

气候变暖背景下第二松花江流域干旱特征及敏感性分析

肖 恒¹, 安志甲^{1*}, 孙 虹², 苏慧茹¹

¹华北水利水电大学环境与市政工程学院, 河南 郑州

²吉林省水文水资源局(吉林省水环境监测中心), 吉林 长春

收稿日期: 2025年3月4日; 录用日期: 2025年4月17日; 发布日期: 2025年4月28日

摘 要

干旱是影响农业生产和水资源的重要灾害, 随着气候变化的加剧, 发生干旱的频率和强度也有所增加, 对生态环境和社会经济造成了严重的影响。本文以第二松花江流域为研究区域, 利用SMAPI指数, 分析了流域的干旱特征及其对气候变化的敏感性。主要结论如下: 1) VIC模型能够较好地模拟流域流量, 验证了模型的适用性。2) SMAPI作为干旱指标, 能够反映流域实际干旱的发生和特征, 能够较好地重现历史干旱情形。3) 流域历史干旱事件的特征随时间变化在空间格局上有不同程度的变化, 且随着干旱面积的增加, 干旱强度总体呈增加趋势。4) 干旱历时、干旱强度、干旱面积随降水增加而减少, 而干旱场次则在-30%~0%之间随降水增加而增加。本文的研究结果对于深入认识气候变化背景下第二松花江流域历史旱情的演变特征和增强流域抗旱能力具有一定的实用价值。

关键词

VIC模型, 土壤含水量距平指数(SMAPI), 干旱特征, 敏感性

Drought Characteristics and Sensitivity Analysis of the Second Songhua River Basin in the Context of Climate Warming

Heng Xiao¹, Zhijia An^{1*}, Hong Sun², Huiru Su¹

¹School of Environmental and Municipal Engineering, North China University of Water Resources and Electric Power, Zhengzhou Henan

²Jilin Provincial Bureau of Hydrology and Water Resources (Jilin Water Environment Monitoring Center), Changchun Jilin

作者简介: 肖恒(1982-), 男, 副教授, 博士研究生, 研究方向为气候变化对水文水资源的影响, Email: xiaoheng@ncwu.edu.cn

*通讯作者 Email: z202210060720@stu.ncwu.edu.cn

文章引用: 肖恒, 安志甲, 孙虹, 苏慧茹. 气候变暖背景下第二松花江流域干旱特征及敏感性分析[J]. 水资源研究, 2025, 14(2): 184-193. DOI: 10.12677/jwrr.2025.142019

Received: Mar. 4th, 2025; accepted: Apr. 17th, 2025; published: Apr. 28th, 2025

Abstract

Drought is an important hazard affecting agricultural production and water resources. With the intensification of climate change, the frequency and intensity of drought have increased, causing serious impacts on the ecological environment and socio-economy. In this paper, the drought characteristics of the basin and its sensitivity to climate change were analysed using the SMAPI index with the Second Songhua River Basin as the study area. The main conclusions are as follows: 1) The VIC model can better simulate the flow of the basin, which verifies the applicability of the model. 2) SMAPI as a drought index can reflect the occurrence and characteristics of actual drought in the basin, and can better reproduce the ephemeral drought situation. 3) The characteristics of historical drought events in the basin changed with time to varying degrees in the spatial pattern, and the overall drought intensity showed an increasing trend with the increase of drought area. 4) The drought duration, drought intensity and drought area decreased with the increase of precipitation, while the drought frequency increased with the increase of precipitation between -30% and 0%. The results of this paper are of practical value in understanding the evolutionary characteristics of historical drought in the Second Songhua River Basin in climate change context and in enhancing the drought resilience of the basin.

Keywords

VIC Model, Soil Moisture Anomaly Percentage Index (SMAPI), Drought Characteristics, Sensitivity

Copyright © 2025 by author(s) and Wuhan University & Bureau of Hydrology, Changjiang Water Resources Commission. This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

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



Open Access

1. 引言

干旱是全球分布范围广、发生频率高、损失重且成因复杂、预测难度大的一种自然灾害，对人类社会和生态环境造成严重的影响[1]。中国每年因干旱造成的农作物平均受灾面积超过 7.526 万 km²，粮食损失约 220 亿 kg，经济作物损失约 249 亿元[2]。气候变暖背景下，极端事件频发，旱灾风险可能进一步加大[3] [4]。

