

Study of Temporal-Spatial Evolution of the Drought-Flood Abrupt Alternation Events Based on SWAP Index in Hanjiang River Basin

Ying Zhao, Hua Chen, Jiawei Yang, Chongyu Xu

State Key Laboratory of Water Resources and Hydropower Engineering Science, Wuhan University, Wuhan Hubei
Email: 3062507439@qq.com

Received: Jan. 29th, 2019; accepted: Feb. 13th, 2019; published: Feb. 21st, 2019

Abstract

The drought and flood event are characterized by extreme drought and flood events alternate in the short term. Disaster recovery is difficult and poses a major threat to social development. Therefore, researching the temporal and spatial evolution of drought and flood event is of great significance. This article uses the SWAP index and run theory to analyze the evolution of drought and flood events and change characteristics of drought-flood in history and future periods in the Hanjiang River basin. Results show as follows: 1) In history and future periods, the frequency and average intensity of flood to drought were less than drought to flood, the occurrence more likely and threatening of drought to flood. 2) In history period, the SWAP index of the typical drought and flood year decreased then increased from northwest to southeast. In 1966, the drought level in middle and lower reaches was higher than the upper reaches; in 1983, the flood level in the upper and lower reaches was higher than the middle reaches of the Hanjiang River basin.

Keywords

Hanjiang River Basin, SWAP Index, Drought-Flood Events

基于SWAP的汉江流域旱涝急转时空演变分析

赵英, 陈华, 杨家伟, 许崇育

武汉大学水资源与水电工程科学国家重点实验室, 湖北 武汉
Email: 3062507439@qq.com

收稿日期: 2019年1月29日; 录用日期: 2019年2月13日; 发布日期: 2019年2月21日

作者简介: 赵英(1996-), 女, 硕士研究生, 主要从事流域水文极端事件研究。

摘要

旱涝急转事件表现为干旱、洪涝等水文极端事件在短期内交替产生，灾害突发、抢险难度大，对社会发展易造成重大威胁。因此，研究旱涝急转事件的时空演变规律意义重大。本文以汉江流域为例，采用SWAP指数和游程理论，分析和研究历史及未来时期汉江流域的旱涝演变及旱涝急转变化特征。结果表明：1) 历史及未来时期涝转旱事件频次及平均强度均小于旱转涝事件，旱转涝事件发生可能性更高、威胁性更大。2) 历史时期典型旱涝年SWAP指数呈现从西北到东南地区先减小后增大的趋势。1966年汉江中下游的干旱等级明显高于上游地区；1983年汉江上游和下游的洪涝等级明显高于中游地区。

关键词

汉江流域，SWAP指数，旱涝急转

Copyright © 2019 by authors and Wuhan University.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY).

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



Open Access

1. 引言

受全球气候变化及人类活动影响，干旱、暴雨、洪涝等极端水文事件发生频率将进一步增加[1] [2] [3]。干旱洪涝灾害是全球性问题，旱灾由持续性缺水而引发，具有发生频率高、持续时间长、影响范围广、危害程度强等特点[4]，导致水库、湖泊蓄水减少，河流径流量减小，作物减产，人畜饮水困难等问题[5]；涝灾多由短期高强度降水或冰川大量融雪造成，导致山洪暴发、河流决堤，危及人类生命、破坏经济和生态环境[6]。在我国平均2~3年会遭遇一次严重的干旱灾害[7]。旱涝急转在我国也时有发生，在1994年6月中旬珠江流域及2011年夏初长江中下游地区由于连续强降水导致的旱涝急转事件[8] [9]，给社会生产造成了巨大损失。汉江流域地处亚热带季风区，气候变化频繁，容易发生干旱和洪涝事件，“旱涝并存、旱涝急转”事件时有发生。在短期里同时遭遇干旱、洪涝事件，会使区域受到的损失及影响呈倍数增加[10]。

