

DOI: 10.20103/j.stxb.202402220376

李奇锦, 姜亮亮, 刘文利, 吴光明, 谢崇丹. 成渝地区农田生产力对骤旱的抵抗性与恢复性. 生态学报, 2025, 45(1): 351-366.

Li Q J, Jiang L L, Liu W L, Wu G M, Xie C D. The resistance and resilience of farmland productivity to flash drought in the Chengdu-Chongqing area. Acta Ecologica Sinica, 2025, 45(1): 351-366.

成渝地区农田生产力对骤旱的抵抗性与恢复性

李奇锦^{1,2}, 姜亮亮^{1,2,*}, 刘文利^{1,2}, 吴光明^{1,2}, 谢崇丹³

1 重庆师范大学地理与旅游学院, 重庆 401331

2 地理信息系统应用研究重庆市高校重点实验室, 重庆 401331

3 云南大学国际河流与生态安全研究院, 昆明 650500

摘要: 在全球变暖的影响下, 中国骤旱事件逐渐增加, 西南地区尤为突出。成渝地区由骤旱事件引起的农田绝收问题逐渐加剧。然而, 国内外关于农田生产力对骤旱的抵抗性与恢复性研究较为匮乏。因此, 研究农田对骤旱的抵抗性与恢复性对保护农田具有重要意义。基于此, 使用 GPP 数据和中国土壤水分数据集以及农田类型数据等, 采用游程理论和地理加权回归等方法, 分析了成渝地区农田对骤旱的抵抗性与恢复性, 量化了农田生产力对骤旱的脆弱性。研究结果表明: (1) 在 2006 和 2022 骤旱年中, 成渝地区西北部 and 东南部骤旱较为严峻, 其中德阳市、绵阳市、成都市等地区的骤旱严重度、骤旱持续时间均为高值, 而 2022 年西部区域骤旱次数比 2006 年明显减少; (2) 2022 年与 2006 年相比, 大部分农田恢复性提高, 但抵抗性下降, 其中水稻田、玉米田等抵抗性变化范围从 5—6 下降到了 3—4, 恢复性变化范围则由 1—2 上升至 2—3; (3) 2022 年成渝地区北部农田比 2006 年抵抗时间增加, 但成渝地区大部分农田恢复时间相较于 2006 年急剧下降; (4) 2022 年成渝地区西北部农田相较于 2006 年面对骤旱更加脆弱, 且在 2022 骤旱年中, 成渝地区多季作物田脆弱性高于组成轮作的单季作物田脆弱性。有助于深入了解农田对骤旱的抵抗性和恢复性, 以及在农田灌溉制度和种植制度条件下骤旱对农田脆弱性的影响机制, 对成渝地区农业生产和抗旱减灾提供科学理论依据。

关键词: 骤旱事件; 农田生产力; 农田抵抗性; 农田恢复性; 成渝地区

The resistance and resilience of farmland productivity to flash drought in the Chengdu-Chongqing area

LI Qijin^{1,2}, JIANG Liangliang^{1,2,*}, LIU Wenli^{1,2}, WU Guangming^{1,2}, XIE Chongdan³

1 School of Geography and Tourism, Chongqing Normal University, Chongqing 401331, China

2 Chongqing Key Laboratory of Geographic Information System Application, Chongqing 401331, China

3 Institute of International Rivers and Eco-security of Yunnan University, Kunming 650500, China

Abstract: Under the influence of global warming, flash drought events in China are gradually increasing, with the southwest region being particularly affected. The Chengdu-Chongqing area is experiencing increasing crop failures as a result of these flash droughts. However, understanding the resistance and recovery of farmland productivity to flash droughts is limited both domestically and internationally. Therefore, investigating the resistance and recovery mechanisms of farmland to flash droughts is of significant importance for protecting agricultural resources. The GPP data, Chinese soil moisture dataset, and farmland type data were used in the study. The fundamental characteristics of flash drought in the Chengdu-Chongqing area in 2006 and 2022 were investigated by using run length theory. Then, the study assessed the resistance and

基金项目: 国家自然科学基金 (42201124); 重庆市自然科学基金创新发展联合基金项目 (CSTB2024NSCQ-LZX0064); 中国博士后科学基金 (2023M740433); 重庆市自然科学基金 (cstc2021jcyj-msxmX0523)

收稿日期: 2024-02-22; **网络出版日期:** 2024-09-23

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: jiang@cqnu.edu.cn

recovery capacities of farmland to flash droughts and quantified the vulnerability of farmland productivity in the Chengdu-Chongqing area. The main results reveal that the northwest and southeast parts of the Chengdu-Chongqing area experienced more severe flash droughts in the flash drought years of 2006 and 2022. Notably, areas such as De yang, Mian yang, and Chengdu exhibited high severity, and duration of flash droughts, while the number of flash droughts in the western region significantly decreased in 2022 compared to 2006. Compared to 2006, most farmland in 2022 has shown improved resilience but decreased resistance. Specifically, paddy fields, corn fields, and other single-season, double-season, and three-season crops have seen their resistance levels decrease from 5—6 to 3—4. Meanwhile, the range of resilience change has increased from 1—2 to 2—3. The range of resilience change has increased from 1—2 to 2—3, while the range of resistance change has decreased from 4—6 to 2—4. In 2022, the resistance time of farmland in the northern part of the Chengdu-Chongqing area increased compared to 2006, while the recovery time of most farmland in the Chengdu-Chongqing area sharply decreased. In 2022, farmland in the northwest of the Chengdu-Chongqing area became more vulnerable to flash droughts compared to 2006. During the flash drought year of 2022, multi-season crop fields in the Chengdu-Chongqing area exhibited higher vulnerability than single-season crop fields used in rotation. When facing flash droughts, the vulnerability of irrigated farmland was lower than that of rainfed farmland. However, the average vulnerability of some rainfed single-season farmlands, such as corn fields and wheat fields, was lower than that of irrigated farmland. This study enhances the understanding of farmland resistance and resilience to flash droughts and elucidates the impact mechanisms of flash droughts on farmland vulnerability under various irrigation and planting systems. It offers a scientific theoretical basis for agricultural production, drought resistance, and disaster reduction in the Chengdu-Chongqing area.

Key Words: flash drought events; farmland productivity; farmland resistance; farmland resilience; Chengdu-Chongqing area

在全球变暖背景下,气候变暖导致极端干旱频发^[1],造成全球植被总初级生产力(GPP)下降^[2],预计因干旱造成的植被 GPP 下降总量将从 1850—1999 年的 28%增至 2075—2099 年的 49%^[3]。目前,骤旱成为干旱的一种“新常态”,骤旱频发,突发性强、发展迅速、强度高^[4-5],中国骤旱事件在西南地区频发,未来骤旱风险仍有显著上升趋势^[6-7]。近 20 年由高温骤旱导致成渝地区农作物受灾面积年均约 2000 万亩,2006 年,成渝地区遭受了 50 年来最严重的旱灾,粮食损失 300 余万吨,农业经济损失高达 162.15 亿元^[8-9]。而在 2022 年成渝地区遭受了十年来最严重的旱灾,农业经济损失达到 87.63 亿元,受灾救助人数达到 878 万人^[10-11]。因此,研究农田生产力对骤旱的响应具有重要意义。

骤旱可归为农业骤旱或生态骤旱,不同于传统干旱可以出现在任何季节的特点^[5,12],骤旱主要发生在春夏两季,通常发生在作物的关键发育期,所以骤旱一旦发生,通常会给农田带来巨大损失。以往研究区别传统干旱和骤发干旱的主要基于高温、干旱等复合型指标或强调干旱发展速率^[13-14],以上方法可以强调骤旱与传统干旱间的干旱发生速度差异,但不足的是,上述方法都没有明确骤旱的消亡过程,不易评估骤旱和干旱的持续时间和强度差异。2019 年袁星等^[4,15-16]总结前人的工作并提出基于土壤含水量下降速率和干旱持续时间的骤旱识别方法^[17],完整地描述了骤旱事件的爆发和消亡过程。鉴于此,本文通过该方法结合游程理论来识别骤旱的基本特征^[18],为分析农田生产力对骤旱的响应研究提供帮助。

农田对干旱的抵抗性研究采用的传统方法有偏相关分析法、季节性突变趋势分析法等^[19-21]。以上研究在年际或季节尺度上关注整个时间段中植被指数与干旱指数的相关性,而农田对干旱的抵抗性变化可能与农田灌溉类型和不同区域也存在关联^[22],针对以上问题,部分学者尝试开展了农田对干旱的抵抗性研究^[23-24]。已有研究发现,农田在干旱的影响下,不同种植制度的农田的抵抗性也存在显著差异^[25],虽然雨养农田与灌溉农田的恢复时间相同,但雨养农田具有较高的抵抗性^[26],而干旱区农田对干旱的抵抗性较弱,农田的荒漠化风险也高于其他区域^[27]。所以,不同区域农田对干旱的抵抗性存在差异,且与区域农作物类型、水分胁迫

等因素有关^[28]。同时表层土壤对前期降水具有较长的“水分记忆”^[29],有利于农田抵抗力与恢复力的提高。长江流域农田对水分胁迫较敏感,其抵抗性随年降水量增加而增加^[30]。但这些研究多以定性和半定量分析为主,未充分考虑农田的抵抗时间,农田对骤旱的抵抗性的响应规律需进一步深入研究^[31-33]。

除农田抵抗性外,农田在发生骤旱后的恢复性也引起了部分学者的关注^[34]。农田恢复时间与干旱密切相关,尤其在生态系统脆弱区^[35]。例如,农田对干旱恢复时间与植被覆盖度有关,高覆盖度农作物的干旱恢复时间往往较长^[36];在长江流域,受干旱影响,农田恢复到原有生长状态所需降水量高于同期平均的 100%—350%,恢复到平均的概率约为 0.4 左右^[37],其中 2006 年夏季成渝地区突发骤旱,农作物受灾面积 $249.3 \times 10^4 \text{ hm}^2$,有 $68.6 \times 10^4 \text{ hm}^2$ 农作物受骤旱影响无法恢复而绝收,粮食损失高达 300 余万吨^[38]。

