

农业干旱演变特征及现状防御条件下作物因旱减产阈值研究 ——以三峡库区为例*

常文娟^{1,2}, 李彬², 李海玟³, 屈艳萍⁴, 甘治国⁴, 马海波^{1,2**}, 刘冀^{1,2}, 林青霞^{1,2}

(1: 三峡库区生态环境教育部工程研究中心, 宜昌 443002)

(2: 三峡大学水利与环境学院, 宜昌 443002)

(3: 滁州水文水资源局, 滁州 239000)

(4: 中国水利水电科学研究院, 北京 100038)

摘要: 气候变化和水利工程运行显著改变了三峡库区水循环过程, 近年来, 库区干旱频发, 分析其农业干旱的演变特征与驱动机制, 解析现状防御条件下的因旱减产阈值, 对于库区流域干旱的系统应对具有重要的意义。本研究首先基于标准化土壤湿度指数, 分析库区流域 1982-2022 年农业干旱的时空演变特征, 并识别其驱动要素; 基于 Copula 理论计算干旱重现期, 提取历史典型干旱场景, 综合考虑蒸发、截留和径流等损失, 引入作物生育期有效降雨量改进 Jensen 模型参数, 提出一种基于改进的 Jensen 模型确定现状防御条件下、历史典型干旱重演的作物因旱减产阈值的计算方法。结果表明: 1982-2022 年间三峡库区农业干旱整体呈加剧趋势, 且时空分异显著; 其中, 库尾区域为农业干旱的高发地带, 库中游区域为长历时、大烈度、高峰值的重旱和特旱主要发生区域, 库首区域为长历时极端干旱易发区。进一步研究发现, 未来库区流域农业干旱总体呈减缓趋势。库区夏伏旱的关键驱动因子为降水, 冬春连旱的直接影响因素为潜在蒸散发。在现状水利工程防御条下, 库区流域发生 2、5、10、20、50 一遇的作物因旱减产率阈值为 1.23%、5.12%、8.13%、15.44%、22.32%。研究成果可为库区抗旱水源配置、抗旱补水调度及补水方案推演提供技术支撑。

关键词: 农业干旱; 标准化土壤湿度指数; 改进的 Jensen 模型; 作物因旱减产阈值; 三峡库区

Evolution of agricultural drought and drought-induced crop yield reduction thresholds under current mitigation measures in the Three Gorges Reservoir area

Chang Wenjuan^{1,2}, Li Bin², Li Haiwen³, Qu Yanping⁴, Gan Zhiguo⁴, Ma Haibo^{1,2**}, Liu Ji², Lin Qinxia²

(1.Engineering Research Center of Eco-environment in Three Gorges Reservoir, Ministry of Education, Yichang 443002, P.R.China

2. College of Hydraulic and Environment Engineering, China Three Gorges University, Yichang 443002, P.R.China

3. Hydrology and Water Resources Bureau of Chuzhou, Anhui Province, Chuzhou 239000,P.R.China

4. China Institute of Water Resources and Hydropower Research,Beijing100038,P.R.China)

Abstract: The repercussions of climate change, in conjunction with the functioning of hydraulic projects, have resulted in substantial alterations to the water cycle within the Three Gorges Reservoir area. The Three Gorges Reservoir area has

* 2025-01-24 收稿; 2025-04-28 收修改稿。

国家自然科学基金项目(52479018, 52379069);、新疆维吾尔自治区重点研发计划项目(2023B02001-1);和湖北省水利工程学科111 创新引智基地(三峡大学)联合资助

**通信作者, Email:mahaibo@ctgu.edu.cn

experienced recurrent seasonal droughts in recent years. A comprehensive analysis of the evolution characteristics and driving mechanisms of seasonal agricultural drought in this region is imperative for formulating a systematic response to agricultural droughts. This analysis should be coupled with a quantitative determination of yield reduction thresholds under current drought defence conditions. Firstly, the spatiotemporal evolution of seasonal agricultural drought in the reservoir area from 1982 to 2022 was investigated, based on the Standardized Soil Moisture Index (SSMI). Furthermore, additional analyses were conducted using Path Analysis to explore key driving factors. Furthermore, drought return periods and representative drought years were determined using Copula theory, and historical typical drought scenarios were extracted. On this basis, effective rainfall was introduced to improve the parameters of the Jensen model, considering losses due to evaporation, interception, and runoff. A novel methodology has been proposed for the calculation of drought-induced crop yield reduction thresholds under both historical and current drought scenarios, with the improved Jensen model serving as the underlying framework. This approach is particularly pertinent in the context of the recurrence of historically typical drought conditions. The results demonstrated that agricultural droughts in the Three Gorges Reservoir area intensified between 1982 and 2022, exhibiting significant spatiotemporal variability. The tail section of the reservoir was identified as the area most susceptible to high-frequency drought, while the middle reaches were characterised by long-duration, high-intensity, and severe droughts. In a similar fashion, the upper reaches were susceptible to extreme, protracted droughts. Subsequent analysis indicated that future agricultural droughts in the reservoir area were anticipated to diminish on a global scale. The primary factor contributing to summer-fall droughts was precipitation, while potential evapotranspiration emerged as the directly influenced factor for winter-spring consecutive droughts. Finally, within the context of the prevailing water conservancy defense conditions, drought-induced crop yield reduction thresholds for return periods of 2, 5, 10, 20, and 50 years were calculated to be 1.23%, 5.12%, 8.13%, 15.44%, and 22.32%, respectively. The findings of this study provide a robust technical foundation for the development of drought-resilient water resource planning, scheduling of drought replenishment, and scenario-based water management in the Three Gorges Reservoir area.

Keywords: Agricultural Drought; Standardized Soil Moisture Index (SSMI); Improved Jensen model; Drought-Induced Crop Yield Reduction Threshold; Three Gorges Reservoir Area

随着气候变化与人类活动影响的加剧,长江流域极端干旱频发、广发^[1, 2],流域水安全面临严峻挑战。三峡库区作为我国水资源战略储备库和长江大保护的关键节点,承担着“一江清水东流”的重大责任和特殊使命。随着三峡工程的建成与运行,库区水文气候系统发生显著变化^[3, 4],特别是季节性干旱的时空分异特征尤为突出^[5],这种变化通过土壤-植被-大气连续体的级联效应深刻影响着农田生态系统^[6]。在此背景下,揭示三峡库区农业干旱的演变特征与驱动机制,解析现状防御条件下的干旱减产阈值,对于提升流域干旱应对能力、保障库区水安全具有重要意义。

近年来,气候变化背景下的长江流域水循环演变及其对于干旱影响的研究引起了广泛关注。大量研究通过构建不同类型的干旱监测指标,揭示了流域内干旱的时空演变^[1, 7-9],并分析了气候变化、土地利用等要素对长江流域干旱时空演变的影响^[10, 11]。谢傲等指出长江流域干旱事件与降水量的显著下降密切相关,且随着气候变暖的加剧,干旱发生的频率和持续时间呈上升趋势^[12]。此外,季节性变化和地理差异对干旱的时空分布产生了重要影响,北部地区由于降水的季节性波动,干旱更加显著,而南部地区则主要受到暴雨和短时强降水的影响,导致局部旱情的快速变化^[13]。这些研究表明,长江流域的干旱呈现出明显的时空分异性,其演变过程受气候变化和水文特征变化的共同作用。在三峡库区,干旱的演变与驱动因素研究则主要聚焦在水文变化和水资源调控的交互影响上。已有研究通过分析三峡库区的降水与水汽输送关系,指出气候变化导致的水汽输送路径改变在一定程度上影响了库区干旱的形成^[14],并探讨了水分循环过程及其对2022年夏伏旱的响应机制^[15]。此外,考虑三峡工程蓄水影响,研究了三峡水库径流调节对水文干旱的影响^[16, 17]。随着气候变化和季节性干旱的加剧,三峡库区农业生产,尤其是水稻等重要经济作物,面临严峻挑战,如2016年三峡库区部分地区发生夏伏旱,导致灌溉水源短缺,水稻生长周期中的分蘖期和灌浆期遭遇干旱,应急灌溉受限,造成水稻大幅减产^[18]。然而,现有研究较少关注库区农业干旱的时空演变驱动及其对农业生产的影响,尤其是缺乏对三峡库区农业干旱与作物减产之间量化关系的深入研究。

在农业干旱灾害损失定量评估方面,灾情数据一般是通过灾后致灾调查,通常为年度数据,不能满足实际灾害预演的需求。相关学者采用作物模型开展了干旱损失定量评估。如, Raymundo R 等^[19]利用 APSIM 模型模拟了高粱生长,评估了干旱对水资源短缺地区作物产量的影响; H. Yang 等^[20]基于 CERES-Wheat 模型构建了干旱脆弱性曲线,定量评估了冬小麦的干旱危害强度与风险; 常文娟等^[21]基于 Aquacrop 模型建立了作物生长环境要素与产量之间的定量关系,定量评估了农业旱灾损失; 雷宏军等^[22]通过长系列降水量确定干旱联合重现期,基于 Jensen 模型评估农业旱灾损失; 彭彭雯等^[23]将水库调度模型与 AquaCrop-OSPy 模型结合,模拟分析了不同等级干旱典型年在不同初始水位下的水库运行过程与农业生产因旱损失风险。尽管如此,现有作物模型(如 APSIM 模型、CERES-Wheat 模型、Aquacrop 等)因其结构复杂、参数繁多,且模型校准过程复杂,难以满足实际防旱抗旱应用需求。此外,已有研究表明,忽略深层渗漏、水文损失(如径流和蒸发)会导致干旱损失评估偏差^[24]。基于此,本文通过构建三峡库区流域农业干旱表征指标—标准化土壤湿度指数(Standardized Soil Moisture Index (SSMI))分析三峡库区流域 1982-2022 年间的农业干旱演变及未来趋势,采用通径分析识别库区农业干旱的驱动因素,基于游程、Copula 理论提取历史典型干旱场景;在考虑作物生理特性,实际供水深层渗漏基础上,进一步综合考虑蒸发、截留和径流等损失,引入作物生育期有效降雨量改进 Jensen 模型参数;同时,基于 Copula 干旱频率计算确定干旱典型年,有效避免了按照年水资源量或降雨量排频选取不同频率干旱典型年的不足;进而提出一种基于改进的 Jensen 模型确定现状防御条件下、历史典型干旱重演的作物因旱减产阈值计算方法,量化现状水利工程应对不同干旱场景的防御能力,并提供更精准的因旱减产阈值预测,为流域干旱预警、极端干旱场景下抗旱补水调度及补水方案预演提供技术支撑。