旱涝异常研究一直是短期气候预测的重要内容，同时是国内外大气科学研究的热点[11] [12]。以往研究大多针对夏季降水异常，对旱涝的季节内变化关注较少[13] [14] [15]。旱涝急转现象正是季节内降水异常的典型代表[16]，在中国华南、长江中下游及西南等地区时有发生[17]。吴志伟等[16]、王胜等[18]、孙鹏等[19]分别对长江中下游地区、淮河流域、东江流域开展了旱涝急转事件时空变化趋势及特征研究。Wu等[20]从一个较长的时间尺度(季时间尺度)分析了长江中下游流域旱涝共存在夏季平均降水正常年份前提下的发生变化规律，研究指出即便在平均降水正常年，旱涝共存事件也可能发生。闪丽洁等[21]通过定义长、短周期旱涝急转指标对长江中下游地区的旱涝急转事件在时空上的分布规律开展了研究。

为了研究和评估旱涝急转给国家、人民带来的巨大损失，亟需一个能对旱涝急转进行定量评估的方法。国内外学者对于如何筛选旱涝急转事件做了一系列研究。Wu等[20]由夏季总降水和夏季无雨日定义了DFCI指数，用于定量筛选季尺度的旱涝急转事件。吴志伟等[16]定义了长周期旱涝急转指数LDFAI，定量分析了季尺度旱涝急转事件。以上研究大多基于季尺度，将旱涝急转的转折时间点固定在6至7月之间。实际上，旱涝急转事件在任何时段均有可能发生，及时获得旱涝急转的起止时间及转折时间点对于农业生产具有重大意义。

Lu 于 2009 年提出的加权平均降水量 WAP (Weighted Average Precipitation)适用于逐日、逐月等不同时间尺度[22]。Lu 还使用了标准化的 WAP (即 Standard Weighted Average Precipitation, SWAP)可以对干旱情况进行逐日监测,识别出干旱开始、持续、结束时间以及强度等详细信息,能较好地分析干旱情况[23]。因此本文以 SWAP 指标筛选汉江流域的旱涝急转事件,分析事件演变规律,以期为汉江流域旱涝急转事件的预测及防洪抗旱提供科学依据,更好实现水资源优化配置。

2. 资料与方法

2.1. 研究区域和数据

汉江流域发源于秦岭南麓,位于东经 106°15'~114°20'、北纬 30°10'~34°20',流域全长 1577 km,流域面积约 15.9 万 km²。汉江流域属于亚热带季风区,气候温和湿润,年降水量 873 mm,水量较丰沛,但年内分配不均匀,年际变化较大。

本文研究资料采用汉江流域实测及 GCM 模拟日降水数据。实测数据来源于中国气象数据网 (<http://data.cma.cn/>)提供的 15 个气象站 1961~2017 年日降水数据(图 1)。GCM 模拟数据包括历史时期 1971~2000 年和未来时期 2021~2050 年。气候模型模拟来自于耦合模型比对项目第 5 阶段(CMIP5)数据库,选取 BCC-CSM1-1m 模型;选取中等排放路径 RCP4.5 和高端排放路径 RCP8.5 两种温室气体排放情景。