第二松花江流域(三岔河口以上)是我国重要的粮食生产基地，地处中高纬度地区，易受气候变化影响。近年来，流域经历了多次严重的干旱事件，给当地农业生产和社会经济发展造成了巨大的损失[5]-[7]。由于干旱情况复杂，其发生强度和影响范围等特征变量一般难以直接观测，通常采用干旱指数进行描述[8]。土壤含水量距平指数因能有效反映土壤水分偏离正常状态程度在农业干旱方面展现出良好的识别效能[9]。目前，第二松花江流域干旱事件还缺乏系统性的定量识别体系，干旱发生、发展、衰亡及消退的动态演变过程尚不清晰。本文以第二松花江流域为研究区，基于 VIC 模型模拟的逐日土壤含水量数据，识别并重构历史长期干旱事件，分析区域干旱事件变化特征及其对气候变化的敏感性，以期为流域抗旱减灾及管理决策提供参考依据。

2. 研究区域及数据

第二松花江流域(124°36'~128°50'E, 41°44'~45°24'N)位于吉林省，发源长白山最高峰白头山天池，自东南向西北长 958 km，流经吉林省 26 个县，流域面积 7.37×10^4 km²。该流域属于温带大陆性季风气候，夏季受太平洋季风控制，冬季受西伯利亚高压控制。年平均气温 3℃~5℃，全年平均降水量 650~750 mm，空间分布极不均匀，6~9 月降水量占全年的 60%~90%，降水由东南向西北逐渐减少。

气象资料为流域内 65 个雨量站 1961~2020 年逐日降水、最低气温、最高气温等数据，来源于中国气象科学共享网发布的《中国地面气候资料日值数据集(V3.0)》。水文资料为流域内 14 个控制断面的逐日流量资料，来源于吉林省水文水资源局。研究区水文站、雨量站分布如图 1 所示。