1 研究区及数据来源

1.1 研究区域概况

三峡库区流域位于长江流域上游,如图 1(a)所示,地跨 $29^{\circ}\sim 31^{\circ}50'N$, $106^{\circ}20'\sim 110^{\circ}30'E$ 之间,库区总面积约 5.8 万 km^2 。该地区跨越鄂中、川东山区岭谷地带,北屏大巴山,东南高、西北低,地形条件复杂,中低山和丘陵面积占总面积的 90%以上,山地主要分布在东北部,丘陵主要分布在库区中西部,如图 1(b)。三峡库区共有 26 个区县,辖 16 个区、9 个县及 1 个自治县,可分为库首、库中游、库尾三部分^[25],如图 1(c)所示。库区内气候属亚热带季风气候,四季分明、夏热冬暖,水热资源丰沛但时空分布不均,其降水年内和年际变化大,经常出现暴雨、山洪和干旱等自然灾害^[26]。2022 年夏秋季,长江流域遭遇特大干旱,三峡库区库尾区域重庆片及库中游、库首区域出现有记录以来综合强度最强的高温干旱,造成了极大的负面影响^[15]。

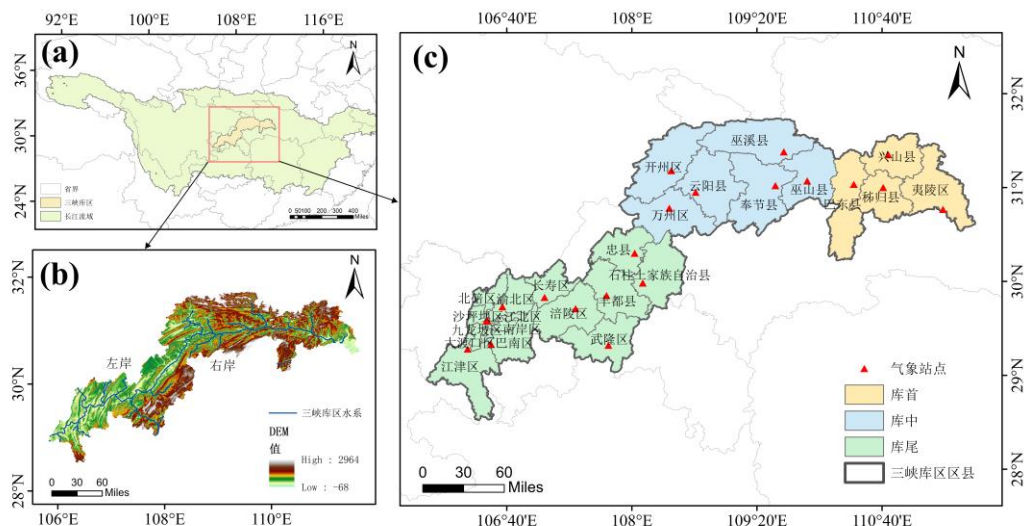


图 1 三峡库区地理位置示意图

Fig. 1 Schematic map of the geographic location of the Three Gorges Reservoir Area

1.2 数据来源

本研究数据类型及来源为：（1）土壤湿度、降水、温度（1982-2022 年）数据，来源于 ERA5-Land^[27]，月尺度，空间分辨率为 0.1°×0.1°（<https://cds.climate.copernicus.eu/datasets>）；（2）植被覆盖（NDVI）数据、潜在蒸散发数据集（1982 年-2022 年）来源于国家地球系统科学数据中心（<http://www.geodata.cn>），其中，NDVI 数据为逐月，空间分辨率为 8km；潜在蒸散发数据集时间尺度为月，空间分辨率为 1km；NDVI 与潜在蒸散发数据均通过线性插值法、重采样为 0.1°×0.1°空间分辨率。（3）三峡库区各区县站点降水量来源于国家气象信息中心-中国气象数据网^[28]，日尺度；（4）三峡库区各区县可供水量、总需水量、农业用水需求量来源于重庆市水利局、湖北省水利厅及《抗旱规划》；（5）各区县农作物总播种面积和主要农作物播种面积来源于重庆市统计局、湖北省统计局，《重庆统计年鉴》、《湖北统计年鉴》；（6）作物模型所需的作物需水量和作物水敏感系数参考文献确定^[29-31]。

表 1 水稻生育期水分敏感系数和需水量
Tab. 1 Water Sensitivity and Demand during Rice Growth Stages

作物生育阶段	生育阶段日期	生育阶段需水量（mm）	总需水量（mm）	水分敏感系数
移栽—分蘖	5.11-5.31	22.1	319.6	0.0182
分蘖—拔节	6.1-6.20	94.3		0.3046
拔节—孕穗	6.21-7.20	59.1		0.3046
孕穗—抽穗	7.21-7.31	52.1		0.5681
抽穗—成熟	8.1-9.10	92		0.1308

2 研究方法

2.1 农业干旱演变分析方法

标准化土壤湿度指数（Standardized Soil Moisture Index, SSMI）是评估农业干旱较为有效的指标^[32]。本研究首先将研究区 1982-2022 年土壤湿度数据进行 Kolmogorov-Smirnov test（K-S 检验），验证其分布特征，结果显著性为 0.826，符合正态分布，满足 SSMI 计算的前提条件；采用标准化土壤湿度指数计算方法^[33]，分别计算不同时间尺度的标准化土壤湿度指数，即 SSMI-1（1 个月尺度）、SSMI-3（3 个月尺度）、SSMI-6（6 个月尺度）和 SSMI-12（12 个月尺度）；某月的 SSMI-3 指数是根据当月及其前两个月的土壤湿度数据计算得出。如，二月的 SSMI-3 值反映的是从十二月至次年二月期间的土壤湿度状况。

月尺度 SSMI 的计算公式如下：

$$SSMI = \frac{SM - \mu}{\sigma} \tag{1}$$

式中，SM--月尺度土壤含水量的数值；μ--月尺度土壤含水量的平均值；σ--月尺度土壤含水量数值的标准差。

在此基础上，采用 Mann-Kendal 检验法（简称 M-K 检验）进行农业干旱历史变化趋势和突变分析，通过计算 Hurst 指数，分析干旱未来演变趋势。在 MK 趋势检验中，Z 值大于 0 表示上升趋势，小于 0 表示下降趋势。若|Z|大于等于 1.96，则表示通过了 95%置信区间检验，趋势具有显著性。其中，UF 是对 SSMI 序列进行正向排序后计算得出的统计量，它能体现从起始端随着时间推移，数值上升或下降趋势的累积情况；而 UB 则是通过反向排序计算得到，与 UF 反映趋势的方向相反，二者的交点可视为趋势的转折点。Hurst 指数^[34]通过重标极差方法（R/S）得到，可以用来量化时间序列在未来一定时间内的相对趋势，其值域为 0 至 1。H=0.5 表明序列为随机游走；0<H<0.5 显示反持续性；0.5<H≤1 则表明存在持续性。

2.2 干旱识别与特征变量

采用游程理论，基于旱情划分等级^[35]，确定干旱发生阈值为-0.5，识别干旱事件^[36]，具体干旱程度分类标准为：-1<SSMI≤-0.5 为轻旱，-1.5<SSMI≤-1 为中旱，-2<SSMI≤-1.5 为重旱，SSMI≤-2 为特旱。提取干旱特征变量：干旱历时、干旱烈度、烈度峰值等^[37]。首先，采用 Kolmogorov-Smirnov（K-S）检验优选干旱历时和干旱烈度的单变量最优分布函数，选择 Gamma、Lognormal 和 Weibull 三种常见分布函数作为备选，并通过极大似然法估计其参数。其次，选取三种典型的 Copula 函数——Gumbel-Copula、Frank-Copula 和 Clayton-Copula 构建干旱历时和烈度的二维联合分布，能反映干旱历时和烈度之间不同干

旱场景的依赖关系。在此基础上,采用极大似然估计法进行参数估计,基于 AIC 信息量准则^[38]和均方根误差 (RMSE)^[39]评估其拟合优度,从而选取拟合最优的 Copula 函数构建干旱特征变量的二维联合分布函数,进而计算干旱频率和重现期^[40]。

2.3 干旱驱动因素识别

季节性干旱是指在特定季节(如春旱、夏旱、伏旱、秋旱)因降水不足、蒸发强烈或水资源分配不均导致的短期水分短缺现象^[41]。本研究结合库区流域干旱特点,针对库区流域夏伏旱、冬春连旱的驱动要素进行识别。通径分析方法^[42],将因变量与多个自变量间的相关系数(相互影响)分解为直接通径系数和间接通径系数,进而识别各变量间的因果关系,通过比较通径系数绝对值的大小,直接比较各个自变量对因变量的作用^[43]。本研究综合考虑降水、温度、潜在蒸发量、植被指数等影响土壤湿度的多种环境变量,采用通径分析方法定量解析库区水文循环季节性变化的影响导致的季节性干旱的主要驱动因素。

