中国种植模式数据,空间分辨率为 500 m,也是中国第 1 个基于 MODIS 的国家复种系统年度地图。该数据将农作物类型分为了 4 类:小麦、水稻、玉米和其他农作物,且分类较为精细——不仅包含不同农作物轮作的农田类型,还包含了如 1 年可收获 2 季的双季稻的双季作物农田。由于农田类型分类较为复杂,本研究将种植同种作物的农田归为一类,将轮作型农田定义为“玉米小麦水稻混合型农田”;在年份上本研究选取干旱年份的中间年份即 2015 年作为农田类型分类的时间依据。

1.2.4 农田灌溉类型数据

本文选取用中国科学院空天信息创新研究院刘良云^[37]发布的“GLC_FCS30D:1985—2022 年全球 30 m 精细土地覆盖动态监测数据集”对土地覆被类型分类中的雨养耕地和灌溉耕地数据进行分析。该数据集是国际上首套采用连续变化检测的 30 m 全球精细土地覆盖动态产品,是包含了 35 个土地利用类型的精细分类系统,时间跨度为 1985—2022 年,2000 年前数据更新周期为 5 a,2000 年后的数据为逐年更新。

1.3 研究方法

1.3.1 骤旱的特征参数

在本研究中,土壤水分指数(SMI)小于 0.2 且该状态总持续时间大于 15 d 时被识别为骤旱,同时基于游程理论来量化骤旱的基本特征^[40],如图 2 所示。骤旱的特征参数主要包括以下 5 个:1) 骤旱持续时间(D_D),即从本次骤旱开始到本次骤旱结束所经历的时间(单位:d);2) 骤旱严重度(D_S),即骤旱期间每日 SMI($I_{SM,i}$)值的累加值;3) 骤旱烈度(D_1),即指骤旱期间每日 SMI 值的平均值;4) 骤旱间隔时间,即从前一次骤旱结束到下一次骤旱开始所经历的时间(单位:d);5) 骤旱次数,即在一定时间范围内出现骤旱的次数。其中骤旱严重度和骤旱烈度的计算公式如下:

$$D_S = \sum_{i=1}^{D_D} |I_{SM,i}|, D_1 = \frac{D_S}{D_D}。$$

1.3.2 农田生产力对骤旱敏感性

本研究采用标准化异常指数衡量 SMI 或 GPP 的异常状态^[38],该指数的计算公式如下:

$$I_{SA(i,j)} = \frac{(X_{i,j} - \bar{X}_j)}{\sigma_j},$$

其中: $I_{SA(i,j)}$ 为 SMI 或 GPP 在第 j 个月份中第 i 日的标准化异常指数,它的值大于(或小于)0 表示 SMI 或 GPP 高于(或低于)正常水平; $X_{i,j}$ 表示第 j 个月份中第 i 日的 SMI 或 GPP; $\bar{X}_j$ 和 σ_j 分别表示 SMI 或 GPP 在第 j 个月份的平均值和标准差。

骤旱对农田 GPP 的影响如图 3 所示。当 GPP 标准化异常指数首次达到 -0.5 时,表示农田生产力对骤旱开始产生响应;当 GPP 标准化异常指数再次波动回到 -0.5 时,表示农田生产力已经恢复。在本研究中,用植被敏感指数衡量农田生产力对骤旱敏感性,该指数可由下式定义^[39]:

$$V_{SD} = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m I_{SA(i,j)},$$

其中: V_{SD} 为植被敏感指数, n 取值范围为 $[1,30]$, m 取值范围为 $[1,12]$ 。

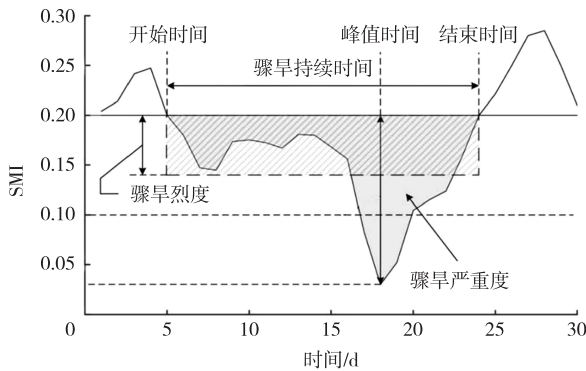


图 2 基于游程理论的骤旱基本特征示意图

Fig. 2 The schematic representation of the basic features of flash droughts based on the run length encoding

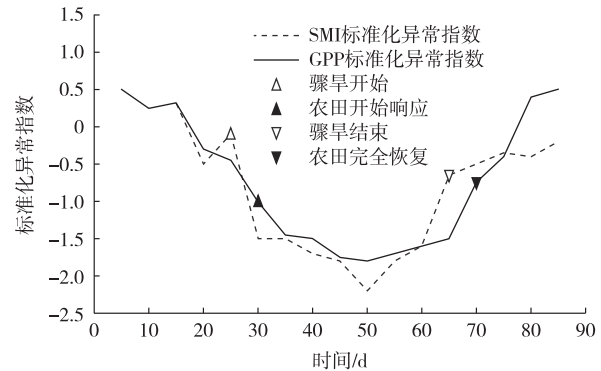


图 3 骤旱对农田 GPP 的影响

Fig. 3 Effects of flash droughts on farmland GPP

1.3.3 地理加权回归模型

空间数据分析中,变量值一般都是以给定空间单元为抽样单位来得到的,随着空间位置的变化,变量间的关系或结构会发生变化,这种因地理位置的变化而引起的变量间关系或结构的变化被称为空间非平稳性^[41]。空间非平稳性普遍存在于空间数据中,而普通线性回归模型分析是建立在变量间具有同质性的前提下,因此在处理空间数据时很难得到满意结果。为解决这一问题,需要对传统回归分析方法进行优化,寻求一种考虑局部特性的回归模型,地理加权回归模型由此诞生^[42]。地理加权回归模型在地理统计学上有着广泛的应用,本研究则主要通过该模型分析结果中决定系数(R^2)的大小确定对农田生产力影响最大的骤旱特征参数。

2 结果与讨论

2.1 不同严重干旱年份骤旱的特征参数对比分析

根据相关文献和气象资料^[43-44],2000—2020 年成渝地区旱情较为严重的年份主要为 2006 年与 2010 年,本研究选取上述 2 个典型年份来探究骤旱的特征参数与农田生产力对骤旱敏感性。图 4 和图 5 显示了 2006 和 2010 年具有不同骤旱特征参数值的农田在成渝地区的空间分布状况,从中可以得到以下结果:

1) 2006 年成渝地区农田骤旱持续时间总体相对较短,大部分农田的骤旱持续时间在 120 d 以下,仅有德阳市和资阳市的农田持续骤旱 200 d 以上;2010 年成都市及周边地级市农田的骤旱持续时间总体相对较长,大部分地区农田的骤旱持续时间在 120 d 以上,而重庆市农田的骤旱持续时间较短(图 4a)。