综上所述,现有农田对干旱的研究取得了重要的进展与成果,但在农田对骤旱的抵抗性和恢复性的认识上仍不够深入。为解决上述科学问题,本研究探讨成渝地区农田对骤旱的抵抗性和恢复性响应规律,从骤旱事件中剖析农田抵抗性与恢复性的响应特征,并从农田灌溉制度和农田种植制度的角度下分析骤旱对农田的影响机制。为成渝地区双城经济圈农业结构调整、高质量发展提供科学依据。

1 数据与方法

1.1 研究区概况

成渝经济圈位于长江上游,地处四川盆地,北接陕甘,南连云贵,西通青藏,东邻湘鄂,是我国重要的人口、城镇、产业集聚区,也是引领西部地区加快发展、提升内陆开放水平、增强国家综合实力的重要支撑,在我国经济社会发展中具有重要的战略地位^[8]。成渝地区主要包括四川省成都市和重庆市及之间的地区,该地区面积约 20 万 km^2 ,人口 8724 万,分别占中国西南地区的 6.6% 和 35%。它是我国粮食主产区之一,粮油、畜禽、水产、果蔬、茶叶、蚕桑、道地药材、经济林竹等特色农林产品在全国占有重要地位。如图 1 所示,研究区农田类型有水稻田、玉米田、小麦田、三季作物田、其他双季作物田以及其他单季农作物田等,其中以其他单季作物田与水稻田还有其他双季作物田为主,分别占有所有农田的 26.46%、23.11% 和 38.54%^[39]。

成渝地区骤旱频发主要是因为受地理、气候、人文因素影响,这一地区整体上属于亚热带气候,由于受到喜马拉雅山脉的阻挡,西南地区的雨水很难由海洋输送到该地区,形成了较为干燥的气候,又因为全球气候变暖可能导致气温升高、土壤水分蒸发增加,从而加剧水资源的蒸发和流失,导致骤旱的发生^[40]。

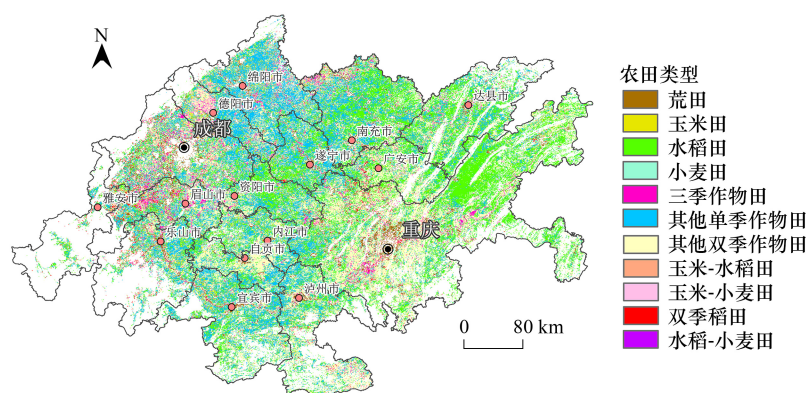


图 1 成渝地区不同农田类型的空间分布图

Fig.1 Spatial distribution map of different farmland types in the Chengdu-Chongqing area

1.2 数据来源与方法

1.2.1 GPP 数据

本文使用的是 MODIS GPP 数据^[41],该数据集已完成产品与地面参考点的比较验证,并提供 14 个数据类

别可供用户下载(https://lpdaac.usgs.gov/product_search/)。MODIS 是搭载在 Terra 和 Aqua 两颗卫星上的中分辨率成像光谱仪,它能获取陆地和海洋温度、初级生产力、陆地表面覆盖、云、汽溶胶、水汽和火情等目标的图像。本文采用 GPP 数据集来源于 MOD17A2H v061 数据产品,时间分辨率为 8 d、空间分辨率为 500 m,时间跨度为 2000.02.26—2022.12.31。

1.2.2 土壤水分数据集

本文选取的国家青藏高原数据中心的地表土壤水分数据集(SSM V2.0)(<https://data.tpdc.ac.cn/home>),是实测的土壤水分数据集,它的时间序列为 2003—2022 年,时间分辨率为日尺度、空间分辨率为 1 km。在本文中,土壤水分(SM)指土壤体积含水量,其单位为 cm^3/cm^3 ,是通过利用土壤中水分占有的体积和土壤总体积的比值来求得,在使用其数据时已进行预处理,并乘以 0.001 得到真实的地表土壤水分物理量,该数据是根据 2000 多个专业气象和土壤水分观测站的实测数据对该产品进行了评估,发现该产品的精度较高^[42]。

1.2.3 农作物类型数据

本文选取了中国种植类型数据(China CP)的农作物类型数据^[39],采用 WGS_1984 空间参考系统,空间分辨率为 500 m。数据利用物候制图算法,基于 MODIS 影像数据反演获得 2015—2021 年中国种植格局年度数据(<http://www.stats.gov.cn/english/>)。基于地面真实数据制作的作物模型图总体精度达到 89%,与统计数据相较吻合,数据集中每个采样点都记录了地理位置和作物类型,通过基于 Google Earth 高分辨率图像的视觉确认,提高了地面调查数据的可靠性。

1.2.4 农田灌溉制度和种植制度数据

本文选取了国家生态科学数据中心的作物种植制度数据集(ACIA500)和灌溉农田数据集^[43],两个数据的空间分辨率为 500 m。ACIA500 是通过结合 MODIS 影像和现有的土地利用等多源数据,基于植被指数的峰值特征,最终得到每年的作物种植制度,该数据集与其他种植制度数据相比精度较好。灌溉农田数据集融合 MODIS 植被指数和统计数据生成 MlrAD-GI 临时灌溉数据集,再利用约束统计和协同绘图方法将其与中国区域现有灌溉数据进行集成、整合得到,且经过与地面验证点比较,该数据集的总体精度适中(0.732—0.819),很好的刻画了中国灌溉农田的时空分布格局,为水资源持续利用和农业管理、规划提供数据支撑。

1.3 研究方法

1.3.1 游程理论

在成渝地区,2006 年和 2022 年相继遭遇了不同程度的骤旱事件,导致这两年的粮食总产量急剧下降,次年各地粮食收成恢复情况也各不相同,对成渝地区的农业和民生产生了巨大的影响^[10,44]。本文采用游程理论逐像元提取骤旱事件基本特征,并识别骤旱事件的开始和结束时间^[9,45]。游程理论已被广泛应用于骤旱研究中,为识别骤旱事件的特征提供了一种有效的方法。该理论将游程定义为时间序列中超过或低于某一特定阈值的连续数值序列。当数值超过阈值时,则判定为正向游程;当数值低于阈值时,则为负向游程。根据前人研究^[46],考虑骤旱的突发性、严重性等特点,本研究通过以下标准判定一次骤旱事件:每期(8 天)平均 SM 值需持续小于 $0.35 \text{ cm}^3/\text{cm}^3$ 且总持续时间大于等于两期(16 d),期间 SM 均需小于 $0.35 \text{ cm}^3/\text{cm}^3$ 的负游程,如图 2 所示。具体来说,主要通过两个限定条件去判定骤旱事件:(1)识别骤旱事件开始:当 SM 值低于 $0.35 \text{ cm}^3/\text{cm}^3$ 且持续低于 16 d 时,判断骤旱发生。(2)识别骤旱事件结束:如果土壤水分 SM 值再次恢复到大于 $0.35 \text{ cm}^3/\text{cm}^3$ 时,则判断骤旱结束。

根据游程理论,骤旱基本参数特征(图 2)主要包括:骤旱持续时间、骤旱严重度、骤旱烈度、骤旱次数和骤旱间隔;骤旱持续时间(DD)指骤旱开始到骤旱结束之间的天数;骤旱严重度(DS)是根据骤旱期间土壤缺水的程度,可将骤旱化分为轻度骤旱、中度骤旱、严重骤旱和特大骤旱四个等级,这里指骤旱期间 SM 的累加值;骤旱烈度(DI)是对骤旱严重度的度量和评估,反映了骤旱影响的强度,指骤旱期间 SM 的平均值,即骤旱严重度(DS)与骤旱持续时间(DD)的比值;骤旱间隔则是指两个相邻骤旱事件的天数;骤旱次数指研究时段中骤旱事件的总和。具体计算公式如下^[1]:

$$DS = \sum_{i=1}^{DD} SM_i \quad (1)$$

$$DI = \frac{\sum_{i=1}^{DD} SM_i}{DD} \quad (2)$$

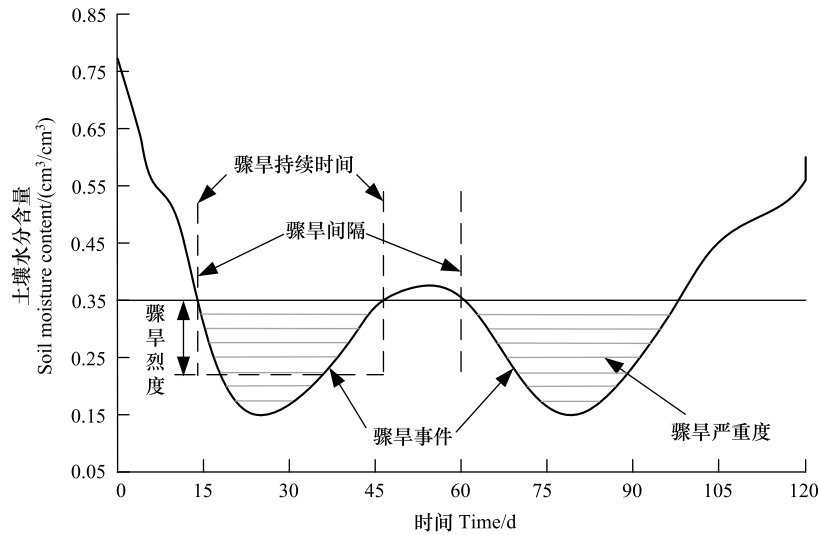


图2 基于游程理论的骤旱事件及其特征图

Fig.2 Basic characteristics of flash drought

1.3.2 农田对骤旱抵抗性和恢复性计算

基于农田生产力响应轨迹,提取农田对骤旱的响应特征信息如抵抗性、恢复性、抵抗时间、恢复时间等,对比分析不同区域农田响应的差异性^[47]。参考前人方法^[1],本研究选取 GPP 用来监测农田生产力状况,并拟采用标准化异常值 SAI 来衡量 GPP 的异常状态(图 3),SAI 计算公式如下^[1]:

$$SAI(i,j) = \frac{X_{i,j} - \bar{X}_j}{\sigma_j} \quad (3)$$

式中,SAI(i,j)是指第 i 年中第 j 期的标准化异常指数,当其值大于0表示该变量值高于正常水平,而当该值小于0则表示该变量低于正常水平。其中, X 表示 GPP 变量, $X_{i,j}$ 表示 i 年中第 j 期的 GPP 实测值,本研究选取的 i 值为2006年和2022年,而 $\bar{X}_j$, σ_j 则分别表示长时间序列里第 j 期 GPP 的平均值和标准差值,本研究使用时间序列2000—2022年的数据求得平均值和标准差值。

分析农田干扰变化时,以骤旱干扰前2期(16 d)农田平均 GPP 为基线标准,并用 G^{Anomaly} 表示^[31]。如图3所示,定量描述农田生产力基本特征参数除了抵抗性、恢复性之外还包括农田抵抗时间、恢复时间,评价农田抵抗性和恢复性以及脆弱性计算公式如下^[3,48—49]:

$$\Omega = \frac{1}{|G_e^{\text{Anomaly}} - G_o^{\text{Anomaly}}|} \quad (4)$$

$$\Delta = |G_e^{\text{Anomaly}} - G_r^{\text{Anomaly}}| \quad (5)$$

$$V = \frac{1}{\Omega} \times \frac{1}{\Delta} \quad (6)$$

$$G_o^{\text{Anomaly}} = \frac{G_{\text{onset}}^{\text{Anomaly}} + G_{\text{onset}-1}^{\text{Anomaly}}}{2} \quad (7)$$

其中, Ω 表示抵抗性, Δ 表示恢复性, V 表示脆弱性, G_e^{Anomaly} 是发生骤旱时,GPP 标准化异常值达到最低值,

$G_o^{Anomaly}$ 是骤旱发生前 2 期的农田 GPP 标准化异常值的平均值, $G_r^{Anomaly}$ 是发生骤旱后标准化异常值数 SAI 达到最高值, $G_{onset}^{Anomaly}$ 是骤旱开始发生时, 最后 1 期农田 GPP 标准化异常值, $G_{onset-1}^{Anomaly}$ 是骤旱发生前, 倒数第 2 期的农田 GPP 标准化异常值。

抵抗时间 (RT_1) 指骤旱事件对农田影响的持续时间, 恢复时间 (RT_2) 指农田受到骤旱事件干扰结束后, 即 GPP 标准化异常值达到最低值时的农田状态完全恢复所需的时间。 t_0 、 t_i 和 t_r 分别表示为农田开始影响、开始恢复和完全恢复的时间 (图 3), 计算公式如下^[50]:

$$RT_1 = t_i - t_0 \quad (8)$$

$$RT_2 = t_r - t_i \quad (9)$$

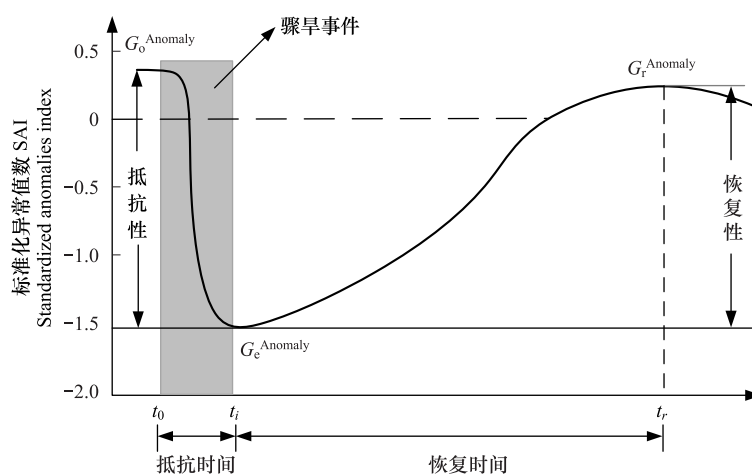


图 3 农田抵抗性与恢复性响应轨迹示意图

Fig.3 Schematic diagram of resistance and restorative response trajectory in farmland

SAI: 标准化异常指数 Standardized Anomalies Index

1.3.3 地理加权回归分析

地理加权回归 (Geographically Weighted Regression, GWR) 是一种空间分析技术, GWR 通过建立空间范围内每个点处的局部回归方程^[51-52], 探索研究对象在某一尺度下的空间变化及相关驱动因素, 并可用于对未来结果的预测。由于它考虑到了空间对象的局部效应, 因此其优势是具有更高的准确性。根据 GWR 的定义, 本文结合骤旱的基本特征、农田类型、农田种植制度以及农田灌溉制度作为解释变量与农田脆弱性作为因变量进行分析, 探究各个因子对农田脆弱性的相对重要性。

$$y_i = \beta_{0i} + \beta_{1i} X_{1i} + \beta_{2i} X_{2i} + \cdots + \beta_{ki} X_{ki} + \varepsilon_i \quad (10)$$

式中, y_i 是因变量在地理位置 i 处的观测值, X_{ki} 是自变量在地理位置 i 处的观测值, β_{ki} 则是回归系数, 而 ε_i 是误差项。地理加权回归模型中引入的关键元素是空间权重, 为每个观测点赋予不同的权重值。这些权重反映了地理位置的相对重要性, 即因变量与目标变量的关系在空间上的变化。通常, 权重是通过衰减函数计算得到的, 离观测点越远的点权重越小。

2 结果与分析

2.1 成渝地区骤旱基本特征

2006 年和 2022 年成渝地区均发生了不同程度的骤旱事件, 导致这两年粮食总量急剧下降, 次年粮食收成的恢复情况也各不相同, 对成渝地区的农业民生都产生了巨大的影响。为了解成渝地区骤旱基本特征空间分布情况, 本文从 2006 年与 2022 年的骤旱持续时间、骤旱严重度、骤旱间隔、骤旱烈度、骤旱次数的空间分布进行分析 (图 4)。

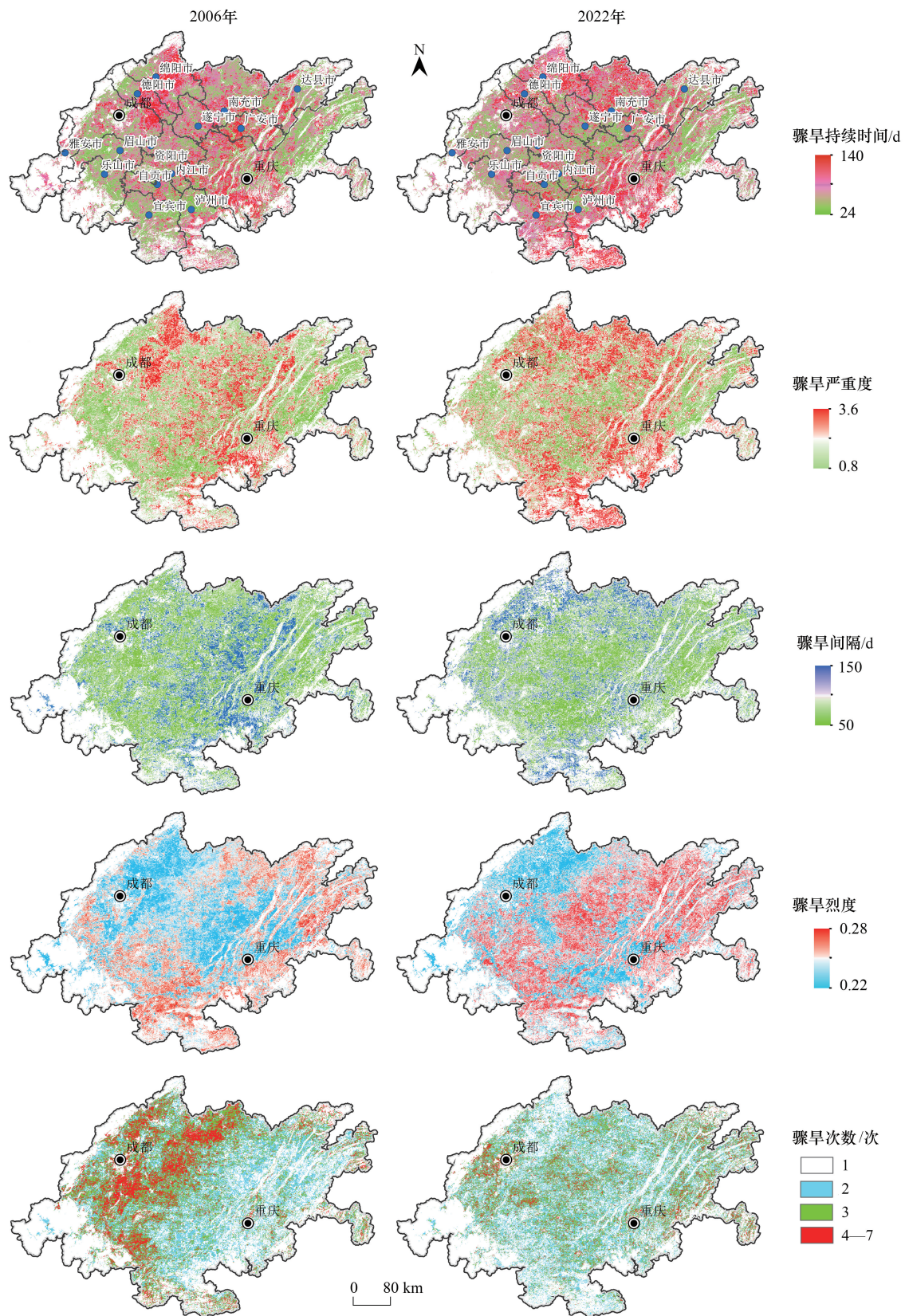


图4 2006与2022骤旱年的骤旱基本特征空间分布图

Fig.4 Spatial distribution map of basic characteristics of flash drought in 2006 and 2022