2.4 现状防御条件下、历史干旱重演的农业因旱减产模型构建

Jensen 模型是基于作物水分生产函数反映作物产量和供水状况的关系^[44]。刘代勇等^[45]为便于评估抗旱灌溉效益,将 Jensen 模型参数实际蒸发量与潜在蒸发量进行简化,将实际蒸发量用作物生育期的实际供水量代替,其中,实际供水量为总降雨量与灌溉水量之和,潜在蒸发量用作物生育期需水量代替。然而,总降雨量不能被田间作物完全利用,保留在作物的根区、能被作物利用的水量才是有效的降雨量。雷宏军等^[22]进一步考虑实际供水量中暴雨引起的排水以及渗漏,对渗漏损失量采用时段稻田渗漏量与生育阶段始末的水位差进行近似计算。本研究在考虑作物生理特性、实际供水深层渗漏量基础上,进一步综合考虑蒸发、截留和径流等损失,引入作物生育期有效降雨量改进模型参数,采用国际农业水文领域权威的有效降雨量计算方法,精细化确定生育期作物水分分亏缺情况,以灌溉供水量表征现状工程抗旱灌溉防御条件,改进 Jensen 模型;基于 Copula 干旱频率计算确定干旱典型年,有效避免了按照水资源量或降雨量排频选取不同频率典型年的不足;进而提出一种基于改进 Jensen 模型的现状防御条件下作物因旱减产模型。在此基础上,选取区域播种面积占比最高的核心粮食作物为研究区主导作物,按照作物各生育阶段缺水比例分配主导作物灌溉可供水量,模拟分析现状防御条件下、历史典型干旱重演的农业因旱减产率,进而确定现状防御条件应对不同程度干旱减产的阈值。

2.4.1 改进的 Jensen 模型

$$\frac{Y_a}{Y_m} = \prod_{i=1}^n \left(\frac{PE_i + S_{gi}}{D_i} \right)^{\lambda_i} \quad (2)$$

式中, Y_a --作物实际产量, kg; Y_m --作物潜在/理想产量, kg; S_{gi} --第 i 生育阶段的灌溉供水量, mm; D_i --第 i 生育阶段的田间需水量, mm; λ_i --第 i 生育阶段的作物水分敏感系数; PE_i --第 i 生育阶段的有效降雨量, mm; 本研究中采用国际农业水文领域权威的有效降雨量计算方法 (USDA-NRCS), 综合考虑了蒸发、截留、深层渗漏及径流等损失, 确定总降雨中能被作物利用的有效降雨量。有效降雨量计算公式^[46]为:

$$PE_i = \begin{cases} \frac{P_i(4.17 - 0.2P_i)}{4.17} & P_i < 8.3\text{mm} \\ 4.17 + 0.1P_i & P_i \geq 8.3\text{mm} \end{cases} \quad (3)$$

式中, P_i --作物生育期内第 i 生育阶段总降雨量, mm。

2.4.2 现状防御条件下作物因旱减产模型 以历史干旱典型年(干旱频率 p) 的作物生育期内有效降雨量 $PE_i(p)$ 作为现状年的降水条件输入, 结合现状防御条件下主导作物各生育阶段灌溉可供水量 $S_{gi}(p)$, 以及作物生育期田间需水量 D_i , 采用改进的 Jensen 模型, 模拟计算现状防御条件下, 发生历史典型干旱(干旱频率为 p) 的作物因旱减产率:

$$Loss(p) = \left[1 - \prod_{i=1}^n \left(\frac{PE_i(p) + S_{gi}(p)}{D_i} \right)^{\lambda_i} \right] \times 100\% \quad (4)$$

式中, $Loss(p)$ --现状防御条件下、历史典型干旱(干旱频率 p)重演的农业因旱减产率, 干旱频率 p (重现期)通过前述 Copula 理论确定。

(1) 干旱典型年确定

基于前述的游程干旱识别与 Copula 干旱频率(重现期)计算, 从识别的干旱事件中筛选出与选定重现期相近的多个年份, 针对干旱频率相近的历史干旱, 重点选取主导作物生育期缺水严重的年份, 即最不利原则, 确定各干旱频率 p 的干旱典型年。由于本研究区域选定的主导作物为水稻, 其生育期主要受夏伏旱影响, 故优先挑选夏伏旱发生的年份, 从而确定为该干旱频率下的干旱典型年。

(2) 灌溉供水确定

本研究基于抗旱规划中不同来水频率下的供需水量, 将不同干旱频率下的总供水水量 $S_{供}(p)$ 按照比例系数 α 转换为现状防御条件水平年、不同干旱频率下的农业可供水量 $S_{农}(p)$, 再将 $S_{农}(p)$ 按照比例系数 β 转换为现状防御条件水平年、不同干旱频率下的主导作物灌溉可供水量 $S_g(p)$, 据此估算不同干旱频率下的灌溉供水能力。其计算公式为:

$$S_g(p) = \beta \cdot S_{农}(p) \quad (5)$$

$$\text{其中, } \beta = \frac{\text{主导作物播种面积}}{\text{作物播种面积}}$$

$$S_{农}(p) = \alpha \cdot S_{供}(p) \quad (6)$$

$$\alpha = \frac{\text{农业需水量}}{\text{总需水量}}$$

为便于确定现状年不同干旱频率的灌溉可供水量, 参照《干旱灾害风险调查评估与区划编制技术要求》, 将 50%来水频率定义为 2 年一遇干旱, 75%来水频率定义为 5 年一遇干旱, 90%来水频率定义为 10 年一遇干旱、95%来水频率定义为 20 年一遇干旱、97%来水频率定义为 50 年一遇干旱^[47]。

(3) 灌溉水量分配

结合研究区灌溉试验站的作物生育期田间需水量 D_i 数据, 按照作物各生育阶段缺水比例确定各生育阶段灌溉可供水量分配系数, 将现状防御条件、干旱频率 p 下的主导作物灌溉可供水量 $S_g(p)$ 分配到各生育阶段灌溉可供水量 $S_{gi}(p)$ 。计算公式为:

$$S_{gi}(p) = S_g(p) \cdot \mu_i \quad (7)$$

$$\mu_i = \frac{D_i - PE_i(p)}{\sum_{i=1}^n (D_i - PE_i(p))} \quad (8)$$

式中, μ_i --作物在 i 生育期的缺水比例系数, 且 $D_i - PE_i(p) \geq 0$ 。当 $D_i - PE_i \leq 0$ 时, 表示该生育阶段有效降水量可满足作物需水量, 不需要额外补充灌溉, 则此时的 $\mu_i=0$ 。

3 结果与分析

3.1 三峡库区流域农业干旱时空演变特征

3.1.1 农业干旱演变趋势 库区流域 1982-2022 年不同时间尺度(1, 3, 6, 12 个月)SSMI-1、SSMI-3、SSMI-6、SSMI-12 的 MK 检验均通过显著性水平 $\alpha=0.01$ (图 2)。由图 2 可知, 1984 年之前, 库区流域的 UF 统计量普遍大于 0, SSMI 值呈上升趋势, 库区趋向湿润状态, 但整体趋势不明显。1984 年以后, UF 统计量降为负数, SSMI 值逐渐下降, 库区趋向干旱状态, 干旱趋势愈加显著。SSMI-3 和 SSMI-6 呈季节性波动, 均在 2002 年发生突变, 且呈干旱加剧趋势。

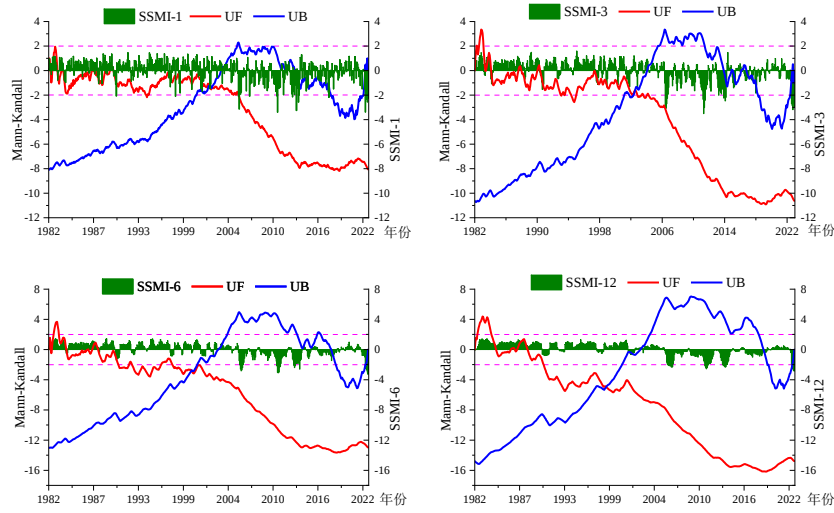


图 2 不同时间尺度 SSMI 指数的趋势和突变结果

Fig. 2 Trends and abrupt changes in SSMI index across different time scales

空间分布上, 库区流域 SSMI 变化趋势如图 3 所示, 由图 3 (a) 可知, 库区流域多年平均 SSMI 自东北向西南逐渐减小, 库尾和库中游地区相对呈干旱状态; 由图 3 (b) 可知, 近 40 年间 SSMI 呈显著下降趋势, 干旱化加剧, 且左岸 SSMI 显著性大于右岸; 由图 3 (c) 可知, 库区流域整体 Hurst 指数小于 0.5, 表明未来库区流域农业干旱呈减缓趋势。

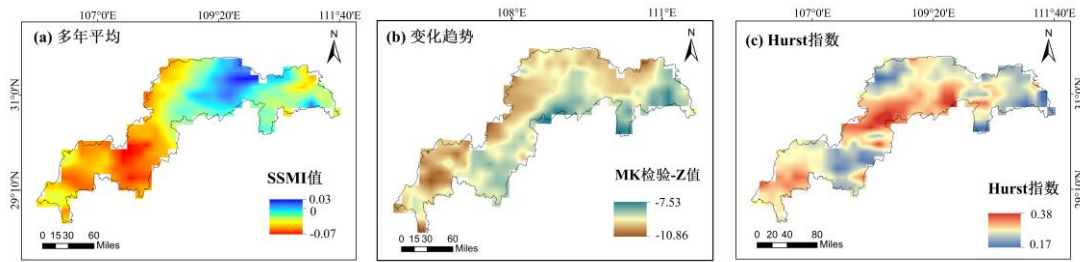


图 3 三峡库区 SSMI 演变趋势

Fig. 3 SSMI evolution trend in the Three Gorges Reservoir Area

年际变化如图 4 所示, 1982-2000 年间多年平均 SSMI 值均为正值, 库区流域总体呈湿润状态; 2001-2022 年间, 多年平均 SSMI 值呈减小趋势, 其中, 2011 年以后, 库区流域整体呈现出干旱状态。此外, 根据 MK 检验结果, 干旱趋势在 2002 年突变后, 2002-2022 年间多年平均 SSMI 值均为负值, 农业干旱区主要集中在库中游地区。2002-2022 年间季节变化情况如图 5 所示, 春季库首相较于库中游和库尾地区更为干旱, 夏季部分库尾地区 SSMI 较低, 秋季库中游地区 SSMI 最低, 为主要干旱区。