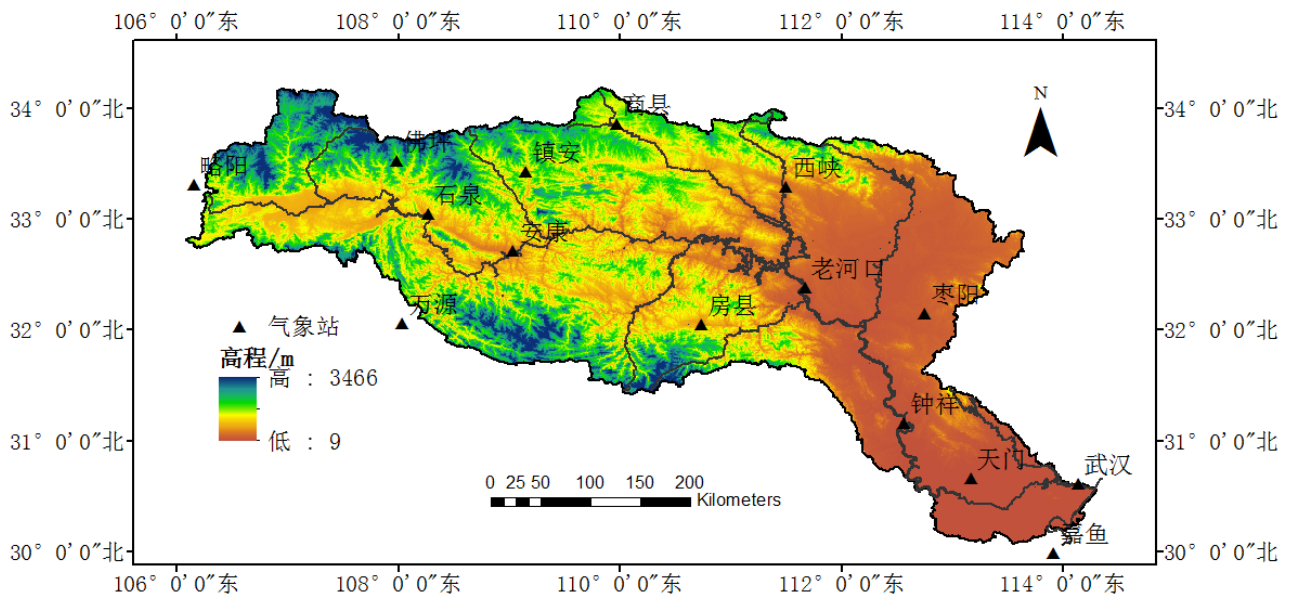


Figure 1. Distribution of meteorological stations in Hanjiang River basin

图 1. 汉江流域气象站点分布

2.2. 研究方法

2.2.1. 标准化加权平均降雨指数

Lu 于 2009 年提出了基于累计降雨的气象旱涝指标 SWAP (Standard Weighted Average Precipitation) [22]。该指标基于加权平均降雨 WAP (Weighted Average Precipitation)通过 Gamma 函数标准化得来[23]。SWAP 指数以降水的单因素气象干旱指数,能在逐日尺度上分析区域的干湿状况。该指标可以识别出干旱开始、持续、结束时间及强度等详细信息,能较好的监测旱涝情况。旱涝等级根据 SWAP 值划分为 9 个等级[4] (表 1)。

Table 1. Drought and flood classification standard

表 1. 旱涝等级划分标准

旱涝等级	旱涝程度	标准化加权平均降雨指数 SWAP
4	特涝	$2.0 \leq \text{SWAP}$
3	重涝	$1.5 \leq \text{SWAP} < 2.0$
2	中涝	$1.0 \leq \text{SWAP} < 1.5$
1	轻涝	$0.5 \leq \text{SWAP} < 1.0$
0	正常	$-0.5 < \text{SWAP} < 0.5$
-1	轻旱	$-1.0 < \text{SWAP} \leq -0.5$
-2	中旱	$-1.5 < \text{SWAP} \leq -1.0$
-3	重旱	$-2.0 < \text{SWAP} \leq -1.5$
-4	特旱	$\text{SWAP} \leq -2.0$

2.2.2. Mann-Kendall 检验

Mann-Kendall 非参数检验方法由 Mann 首先提出, 并由 Kendall 逐渐完善形成完整的 Mann-Kendall 检验方法[24] [25]。非参数检验方法计算简单有效, 不要求系列数据遵从一定分布, 在气候、气象研究等方面已得到广泛运用, 具体计算过程见参考文献[26]。

2.2.3. 旱涝急转事件识别

游程理论也称为轮次理论, 是分析时间序列的一种方法。Yevjevich 最早运用游程理论识别和描述干旱事件[27]。本文取干旱事件截取水平 R_1 为-1 (轻旱), 旱涝指标 SWAP 值满足连续七日小于-1 时, 定义为一次干旱事件发生, 直到 SWAP 值满足连续三日大于 0.5 时, 定义为此次干旱事件结束, 从干旱起始到结束的时间间隔称之为该次干旱事件的持续时间。类似地, 取洪涝事件截取水平 R_1 为 1 (轻涝), 旱涝指标 SWAP 值满足连续七日大于 1 时, 定义为一次洪涝事件发生, 直到 SWAP 值满足连续三日小于-0.5 时, 定义为这次洪涝事件结束, 从洪涝起始到结束的时间间隔称之为该次洪涝事件的持续时间。