2006 年,成渝地区西北部和东南部附近骤旱持续时间较长,其中较为突出的有德阳市、绵阳市、成都市、南充市,而 2022 年,骤旱持续时间较长区域为成渝地区北部和东南部,其中较为突出的城市是绵阳市、德阳市、宜宾市、南充市、重庆市。值得注意的是,德阳市和绵阳市以及南充市在两次骤旱事件中,受灾持续时间均较长。从骤旱严重度来看,2006 年骤旱严重度高值区域主要发生在德阳市、绵阳市、南充市以及重庆市东南部,而 2022 年成渝地区北部和南部骤旱严重度较高。2006 年骤旱间隔长的地区主要分布在成渝地区东南部以及东北部,地级城市影响主要有南充市、遂宁市、自贡市和重庆市西南部,而 2022 年骤旱间隔高值区域主要分布成渝地区北部,地级城市影响主要有成都市、德阳市、绵阳市、南充市。2006 年德阳市、绵阳市、成都市周围和重庆主城至遂宁市区域骤旱烈度较低,其他区域骤旱烈度相对较高,而 2022 年骤旱烈度低值区域主要分布在成渝地区西北部和东南部,且成都市至绵阳市区域受骤旱烈度影响范围比 2006 年小。2006 年成渝地区骤旱次数空间分布呈现“西部多,东部少”的特征,而 2022 年成渝地区骤旱次数普遍较少,部分地级市发生 3—7 次的骤旱,如成都市、遂宁市、乐山市。

总体而言,2022 年成渝地区北部和南部骤旱持续时间比 2006 年的长且 2022 年成渝地区骤旱严重度高值区域比 2006 年更多,其中成渝地区南部和北部区域尤为明显。2022 年成渝地区北部骤旱间隔比 2006 年增大,重庆市周围降低。2022 年西北部骤旱烈度相较于 2006 年有所降低,重庆市周围升高。2022 年成渝地区西部骤旱次数相较于 2006 年急剧下降。

2.2 骤旱年不同类型农田对骤旱的抵抗性与恢复性分析

农田对骤旱抵抗性和恢复性如图 5 所示,成渝地区农田对 2006 年骤旱的抵抗性普遍较高,但绵阳市、泸州市、重庆市周围农田抵抗性偏低,成渝地区农田对 2022 年骤旱的抵抗性呈现“四周高,中部低”的特点。2006 年成渝地区中部、东部农田恢复性较强,其余地区恢复性相对较低,2022 年成渝地区西南部、中部、东部农田恢复性高,而西北部和南部恢复性较低。

从农田抵抗时间和恢复时间来看(图 5),2006 年成渝地区农田抵抗时间较长的区域位于成渝地区东部、德阳市和绵阳市,其他区域抵抗时间较短,2022 年成渝地区北部和南部农田抵抗时间较长,其他区域抵抗时间较短。2006 年成渝地区以东部、绵阳市、德阳市、成都市农田恢复时间较长,其他区域恢复时间较短,2022 年成渝地区农田恢复时间整体较短,东南部区域有少数农田恢复时间较长。

总体而言,2022 年农田抵抗性比 2006 年整体上相对较弱,但 2022 年农田整体恢复性相对于 2006 年更强,而且两个骤旱年中成都市、绵阳市、德阳市农田恢复性均较弱。2022 年成渝地区东部农田抵抗时间比 2006 年有所减少,而北部农田抵抗时间有所增加,但 2022 年成渝地区大部分农田恢复时间相较于 2006 年变短,表明多数地区受骤旱影响后恢复到骤旱前的状态所需时间变短。

两个骤旱年的不同农田类型对骤旱的抵抗性、恢复性、抵抗时间和恢复时间也存在一定的差异(图 6)。就农田抵抗性而言,2022 年成渝地区大部分农田抵抗性比 2006 年农田抵抗性更低,如水稻田、玉米田、其他双季田的抵抗性变化范围从 5—6 下降到了 3—4,但 2022 年成渝地区大部分农田的恢复性相较 2006 年的农田恢复性更高,且大多数农田恢复性变化范围从 1—2 上升至 2—3,如水稻田、玉米田、双季稻田等。就不同骤旱年的农田抵抗时间而言,2022 年成渝地区的水稻田、双季稻田以及其他双季田面对骤旱的抵抗时间相较 2006 年较短,但 2022 年成渝地区其余农田的抵抗时间相较 2006 年显著变长,例如三季作物田、小麦田、玉米—小麦田的抵抗时间变化范围由 3—4 增长到 4—5。除了荒田,2022 年成渝地区农田面对骤旱的恢复时间相较于 2006 年普遍缩短,其中水稻田、玉米田、其他双季田和其他单季田的恢复时间变化范围从 8—10 缩短至 6—8。

2.3 成渝地区农田对骤旱的脆弱性分析

综合考虑成渝地区农田的抵抗性和恢复性,计算得到成渝地区农田的脆弱性空间分布,如图 7 所示。2006 年成都市、绵阳市、德阳市、自贡市、重庆市周围农田脆弱性均较大,而遂宁市、宜宾市、达县市、南充市周围的农田脆弱性较小。2022 年成渝地区西北部和东南部农田脆弱性较大,例如成都市、绵阳市、德阳市、宜宾

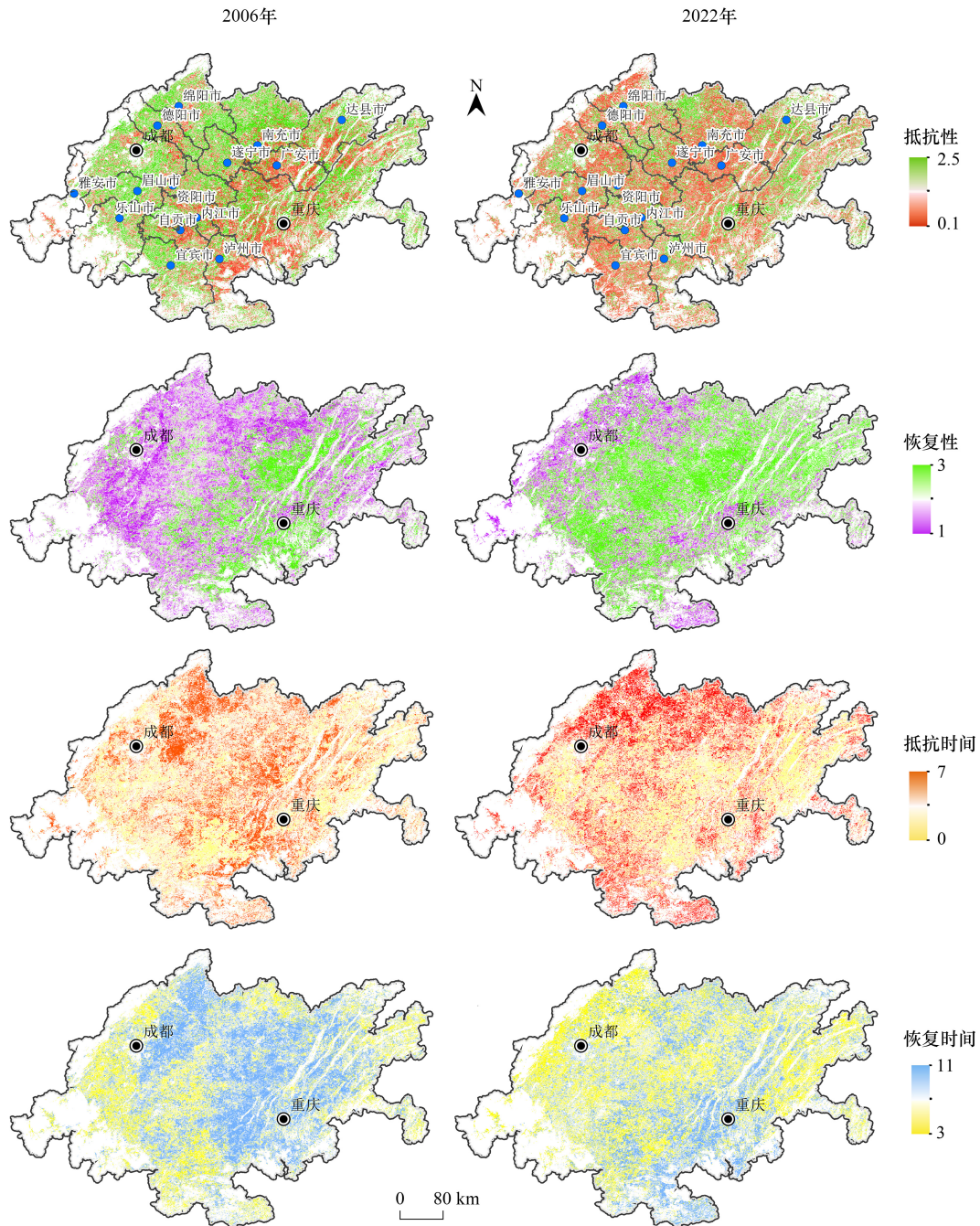


图5 2006与2022 骤旱年成渝地区农田的恢复性、恢复时间和抵抗力、抵抗时间对照图

Fig.5 Comparison chart of the recoverability, recovery time, resistance, and resistance time of farmland in the Chengdu-Chongqing area during the flash drought years of 2006 and 2022