2) 2006 年成渝地区西部农田骤旱严重度较低,东部的重庆市和达州市农田骤旱严重度偏高;2010 年成渝地区具有不同骤旱严重度值的农田呈更为明显的“西高东低”的空间分异格局,且骤旱严重度值较高的农田集中分布,其中绵阳市、德阳市和资阳市农田的骤旱严重度值最高(图 4b)。

3) 2006 和 2010 年成渝地区农田骤旱烈度的最高值与最低值均较为接近。2006 年成渝地区农田骤旱烈度总体偏低,骤旱烈度较高的农田分布于重庆市、达州市、德阳市和绵阳市;2010 年成渝地区骤旱烈度较高的农田分布于德阳市、绵阳市、资阳市和遂宁市,其余地区骤旱烈度较低(图 4c)。

4) 2006 年成渝地区农田骤旱间隔时间总体较短,大部分农田的骤旱间隔时间在 17~120 d,而德阳市周围农田的骤旱间隔时间超过了 250 d。2010 年成渝地区西部农田骤旱间隔时间较 2006 年时更长,但最高值小于 2006 年时;东部的重庆市、达州市等地农田骤旱间隔时间与 2006 年时相比差别较小;整体上看,成渝地区具有不同骤旱间隔时间值的农田呈“西高东低”的空间分布格局(图 5a)。

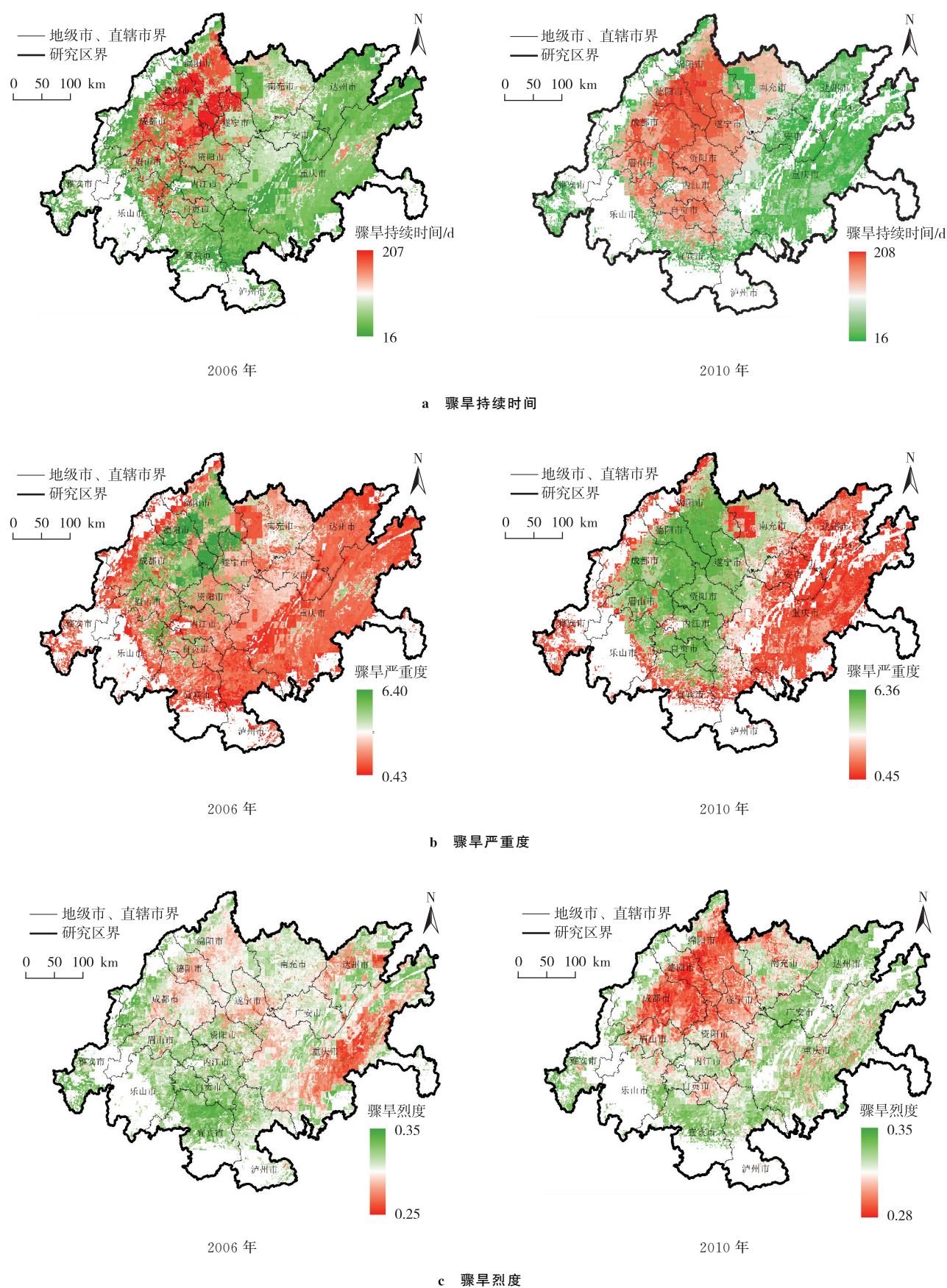


图 4 成渝地区 2006 和 2010 年骤旱基本特征 (I)

Fig. 4 Basic characteristics (part I) of flash droughts in Chengdu-Chongqing Region in 2006 and 2010

5) 2006 和 2010 年成渝地区农田骤旱次数差异较小,其中大部分农田骤旱次数不超过 6 次;骤旱次数较多的农田在 2006 年主要分布于南充市、内江市、自贡市和重庆市西部,在 2010 年仅在南充市有少量分布(图 5b)。

2.2 不同严重干旱年份农田生产力对骤旱敏感性对比分析

2006 和 2010 年成渝地区农田生产力对骤旱敏感性在空间分布上有较大差异。2006 年成渝地区具有不同农田生产力对骤旱敏感性的农田呈镶嵌式的空间分布,其中:敏感性较高的农田面积占比较小,并集中分布在绵阳市、成都市、资阳市等地,同时在其余地区也有极少量的分布;敏感性为中等和较低的农田面积占比较大,且敏感性中等的农田主要分布在成渝地区中部的遂宁市周围,其余地区主要分布着敏感性较低的农田(图 6a)。2010 年成渝地区具有不同农田生产力对骤旱敏感性的农田呈明显的“西高东低”分布格局,且东部农田的敏感性差异较小,西部敏感性较低的农田主要分布在边缘地区,其余区域则分布着连片的敏感性较高的农田(图 6b)。