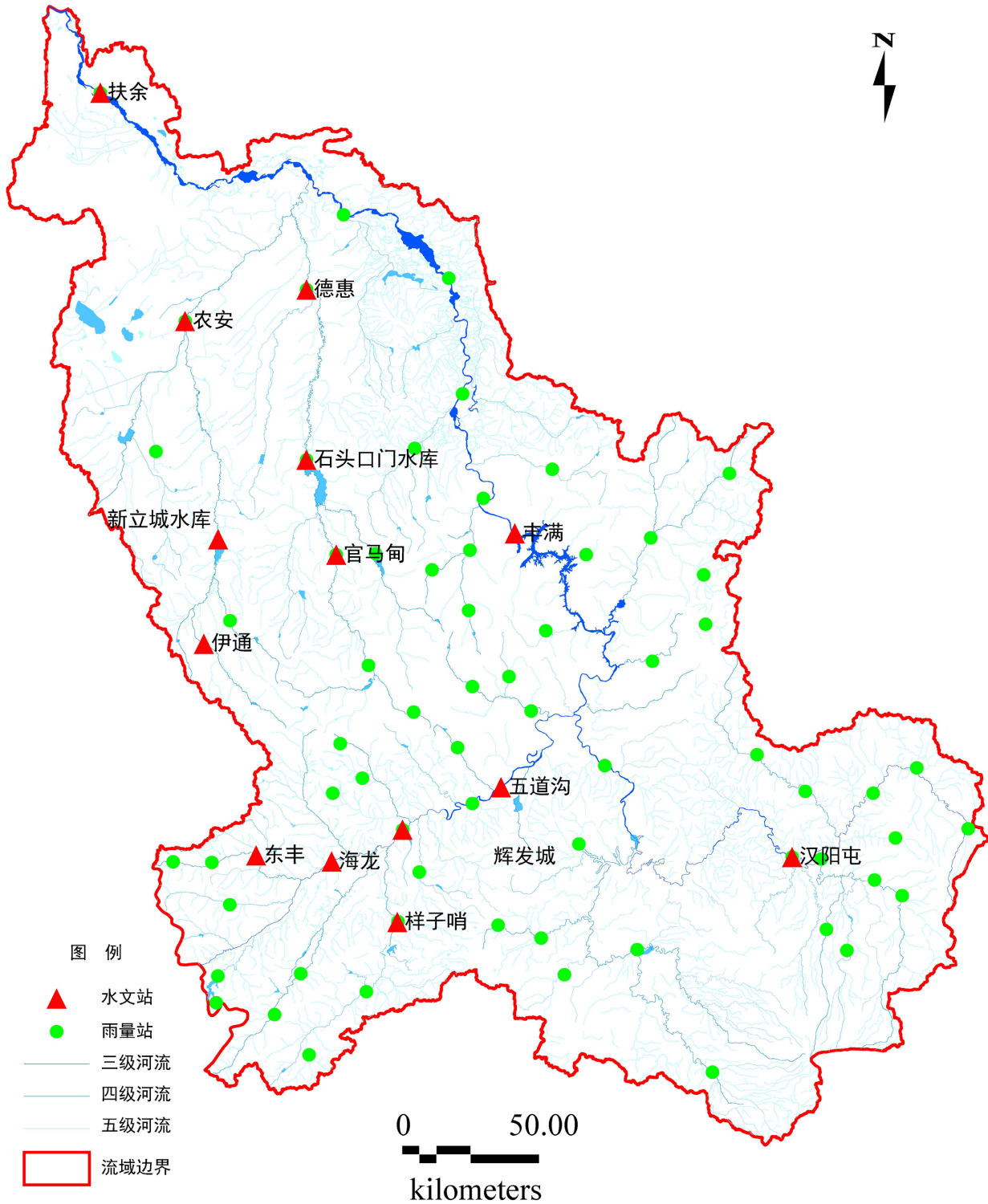


图 1. 研究区水文站、雨量站分布图

3. 研究方法

3.1. SMAPI 指数的建立

土壤含水量距平指数(SMAPI)的含义参考文献[10]。SMAPI 的干湿划分方法见文献[9]。SMAPI 的计算公式如下:

$$SMAPI = \frac{\theta - \bar{\theta}}{\bar{\theta}} \times 100\% \quad (1)$$

式中: θ 和 $\bar{\theta}$ 分别代表当前土壤含水量和该时段的土壤含水量的气候适宜值, 因而 $\bar{\theta}$ 可看作土壤含水量时间序列的数学期望值。

本文采用 VIC 模型模拟生成 1961~2020 年的逐日土壤含水量。VIC 模型的原理参见文献[11] [12]。

以 $0.125^\circ \times 0.125^\circ$ 分辨率划分流域为 607 个网格, 对每一个网格, 通过距离反比插值方法得到驱动模型所需的气象数据, 考虑高程对气温的影响, 采用高程上升 100 m, 气温下降 0.65°C 的关系; 植被、土壤参数分别根据全球 1 km 土地植被覆盖数据和全球 10 km 土壤数据库设定。模型构建和参数率定过程参考 Wu 等[13]的研究。采用相对误差 E_r 和效率系数 E_C 评价模型模拟性能, 计算公式如下:

1) 反映总量精度的多年径流相对误差 E_r (%):

$$E_r = (\bar{Q}_C - \bar{Q}_O) / \bar{Q}_O \quad (2)$$

式中 $\bar{Q}_C$ 和 $\bar{Q}_O$ 分别是模拟和实测的多年平均径流量, 单位(m^3/s)。相对误差的绝对值越小, 模拟精度越好。

2) 反映径流过程拟合程度的效率系数 E_C :

$$E_C = 1 - \sum_i (Q_{i,c} - Q_{i,o})^2 / \sum_i (Q_{i,o} - \bar{Q}_O)^2 \quad (3)$$

式中 $Q_{i,c}$ 和 $Q_{i,o}$ 分别是模拟和实测的径流系列, 单位(m^3/s)。确定性系数越大, 过程拟合越好, 模拟精度越高。

3.2. 干旱事件识别方法

干旱事件的特征由于旱面积、干旱历时、干旱强度及干旱严重程度来描述, 这种干旱事件识别方法参考文献[9] [14]。

- 1) 干旱面积: 区域内 SMAPI 取值低于-5%的网格百分比;
- 2) 干旱历时: 区域日干旱面积大于 30%的持续天数;
- 3) 干旱强度: 区域内 SMAPI 取值低于-5%的网格的平均值;
- 4) 干旱严重程度: 干旱强度与干旱历时的乘积。

取 60 天作为干旱历时的阈值来识别一场网格/区域干旱事件。

3.3. 敏感性分析

将降水变化 $\pm 10\%$ 、 $\pm 20\%$ 、 $\pm 30\%$ 和不变, 气温升高 1°C 、 2°C 、 3°C 和保持不变, 共计 28 种组合作为气候变化情景, 研究干旱事件特征值对气候变化的敏感性, 计算公式如下:

$$\eta_{\Delta p, \Delta T} = \frac{W_{P+\Delta P, T+\Delta T} - W_{P, T}}{W_{P, T}} \times 100\% \quad (4)$$

式中: $W_{P, T}$ 为现状模拟值; $W_{P+\Delta P, T+\Delta T}$ 为降水变化 Δp 同时气温变化 ΔT 情景下的模拟值; $\eta_{\Delta p, \Delta T}$ 为降水变化 Δp 同时气温变化 ΔT 情况下的相对变化。