3.1.2 干旱事件特征 不同时间尺度 SSMI 识别的干旱事件如表 2。根据水利部水旱灾害防御公报记载, 库区流域主要的干旱为夏伏旱、冬春连旱, 1982-2022 年期间干旱事件主要有 1992 年、2006 年、2011 年、2013 年、2022 年。基于 SSMI-3 识别的干旱事件覆盖历史实际干旱事件的 89%, 实际干旱覆盖率最高, 故本研究选用 SSMI-3 进行干旱事件特征分析。

如图 6 (a) 干旱频次、图 6 (b) 平均干旱历时、图 6 (c) 平均干旱烈度及图 6 (d) 干旱烈度峰值的空间分布图, 可知: 库首和库尾区域干旱发生频次相比于库中游较多, 库尾地区在 40 年间发生的干旱频次最多, 超过 30 次, 而库中游干旱频次相对较少, 为 22 次; 整体上, 轻旱次数最多, 库尾和库首区域重旱频次多于库中游。从干旱历时看, 库中游和库尾区域的平均干旱历时较长, 局部区域可达到 5 个月以上, 而库首区域平均干旱历时相对较短, 约为 3 个月; 库中游和库首区域发生重旱和特旱时干旱历

时较长，最长可达 12 个月以上。从干旱烈度看，库中游干旱烈度最大，可达 4.84，库尾西北部次之，库首区域较小；库中游发生重旱和特旱时其干旱烈度在整个库区最大，库首发生特旱时干旱烈度仅次于库中游。从干旱烈度峰值分布看，库中游平均烈度峰值最高，依次为库首、库尾区域，库中游和库首区域发生重旱和特旱时干旱峰值最高。综上可知，库中游为长历时、大烈度、高峰值的重旱和特旱主要发生区域，库尾为干旱频发区，库首为长历时极端干旱易发区。

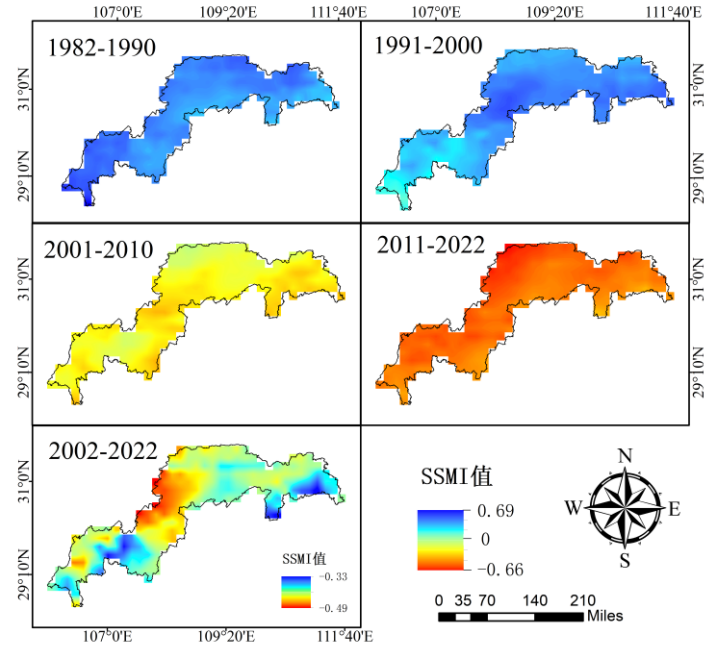


图 4 三峡库区 SSMI 年际变化图

Fig. 4 Interannual variation of SSMI in the Three Gorges Reservoir Area

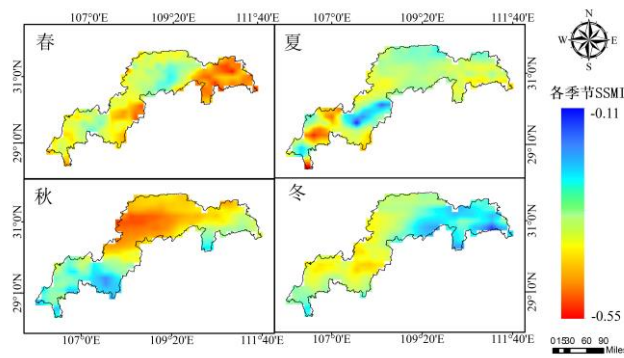


图 5 三峡库区 SSMI 季节变化图（2002-2022）

Fig. 5 Seasonal variation of SSMI in the Three Gorges Reservoir area (2002-2022)

表 2 基于不同尺度 SSMI 识别的干旱事件

Tab. 2 Drought events identified by SSMI at different scales					
干旱类型	历史发生旱灾年份	是否完整识别干旱 (T/F)			
		SSMI-1	SSMI-3	SSMI-6	SSMI-12
夏伏旱	1990	T	T	T	T
	1992	T	T	F	F
	1995	F	F	F	F
	1997	T	T	F	F
	2001	F	T	T	F
	2004	F	F	F	F
	2006	T	T	T	T
	2009	T	T	F	T
	2011	T	T	T	F
	2013	T	T	T	T
	2014	F	T	T	T
	2017	T	T	T	T
	2022	T	T	T	T
冬春连旱	1983-1984	F	T	F	F
	1998-1999	T	T	F	F
	2008-2009	T	T	T	T
	2016-2017	T	T	T	T
	2021-2022	F	T	T	F
识别准确率		67%	89%	61%	50%

备注：T 表示成功识别干旱事件，F 表示未能识别干旱事件

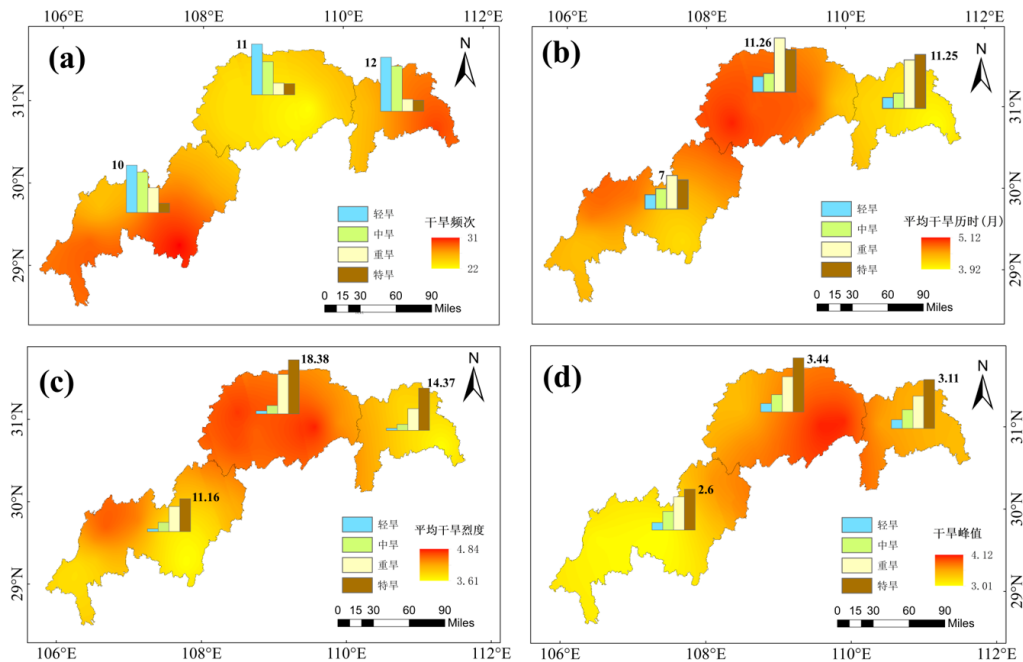


图 6 三峡库区农业干旱特征空间分布

Fig. 6 Spatial distribution of agricultural drought characteristics in the Three Gorges Reservoir Area

3.1.3 干旱重现期 基于 K-S 检验确定库区流域各区县干旱历时、干旱烈度的优选函数。从干旱历时看，大部分区县干旱特征变量的最优分布函数为 Lognormal 分布；从干旱烈度看，最优分布函数主要为 Lognormal 分布，少部分为 Weibull 分布，个别为 Gamma 分布。采用三种典型的 Copula 函数 (Gumbel Copula、Frank Copula 和 Clayton Copula)，构建流域各区县干旱历时与干旱烈度的二维联合分布。Frank

Copula 函数在大部分区县拟合效果最佳,少数地区为 Gumbel Copula 函数。在此基础上,计算干旱重现期,三峡库区各区县干旱重现期如图 7 所示,库首区域的干旱重现期在置信区间内为 2-20 年一遇,库中游区域为 2-30 年一遇,库尾区域大部分区县为 2-20 年一遇,个别区县为 30 年一遇;整体来看,库中游的干旱重现期在置信区间内相对较长,依次为库首、库尾区域,其中 2006 年、2013 年、2022 年库区流域大部分地区均出现超过 50 年一遇的大旱,与吴佳^[48]、何慧根^[49]等对历史同期评估结果一致。