此外由表 2 可知:虽然 2006 年混种玉米、小麦和水稻的混合型农田的植被敏感指数平均值的绝对值最高,但这是因为混合型农田所种植的每种农作物对骤旱的响应能力有差别,故一定程度上影响了对该类型农田的植被敏感指数计算结果;其他农作物型农田在成渝地区面积最大,且该类型农田的植被敏感指数的最高值在 2 个严重干旱年份中均比其他类型农田的这一统计参数更高;小麦型农田的植被敏感指数平均值的绝对值虽然较高,但是成渝地区小麦种植面积比例低于 2%,且结合当地饮食习惯,因而暂无讨论意义;此外,成渝地区水稻种植面积较大,水稻型农田生产力对骤旱敏感性在 2 个严重干旱年份中均较高。

2.3 不同严重干旱年份对农田生产力影响最大的骤旱特征参数分析

本研究通过地理加权回归模型进一步分析发现,2006 和 2010 年成渝地区对农田生产力影响最大的骤旱特征参数在不同区域存在差异,即某一区域农田生产力受某一骤旱特征参数影响最大,而另一区域农田生产力受另一骤旱特征参数影响最大。以上述结果为依据,按对农田生产力影响最大的骤旱特征参数就成渝地区农田进行命名和分类,分别为:骤旱持续时间型农田、骤旱严重度型农田、骤旱烈度型农田、骤旱间隔时间型农田和骤旱次数型农田。由图 7 可知,2006 和 2010 年成渝地区上述类型农田的空间分布格局有一定差异,仅从骤旱持续时间型和骤旱烈度型农田来看,2 个年份中 2 种类型农田分布恰好相反,仅少部分区域为同类型农田,其余类型农田则无明显的空间分布特征,但表现出以下规律:骤旱持续时间型农田面积占比最高(约 60%)、骤旱烈度型农田面积占比次之(约 30%)、其余类型农田面积占比较低(总和不足 10%)。整体上看,骤旱持续时间与骤旱烈度为影响 2006 和 2010 年成渝地区农田生产力的主要因素,其中又以骤旱持续时间为最重要的因素。

关于骤旱持续时间在影响农田生产力方面是具有最高解释力的骤旱特征参数这一结果,可以进一步从以下 2 个方面进行更为深入的理解:1) 从农田灌溉方式上看,成渝地区雨养农田面积占比较高,非常依赖自然降水进行灌溉,且极易受干旱影响。2) 从植物生理生态学角度来看,骤旱常造成作物根系自疏,主根上大量毛细根与侧根衰亡脱落,由此导致根系对水分的吸收功能下降,作物出现萎蔫现象甚至脱水死亡;同时,骤旱也使得作物叶表皮气孔无法正常开张、叶绿素的合成被抑制,由此导致光合作用能力降低;更为重要的是,干旱持续时间的延长会加重对作物根系和光合作用能力的损伤,最终导致农田生产力下降^[6-11]。

2.4 高农田生产力对骤旱敏感性区域分析

本研究以在 2006 和 2010 年农田生产力对骤旱敏感性高于该地区其他区域的德阳市和绵阳市(图 6)为例,深入分析骤旱对成渝地区农田生产力的具体影响。由图 8 可知,德阳市中部和东南部农田生产力对骤旱敏感性较高,其中敏感性最高的农田位于东南部;西北部虽然在 2006 和 2010 年中也呈现出了部分农田生产力对骤旱敏感性较高的情况,但这些农田的分布比中部更杂乱,而中部的高敏感性农田分布则呈现出相对均一的情况。2006 年绵阳市东部农田生产力对骤旱敏感性较高,但总体来看,高敏感性农田并未呈现出明显的连片集聚现象,但 2010 年南部大片农田生产力对骤旱敏感性较高,且集聚现象明显。

2006 年德阳市和绵阳市骤旱程度较高,对农田生产力的影响较大。与 2005 年时相比,2006 年德阳市和绵阳市的粮食产量分别下降了约 12%和约 16%;2010 年的骤旱程度虽然弱于 2006 年时,但对农田生产力仍有一定的影响(表 3)。此外,德阳市和绵阳市水稻型农田和其他农作物农田面积占比较高(图 8a),在骤旱发生的情况下,农田生产力也更容易受到影响。