采用上文游程理论定义的干旱事件和洪涝事件, 对于某时期, 若先后存在一个干旱事件和一个洪涝事件, 且干旱事件结束时间与洪涝事件开始时间两者时间间隔小于五天, 定义为一次旱涝急转事件, 旱涝急转事件的起始时间是这次干旱事件的发生时间, 结束时间是这次洪涝事件的结束时间。类似地, 对于某时期, 若先后存在一个洪涝事件和一个干旱事件, 且洪涝事件结束时间与干旱事件开始时间两者间隔小于五天, 定义为一次涝旱急转事件, 涝旱急转事件的起始时间是这次洪涝事件的发生时间, 结束时间是这次干旱事件的结束时间。

2.2.4. 旱涝事件分析指标

采用旱涝事件的发生频次与事件的平均强度两个指标来分析旱涝急转事件的时空变化规律。事件频次为流域时段内发生的旱涝急转事件的累计次数; 事件平均强度采用时段内发生旱涝事件总的 SWAP 指标累计面积与时段内包含的总年数的比值。

3. 结果与分析

3.1. 历史旱涝事件特征分析

3.1.1. 降雨时空变化

图 2 展现了汉江流域 1961~2017 年年降水量及多年平均降水量空间分布。可以看出, 汉江流域 1961~2017 年多年平均降水量为 948 mm。年降水量最小值出现在 1966 年, 为 693 mm; 年降水量最大值出现在 1983 年,

为 1412 mm；年降水量极值相差达 719 mm，降水年际变化相差明显。20 世纪 90 年代出现了连续多年降雨量低于多年平均降水量，事实也证明在 90 年代干旱事件发生频繁。从降雨空间分布看，汉江下游的多年平均降水量最多，为 1356 mm；汉江上游的东南地区的降水量最少，为 784 mm。总体而言，近 57 年来流域年降水量呈不显著上升趋势，上升速率为 0.48 mm/年；多年平均降雨量的空间分布存在明显差异，具有不均匀性。

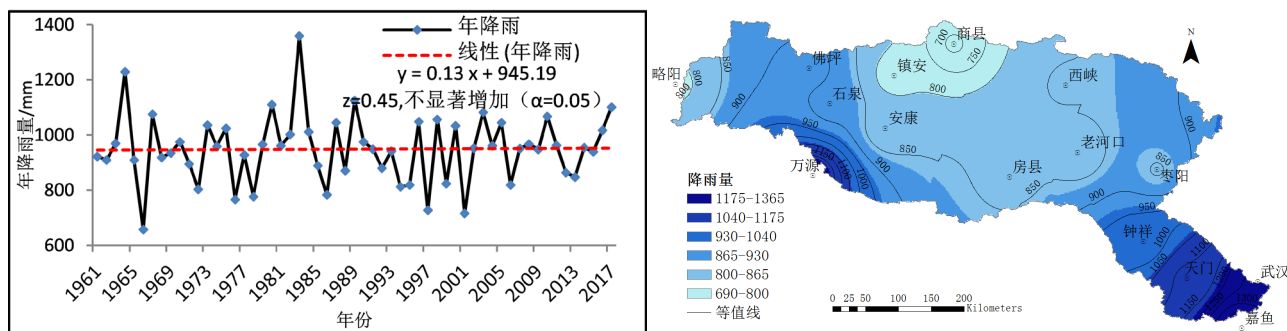


Figure 2. Precipitation from 1961 to 2017 and the spatial distribution of annual average precipitation in Hanjiang basin
图 2. 汉江流域 1961~2017 年降水量及多年平均降水量空间分布