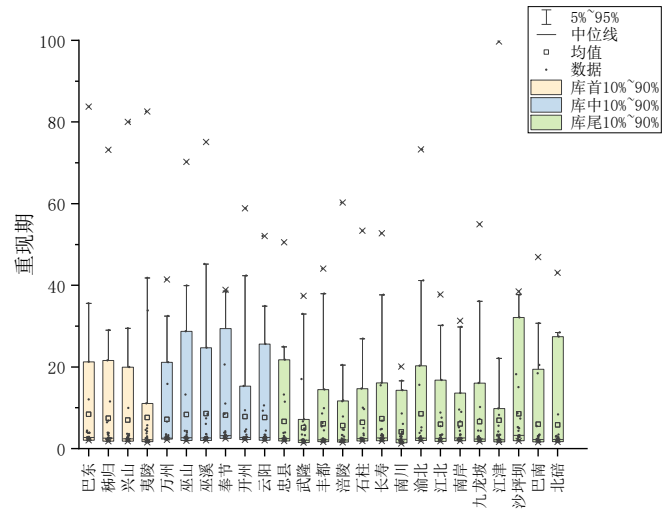


图 7 三峡库区各区县干旱重现期

Fig. 7 Drought return period for each district and county in the Three Gorges Reservoir Area

3.2 农业干旱驱动因素

针对库区流域季节性干旱特征,选取降水、温度、植被指数 (NDVI)、潜在蒸散量等关键影响因素,基于通径分析,分别对库区流域夏伏旱、冬春连旱驱动要素进行识别,如表 3 和表 4 所示。

表 3 库区流域夏伏旱驱动要素通径分析

Tab. 3 Pathway analysis of driving factors for summer and fall drought in the reservoir basin

影响因子	直接通径系数	间接通径系数				间接通径系数之和
		降水	温度	潜在蒸散发	NDVI	
降水	0.43		0.12	0.17	0.06	0.35
温度	0.34	-0.09		-0.31	-0.27	-0.67
潜在蒸散发	0.09	0.03	0.08		0.07	0.18
NDVI	0.02	0.00	0.01	0.01		0.03

可知,库区流域夏伏旱的影响要素依次为降水、温度、潜在蒸散发、NDVI,降水不足和高温协同作用是夏伏旱的主因。其中,降水对 SSMI 的直接通径系数最大,为 0.43,是直接影响夏伏旱的关键因素,温度的直接通径系数为 0.34,其间接效应最高,为-0.67,主要通过影响潜在蒸散发与 NDVI 来影响 SSMI。张强^[50]、李忆平^[51]等指出降水缺少、高温会直接加剧夏、秋季农业干旱程度。

表 4 库区流域冬春连旱驱动要素通径分析

Tab. 4 Pathway analysis of driving factors for winter and spring consecutive drought in the reservoir basin

影响因子	直接通径系数	间接通径系数				间接通径系数之和
		潜在蒸散发	降水	温度	NDVI	
潜在蒸散发	1.46		-1.30	-1.35	-0.98	-3.63
降水	0.68	0.61		0.58	0.43	1.62
温度	0.67	0.62	0.57		0.52	1.71
NDVI	0.07	0.05	0.04	0.05		0.14

库区流域冬春连旱的驱动要素依次为潜在蒸散发、降水、温度及 NDVI。其中，潜在蒸散发的直接通径系数，最大为 1.46，是直接影响冬春连旱的关键因素，这也与刘南江^[52]，陈思^[53]等对西南地区冬春连旱的成因研究相印证。降水、温度、NDVI 对潜在蒸散发的间接通径系数较大，表明潜在蒸散发与其他因子联合作用，驱动库区流域冬春连旱发生。

3.3 现状防御条件下历史典型干旱重演的因旱减产阈值

3.3.1 干旱典型年的确定 以渝北区为例，渝北区是库区重要的水稻种植区，同时也是干旱影响较为严重的地区。1982-2022 年间共发生 24 场干旱，按照干旱典型年选取原则，选择重现期接近 2、5、20、40、70 年的干旱事件，表 5 为渝北区典型干旱年，同理可确定库区其他区县的干旱典型年。

表 5 渝北区干旱典型年确定

Tab. 5 Identification of typical drought years in Yubei District

干旱历时	干旱烈度	u	v	F (u, v)	干旱开始时间	干旱结束时间	重现期	干旱典型年
3	5.95	0.31	0.71	0.29	2000.4	2000.6	2.3	2000
6	5.62	0.68	0.69	0.64	1999.7	1999.12	5.2	1999
9	14.77	0.89	0.96	0.91	2010.11	2011.7	20.3	2011
14	14.93	0.99	0.96	0.95	2013.3	2014.4	41.2	2013
13	20.25	0.98	0.99	0.97	2006.6	2007.6	73.3	2006

备注：u、v 分别为干旱历时和干旱烈度两个变量的边缘分布函数，F (u, v) 为 u、v 变量的 copula 联合分布

3.3.2 现状防御条件下作物因旱减产率计算 采用改进的 Jensen 模型，以 2020 年为现状年，根据重庆与湖北省《抗旱规划》现状防御条件下的供、需水量，确定现状年主导作物灌溉可供水量；根据典型年主导作物生育期内有效降雨量、田间需水量确定各生育期缺水量，以此分配灌溉供水量。渝北区现状防御条件下、历史典型干旱重演的作物因旱减产分析结果如表 6 所示。

表 6 渝北区现状防御条件下、典型干旱重演的主导作物因旱减产分析

Tab. 6 Analysis of drought-induced yield reduction of dominant crops under current defense conditions and typical drought recurrence in Yubei District

年份	重现期	农作物播种面积 (千公顷)	受灾面积 (千公顷)	因旱减产率 (%)	
				统计	模拟
2000	2	91.72	13.55	14.77	5.45
1999	5	96.84	15.25	15.75	7.83
2011	20	63.02	18.34	29.11	26.55
2013	40	60.87	19.61	32.22	28.61
2006	70	77.99	27.94	35.87	33.74

由表 6 可知，现状防御条件下，渝北区发生历史干旱（2000 年典型）2 年一遇作物因旱减产率为 5.45%、5 年一遇（1999 年典型）因旱减产率为 7.83%，20 年一遇（2011 年典型）因旱减产率为 26.55%，40 年一遇（2013 年典型）因旱减产率为 28.61%，70 年一遇（2006 年典型）因旱减产率为 33.74%。与干旱致灾实际调查统计的因旱受灾情况较为相近，且现状防御条件下的因旱减产率均小于当年旱灾统计的因旱受灾率，结果表明，在现状水利工程防御条件，历史典型干旱重演情景下的农业因旱损失有一定程度的减少，也进一步验证采用本研究提出的现状防御条件作物因旱减产方法是可行且合理的。

同理，确定库区流域其他区县的干旱典型年，采用改进的 Jensen 模型，模拟计算各区县发生在作物生育期内所有干旱事件对应的因旱减产率，进而建立各区县现状水利工程防御条件下，干旱重现期与作物因旱减产率的定量关系（图 8），各区县的拟合方程相关系数在 0.7 以上。

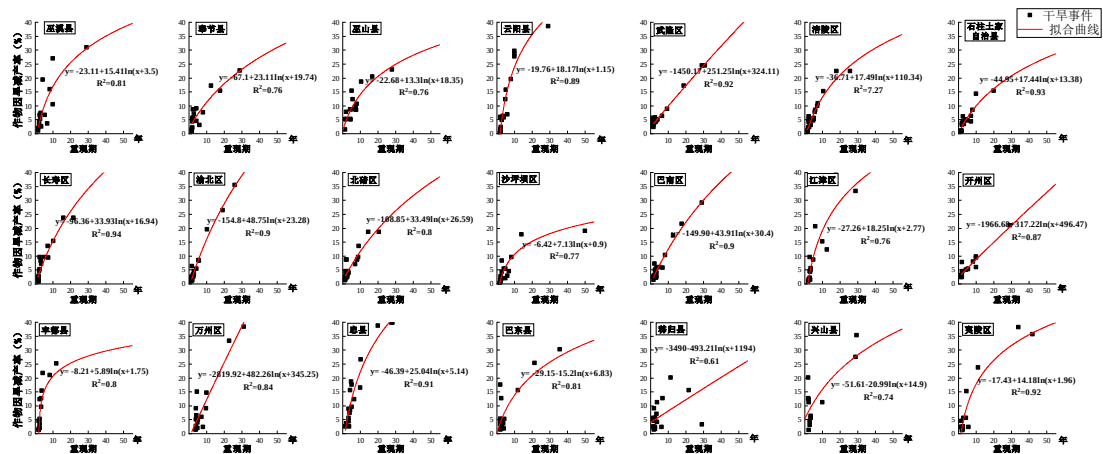


图 8 三峡库区各区县干旱重现期与因旱减产率定量关系曲线

Fig. 8 Quantitative relationship curve between drought return period and drought-induced yield reduction rate for each district and county in the Three Gorges Reservoir Area

3.3.3 现状防御条件下作物因旱减产阈值确定 根据库区流域各区县干旱重现期与作物因旱减产率定量关系，分别计算现状水利工程防御条件下，发生不同干旱重现期（2 年、5 年、10 年、20 年、50 年一遇）的农业因旱减产率（图 9）。结果表明，发生 2 年一遇的干旱时，各区县作物因旱减产率为 1.23%~4.89%，平均减产率为 3.31%，中位数为 3.56%；发生 5 年一遇的干旱时，各区县作物因旱减产率为 5.12%~15.33%，平均减产率为 9.55%，中位数为 9.09%；发生 10 年一遇的干旱时，各区县因旱减产率为 8.13%~24.54%，平均减产率为 16.04%，中位数为 16.15%；发生 20 年一遇的干旱时，各区县农业因旱减产率为 15.44%~37.96%，平均为 24.85%；中位数为 25%；发生 50 年一遇的干旱时，各区县农业因旱减产率为 22.32%~54.23%，平均为 38.71%，中位数为 38.01%。由此可知，在现状水利工程防御条件下，库区流域发生 2、5、10、20、50 一遇的干旱作物因旱减产率阈值为 1.23%、5.12%、8.13%、15.44%、22.32%。