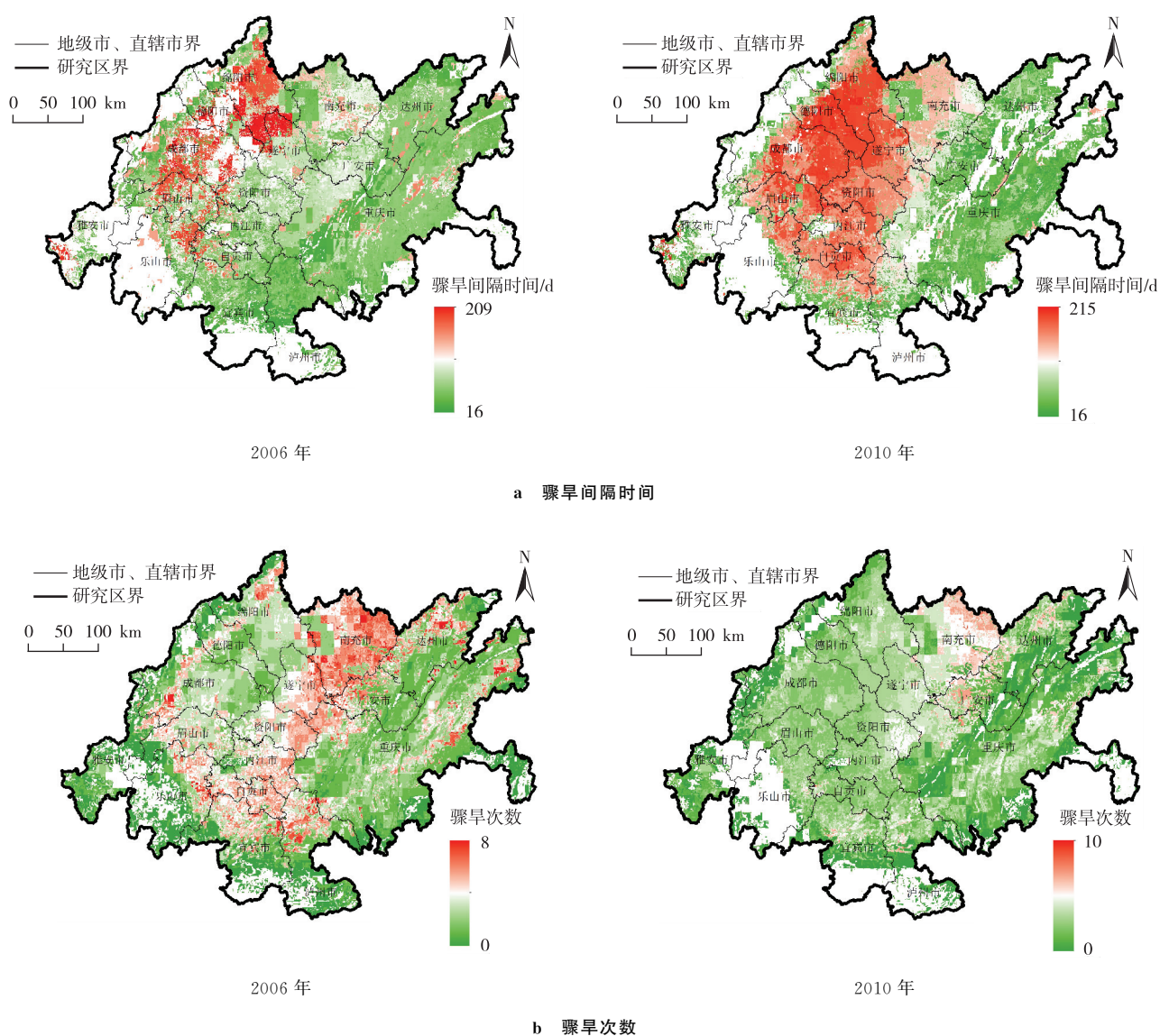


图5 成渝地区2006和2010年骤旱基本特征(Ⅱ)

Fig. 5 Basic characteristics (part II) of flash droughts in Chengdu-Chongqing Region in 2006 and 2010

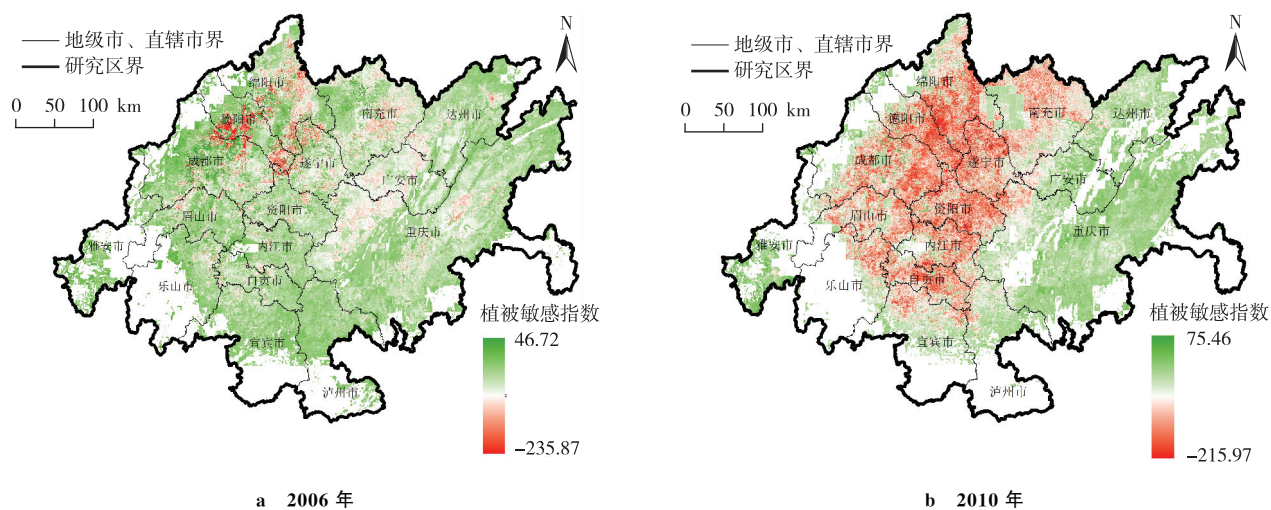


图6 2006和2010年成渝地区农田生产力对骤旱敏感性

Fig. 6 The sensitivity of farmland productivity to flash droughts in Chengdu-Chongqing Region in 2006 and 2010

表 2 2006 和 2010 年成渝地区农田生产力对骤旱敏感性统计数据

Tab. 2 Statistical data on the sensitivity of farmland productivity to flash droughts in Chengdu-Chongqing Region in 2006 and 2010

农田类型	植被敏感指数(2006 年)					
	面积/km ²	最低值	最高值	极差	平均值	标准差
休耕型农田	1 347.00	−384.72	395.16	779.88	−36.72	49.30
玉米型农田	8 002.25	−570.97	497.90	1 068.87	−54.70	43.43
水稻型农田	36 867.75	−570.93	515.83	1 086.76	−55.95	38.88
小麦型农田	1 909.25	−473.30	660.02	1 133.31	−68.32	56.59
混合型农田	848.75	−633.66	589.44	1 223.10	−75.90	88.91
其他农作物型农田	70 096.25	−624.13	1 098.63	1 722.76	−55.90	49.75

农田类型	植被敏感指数(2010 年)					
	面积/km ²	最低值	最高值	极差	平均值	标准差
休耕型农田	1 287.50	−342.40	159.47	501.87	−69.76	62.46
玉米型农田	7 105.25	−348.54	214.53	563.07	−56.10	59.94
水稻型农田	33 381.75	−371.36	242.09	613.46	−70.26	60.26
小麦型农田	1 860.50	−352.43	94.52	446.95	−94.59	56.61
混合型农田	821.75	−354.17	135.26	489.43	−90.04	65.28
其他农作物型农田	62 842.00	−408.76	396.55	805.31	−71.21	63.15

鉴于水稻型和其他农作物型农田的生产力对骤旱敏感性相对较高,建议在德阳市和绵阳市采取以下措施以应对骤旱对农田生产力的不利影响:1) 对水稻和其他农作物的种植面积进行适当的调整,并适量增加玉米、小麦等耐旱农作物的种植面积,抑或引进更加先进的耐旱水稻品种,以降低该区域农田生产力对骤旱敏感性,从而保证粮食产量的稳定;2) 种植水稻和其他农作物的区域应当加大对农田水利建设的投入,在修建新的水利设施的同时对老化的水利设施进行修复,从而增强农田抵御自然灾害的能力;3) 改良灌溉技术,在降水不足时保证农田不断水,增强骤旱发生时农田的缓冲能力,最大程度减小骤旱对农田生产力的影响;4) 采用保水剂或抗旱剂以保证农田土壤含水量的稳定,调控农作物在生长过程中的生化指标,增强水稻等作物的耐旱能力和生产能力^[45];5) 在农作物种植区域,应增强居民的节水意识,强化对水资源的管理,优化对水资源的利用;6) 建立健全骤旱监测和预警系统,提高骤旱预测的准确度,提升相关部门在防旱供水时的调度能力。