4. 结果分析

4.1. VIC 模型适用性分析

在流域 14 个控制断面构建了月尺度的 VIC 模型，14 个控制断面 VIC 模型率定和验证结果统计见表 1。从表 1 中可以看出，率定期模型模拟的流量的相对误差在-9.6%到 5.7%之间，平均误差为 1.15%，月效率系数最大为 0.919，最小为 0.719，平均值约为 0.840。验证期模型模拟流量的相对误差在-2.0%到 12.6%之间，平均误差为 3.81%，月效率系数最大为 0.895，最小为 0.301，平均值约为 0.691。海龙断面的月效率系数最低，可能是受流域内大型水库(海龙水库)工程运行的影响。在扶余断面(流域出口断面)构建了日尺度的 VIC 模型，率定期模型模拟的流量的相对误差为-2.3%，月效率系数为 0.896，日效率系数为 0.723。验证期模型模拟的流量的相对误差为 2.7%，月效率系数为 0.838，日效率系数为 0.684。这表明构建的模型在研究区域内具有较好的精度。

表 1. 14 个控制断面 VIC 模型率定和验证结果统计表

序号	站码	站名	率定期(1956~2000 年)		验证期(2001~2016 年)	
			相对误差(%)	月效率系数	相对误差(%)	月效率系数
1	10901900	扶余	-2.3	0.896	2.7	0.838
2	10801300	丰满	-3.3	0.873	4.0	0.799
3	10800500	汉阳屯	-5.1	0.719	10.7	0.614
4	10811000	五道沟	4.7	0.919	6.2	0.895
5	10810602	辉发城	4.4	0.875	1.9	0.503
6	10843000	海龙	5.4	0.851	-0.6	0.301
7	10811800	东丰	4.4	0.836	7.0	0.753
8	10845600	样子哨	-0.3	0.858	-0.2	0.821
9	10911500	德惠	2.8	0.859	5.0	0.708
10	10911000	石头口门水库	2.8	0.833	3.4	0.749
11	10910800	官马甸	3.7	0.881	0.1	0.819
12	10914800	农安	5.7	0.840	12.6	0.622
13	10914190	新立城水库	-9.6	0.754	2.6	0.556
14	10914003	伊通	2.8	0.766	-2.0	0.700

4.2. 典型干旱事件的验证

1961~2020 年流域共识别出 59 场干旱事件。以 2004 年的干旱事件为例(图 2)，该场干旱事件从 2004 年 4 月开始于农安断面以下流域，共历时 84 天，干旱重心在农安断面以下流域，干旱面积约 57.7%；5 月干旱向西南方向蔓延并加剧，干旱面积达到 72.0%，干旱重心略向南移动；6 月干旱进一步向德惠至石头口门水库区间发展，流域内仅 3.3%的区域未发生干旱，相较于 5 月，农安至新立城水库区间以及德惠至石头口门水库区间干旱等级进一步增高，干旱等级和干旱面积均达到峰值，干旱重心略向东北方向迁移；7 月干旱强度减弱，干旱面积减至 23.9%，干旱重心向西北方向迁移至扶余断面以下流域；8 月干旱面积虽然并未减少，但干旱强度锐减，干旱重心略向南移动，并最终在此消亡。

本场干旱事件从2004年3~8月共历时6个月,旱情经历了发生、强化、峰值、消减及消亡5个阶段;干旱重心由西北向东南方向迁移后又迁移回西北方向,农安至新立城水库区间是受旱最严重的地区。这与《吉林灾害记载》以及 Yining Ma、Rui Wang、Ying Guo 等[15]-[18]人的研究结果相符。