3.1.2. SWAP 指数年际变化

图 3 给出了汉江流域 SWAP 指数年际变化趋势及 M-K 检验结果。从 UF 曲线看，近 57 年汉江流域 SWAP 指数呈现先下降后上升再下降后上升的趋势，但上升和下降的趋势均未超过 0.05 显著性水平临界线。综合 SWAP 指数计算结果看，旱涝指数 SWAP 大多在 -0.5~0.5 范围内变化，主要在 0 值附近上下波动，由此可知大多数年份属于正常年。干旱最严重的年份为 1966 年(SWAP 为 -1.60，重旱)、1997 年(SWAP 为 -1.28，中旱)、2001 年(SWAP 为 -1.18，中旱)，洪涝最严重的年份为 1983 年(SWAP 为 1.88，重涝)、1964 年(SWAP 为 1.47，中涝)。这一结果与陶新娥等[28]用 SPI 及 SPEI 指数识别结果一致，说明 SWAP 指数能对干旱、洪涝事件做出合理诊断。

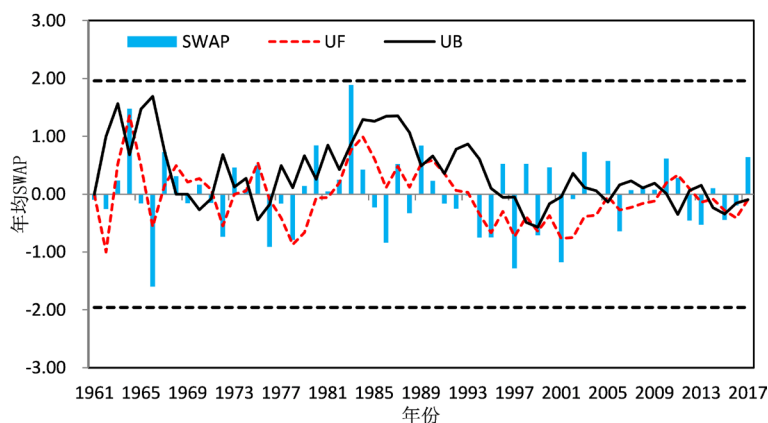


Figure 3. Interannual variation and mutation test of SWAP index from 1961 to 2017 in Hanjiang Basin
图 3. 汉江流域 1961~2017 年降水量及多年平均降水量空间分布

3.1.3. 不同等级旱涝事件频次时空变化

从表 2 可以看出汉江流域不同年代干旱、洪涝事件呈先上升后下降的趋势，不同年代间不同等级旱涝事件发生频率差异明显。其中 90 年代不同等级干旱发生共 5 次，干旱事件的累计频率最高，为 43.33%，该年代降水最少，多年平均降水量仅为 903.6 mm。80 年代不同等级洪涝发生共 5 次，洪涝事件的累计频率高达 40%，该年代降水最多，多年平均降水量为 1015.9 mm。60 年代极端干旱、洪涝事件累计频率最高，高达 8.14%。

Table 2. Frequency of different drought and flood grades in Hanjiang River basin
表 2. 汉江流域不同等级旱涝事件发生频率

年代	特涝	重涝	中涝	轻涝	正常	轻旱	中旱	重旱	特旱
1961~1969	3.70	5.19	11.11	20.00	28.15	14.81	7.41	5.19	4.44
1970~1979	0.67	1.33	10.00	13.33	38.00	16.67	12.67	7.33	0.00
1980~1989	6.67	6.00	14.00	16.67	35.33	12.00	4.67	4.00	0.67
1990~1999	0.00	4.00	7.33	11.33	34.00	22.67	10.67	7.33	2.67
2000~2010	2.67	2.67	12.00	12.67	36.00	23.33	7.33	2.67	0.67
2010~2017	1.67	4.17	15.83	7.50	35.83	16.67	16.67	0.83	0.83
1961~2017	2.57	3.86	11.58	13.68	34.62	17.78	9.71	4.68	1.52