2.5 农田生产力对骤旱敏感性的空间差异性成因

成渝地区农作物以水稻和其他类型农作物为主,两者种植面积占比之和近 90%(图 1、表 1),为此本研究就这 2 种类型的农作物展开深入讨论。成渝地区水稻型和其他农作物型农田空间分布、灌溉方式及农田生产力对骤旱敏感性如图 9 所示。在农田灌溉方式上,成渝地区农田以雨养农田为主;而相较之下,灌溉农田则可在很大程度上降低干旱所带来的负面影响^[46],例如眉山市、雅安市、泸州市、重庆市等灌溉农田聚集区农田生产力对骤旱敏感性较低,尤其是泸州市和重庆市的农田在 2006 和 2010 年均保持了较低的敏感性,一定程度上说明了在骤旱多发地区灌溉是农作物应对干旱等极端气候条件的有效调节机制^[47]。在农作物类型上,成都市、绵阳市和德阳市的农田以三季稻和其他农作物为主,也是 2006 和 2010 年中农田生产力对骤旱敏感性较高的区域。本研究推测这一状况可能与当地良好的经济发展状况和密集的人口有关——当地为了保证粮食供应而选择了种植生长期更短的季节稻。结合图 9c、d 可知,成渝地区农田生产力对骤旱敏感性较高的农田分布与三季稻农田分布方式较为相似;尤其是在 2006 年,三季稻农田分布较为集中的德阳市和绵阳市的农田生产力对骤旱敏感性较高。即使是在三季稻农田零散分布的其他区域,也仍然出现了上述状况。因此,建议协调农田生产力对骤旱敏感性较高区域的水稻种植类型,在保障粮食产量的情况下种植一定面积的双季稻以增加农田的抗旱能力。

4 结束语

本研究深入分析了 2006 和 2010 年这 2 个严重干旱年份中成渝地区骤旱基本特征,然后在此基础上量化了

该地区农田生产力对骤旱敏感性,区分了不同类型农田生产力对骤旱敏感性的差异,探讨了对农田生产力影响较大的骤旱特征参数,主要结果如下:

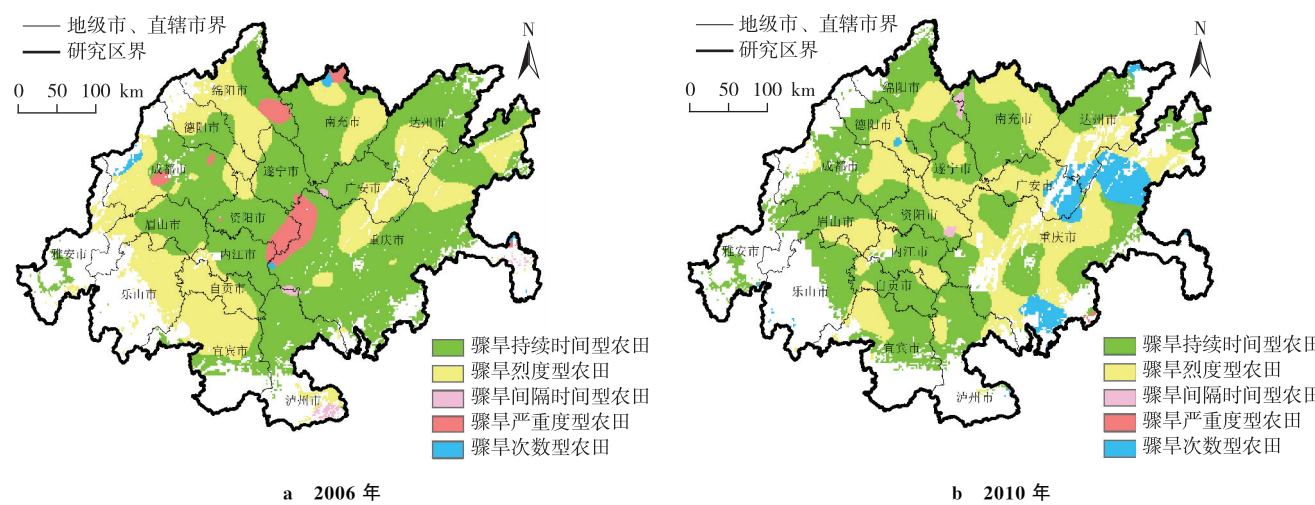


图 7 2006 和 2010 年生产力受不同骤旱特征参数影响最大的农田在成渝地区的空间分布
Fig. 7 The spatial distribution of farmland with the greatest impacts from different flash droughts characteristic parameters in Chengdu-Chongqing Region in 2006 and 2010

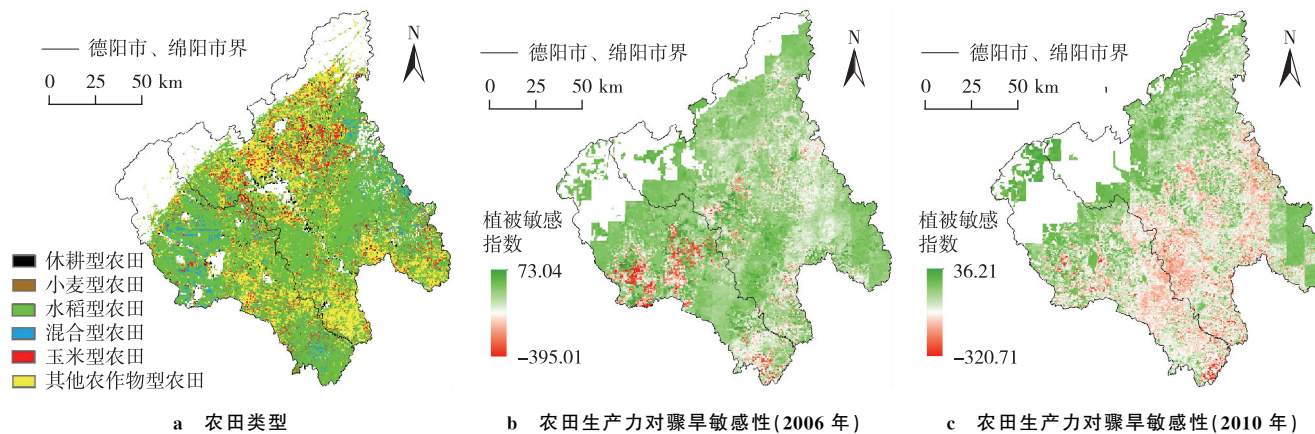


图 8 德阳市和绵阳市农田类型及农田生产力对骤旱敏感性
Fig. 8 Farmland types and sensitivities of farmland productivity to flash droughts in Deyang City and Mianyang City

表 3 2003—2014 年德阳市和绵阳市的粮食产量

Tab. 3 The grain production in Deyang City and Mianyang City from 2003 to 2014								万 t
年份	德阳市	绵阳市	年份	德阳市	绵阳市	年份	德阳市	绵阳市
2003 年	177.80	197.40	2007 年	174.04	198.05	2011 年	184.18	216.38
2004 年	184.08	212.84	2008 年	175.20	200.38	2012 年	185.73	217.04
2005 年	190.41	217.94	2009 年	179.28	204.83	2013 年	188.16	221.10
2006 年	166.81	183.90	2010 年	179.89	206.66	2014 年	187.36	221.71