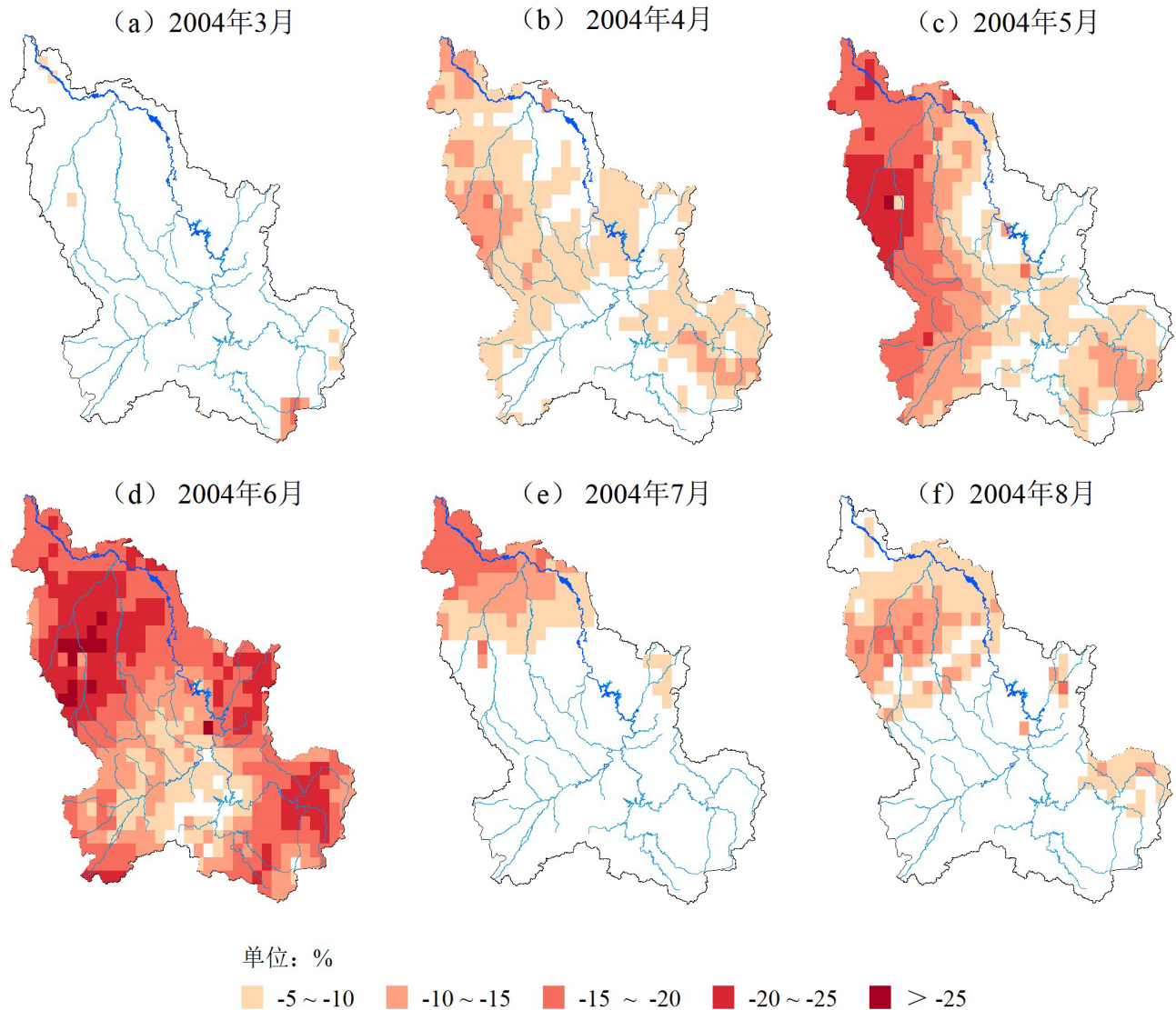


图2. 干旱动态演变过程

4.3. 干旱事件分析

4.3.1. 年代变化

1961~2020年流域共发生59场干旱(表2),其中2000s有14场为各年代最多,比干旱场次最少的2010s多7次。流域单场干旱平均历时为178d(约6个月),其中1990s有261d(约9个月)为各年代最大,1960s和1980s分别有143d和146d(约5个月),为各年代最小。流域干旱面积约占流域总面积的69.8%,其中1960s和1970s干旱面积最大为73.6%;其它年代干旱面积所占比例均超过65%。流域平均干旱强度为-12.7%,其中1960s达-13.8%为各年代最大,1990s干旱强度-12.1%为各年代最小。流域平均干旱严重程度为-2182%,其中1990s达-3164%为各年代最大,2010s干旱严重程度-1859%为各年代最小。

表 2. 1961~2020 年流域干旱场次年代统计

年代	干旱场次	干旱历时/d	干旱面积/%	干旱强度/%	干旱严重程度/%
1960s	9	143	73.6	-13.8	-1970
1970s	11	181	73.6	-12.3	-2214
1980s	10	146	68.9	-12.4	-1807
1990s	8	261	67.2	-12.1	-3164
2000s	14	159	69.8	-13.0	-2074
2010s	7	151	65.6	-12.3	-1859

4.3.2. 空间变化

图 3 中显示了 1961~2020 年干旱特征的空间分布。从图 3 中可以看出，流域干旱特征呈现出明显的空间差异。农安至丰满区间是干旱历时最长的区域，平均超过 150 d，但干旱强度相对较低，小于-13%，干旱严重程度高于 2100%；官马甸至德惠区间及五道沟断面以上流域是干旱强度最高的区域，高达-13%~-16%，干旱严重程度在-2100%~-3300%范围内，而干旱历时则在 120~150 d 之间；样子哨至汉阳屯区间是干旱历时、强度、严重程度均最低的区域，分别低于 120 d、-10%和 1800%。