市的农田脆弱性较高,而重庆市东北部和达县市以及内江市农田脆弱性相对较小。总体而言,2022 年成渝地区大部分区域农田脆弱性相较于 2006 年有所上升,上升明显的城市有成都市、绵阳市、德阳市等,且 2022 年西北部农田相较于 2006 年面对骤旱更加脆弱。

综合考虑成渝地区农田的种植方式,对 2022 骤旱年成渝地区的农田脆弱性统计分析。如图 8 所示,单季农田中水稻田脆弱性均值最小(0.580),而其他单季田脆弱性均值最大(0.717),但是在多季(非单季)农田中其他双季田脆弱性均值最小(0.669),而其余的多季农田脆弱性均值低于单季农田脆弱性均值。在所有农田

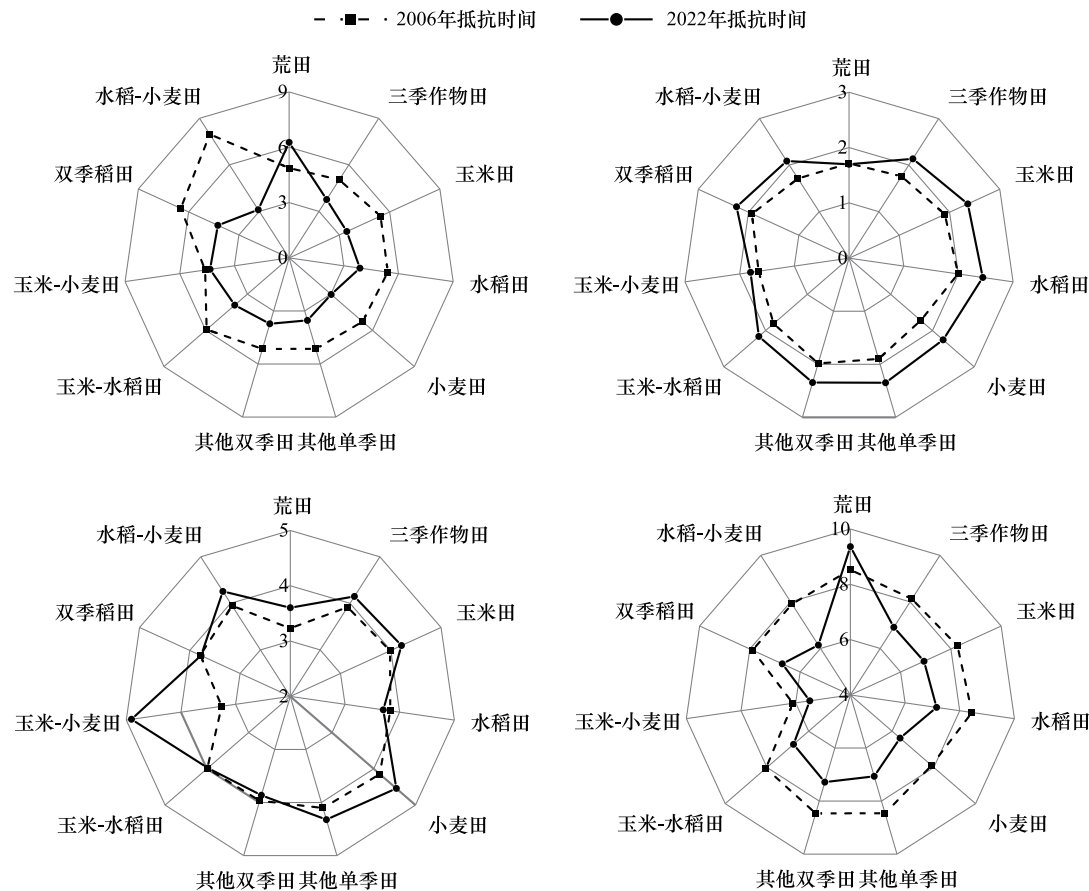


图 6 2006 与 2022 骤旱年不同农田类型的抵抗性、恢复性等对照图

Fig.6 Comparison chart of resistance and recovery of different types of farmland in flash drought years of 2006 and 2022

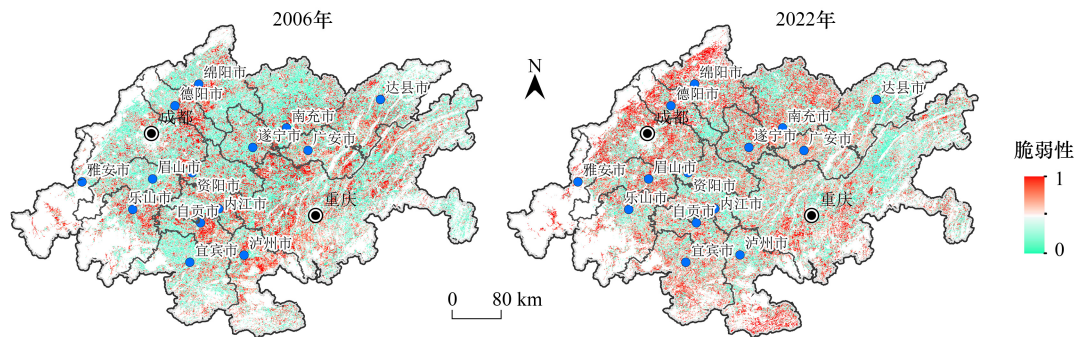


图 7 2006 与 2022 骤旱年成渝地区农田脆弱性对照图

Fig.7 Comparison chart of farmland vulnerability in the Chengdu-Chongqing area during flash drought years in 2006 and 2022

中,水稻田在面临骤旱时的脆弱性均值最低,而双季稻田的脆弱性均值(0.861)高居第二,并且在成渝地区中大部分多季农田脆弱性高于对应轮作的单季农田,如玉米—水稻田、水稻—小麦田、玉米—小麦田的脆弱性均值都高于单季的玉米田、水稻田、小麦田。所有农田中,农田脆弱性中位数最大值是玉米—小麦田(0.639),而农田脆弱性中位数最小值则是荒田(0.399)。

对 2022 年成渝地区的农田对骤旱的脆弱性统计分析(图 8)。在单季农田中,农田脆弱性的均值最大值是灌溉农田中的其他单季田(0.741),农田脆弱性的均值最小值是灌溉农田中的水稻田(0.582)。在单季农田

脆弱性中,农田脆弱性中位数最大值是雨养(非灌溉)农田中的小麦田(0.548),而最小值是雨养农田中的荒田(0.391)。

在多季农田中,农田脆弱性的均值最大值是雨养农田中的玉米—水稻田(1.065),农田脆弱性的均值最小值是灌溉农田中的双季稻田(0.527)。多季农田脆弱性中位数最大值出现在灌溉农田中的玉米—小麦田(0.647),而最小值是灌溉农田中的水稻—小麦田(0.480)。

总体而言,多季农田在面临骤旱时,灌溉农田的脆弱性普遍低于雨养农田的脆弱性。而在单季农田中,部分雨养农田脆弱性均值低于灌溉农田脆弱性均值,如玉米田、小麦田、其他单季田。灌溉的水稻田与双季稻田的脆弱性均值低于雨养的水稻田与双季稻田的脆弱性均值。