- 1) 与 2006 年时相比,2010 年成渝地区骤旱持续时间和骤旱间隔时间总体上更长,骤旱烈度和骤旱严重度总体上更高,但骤旱次数同 2006 年时相比差异较小。
- 2) 2006 年成渝地区农田生产力对骤旱敏感性总体上较为均一,空间差异性较小;2010 年该地区农田生产力对骤旱敏感性则呈现出明显的“西高东低”空间分异格局;德阳市和绵阳市农田生产力对骤旱敏感性高于该地区其他区域。

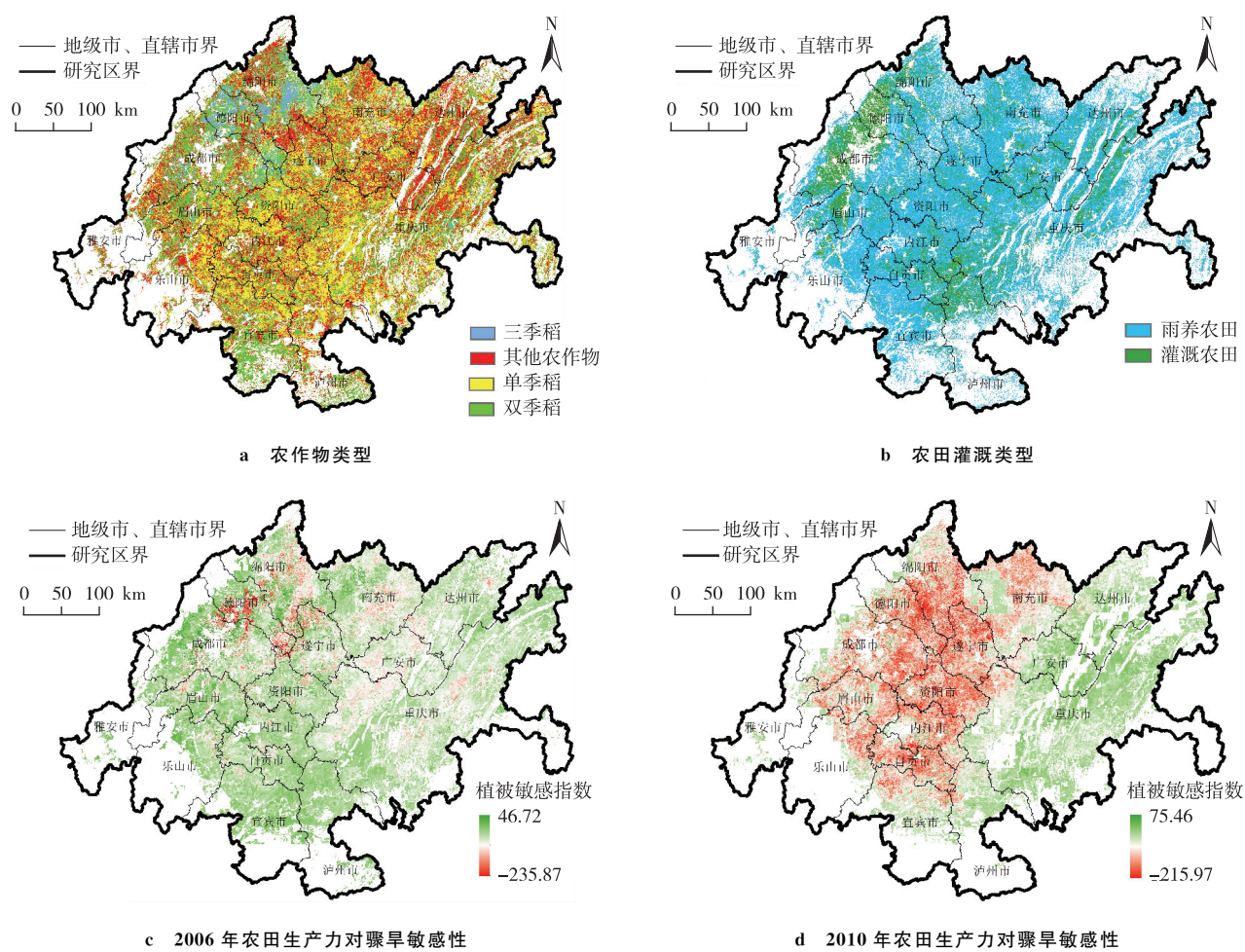


图 9 成渝地区水稻型和其他农作物型农田的空间分布、灌溉方式及农田生产力对骤旱敏感性

Fig. 9 The spatial distribution of rice and other crop-type farmland, irrigation methods and their sensitivities in Chengdu-Chongqing Region

- 3) 与其他类型农田相比,成渝地区水稻型和其他农作物型农田的生产力对骤旱敏感性相对较高。
- 4) 骤旱持续时间与骤旱烈度为影响成渝地区农田生产力的主要因素,其中又以骤旱持续时间为最重要的因素。
- 5) 三季稻种植区农田生产力对骤旱敏感性明显高于单、双季稻种植区,灌溉农田的生产力对骤旱敏感性明显低于雨养农田。

参考文献:

[1] HEIM R R Jr. A review of twentieth-century drought indices used in the United States[J]. Bulletin of the American Meteorological Society,2002,83(8):1149-1166.

[2] BALTING D F,AGHAKOUCHAK A,LOHMANN G,et al. Northern Hemisphere drought risk in a warming climate[J]. NPJ Climate and Atmospheric Science,2021,4(1):61.

[3] PANAYOTOV M P,ZAFIROV N,CHERUBINI P. Fingerprints of extreme climate events in *Pinus sylvestris* tree rings from Bulgaria[J]. Trees,2013,27(1):211-227.

[4] NAUMANN G,ALFIERI L,WYSER K,et al. Global changes in drought conditions under different levels of warming[J]. Geophysical Research Letters,2018,45(7):3285-3296.

[5] TRENBERTH K E,DAI A G,VAN DER SCHRIER G,et al. Global warming and changes in drought[J]. Nature Climate Change,2014,4(1):17-22.

[6] VICENTE-SERRANO S M,QUIRING S M,PEÑA-GALLARDO M,et al. A review of environmental droughts:increased risk under global warming [J]. Earth-Science Reviews,2020,201:102953.