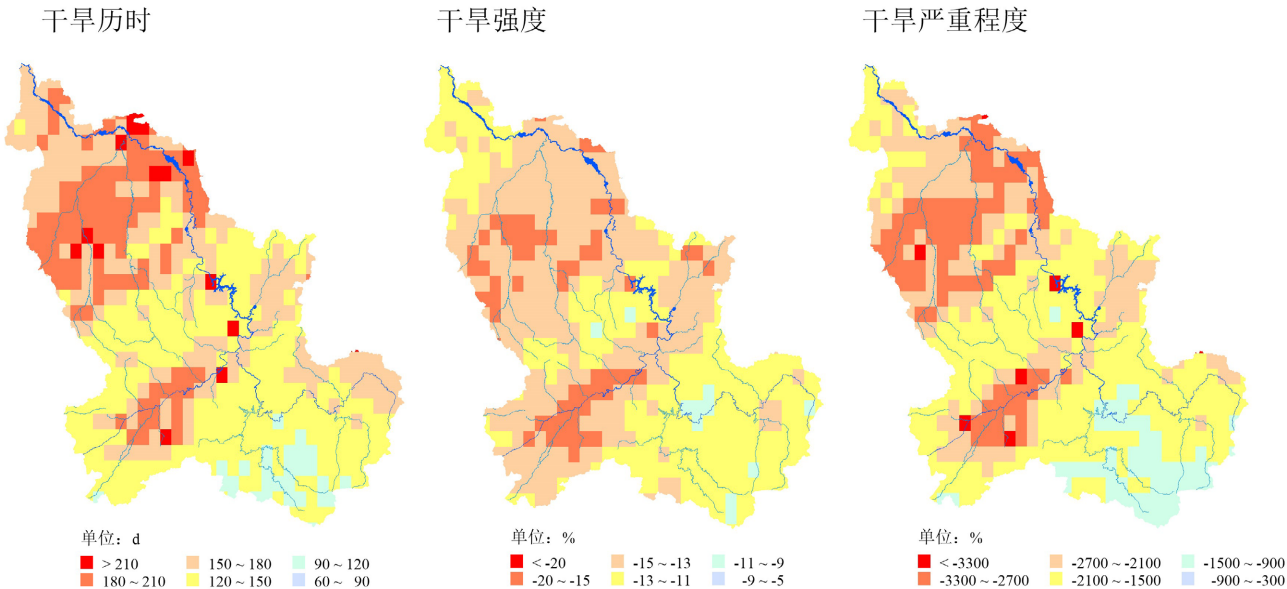


图 3. 1961~2020 年干旱特征空间变化

4.4. 干旱事件特征对气候变化的敏感性

4.4.1. 干旱场次变化

降水变化 30%以内时，干旱场次随着降水的增加而逐渐减少(图 4(a))。在降水增加 30%、气温不变的情景下，仅能识别出 3 场干旱；而降水减少 10%、气温不变的情景下，则识别出 40 场干旱，约是现状条件下的 1.2 倍。同时随着气温的升高，识别出的干旱场次也有所增加。值得注意的是，与降水减少 10%情景相比，在降水减少 30%的情景下干旱场次数有所减少，气温不变、升高 1℃、2℃和 3℃情景下分别减少 27 场、33 场、30 场和 27 场。这表明降水有较大减幅的情况下，一些干旱场次可能会合并，导致识别出的干旱场次减少；气温升高将进一步加剧这一过程。

4.4.2. 干旱历时变化

随着降水的增加,干旱历时有所减少(图 4(b))。干旱历时变化受气温影响明显,气温升高对干旱历时变化的影响大于降水。由于降水变化-30%情景下合并了一些场次,该情景下干旱历时有较大幅度的增加,气温不变、升高 1℃、2℃和 3℃情景下分别增加 1138 d(约 38 个月)、2299 d(约 77 个月)、5623 d(约 187 个月)和 5660 d(约 189 个月)。在降水变化不变、10%、20%和 30%情景下,干旱历时变化一般在±30 d 以内,说明气温变化对其影响较小。总体上,降水减少和气温升高将导致干旱历时增加,但注意到如降水增加 30%、气温升高 2℃情景等少数情况下,干旱历时却增加 17 d,变化趋势相反,这可能是由于降水增加导致干旱场次减少,使得平均干旱历时有所增加。

4.4.3. 干旱强度变化

图 4(c)为干旱强度变化,由于干旱强度的计算与网格土壤含水量 SMAPI 值、干旱面积、干旱场次、干旱历时等变量有关,因此得到的干旱强度随降水、气温变化的变化较为复杂,是上述变量受假设情景变化影响下的综合作用结果。一般来说,随着降水的增加,干旱强度将有所减少,随着气温的升高,干旱强度有所增加。