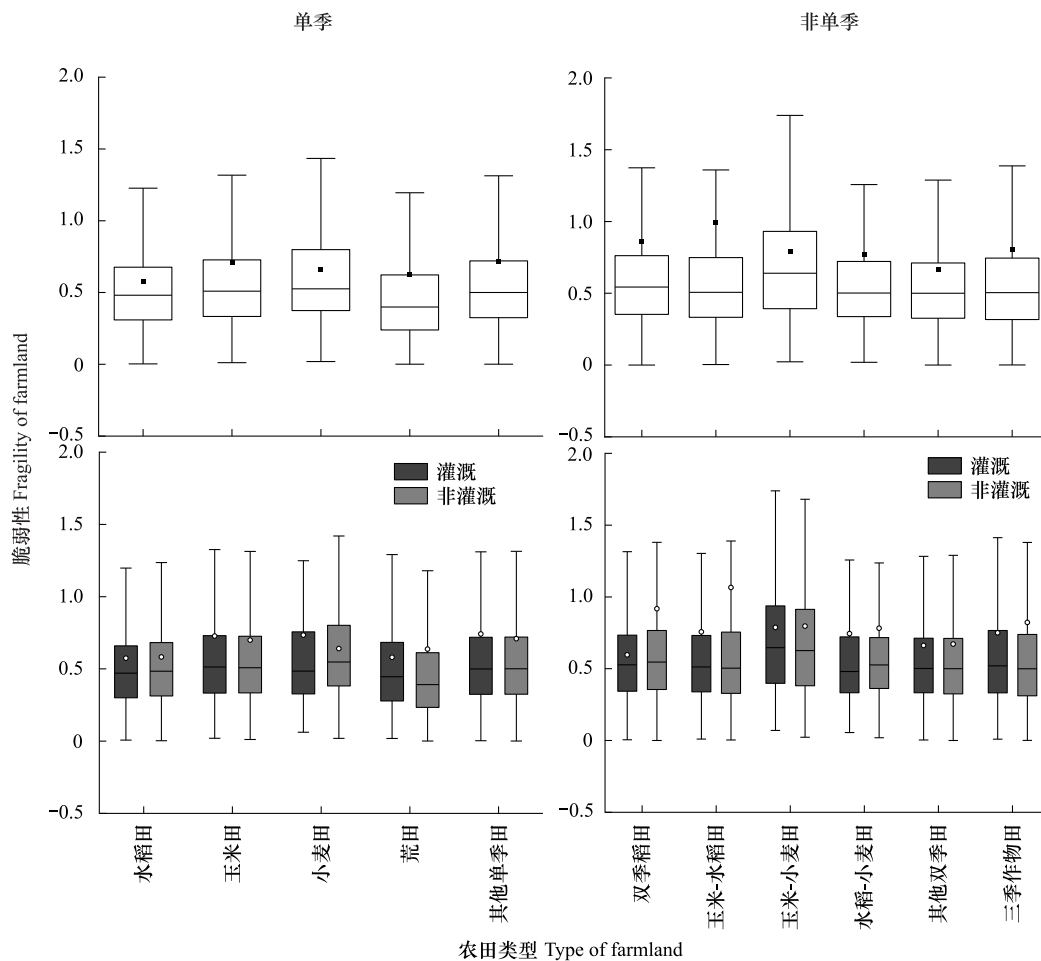


图 8 2022 骤旱年成渝地区不同种植方式和灌溉方式下农田脆弱性对照图

Fig.8 Comparison chart of farmland vulnerability for different planting and irrigation methods in the Chengdu-Chongqing area during a flash drought year in 2022

结合 2022 年成渝地区骤旱基本特征的空间分布与成渝地区不同农田类型的种植制度和灌溉制度,分析骤旱基本特征对农田脆弱性相对重要性,并利用地理加权回归模型来探究各影响因子的空间异质性作用。

如图 9 所示,不同因子对水稻田脆弱性相对重要性空间分布特征为:东部主要受骤旱持续时间、骤旱烈度以及农田灌溉制度影响;南部主要受骤旱持续时间、骤旱烈度影响;而西部主要受骤旱严重度、骤旱烈度影响;北部则主要受骤旱次数、骤旱间隔、骤旱烈度以及种植制度影响。成渝地区水稻田脆弱性受骤旱烈度影响面积最大,其次为骤旱持续时间,影响面积最小的农田种植制度。总的来看,成渝地区多数区县的水稻田脆弱性主要受骤旱基本特征影响,但开县和云阳县的水稻田脆弱性主要受种植制度影响以及万州区的水稻田脆弱性

主要受灌溉制度影响。

不同因子对玉米田脆弱性相对重要性空间分布特征为:东部主要受骤旱烈度、农田骤旱严重度以及农田种植制度影响;南部主要受骤旱持续时间、骤旱烈度影响;而西部主要受骤旱严重度、骤旱烈度、骤旱次数以及农田种植制度影响;北部则主要受骤旱次数、骤旱间隔、农田种植制度影响。成渝地区多数区县的玉米田脆弱性虽主要受骤旱基本特征影响,但是有 11 个区县的玉米田脆弱性主要受农田种植制度影响。总体而言,成渝地区玉米田脆弱性受骤旱次数影响面积最大,但农田种植制度对玉米田脆弱性的影响也不容忽视。

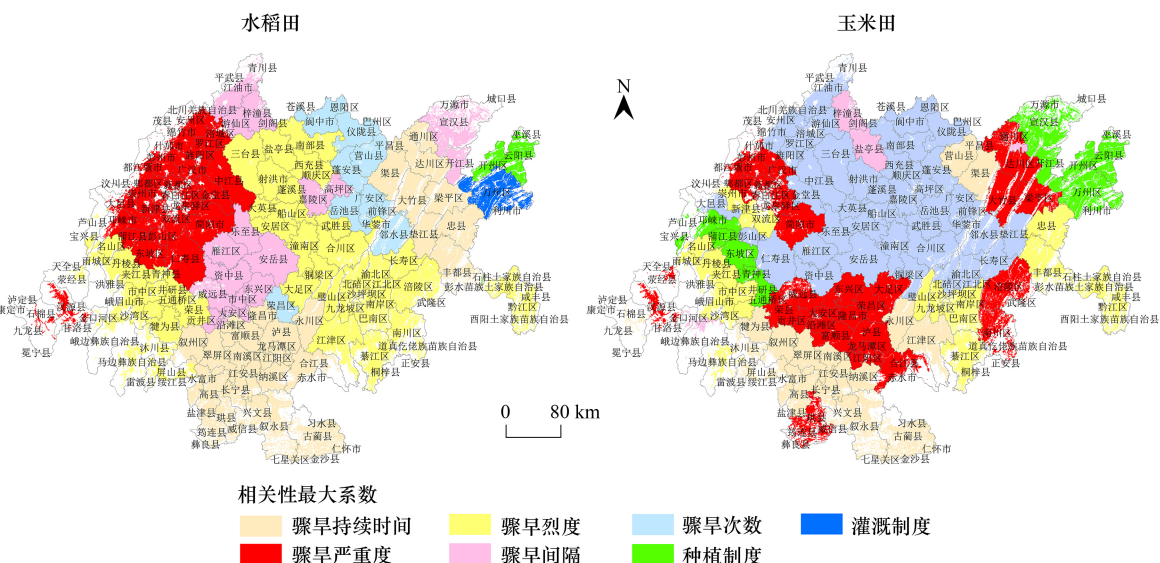


图 9 相关性因子与水稻田和玉米田脆弱性的 R^2 最大值的空间分布图

Fig.9 Spatial distribution map of the maximum R^2 value of the Correlation factor and rice farmland vulnerability in the Chengdu-Chongqing area

3 讨论

3.1 农田对骤旱的抵抗性与恢复性

骤旱期间因高温和降水量减少,土壤水分快速下降,但由于地形和气候的不同,骤旱严重区域也存在一定的空间差异^[53]。成渝地区地形复杂,夏季受不同季风环流交替影响,降水时空分布不均,并且区域特征显著^[54],因此成渝地区不同区域的骤旱严重程度与地形和气候有着密切关系。

成渝地区中部骤旱持续时间短、骤旱严重度小,受灾相对较轻(图 4)。四川盆地中部区域属于西南季风气候区,且海拔较低,地形较为复杂,平原、盆地、河谷共存,夏季降水较为充沛,土壤含水量较高,抗旱能力较强^[55]。研究发现成渝地区西北部和东南部骤旱持续时间长、骤旱严重度高,受灾较为严重(图 4)。四川北部和西部由于海拔较高,高山峡谷较多,山地垂直气候带明显,地形对降水影响显著,降水量相对其他区域较小,特别是夏季 7—8 月区域降水差异较大,土壤湿度较低,抗旱能力较弱,受到骤旱影响严重^[55],且成渝地区东南部属于东南季风气候区,多年平均降水量为 300—450 mm^[54],但气温相对中部和西部更高,高温导致土壤含水量快速下降,易形成骤旱严重区域。所以一旦发生骤旱,成渝地区西北部和东南部受地形和气候的影响易成为骤旱严重区域,势必会对当地农田生态造成巨大损失,因此建议成渝地区西北部和东南部农田应合理增加种植耐旱作物的比例,以及扩大灌溉农田面积,从而降低骤旱对当地农田造成的损失。

雨养农田面对骤旱时相较灌溉农田具有更高的抵抗性,但灌溉农田具有更好的恢复性^[26]。2022 年农田对骤旱的恢复性相对 2006 年农田对骤旱的恢复性显著增加,但两个骤旱年中德阳市、绵阳市和成都市北部农田恢复性普遍较低(图 5)。2022 年成渝地区中部以及东部相较于 2006 年,灌溉农田明显增加(图 10),据统

计 2022 年渝地区的灌溉农田为 29711.50 km²,而 2006 年渝地区的灌溉农田为 21982.75 km²,这一现象侧面反映了 2022 年成渝地区农田对骤旱的恢复性显著相较 2006 年成渝地区农田恢复性更大。严重的干旱有可能会降低植被的生产力,引发植被死亡,但在干旱中存活下来的植被,恢复性越高,则易恢复到干旱发生前的初始状态^[56-57]。根据统计年鉴中农产品产量数据表明 2022 年成渝地区总体粮食比其前一年减少 91.6 万 t,而 2006 年比前一年减少 575.4 万 t。在两个骤旱年中,德阳市、绵阳市和成都市北部的骤旱持续时间和骤旱严重度均为高值。长期的严重骤旱意味着德阳市、绵阳市和成都市北部土壤水分损失严重,而德阳市和绵阳市的农田虽以其他单季农田为主,但灌溉农田相对较少(图 1 和图 10),虽然成都市北部灌溉农田较多,但农田类型主要为多季农田更易受骤旱影响^[25]。因此德阳市、绵阳市和成都市北部农田对骤旱的恢复性普遍较低与灌溉农田数量、农田类型和农田种植制度有着密切关系。本文建议绵阳市和德阳市可以考虑增大灌溉农田面积,成都市可以考虑在北部适当增加单季农田的比例,从而降低骤旱对农田造成的损失。