- [7] LINARES J C, CAMARERO J J, CARREIRA J A. Competition modulates the adaptation capacity of forests to climatic stress: insights from recent growth decline and death in relict stands of the Mediterranean fir *Abies pinsapo* [J]. *Journal of Ecology*, 2010, 98(3): 592-603.
- [8] GEA-IZQUIERDO G, VIGUERA B, CABRERA M, et al. Drought induced decline could portend widespread pine mortality at the xeric ecotone in managed Mediterranean pine-oak woodlands [J]. *Forest Ecology and Management*, 2014, 320: 70-82.
- [9] ANDEREGG W R L, HICKE J A, FISHER R A, et al. Tree mortality from drought, insects, and their interactions in a changing climate [J]. *New Phytologist*, 2015, 208(3): 674-683.
- [10] ZHAO M S, RUNNING S W. Drought-induced reduction in global terrestrial net primary production from 2000 through 2009 [J]. *Science*, 2010, 329(5994): 940-943.
- [11] HÄNKE H, BÖRJESON L, HYLANDER K, et al. Drought tolerant species dominate as rainfall and tree cover returns in the West African Sahel [J]. *Land Use Policy*, 2016, 59: 111-120.
- [12] XU C G, McDOWELL N G, FISHER R A, et al. Increasing impacts of extreme droughts on vegetation productivity under climate change [J]. *Nature Climate Change*, 2019, 9(12): 948-953.
- [13] ZLATEV Z, LIDON F C. An overview on drought induced changes in plant growth, water relations and photosynthesis [J]. *Emirates Journal of Food and Agriculture*, 2012, 24(1): 57-72.
- [14] 安洁, 付博, 李玮, 等. 东亚地区典型极端气候指标未来预估及高温下人口暴露度研究 [J]. *北京大学学报(自然科学版)*, 2020, 56(5): 884-892.
- AN J, FU B, LI W, et al. Future prediction of typical extreme climatic indices and population exposure to high temperature in East Asia [J]. *Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Pekinensis*, 2020, 56(5): 884-892.
- [15] 袁星, 王钰淼, 张苗, 等. 关于骤旱研究的一些思考 [J]. *大气科学学报*, 2020, 43(6): 1086-1095.
- YUAN X, WANG Y M, ZHANG M, et al. A few thoughts on the study of flash drought [J]. *Transactions of Atmospheric Sciences*, 2020, 43(6): 1086-1095.
- [16] WANG L Y, YUAN X. Two types of flash drought and their connections with seasonal drought [J]. *Advances in Atmospheric Sciences*, 2018, 35(12): 1478-1490.
- [17] YUAN X, WANG L Y, WU P L, et al. Anthropogenic shift towards higher risk of flash drought over China [J]. *Nature Communications*, 2019, 10(1): 4661.
- [18] 姚玉璧, 张强, 王劲松, 等. 中国西南干旱对气候变暖的响应特征 [J]. *生态环境学报*, 2014, 23(9): 1409-1417.
- YAO Y B, ZHANG Q, WANG J S, et al. The response of drought to climate warming in southwest in China [J]. *Ecology and Environmental Sciences*, 2014, 23(9): 1409-1417.
- [19] 段海霞, 王劲松, 刘芸芸, 等. 2009/2010 年我国西南秋冬春连旱特征及其大气环流异常分析 [J]. *冰川冻土*, 2013, 35(4): 1022-1035.
- DUAN H X, WANG J S, LIU Y Y, et al. The features of continuous heavy drought from autumn, 2009 to spring, 2010 in Southwest China and analysis of its atmospheric circulation anomalies [J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2013, 35(4): 1022-1035.
- [20] 彭京备, 张庆云, 布和朝鲁. 2006 年川渝地区高温干旱特征及其成因分析 [J]. *气候与环境研究*, 2007, 12(3): 464-474.
- PENG J B, ZHANG Q Y, BUEH CHOLAW. On the characteristics and possible causes of a severe drought and heat wave in the Sichuan-Chongqing Region in 2006 [J]. *Climatic and Environmental Research*, 2007, 12(3): 464-474.
- [21] 张峰. 川渝地区农业气象干旱风险区划与损失评估研究 [D]. 杭州: 浙江大学, 2013.
- ZHANG F. Regionalization of agricultural meteorological drought risk and loss evaluation in Sichuan-Chongqing Area [D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2013.
- [22] SHUKLA P, SKEG J, BUENDIA E C, et al. Climate change and land: an IPCC special report on climate change, desertification, land degradation, sustainable land management, food security, and greenhouse gas fluxes in terrestrial ecosystems [R]. Geneva: IPCC, 2019.
- [23] 张建平, 刘宗元, 何永坤, 等. 西南地区水稻干旱时空分布特征 [J]. *应用生态学报*, 2015, 26(10): 3103-3110.
- ZHANG J P, LIU Z Y, HE Y K, et al. Temporal and spatial distribution of rice drought in Southwest China [J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2015, 26(10): 3103-3110.
- [24] 宋丽莉, 王春林, 董永春. 水稻干旱动态模拟及干旱损失评估 [J]. *应用气象学报*, 2001, 12(2): 226-233.
- SONG L L, WANG C L, DONG Y C. Dynamic simulation and damage evaluation of rice drought [J]. *Quarterly Journal of Applied Meteorology*, 2001, 12(2): 226-233.