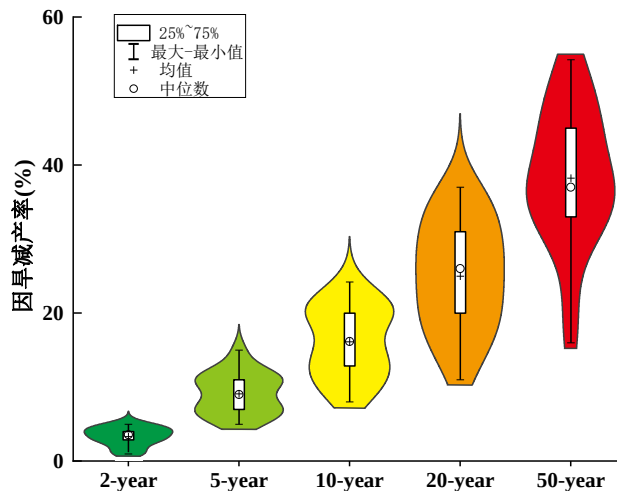


图 9 库区流域现状防御条件下作物因旱减产阈值

Fig. 9 Drought-induced crop yield reduction threshold under the current defense conditions in the reservoir basin

4 讨论

4.1 三峡库区农业干旱演变趋势讨论

本研究基于土壤湿度指标分析了三峡库区1982-2022年间农业干旱的演变趋势,发现库区流域在1984年后呈干旱化趋势,尤其自2002年起,呈现出明显的季节性波动(图2)。这与张胜南等研究发现的1982-2020年三峡库区的土壤水分总体呈显著干旱趋势的结论相吻合^[54]。三峡库区SSMI值在2002年发生突变(图2),2002年后呈现显著下降趋势,干旱化加剧。三峡工程蓄水后,库区流域水面积的增加、蒸散发的显著变化等水文条件的改变对干旱状况产生了重要影响。相关研究表明,自三峡工程蓄水后,蒸发量的增长趋势更加显著^[55],潜在蒸发量的持续上升可能加剧了土壤水分流失^[56]。随着三峡工程的蓄水能力不断增强,流域内的水资源调配机制对干旱的缓解作用呈现出复杂的时空变化特征^[57]。此外,库区未来降水较历史期增加,三峡库区气候系统的自然演变和降水格局调整可能对干旱起到缓解作用^[58],本研究分析也表明未来三峡库区农业干旱呈减缓趋势(图3)。由此可知,三峡库区的干旱受气候变化、降水、蒸发等水文过程以及水资源调配等人为因素的共同影响。因此,后续还需综合考虑降水、蒸散发等水文过程、植被覆盖以及工程调蓄等多要素,更加全面、深入分析其干旱空间演变趋势。

4.2 农业干旱驱动因素的复杂交互效应讨论

区域性干旱的形成本质上是大气环流异常与局地下垫面过程非线性耦合的结果。干旱驱动从大尺度上讲,主要是海陆热力差异通过调控水汽输送通量^[59],构成干旱发生的宏观气候条件,而小尺度自然因子,如降水、温度、蒸散发等则直接调控干旱的发生强度与时空分布特征^[60]。本研究聚焦于自然要素的驱动作用,揭示了三峡库区流域农业干旱演变的驱动机制差异,具体而言,夏伏旱的关键驱动因子为降水,其直接途径系数最大(0.43),温度的影响则主要通过间接效应(-0.67)影响潜在蒸散发与植被指数(NDVI)。表明高温和降水不足的协同作用是夏伏旱发生的主要机制。2022年三峡库区的极端高温干旱事件进一步验证了蒸散发与大尺度水汽输送的差异化调控作用^[15],体现了干旱演变中的多因素交互作用。进一步表明,库区流域干旱不仅是局地气候条件的结果,还受到大气环流和水汽输送的宏观调控。

而冬春连旱的形成则主要受到潜在蒸散发的驱动,其直接途径系数为1.46,表明蒸散发在冬春季节的作用尤为显著,尤其在降水相对较少的情况下,蒸发损失加剧了干旱发生。此外,降水、温度和NDVI对潜在蒸散发的影响也具有显著的间接作用。不同地区的干旱驱动因子也存在异质性,黄河中游地区的研究表明,气温、蒸散发和降水量在近二十年来是影响干旱的重要因素^[61],而西南地区则强调了过度蒸发和气压等因素对干旱的影响^[62]。因此,冬春连旱的形成是多因素联合作用的结果,单一因素的变化难以完全驱动干旱的发生。

此外,本研究尚未系统考虑人类活动的影响,如农业种植结构调整、灌溉方式改变等。已有研究表明,人类活动通过改变下垫面属性与用水模式,进而改变区域干旱响应机制^[63]。未来可进一步考虑土地利用类型变化、人类活动强度等驱动因素及其与自然要素的交互效应,以更准确地预测干旱的动态变化并优化干旱防控措施。

5 主要结论

干旱重演及其影响研究是极端干旱情景下水资源精细化调配与管理的重要支撑。通过模拟现状防御条件下、历史典型干旱重演的发展过程及作物因旱损失,可为抗旱补水调度方案的预演及预案推送提供数据支撑。本文主要结论如下:

(1) 三峡库区流域自1984年以来,农业干旱化趋势加剧,尤其在2001年以后,库区土壤湿度整体呈干旱状态,且在不同季节干旱分布有所不同,秋季库区中游地区干旱化最为显著。空间分布上,库区流域的SSMI值呈现从东北向西南逐渐减小的趋势。

(2) 库区流域夏伏旱的主要影响因素为降水和高温的协同作用,冬春连旱的驱动要素主要为潜在蒸散发,其次为降水和温度,蒸散发在库区流域农业干旱形成过程中起着决定性作用,尤其是在冬春季节的干旱。

(3) 通过改进Jensen模型,并基于该模型提出一种确定现状防御条件下、历史典型干旱重演的作物因旱减产阈值的计算方法,模拟了现状防御条件下、不同历史典型干旱重演的各区县作物因旱减产率,表明在现状水利工程防御条件下,库区流域发生2、5、10、20、50一遇的作物因旱减产率阈值为1.23%、5.12%、8.13%、15.44%、22.32%。

6 附件

附表见电子版(DOI: 10.18307/2026.0141)。

7 参考文献

- [1] Wang Y, Li WX, Zhang JY, *et al.* Historical evolution and future prediction of hydrological droughts in the Upper Yangtze River Basin . *Strategic Study of CAE*, 2024, 26(06):157-168. [王云, 李文鑫, 张建云, 等. 长江上游流域水文干旱历史演变及未来预估. 中国工程科学, 2024,26(06):157-168.]
- [2] Xia J, Chen J, She DX, *et al.* Impacts and countermeasures of extreme drought in the Yangtze River Basin in 2022 . *Journal of Hydraulic Engineering*, 2022, 53(10): 1143-1153. [夏军, 陈进, 余敦先, 等. 2022年长江流域极端干旱事件及其影响与对策. 水利学报, 2022,53(10):1143-1153.]
- [3] Ding X, Zhou H, Wang Y, *et al.* Evolution of hydro-climatic elements in the Three Gorges Reservoir under changing environment: International Conference on Energy, Environment and Sustainable Development[C], 2012.
- [4] Song Z, Liang S, Feng L, *et al.* Temperature changes in Three Gorges Reservoir Area and linkage with Three Gorges Project. *Journal of Geophysical Research Atmospheres*, 2017.
- [5] Zheng BF, Xiao DL, Wan W, *et al.* Research progress on assessment indicators, spatio-temporal characteristics and causes of drought in the Yangtze River Basin . *Water Resources Protection*, 2024, 40(5): 18-28. [郑博福, 肖德利, 万炜, 等. 长江流域干旱评估指标、时空特征及成因研究进展. 水资源保护, 2024,40(05):18-28.]
- [6] Duan YL, Liu F, Zhao S, *et al.* Analysis of farmland ecosystem services and environmental pressures in the Three Gorges Reservoir Area before and after impoundment . *Acta Ecologica Sinica*, 2016, 36(9): 14-23. [段颖琳, 刘峰, 赵帅, 等. 三峡库区蓄水前后农田生态系统服务与环境压力分析. 生态学报, 2016,36(9):14.]
- [7] Dai X, Yao L, Yuan Z, *et al.* Research on the Temporal and Spatial Changes Characteristics of the Drought of Natural Vegetation in the Yangtze River Source Area Based on CWSI. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 2021,783.
- [8] Ma F, Yuan X, Liu X. Intensification of drought propagation over the Yangtze River basin under climate warming. *International Journal of Climatology*, 2023,43(12):5640-5661.
- [9] Dong RR, Su XL, Qu YP, *et al.* Spatiotemporal response relationships between different types of droughts in the Yangtze River Basin in 2022 . *Water Resources Protection*, 2024, 40(3): 61-70. [董蓉蓉, 粟晓玲, 屈艳萍, 等. 2022年长江流域不同类型干旱时空响应关系. 水资源保护, 2024,40(03):61-70.]
- [10] Ren Z, Zhao H, Mu X, *et al.* Spatiotemporal variations of extreme weather events and climate drivers in the Three Gorges Reservoir Area and its surrounding regions from 1960 to 2020. *Atmospheric Research*, 2024,304:107379.
- [11] Yang XL, Cui ZY, Ren LL, *et al.* Patterns and attributions of hydrological drought in the Yangtze River basin from 1966 to 2015 . *Advances in Water Science*, 2023, 34(3): 349-359. [杨肖丽, 崔周宇, 任立良, 等. 1966—2015年长江流域水文干旱时空演变归因. 水科学进展, 2023,34(03):349-359.]
- [12] Xie A, Luo BL, Deng JB, *et al.* Characteristics and cause analysis of extreme and persistent drought in summer, autumn, and winter in 2022/2023 in Hunan Province . *Journal of Arid Meteorology*, 2023, 41(6): 910-922. [谢傲, 罗伯良, 邓剑波, 等. 湖南2022/2023年夏秋冬季节持续极端干旱事件特征及成因分析. 干旱气象, 2023,41(6):910-922.]
- [13] Wang H, Wang S, Shu X, *et al.* Increasing Occurrence of Sudden Turns From Drought to Flood Over China. *Journal of Geophysical Research. Atmospheres*, 2024,129(3).
- [14] Li Y, Wang C, Peng H, *et al.* Contribution of moisture sources to precipitation changes in the Three Gorges Reservoir Region. *Hydrology and Earth System Sciences*, 2021(9).
- [15] Pan XL, Wang WG, Xing WQ, *et al.* Deciphering moisture sources of precipitation in the Three Gorges Reservoir Basin during the 2022 drought using a three-component isotopic mixing model . *Lake Sci*, 2025, 37(2): 660-675. [潘晓龙, 王卫光, 邢万秋, 等. 基于同位素三元混合模型的流域降水水汽来源剖析——以2022年干旱背景下三峡库区为例. 湖泊科学, 2025,37(02):660-675.]
- [16] Li X, Sha J, Wang Z L. Influence of the Three Gorges Reservoir on climate drought in the Yangtze River Basin. *Environmental Science and Pollution Research*, 2021(3-4).
- [17] Li ZR, Peng T, Lin QX, *et al.* Hydrological drought evolution and its response to meteorological drought in the middle-lower Yangtze River triggered by the Three Gorges Reservoir . *Lake Sci*, 2022, 34(5): 1683-1696. [李峥嵘, 彭涛, 林青霞, 等. 三峡水库影响下长江中下游水文干旱演变及对气象干旱的响应. 湖泊科学, 2022,34(05):1683-1696.]
- [18] Lv ZW. Effects of high-temperature and drought weather on rice yield and quality in the Three Gorges Reservoir Area and its defensive strategies . *South China Agriculture*, 2016, 10(34): 5-8. [吕直文. 三峡库区高温伏旱天气对水稻产量品质的影响及其防御对策. 南方农业, 2016,10(34):5.]
- [19] Raymundo R, Mclean G, Sexton-Bowser S, *et al.* Crop modeling suggests limited transpiration would increase yield of sorghum across drought-prone regions of the United States. *Frontiers in Plant Science*, 2024.
- [20] Yang H, Li Z, Du Q, *et al.* Winter Wheat Drought Risk Assessment by Coupling Improved Moisture-Sensitive Crop Model and Gridded Vulnerability Curve: Remote Sensing[Z]. 2023: 15.
- [21] Chang WJ, Liang ZM. Application of AquaCrop model in evaluation of agricultural drought losses . *South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology*, 2014, 12(5): 175-178. [常文娟, 梁忠民. AquaCrop模型在农业旱灾损失评估中的应用. 南水北调与水利科技, 2014,12(05):175-178.]
- [22] Lei H, Yu J, Pan H, *et al.* A New Agricultural Drought Disaster Risk Assessment Framework: Coupled a Copula Function to Select Return Periods and the Jensen Model to Calculate Yield Loss: Sustainability[Z]. 2023: 15.
- [23] Peng ZW, Guo AJ, Chang JX, *et al.* Connotation and determination method of graded and staged drought warning water level for reservoir considering drought risks . *Journal of Hydraulic Engineering*, 2024, 55(10): 1260-1269. [彭邹雯, 郭爱军, 畅建霞, 等. 考虑旱灾风险的水库分级分期旱警水位内涵与确定方法. 水利学报, 2024,55(10):1260-1269.]
- [24] Embaye T A G, Kahsay G H, Abadi N, *et al.* Evaluation of water harvesting structures on agricultural productivity: the case of Tigray Region, Ethiopia. *Sustainable Water Resources Management*, 2020,6(5).
- [25] Li ML, Jia MD, Sun TC, *et al.* Spatiotemporal change and source apportionment of non-point source nitrogen and phosphorus pollution loads in the Three Gorges Reservoir Area . *Environmental Science*, 2021, 42(4): 1839-1846. [李明龙, 贾梦丹, 孙天成, 等. 三峡库区非点源污染氮磷负荷时空变化及其来源解析. 环境科学, 2021.]
- [26] Yu YL, Shi DM, Jiang P, *et al.* Soil stability and water-retention properties of different mulberry habitats in the Three Gorges Reservoir Area, China . *Journal of Soil and Water Conservation*, 2016, 30(6): 246-252. [于亚莉, 史东梅, 蒋平, 等. 三峡库区不