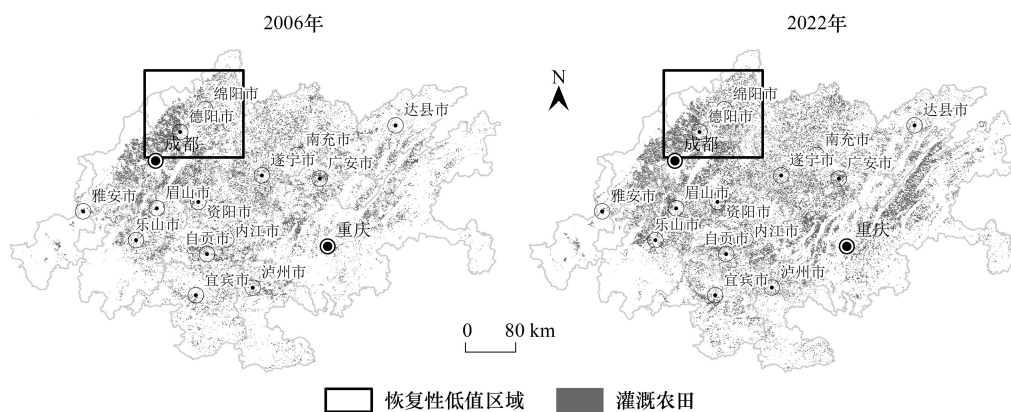


图 10 2006 和 2022 骤旱年成渝地区灌溉农田的对比图

Fig.10 Comparison map of irrigated farmland in the Chengdu Chongqing region during the flash drought years of 2006 and 2022

3.2 农田对骤旱的脆弱性

本文利用农田对骤旱的抵抗性和恢复性来共同判别农田的脆弱性大小,使用 GWR 得到了骤旱发生后,不同农田的脆弱性与农田种植制度和农田灌溉制度存在着较大相关性。已有研究表明,农田对骤旱的脆弱性与农田种植制度、农田灌溉制度、农田类型也存在重要关联^[23,58]。

成都市、眉山市、以及重庆市周围的多季农田面对骤旱更加脆弱。在中国通过作物轮作来提高农作物产量已成为一种重要的种植方式^[59],且 2022 年成渝地区约有 2/5 的农田为多季农田。多季作物在经历骤旱时相对单季作物更加容易受到影响,且双季作物中由于两种作物类型的播种时间不同,受到骤旱的影响程度也有所不同,如晚稻相对早稻更易受季节性干旱影响^[25]。本文研究结果表明大部分单季农田脆弱性均值低于多季农田脆弱性均值,而成都市、眉山市主要为多季农田,且在 2022 骤旱年农田对骤旱的脆弱性均为高值。因此农田种植制度与农田对骤旱的脆弱性存在着密切关系,建议对成都市、眉山市等以多季农田为主的城市在干旱年份应适当增加单季作物的比例,将更多的水资源分配给多季农田。

农田经历干旱时,灌溉农田相比雨养农田,在很大程度上能降低干旱所带来的负面影响^[60]。成渝地区灌溉条件下的单季水稻对骤旱的脆弱性比雨养条件下的单季水稻对骤旱的脆弱性低,且灌溉双季稻田对骤旱的脆弱性显著低于雨养双季稻田对骤旱的脆弱性(图 8)。成渝地区是水稻生产重要基地,其成渝地区水稻田约占有所有农田总量的 1/4,而水稻主要生长在较为湿润的环境,相对其他农作物更需进行灌溉种植,且对于干旱的耐受性较差^[25]。双季稻田由于播种与收获时间长于单季稻田,更易在开花前后遇上骤旱且土壤水分严重不足,导致农田变的更加脆弱^[25]。本文研究也表明成渝地区灌溉多季农田对骤旱的脆弱性均低于成渝地区雨养多季农田对骤旱的脆弱性,因此灌溉是农作物应对干旱等极端气候条件的有效调节机制^[61]。建议成渝地

区可以考虑未来将更多的雨养多季农田转变为灌溉多季农田,以降低骤旱对成渝地区农田产量造成的损失。

4 结论

本文分析了 2006 年与 2022 年骤旱事件的基本特征,揭示了极端干旱年不同类型农田对骤旱的抵抗性与恢复性,量化了 2022 年农田生产力对骤旱的脆弱性,以及探究了骤旱事件基本特征与农田种植制度以及农田灌溉制度对不同农田脆弱性的相对重要性,主要结论如下:

(1) 2022 年成渝地区南部以及中部相比 2006 年的骤旱严重度更高且骤旱持续时间更长,2006 年成渝地区西部发生骤旱次数普遍较高。骤旱年中,成渝地区西北部和东南部骤旱较为严峻,如德阳市、绵阳市和成都市。骤旱烈度值低的区域,骤旱严重度和骤旱持续时间普遍较高,其中德阳市、绵阳市、成都市、重庆市、南充市的骤旱严重度、骤旱持续时间均为高值。

(2) 在骤旱年中,农田抵抗性越高的区域恢复性越小,如德阳市、绵阳市和成都市。2022 年成渝地区农田相比 2006 年呈现“抵抗性下降,恢复性上升”的特点,其中水稻田、玉米田的抵抗性变化范围从 5—6 下降到了 3—4,恢复性变化范围则由 1—2 上升至 2—3。

(3) 北部农田对骤旱抵抗时间较长,而东南部农田恢复时间长。总体而言,2022 年农田抵抗时间相比 2006 年增加,而 2022 年农田的恢复时间除了荒田,其他农田恢复到骤旱来临前的状态所需时间相比 2006 年缩短,2022 年大部分农田面对骤旱呈现“抵抗时间长,恢复时间短”的特点。

(4) 2022 年成渝地区大部分多季农田脆弱性均值低于单季农田脆弱性均值。多季农田在面临骤旱时,灌溉条件下的农田的脆弱性普遍低于雨养条件下农田的脆弱性。而单季农田在面临骤旱时,部分雨养农田脆弱性均值低于灌溉农田脆弱性均值,如玉米田、小麦田、其他单季田。

参考文献(References):

- [1] Jiang L L, Liu W L, Liu B, Yuan Y, Bao A M. Monitoring vegetation sensitivity to drought events in China. *The Science of the Total Environment*, 2023, 893: 164917.
- [2] Ge W Y, Li X X, Xie M X, Yu B W, Jiao J Y, Han J Q, Wang F. Quantitative evaluation of drought risk related to vegetation productivity in China. *Journal of Hydrology*, 2023, 623: 129877.
- [3] David G, Jakob Z, Markus R, Michael O, Smith William K, Stephen S, Wolfgang B. Increasing impact of warm droughts on northern ecosystem productivity over recent decades. *Nature Climate Change*, 2021, 11(9): 772-779.
- [4] 袁星,王钰森,张苗,王琳瑛. 关于骤旱研究的一些思考. *大气科学学报*, 2020, 43(6): 1086-1095.
- [5] 纪瑞鹏,于文颖,冯锐,武晋雯,米娜,张玉书. 骤发干旱对农作物生长过程的影响机制与评估研究进展. *生态学杂志*, 2023, 42(11): 2737-2746.
- [6] 袁星,马凤,李华,陈思思. 全球变化背景下多尺度干旱过程及预测研究进展. *大气科学学报*, 2020, 43(1): 225-237.
- [7] 薛雨婷,李谢辉,贾何佳. 基于 CMIP6 模式的西南地区旱灾风险未来预估. *水土保持研究*, 2023, 30(2): 247-255.
- [8] 张丽,何伟,潘洪义. 成渝地区双城经济圈县域经济空间格局及影响因素——基于夜间灯光数据的分析. *资源开发与市场*, 2022, 38(9): 1081-1090, 1125.
- [9] 刘海,姜亮亮,刘冰,刘睿,肖作林. 近 40 年中国干旱特征及其对植被变化的影响. *生态学报*, 2023, 43(19): 7936-7949.
- [10] 孙博,王会军,黄艳艳,尹志聪,周波涛,段明铿. 2022 年夏季中国高温干旱气候特征及成因探讨. *大气科学学报*, 2023, 46(1): 1-8.
- [11] 梅梅,高歌,李莹,王国复,代潭龙,陈逸骁. 1961—2022 年长江流域高温干旱复合极端事件变化特征. *人民长江*, 2023, 54(2): 12-20.
- [12] Sun P, Liu R L, Yao R, Shen H, Bian Y J. Responses of agricultural drought to meteorological drought under different climatic zones and vegetation types. *Journal of Hydrology*, 2023, 619: 129305.
- [13] Zhang Y T, Hao Z, Jiang Y T, Singh V. Impact-based evaluation of multivariate drought indicators for drought monitoring in China. *Global and Planetary Change*, 2023, 228: 104219.
- [14] Cai X H, Zhang W Q, Zhang C J, Zhang Q, Sun J L, Cheng C, Fan W J, Yu Y, Liu X L. Identification and spatial-temporal variation characteristics of regional drought processes in China. *Land*, 2022, 11(6): 849.
- [15] Ma F, Yuan X. When will the unprecedented 2022 summer heat waves in Yangtze River Basin become normal in a warming climate? *Geophysical Research Letters*, 2023, 50(4): e2022GL101946.