- [25] 宋丽莉,张昌昭. 广东省水稻旱灾的评价及防旱抗旱对策[J]. 热带地理,1996,16(3):196-203.
SONG L L,ZHANG C Z. Rice drought evaluation and drought-relief measures in Guangdong Province[J]. Tropical Geography, 1996,16(3):196-203.
- [26] BURRELL A L, EVANS J P, LIU Y. Detecting dryland degradation using time series segmentation and residual trend analysis (TSS-RESTREND)[J]. Remote Sensing of Environment, 2017, 197: 43-57.
- [27] VON KEYSERLINGK J, DE HOOP M, MAYOR A G, et al. Resilience of vegetation to drought: studying the effect of grazing in a Mediterranean rangeland using satellite time series[J]. Remote Sensing of Environment, 2021, 255: 112270.
- [28] YAO J Y, LIU H P, HUANG J P, et al. Accelerated dryland expansion regulates future variability in dryland gross primary production[J]. Nature Communications, 2020, 11(1): 1665.
- [29] GUO H, BAO A M, LIU T, et al. Determining variable weights for an optimal scaled drought condition index (OSDCI): evaluation in Central Asia[J]. Remote Sensing of Environment, 2019, 231: 111220.
- [30] KUSCH E, DAVY R, SEDDON A W R. Vegetation-memory effects and their association with vegetation resilience in global drylands[J]. Journal of Ecology, 2022, 110(7): 1561-1574.
- [31] JIANG W X, WANG L C, ZHANG M, et al. Analysis of drought events and their impacts on vegetation productivity based on the integrated surface drought index in the Hanjiang River Basin, China[J]. Atmospheric Research, 2021, 254: 105536.
- [32] WU J F, YAO H X, CHEN X H, et al. A framework for assessing compound drought events from a drought propagation perspective[J]. Journal of Hydrology, 2022, 604: 127228.
- [33] 涂建军, 况人瑞, 毛凯, 等. 成渝城市群高质量发展水平评价[J]. 经济地理, 2021, 41(7): 50-60.
TU J J, KUANG R R, MAO K, et al. Evaluation on high-quality development of Chengdu-Chongqing Urban Agglomeration[J]. Economic Geography, 2021, 41(7): 50-60.
- [34] LI Q L, SHI G S, SHANGGUAN W, et al. A 1 km daily soil moisture dataset over China using *in situ* measurement and machine learning[J]. Earth System Science Data, 2022, 14(12): 5267-5286.
- [35] ZHANG Y Q, KONG D D, GAN R, et al. Coupled estimation of 500 m and 8-day resolution global evapotranspiration and gross primary production in 2002—2017[J]. Remote Sensing of Environment, 2019, 222: 165-182.
- [36] QIU B W, HU X, CHEN C C, et al. Maps of cropping patterns in China during 2015—2021[J]. Scientific Data, 2022, 9(1): 479.
- [37] 刘良云. GLC_FCS30D: 1985—2022 年全球 30 米精细土地覆盖动态监测数据集[DS/OL]. (2023-10-09)[2024-11-18]. https://data.casearth.cn/thematic/glc_fcs30/314.
LIU L Y. GLC_FCS30D: global 30-m land-cover dynamic monitoring product with a fine classification system from 1985 to 2022[DS/OL]. (2023-10-09)[2024-11-18]. https://data.casearth.cn/thematic/glc_fcs30/314.
- [38] DENG Y, WANG X H, WANG K, et al. Responses of vegetation greenness and carbon cycle to extreme droughts in China[J]. Agricultural and Forest Meteorology, 2021, 298: 108307.
- [39] 吴光明, 姜亮亮, 刘文利, 等. 中亚不同植被生产力对干旱事件的敏感性[J]. 生态学报, 2024, 44(24): 11331-11346.
WU G M, JIANG L L, LIU W L, et al. Vegetation sensitivity analysis of different vegetation productivity to drought events in Central Asia[J]. Acta Ecologica Sinica, 2024, 44(24): 11331-11346.
- [40] 刘海, 姜亮亮, 刘冰, 等. 近 40 年中国干旱特征及其对植被变化的影响[J]. 生态学报, 2023, 43(19): 7936-7949.
LIU H, JIANG L L, LIU B, et al. Characteristics of drought in China and its effect on vegetation change in recent 40 years[J]. Acta Ecologica Sinica, 2023, 43(19): 7936-7949.
- [41] 常明园. 基于公平正义视角的郑州市核心区公共服务设施空间布局及驱动因素研究[D]. 郑州: 河南农业大学, 2024.
CHANG M Y. Research on the spatial layout and driving factors of public service facilities in the core district of Zhengzhou based on the perspective of equity and justice[D]. Zhengzhou: Henan Agricultural University, 2024.
- [42] BRUNSDON C, FOTHERINGHAM A S, CHARLTON M E. Geographically weighted regression: a method for exploring spatial nonstationarity[J]. Geographical Analysis, 1996, 28(4): 281-298.
- [43] 陈绘. 重庆市干旱时空分布及植被响应[D]. 重庆: 西南大学, 2019.
CHEN H. Spatial and temporal distribution of drought and vegetation response in Chongqing[D]. Chongqing: Southwest University, 2019.
- [44] 张楚瑶. 川渝地区干旱特征与产业结构变动关系研究[D]. 南京: 南京信息工程大学, 2015.
ZHANG C Y. Research on relations between industrial structure changes and drought characteristic in Sichuan and Chongqing Region[D]. Nanjing: Nanjing University of Information Science & Technology, 2015.
- [45] 李磐, 冯耀祖, 钟新才. 施用抗旱保水剂对棉花产量与水分利用效率的影响[J]. 新疆农业科学, 2011, 48(6): 1125-1129.

- LI P, FENG Y Z, ZHONG X C. Effects of drought-resistant agents (DRA) and super absorbent polymers (SAP) on the yield and water use efficiency of cotton[J]. Xinjiang Agricultural Sciences, 2011, 48(6): 1125-1129.
- [46] ZHU X F, LIU Y, XU K, et al. Effects of drought on vegetation productivity of farmland ecosystems in the drylands of northern China[J]. Remote Sensing, 2021, 13(6): 1179.
- [47] 刘莹, 朱秀芳, 徐昆, 等. 干旱对灌溉和雨养农田生态系统生产力的影响对比分析[J]. 遥感技术与应用, 2021, 36(2): 381-390.
- LIU Y, ZHU X F, XU K, et al. Comparative analysis of the impact of drought on the crop productivity of irrigated and rain-fed farmland ecosystems[J]. Remote Sensing Technology and Application, 2021, 36(2): 381-390.

Resources, Environment and Ecology in Three Gorges Area

Sensitivity Analysis of Farmland Productivity to Flash Droughts in Chengdu-Chongqing Region

ZHAO Yifei^{1,2}, JIANG Liangliang^{1,2}, LIU Rui^{1,2}, LI Qijin^{1,2}, TANG Siyi^{1,2}

(1. School of Geography and Tourism, Chongqing Normal University; 2. Chongqing Key Laboratory of GIS Application, Chongqing Normal University, Chongqing 401331, China)

Abstract: Drought is a meteorological disaster that has a large impact on farmland productivity and is manifesting itself more in the form of flash droughts. Taking the Chengdu-Chongqing Region, the sensitivity of farmland productivity to flash droughts in the Chengdu-Chongqing Region is analyzed in 2006 and 2010, when drought was more severe, based on the travel theory and vegetation sensitivity index using soil moisture, total primary productivity and crop type data from 2000 to 2020, and determined the parameters of flash droughts characteristics that had the greatest impact on farmland productivity by combining with the geographically weighted regression model. The results showed that: 1) the duration and interval of flash droughts in Chengdu-Chongqing Region in 2010 were longer than that in 2006, and the intensity and severity of flash droughts were higher than that in 2006, but the difference in the number of flash droughts was small. 2) The sensitivity of farmland productivity to flash droughts in Chengdu-Chongqing Region in 2006 was generally more homogeneous, and the spatial variability was small; and in 2010, the productivity of the region showed a clear “uniform” pattern, with the same spatial variability as that in the same region. In 2010, the sensitivity of farmland productivity to flash droughts in the region showed a clear pattern of “high in the west and low in the east”; the productivity of farmland in Deyang City and Mianyang City was higher than that of other regions in the region. 3) The productivity of rice-type and other crop-type farmland in Chengdu-Chongqing region was relatively high in relation to the sensitivity to flash droughts. 4) The duration of flash droughts and the intensity of flash droughts were the main factors affecting farmland productivity in Chengdu-Chongqing Region. 5) Productivity sensitivity to flash droughts was significantly higher in three-season rice fields than in single- and two-season rice fields, and productivity sensitivity to flash droughts was significantly lower in irrigated fields than in rainfed fields. The results can provide a scientific basis for the prevention and control of flash droughts in Chengdu-Chongqing Region and for the adjustment of agricultural structure.

Keywords: flash droughts; farmland productivity; sensitivity; Chengdu-Chongqing Region

(责任编辑 方 兴)