- 同生境下桑树林地土壤结构稳定性与持水性能. 水土保持学报, 2016,30(06):246-252.]
- [27] Balsamo G, Albergel C, Beljaars A, et al. ERA-Interim/Land: a global land surface reanalysis data set. *Hydrology and Earth System Sciences*, 19,1(2015-01-21), 2015,19(1):389-407.
- [28] Guofu W. CHINA METEOROLOGICAL DATA SHARING SERVICE SYSTEM: DESIGN AND DEVELOPMENT. *Quarterly Journal of Applied Meteorology*, 2004.
- [29] Deng GW, Sun J, Lai J, et al. Grey correlation analysis of drought and yield at different growth stages of rice in Sichuan Province. *Journal of Arid Meteorology*, 2022, 40(5): 814-822. [邓国卫, 孙俊, 赖江, 等. 四川水稻不同生育期干旱与产量灰色关联分析. 干旱气象, 2022,40(5):814-822.]
- [30] Fu N, Liu XG, Zhang Y, et al. Variation pattern of rice irrigation water requirement in Southwest China. *Chinese Journal of Ecology*, 2014, 33(7): 1895-1901. [符娜, 刘小刚, 张岩, 等. 西南地区水稻灌溉需水量变化规律. 生态学杂志, 2014,33(7):7.]
- [31] 廖勇. 川中丘陵区主要作物需水量及其变化规律研究[学位论文]. 四川大学, 2005.
- [32] Sun X, Lai P, Wang S, et al. Monitoring of Extreme Agricultural Drought of the Past 20 Years in Southwest China Using GLDAS Soil Moisture. *Remote Sensing*, 2022,14.
- [33] Yang Y, Gan T Y, Tan X. Spatiotemporal changes of drought characteristics and their dynamic drivers in Canada. *Atmospheric research*, 2020,232(Feb.):104691-104695.
- [34] Lai JL, Qi S, Cui RR, et al. Analysis of vegetation change and influencing factors in Southwest Alpine Canyon Area. *Environmental Science*, 2023, 44(12): 6833-6846. [赖金林, 齐实, 崔冉冉, 等. 西南高山峡谷区植被变化及影响因素分析. 环境科学, 2023,44(12):6833-6846.]
- [35] Li YY, Chang JX, Fan JJ, et al. Agricultural drought evolution characteristics and driving mechanisms in the Yellow River Basin under climate and land use changes. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE)*, 2021, 37(19): 84-93. [黎云云, 畅建霞, 樊晶晶, 等. 气候和土地利用变化下黄河流域农业干旱时空演变及驱动机制. 农业工程学报, 2021,37(19):84-93.]
- [36] Liu ZN, Jiao WG, Wang XY, et al. Evaluation of agricultural drought in Guizhou Province based on standardized soil moisture index. *China Rural Water and Hydropower*, 2022(11): 1-5. [刘振男, 焦卫国, 王笑宇, 等. 基于标准化土壤湿度指数的贵州省农业干旱评价. 中国农村水利水电, 2022(11):1-5.]
- [37] Li QF, Fang KY, Han XY, et al. Meteorological drought characteristics analysis based on multidimensional Copula function in the Lancang-Mekong River Basin. *Water Resources Protection*, 2024, 40(1): 52-59. [李琼芳, 方凯悦, 韩幸辉, 等. 基于多维Copula函数的澜沧江-湄公河流域气象干旱特征分析. 水资源保护, 2024,40(01):52-59.]
- [38] Hieu N V, Tuan N V, Bang N K, et al. Assessment of Hydrological Drought Using the Standardized Streamflow Index (SSFI): A Case Study of the Tien Yen River Basin of Quang Ninh Province, Vietnam. *地球科学和环境保护期刊(英文)*, 2022,10(8):309-326.
- [39] Feng K, Su X, Singh V P, et al. Dynamic evolution and frequency analysis of hydrological drought from a three-dimensional perspective. *Journal of Hydrology*, 2021(600-):600.
- [40] Xu M. Study on the inversion of regional drought return period. *Water Resources Planning and Design*, 2021(4): 48-51. [徐敏. 区域干旱重现期反演研究. 水利规划与设计, 2021(04):48-51.]
- [41] Hao Z, Singh V P, Xia Y. Seasonal Drought Prediction: Advances, Challenges, and Future Prospects. *Reviews of Geophysics*, 2018,56(1):108-141.
- [42] Stage F K, Nora C A. Special Issue on Methodology || Path Analysis: An Introduction and Analysis of a Decade of Research. *Journal of Educational Research*, 2004,98(1):5-12.
- [43] Sergeant F, Therrien R, Oudin L, et al. Evolution of Arctic rivers recession flow: Global assessment and data-based attribution analysis. *Journal of Hydrology*, 2021(601-):601.
- [44] 王则玉, 马晓鹏, 刘国宏, 等. 基于Jensen模型的红枣水分生产函数及敏感指数研究. 新疆农业科学, 2017,54(04):634-638.
- [45] Liu DY, Liang ZM, Yi ZZ. Dynamic evaluation model of agricultural loss of drought disaster and assessment of irrigation benefit. *South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology*, 2011, 9(5): 36-39. [刘代勇, 梁忠民, 易知之. 旱灾农业损失动态评估模型及灌溉效益评估研究. 南水北调与水利科技, 2011,9(05):36-39.]
- [46] Zhu X, Hou C, Xu K, et al. Establishment of agricultural drought loss models: A comparison of statistical methods. *Ecological Indicators*, 2020,112:106084.
- [47] 陈前玲, 苗磊, 崔自力. 浅析农业干旱灾害风险区划影响分析. 陕西水利, 2022(12):89-90.
- [48] Wu J, Gao XJ, Zhang DF, et al. Climatic effects of the Three Gorges Reservoir and regional climate simulation of the 2006 summer heatwave and drought event in Sichuan and Chongqing. *Journal of Tropical Meteorology*, 2011, 27(1): 44-52. [吴佳, 高学杰, 张冬峰, 等. 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(01):44-52.]
- [49] He HG, Zhang C, Wu Y, et al. Characteristics of summer heatwaves and droughts in Chongqing and their response to La Niña events. *Journal of Arid Meteorology*, 2023, 41(6): 873-883. [何慧根, 张驰, 吴遥, 等. 重庆夏季高温干旱特征及其对拉尼娜事件的响应. 干旱气象, 2023,41(06):873-883.]
- [50] Zhang Q, Han LY, Wang S, et al. The affected characteristic of key period's climate factor on the agricultural disaster loss caused by drought in southern China. *Chinese Science Bulletin*, 2018, 63(23): 2378-2392. [张强, 韩兰英, 王胜, 等. 影响南方农业干旱灾损率的气候要素关键期特征. 科学通报, 2018,63(23):2378-2392.]
- [51] Li YP, Zhang JY, Yue P, et al. Study on characteristics of severe drought event over the Yangtze River Basin in summer 2022 and its causes. *Journal of Arid Meteorology*, 2022, 40(5): 733-747. [李忆平, 张金玉, 岳平, 等. 2022年夏季长江流域重大干旱特征及其成因研究. 干旱气象, 2022,40(05):733-747.]
- [52] Liu NJ, Feng AQ, Zhang P, et al. Spatial-temporal patterns of the winter 2022-spring 2023 drought in Southwest China and recommendations for drought disaster risk reduction. *China Flood & Drought Management*, 2023, 33(7): 16-20. [刘南江, 冯爱青, 张鹏, 等. 2023年西南地区冬春连旱时空特征及防范应对建议. 中国防汛抗旱, 2023,33(7):16-20.]
- [53] Chen S, Zhong WS, Waseem M, et al. A modified composite drought index for comprehensive drought monitoring and its applications in Hubei Province. *Resources and Environment in the Yangtze Basin*, 2021, 30(11): 2726-2735. [陈思, 钟无双, Waseem Muhammad, 等. 基于修正复合干旱指数的干旱综合监测及其在湖北省的应用. 长江流域资源与环境, 2021,30(11):2726-2735.]