- [16] Liang M L, Yuan X, Zhou S Y, Ma Z S. Spatiotemporal evolution and nowcasting of the 2022 Yangtze River mega-flash drought. *Water*, 2023, 15 (15): 2744.
- [17] 徐翔宇, 许凯, 杨大文, 郦建强. 多变量干旱事件识别与频率计算方法. *水科学进展*, 2019, 30(3): 373-381.
- [18] Chen, L G, Gottschalck, J, Hartman, A, Miskus, D, Tinker, R, Artusa, A. Flash Drought Characteristics Based on U.S. Drought Monitor. *Atmosphere*, 2019, 10(9): 498.
- [19] 宋进喜, 高隽清, 李晓鑫, 毛瑞晨, 史阿莹. 近 20 年来黄土高原蒸散发变化规律及其驱动因素. *西北大学学报: 自然科学版*, 2023, 53 (6): 974-990.
- [20] 杨航, 马彩虹, 滑雨琪, 李聪慧, 刘圆圆. 宁夏草地绿度时空变化图谱及驱动因素分析. *水土保持研究*, 2024, 31(2): 228-239.
- [21] 陈中平, 徐强. Mann-Kendall 检验法分析降水量时程变化特征. *科技通报*, 2016, 32(6): 47-50.
- [22] 杨唐, 邵景安, 郭跃, 杨华良. 西南地区农田灌溉用水影响因素研究——以重庆市石柱县为例. *农业与技术*, 2021, 41(15): 60-65.
- [23] 赵仰徽, 齐向辉, 任稳江, 车宗贤, 任亮. 半干旱区雨养农田绿肥作物轮作休耕技术措施研究. *干旱区资源与环境*, 2024, 38(1): 123-132.
- [24] Mphande W, Kettlewell P S, Grove I G, Farrell A D. The potential of antitranspirants in drought management of arable crops: a review. *Agricultural Water Management*, 2020, 236: 106143.
- [25] 冯利平, 莫志鸿, 黄晚华, 杨晓光, 潘学标. 湖南省季节性干旱对双季稻生长及产量影响的模拟研究. *作物学报*, 2011, 37(5): 895-902.
- [26] He Y, Chen F, Jia H C, Wang L, Bondur V G. Different drought legacies of rain-fed and irrigated croplands in a typical Russian agricultural region. *Remote Sensing*, 2020, 12(11): 1700.
- [27] 谢晓丽. 朝阳地区土地荒漠化成因及治理成效. *防护林科技*, 2020(2): 48-49, 54.
- [28] Wei M H, Li H L, Akram M A, Dong L W, Sun Y, Hu W G, Gong H Y, Zhao D M, Xiong J L, Yao S R, Sun Y, Hou Q Q, Zhang Y H, Wang X T, Xie S B, Deng Y, Zhang L, Degen A A, Ran J Z, Deng J M. Quantifying drought resistance of drylands in Northern China from 1982 to 2015: regional disparity in drought resistance. *Forests*, 2022, 13(1): 100.
- [29] 范嘉智, 谭诗琪, 罗宇, 庄翔宇, 周伟, 罗曼. 长短期记忆神经网络在多次土壤水分动态预测中的应用. *土壤*, 2021, 53(1): 209-216.
- [30] Wang L, Huang S Z, Huang Q, Leng G Y, Han Z M, Zhao J, Guo Y. Vegetation vulnerability and resistance to hydrometeorological stresses in water- and energy-limited watersheds based on a Bayesian framework. *Catena*, 2021, 196: 104879.
- [31] Liu Y J, You C H, Zhang Y G, Chen S P, Zhang Z Y, Li J, Wu Y F. Resistance and resilience of grasslands to drought detected by SIF in Inner Mongolia, China. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2021, 308/309: 108567.
- [32] Li X R, Yao Y T, Yin G D, Peng F F, Liu M X. Forest resistance and resilience to 2002 drought in northern China. *Remote Sensing*, 2021, 13 (15): 2919.
- [33] Liu Y, Ding Z, Chen Y N, Yan F Q, Yu P J, Man W D, Liu M Y, Li H, Tang X G. Restored vegetation is more resistant to extreme drought events than natural vegetation in Southwest China. *The Science of the Total Environment*, 2023, 866: 161250.
- [34] Li Y, Zhang W, Schwalm C R, Gentine P, Smith W K, Ciais P, Kimball J S, Gazol A, Kannenberg S A, Chen A P, Piao S L, Liu H Y, Chen D L, Wu X C. Widespread spring phenology effects on drought recovery of Northern Hemisphere ecosystems. *Nature Climate Change*, 2023, 13: 182-188.
- [35] Luna D A, Pottier J, Picon-Cochard C. Variability and drivers of grassland sensitivity to drought at different timescales using satellite image time series. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2023, 331: 109325.
- [36] Xu H J, Wang X P, Zhao C Y, Yang X M. Diverse responses of vegetation growth to meteorological drought across climate zones and land biomes in Northern China from 1981 to 2014. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2018, 262: 1-13.
- [37] Yao Y, Liu Y X, Zhou S, Song J X, Fu B J. Soil moisture determines the recovery time of ecosystems from drought. *Global Change Biology*, 2023, 29(13): 3562-3574.
- [38] Wang L Y, Yuan X, Xie Z H, Wu P L, Li Y H. Increasing flash droughts over China during the recent global warming hiatus. *Scientific Reports*, 2016, 6: 30571.
- [39] Qiu B W, Hu X, Chen C C, Tang Z H, Yang P, Zhu X L, Yan C, Jian Z Y. Maps of cropping patterns in China during 2015 - 2021. *Scientific Data*, 2022, 9: 479.
- [40] Guo W W, Huang S Z, Huang Q, She D X, Shi H Y, Leng G Y, Li J, Cheng L W, Gao Y J, Peng J. Precipitation and vegetation transpiration variations dominate the dynamics of agricultural drought characteristics in China. *Science of the Total Environment*, 2023, 898: 165480.
- [41] 孙志超, 祁雨薇, 汪东川, 姜杰, 韩明利, 赵人杰. 基于多源遥感影像的盐碱地治理效果. *生态学报*, 2023, 43(15): 6406-6417.
- [42] Song P L, Zhang Y Q, Guo J P, Shi J C, Zhao T J, Tong B. A 1 km daily surface soil moisture dataset of enhanced coverage under all-weather conditions over China in 2003 - 2019. *Earth System Science Data*, 2022, 14(6): 2613-2637.
- [43] Zhang C, Dong J W, Ge Q S. Mapping 20 years of irrigated croplands in China using MODIS and statistics and existing irrigation products.

- Scientific Data, 2022, 9: 407.
- [44] 吴佳, 高学杰, 张冬峰, 石英, Giorgi F. 三峡水库气候效应及 2006 年夏季川渝高温干旱事件的区域气候模拟. 热带气象学报, 2011, 27(1): 44-52.
- [45] 黄曼捷, 李艳忠, 王渊刚, 于志国, 庄稼成, 星寅聪. 多源遥感降水产品在西北干旱区的气象干旱性能评估. 干旱区地理, 2024, 47(4): 549-560.
- [46] Yuan X, Wang L Y, Wu P L, Ji P, Sheffield J, Zhang M. Anthropogenic shift towards higher risk of flash drought over China. Nature Communications, 2019, 10: 4661.
- [47] Bai Y, Li S G. Growth peak of vegetation and its response to drought on the Mongolian Plateau. Ecological Indicators, 2022, 141: 109150.
- [48] 李梦娜, 钱会, 乔亮. 关中地区农业干旱脆弱性评价. 资源科学, 2016, 38(1): 166-174.
- [49] Wang C Y, Wang J B, Sun X F, Wang M, Wang S Q, Cui H J. Vulnerability of farmland productivity and climatic impact in Bangladesh, India, and Myanmar, based on GIMMS 3g NDVI in 1982-2015. Acta Ecologica Sinica, 2019, 39(21): 7793-7804.
- [50] Fang O, Qiu H, Zhang Q B. Species-specific drought resilience in juniper and fir forests in the central Himalayas. Ecological Indicators, 2020, 117: 106615.
- [51] 李春泽, 张超, 张皓源, 杨翠翠, 李珊儿, 郇文聚. 基于 XGBoost 与地理加权回归的吉林省西部土壤盐渍化反演. 中国农业大学学报, 2024, 29(2): 1-10.
- [52] 王圳峰, 王欣珂, 谢香群, 萧满红, 武艳芳, 刘兴诏. 基于 GWR 模型的福建省绿色空间景观格局演变影响因素及其空间差异. 西北林学院学报, 2022, 37(5): 242-250.
- [53] Ganguli P, Singh B, Reddy N N, Raut A, Mishra D, Das B S. Climate-catchment-soil control on hydrological droughts in peninsular India. Scientific Reports, 2022, 12: 8014.
- [54] 易俊莲, 方建刚, 刘晓东. 川渝地区夏季干旱气候特征及成因分析. 干旱地区农业研究, 2013, 31(4): 237-244, 256.
- [55] Adnan S, Ullah K. Development of drought hazard index for vulnerability assessment in Pakistan. Natural Hazards, 2020, 103(3): 2989-3010.
- [56] Fang O Y, Zhang Q B. Tree resilience to drought increases in the Tibetan Plateau. Global Change Biology, 2019, 25(1): 245-253.
- [57] DeSoto L, Cailleret M, Sterck F, Jansen S, Kramer K, Robert E M R, Aakala T, Amoroso M M, Bigler C, Camarero J J, Čufar K, Gea-Izquierdo G, Gillner S, Haavik L J, Heres A M, Kane J M, Kharuk V I, Kitzberger T, Klein T, Levanič T, Linares J C, Mäkinen H, Oberhuber W, Papadopoulos A, Rohner B, Sangüesa-Barreda G, Stojanovic D B, Suárez M L, Villalba R, Martínez-Vilalta J. Low growth resilience to drought is related to future mortality risk in trees. Nature Communications, 2020, 11: 545.
- [58] 孙鹏洲, 罗珠珠, 李玲玲, 牛伊宁, 蔡立群, 刘家鹤, 王晓菲. 黄土高原干旱区长期种植紫花苜蓿和一年生作物轮作对土壤真菌群落的影响. 中国生态农业学报: 中英文, 2022, 30(6): 965-975.
- [59] 刘春燕, 张利影, 周杰, 许依, 杨亚东, 曾昭海, 臧华栋. 豆科作物轮作强化农田生态系统功能的研究进展. 作物学报: 1-12[2024-07-11]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.1809.s.20240515.1720.002.html>.
- [60] Zhu X F, Liu Y, Xu K, Pan Y Z. Effects of drought on vegetation productivity of farmland ecosystems in the drylands of northern China. Remote Sensing, 2021, 13(6): 1179.
- [61] 刘莹, 朱秀芳, 徐昆, 陈令仪, 郭锐. 干旱对灌溉和雨养农田生态系统生产力的影响对比分析. 遥感技术与应用, 2021, 36(2): 381-390.