4.4.4. 干旱面积变化

干旱面积随着降水的增加而减少(图 4(d)),降水分别变化±30%、气温不变情景下,干旱面积分别变化-20.6%

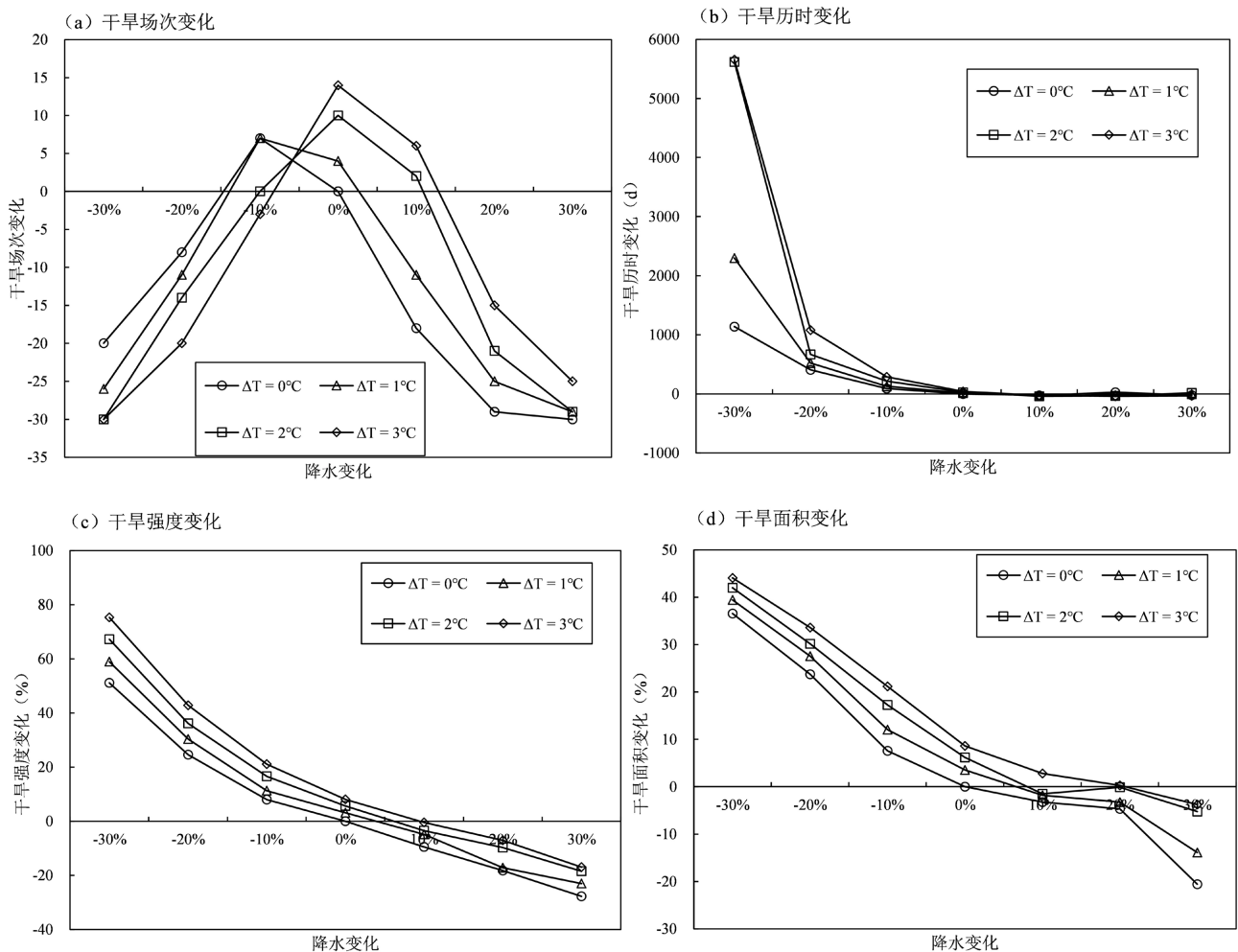


图 4. 假设情景下流域干旱事件特征平均变化

和 44.1%，降水减少引起的干旱面积的变化明显大于降水增加造成的干旱面积的变化。气温升高将导致干旱面积的增加，同时，气温升高对干旱面积变化的影响小于降水。

5. 结论

1) 利用 VIC 模型模拟逐日三层土壤含水量，基于土壤含水量 SMAPI 指数识别干旱事件，较好的再现了历史旱情，识别出的网格干旱和区域干旱事件与实际旱情资料具有较好的一致性，可以用于干旱事件时空特征变化的分析。

2) 流域历史干旱时空特征变化显著。1961~2020 年流域共发生 59 场干旱，平均干旱历时约为 6 个月，干旱面积约占流域总面积的 69.8%，平均干旱强度为-12.7%。2000s 干旱发生的场次多、历时长、面积也较大，干旱的强度一般较大，区域干旱程度较为严重。干旱事件的特征随时间变化在空间格局上有不同程度的变化，结果表明随着干旱面积的增加，干旱强度总体呈增加趋势。