[54]张胜南. 三峡库区土壤水分、植被和土地利用对梯级水利工程的时空响应[学位论文]. 华中农业大学, 2023.

[55] Sun M, Gao B, Xiao WH, *et al.* Spatiotemporal variability of evapotranspiration in the Three Gorges Reservoir Area over the past 61 years and its response to climate change . *Water Resources and Power*, 2022, 40(5): 1-5. [孙萌, 高斌, 肖伟华, 等. 近61年三峡库区潜在蒸发量时空演变规律及其驱动因素. 水电能源科学, 2022,40(05):1-5.]

[56] Bodner G, Nakhforoosh A, Kaul H P. Management of crop water under drought: a review. *Agronomy for Sustainable Development*, 2015,35(2):401-442.

[57] Liu X, Peng J, Liu Y, *et al.* The Three Gorges Dam has weakened the drought propagation process in the Yangtze River Basin. *Journal of Hydrology*, 2024,632:130875.

[58]杨恒. 三峡库区流域水循环要素演变与氮磷流失规律研究[学位论文]. 中国水利水电科学研究院, 2020.

[59] Yuan X, Zhou SY, Ma F, *et al.* Review on the formation and evolution mechanisms of flash droughts under climate and land cover change . *Advances in Earth Science*, 2024, 39(9): 877-888. [袁星, 周诗琦, 马凤, 等. 气候和下垫面变化下骤旱形成演变机制研究进展. 地球科学进展, 2024,39(09):877-888.]

[60] Guo W, Huang S, Zhao Y, *et al.* Quantifying the effects of nonlinear trends of meteorological factors on drought dynamics. *Natural Hazards*, 2023.

[61] Guo YX, Sun CJ, Chen W, *et al.* Spatio-temporal characteristics and driving factors of vegetation drought in the middle Yellow River under different geomorphic conditions . *SCIENTIA GEOGRAPHICA SINICA*, 2024, 44(9): 1676-1683. [郭宇星, 孙从建, 陈伟, 等. 黄河中游不同地貌条件下植被干旱时空特征及影响因素. 地理科学, 2024,44(09):1676-1683.]

[62] Yan Y, Mo JY, Jin J, *et al.* Spatio-temporal patterns of meteorological drought and impact on vegetation in karst and non-karst regions of Southwest China . *SCIENTIA GEOGRAPHICA SINICA*, 2024, 44(7): 1275-1285. [闫妍, 莫金宇, 靳佳, 等. 西南喀斯特地区与非喀斯特地区气象干旱时空特征及其对植被的影响. 地理科学, 2024,44(07):1275-1285.]

[63] Dai R, Huang J, Chen Z, *et al.* Impacts of anthropogenic climate change on meteorological drought in China. *Frontiers in Earth Science*, 2024.

附表

附表 1 各区县干旱历时与干旱烈度的二维联合分布 copula 函数

Appendix Table 1: Copula Function of the Two-Dimensional Joint Distribution of Drought Duration and Drought

Intensity in Each District and County					
区县	函数类型	Copula 参数 θ	RMSE	AIC	BIC
巴东	Gumbel	3.34	0.10	-113.57	-112.35
	Frank	12.70	0.08	-122.10	-120.89
	Clayton	3.17	0.11	-108.82	-107.60
秭归	Gumbel	2.99	0.09	-124.19	-122.90
	Frank	10.74	0.08	-134.07	-132.77
	Clayton	2.09	0.11	-114.81	-113.51
兴山	Gumbel	2.52	0.11	-123.00	-121.67
	Frank	7.93	0.09	-133.14	-131.81
	Clayton	2.15	0.11	-119.59	-118.26
夷陵	Gumbel	2.51	0.11	-131.77	-130.34
	Frank	9.82	0.10	-141.73	-140.29
	Clayton	1.56	0.14	-120.69	-119.25
万州	Gumbel	2.39	0.12	-94.65	-93.51
	Frank	10.49	0.10	-104.74	-103.60
	Clayton	2.87	0.11	-97.37	-96.23
丰都县	Gumbel	2.48	0.11	-124.77	-123.41
	Frank	8.00	0.10	-132.27	-130.91
	Clayton	1.39	0.13	-116.10	-114.73
开州	Gumbel	2.36	0.11	-99.21	-98.08
	Frank	9.47	0.09	-107.96	-106.83
	Clayton	2.89	0.11	-100.08	-98.95
巴南	Gumbel	2.40	0.10	-135.84	-134.44
	Frank	9.43	0.08	-150.53	-149.13
	Clayton	2.10	0.10	-132.37	-130.97
北碚	Gumbel	1.90	0.07	-147.33	-145.99

区县	函数类型	Copula 参数 θ	RMSE	AIC	BIC
涪陵	Frank	6.21	0.06	-152.62	-151.29
	Clayton	1.21	0.08	-140.22	-138.88
	Gumbel	2.24	0.13	-118.59	-117.19
	Frank	7.40	0.11	-128.66	-127.25
	Clayton	2.08	0.13	-117.82	-116.42
江津	Gumbel	1.95	0.11	-125.01	-123.64
	Frank	6.90	0.09	-138.47	-137.11
	Clayton	1.41	0.12	-118.54	-117.17
沙坪坝	Gumbel	3.15	0.08	-124.33	-123.12
	Frank	11.60	0.06	-134.92	-133.70
	Clayton	3.62	0.08	-126.38	-125.16
石柱	Gumbel	2.36	0.11	-111.70	-110.44
	Frank	7.45	0.09	-122.16	-120.91
	Clayton	2.21	0.11	-112.30	-111.05
巫山	Gumbel	2.67	0.11	-106.78	-105.57
	Frank	9.69	0.09	-115.28	-114.06
	Clayton	2.06	0.13	-100.89	-99.67
巫溪	Gumbel	2.89	0.09	-115.85	-114.63
	Frank	10.56	0.08	-124.42	-123.20
	Clayton	2.76	0.10	-112.39	-111.17
武隆	Gumbel	2.35	0.12	-135.10	-133.63
	Frank	7.48	0.10	-144.81	-143.35
	Clayton	1.62	0.12	-130.43	-128.96
渝北	Gumbel	2.64	0.10	-109.90	-108.72
	Frank	9.34	0.08	-117.64	-116.46
	Clayton	2.34	0.10	-106.27	-105.09
云阳	Gumbel	2.66	0.09	-114.01	-112.83
	Frank	10.02	0.07	-125.69	-124.51
	Clayton	2.31	0.09	-110.07	-108.89
长寿	Gumbel	2.56	0.10	-112.00	-110.78
	Frank	10.16	0.08	-122.43	-121.21
	Clayton	1.66	0.12	-102.48	-101.26
忠县	Gumbel	2.41	0.12	-109.22	-107.97
	Frank	9.29	0.10	-118.59	-117.34
	Clayton	2.21	0.12	-107.52	-106.27
奉节	Gumbel	2.82	0.11	-84.73	-83.74
	Frank	12.75	0.09	-94.18	-93.19
	Clayton	3.28	0.11	-86.49	-85.50
江北	Gumbel	2.34	0.09	-124.96	-123.70
	Frank	8.27	0.07	-136.32	-135.07
	Clayton	2.19	0.09	-124.21	-122.95
九龙坡	Gumbel	2.45	0.07	-138.19	-136.90
	Frank	7.88	0.06	-149.90	-148.61
	Clayton	2.56	0.08	-136.06	-134.77
南岸	Gumbel	2.30	0.11	-108.66	-107.44
	Frank	9.40	0.09	-119.79	-118.57
	Clayton	1.95	0.11	-106.32	-105.10

附表 2 各区县现状年（2020 年）农作物播种面积

Appendix Table 2: Current Year (2020) Crop Sowing Area in Each District and County

	县级行政区	农作物播种面积（千公顷）
库首	夷陵区	82.406
	兴山	39.5
	秭归	48.51
	巴东	109.19
库中游	万州区	167.503
	开州区	169.38
	云阳县	150.99
	奉节县	131.73
	巫山县	85.825
	巫溪县	93.386

	涪陵区	178.277
	渝中区	0
	大渡口区	0
	江北区	0.87
	沙坪坝区	5.796
	九龙坡区	7.413
	南岸区	2.38
库尾	北碚区	18.61
	渝北区	41.66
	巴南区	63.567
	长寿区	81.27
	江津区	150.666
	武隆区	75.13
	丰都县	100.1
	忠县	75.106
	石柱土家族自治县	91.15