3) 降水变化-30%~30%之间，干旱历时、干旱强度、干旱面积随降水增加而减少，而干旱场次则在-30%~0%之间随降水增加而增加。干旱特征值对气温变化的敏感性相对较小，随气温增加而增大。

基金项目

河南省科技攻关项目(252102320238)；国家重点研发计划项目(2023YFC3006603)。

参考文献

- [1] DU, C., CHEN, J., NIE, T., et al. Spatial-temporal changes in meteorological and agricultural droughts in Northeast China: Change patterns, response relationships and causes. *Natural Hazards*, 2022, 110(1): 155-173. <https://doi.org/10.1007/s11069-021-04940-1>
- [2] SUN, H., XU, Q., WANG, Y., et al. Agricultural drought dynamics in China during 1982-2020: A depiction with satellite remotely sensed soil moisture. *GIScience and Remote Sensing*, 2023, 60(1): 2257469. <https://doi.org/10.1080/15481603.2023.2257469>
- [3] 胡实, 莫兴国, 林忠辉. 未来气候情景下我国北方地区干旱时空变化趋势[J]. *干旱区地理*, 2015, 38(2): 239-248.
- [4] 马鹏里, 韩兰英, 张旭东, 等. 气候变化背景下中国干旱变化的区域特征[J]. *中国沙漠*, 2019, 39(6): 209-215.
- [5] 马建勇, 许吟隆. 东北地区作物生长季干旱时空分布特征及其环流背景[J]. *中国农业气象*, 2013, 34(1): 81-87.
- [6] 王岩, 王敬宜, 冯锐, 等. 基于 FY-3D/MERSI 数据的东北地区干旱监测方法研究[J]. *干旱地区农业研究*, 2023, 41(4): 289-297.
- [7] 杨晓静, 孙洪泉, 吕娟, 等. 东北三省典型气象灾害对粮食生产影响特征研究[J]. *中国水利水电科学研究院学报*, 2020, 18(1): 21-30.
- [8] LLOYD, H. B. The impracticality of a universal drought definition. *Theoretical and Applied Climatology*, 2014, 117(3): 607-611. <https://doi.org/10.1007/s00704-013-1025-7>
- [9] WU, Z. Y., LU, G. H., WEN, L., et al. Reconstructing and analyzing China's fifty-nine year (1951-2009) drought history using hydrological model simulation. *Hydrology and Earth System Sciences*, 2011, 15(9): 2881-2894. <https://doi.org/10.5194/hess-15-2881-2011>
- [10] 吴志勇, 徐征光, 肖恒, 等. 基于模拟土壤含水量的长江上游干旱事件时空特征分析[J]. *长江流域资源与环境*, 2018, 27(1): 176-184.
- [11] MENG, L., QUIRING, S. M. A comparison of soil moisture models using soil climate analysis network observations. *Journal of Hydrometeorology*, 2008, 9(4): 641-659. <https://doi.org/10.1175/2008jhm916.1>
- [12] ANDREADIS, K. M., CLARK, E. A., Wood, A. W., et al. Twentieth-century drought in the conterminous United States. *Journal of Hydrometeorology*, 2005, 6(6): 985-1001. <https://doi.org/10.1175/jhm450.1>
- [13] WU, Z., LU, G., WEN, L., et al. Thirty-five year (1971-2005) simulation of daily soil moisture using the variable infiltration capacity model over China. *Atmosphere-Ocean*, 2007, 45(1): 37-45. <https://doi.org/10.3137/ao.v450103>
- [14] LU, G., WU, H., XIAO, H., et al. Impact of climate change on drought in the upstream Yangtze River region. *Water*, 2016, 8(12): 576. <https://doi.org/10.3390/w8120576>

- [15] MA, Y., GUGA, S., XU, J., et al. Assessment of maize drought risk in midwestern Jilin province: A comparative analysis of TOPSIS and VIKOR models. *Remote Sensing*, 2022, 14(10): 2399. <https://doi.org/10.3390/rs14102399>
- [16] WANG, R., ZHANG, J., WANG, C., et al. Characteristic analysis of droughts and waterlogging events for maize based on a new comprehensive index through coupling of multisource data in midwestern Jilin province, China. *Remote Sensing*, 2020, 12(1): 60. <https://doi.org/10.3390/rs12010060>
- [17] GUO, Y., WANG, R., TONG, Z., et al. Dynamic evaluation and regionalization of maize drought vulnerability in the midwest of Jilin province. *Sustainability*, 2019, 11(15): 4234. <https://doi.org/10.3390/su11154234>
- [18] 张晨琛, 孔庆伟, 朱锋. 基于 SPEI 及连续小波变换的吉林省干旱周期性特征分析[J]. *气象灾害防御*, 2017, 24(3): 43-48.