从图 4 可见,近 57 年全流域均发生过不同程度的旱、涝事件,干旱事件最少为 17 次,最多为 23 次;洪涝事件最少为 15 次,最多为 20 次,干旱事件的频次高于洪涝事件的频次,说明干旱事件对区域发展更具威胁性。流域旱涝事件频次在空间分布上不均匀,干旱事件主要分布在汉江上游及下游地区,汉江中游事件的发生频次较少,为 17 次左右。洪涝事件主要分布在汉江上游的西北和南部地区及汉江下游;汉江中游洪涝事件的发生频次相对较少,为 15 次左右。从分析结果可知,汉江中游受旱涝事件较汉江上游及下游地区的威胁影响程度小。

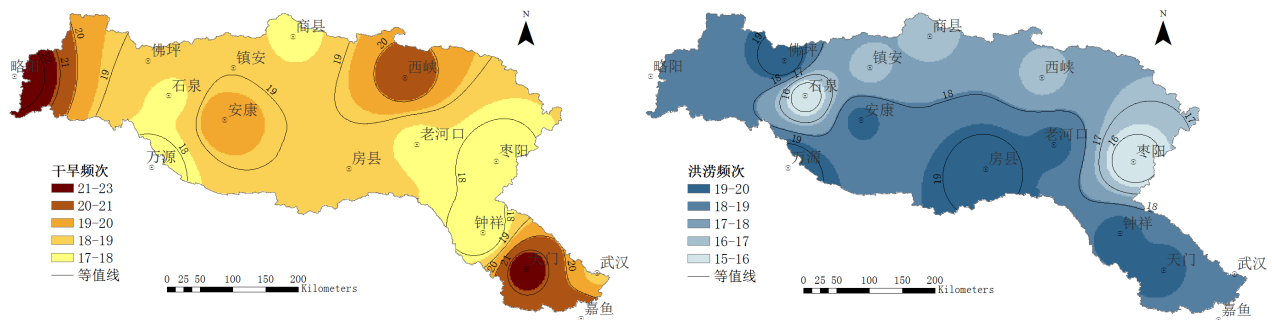


Figure 4. Spatial distribution of frequency of drought and flood from 1961 to 2017 in Hanjiang River basin
图 4. 汉江流域 1961~2017 年干旱、洪涝事件频次的空间分布

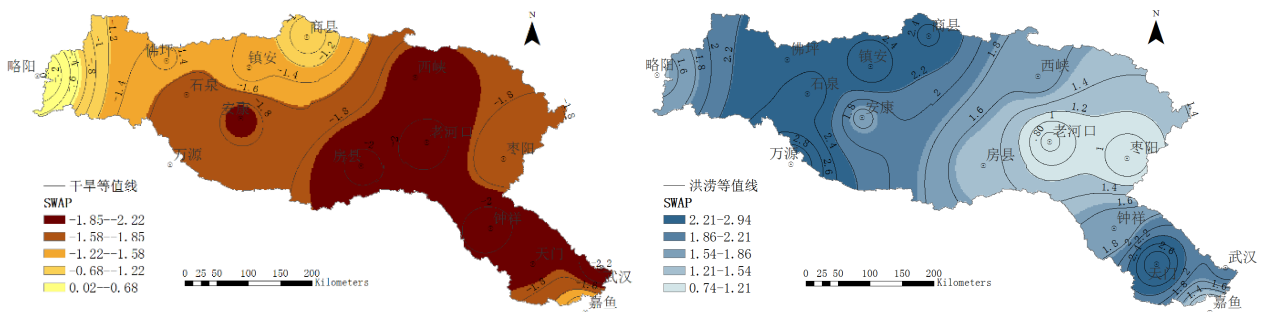


Figure 5. Spatial distribution of SWAP Index in typical drought year (1966) and flood year (1983) in Hanjiang River basin
图 5. 汉江流域典型干旱年(1966 年)、典型洪涝年(1983 年)SWAP 指数空间分布

图 5 展示了汉江流域典型干旱年、洪涝年 SWAP 指数空间分布。可以看出,汉江流域典型旱涝年 SWAP 指数空间分布存在明显差异。1966 年汉江中下游地区的干旱等级明显高于汉江上游地区;1983 年汉江上游和下游的洪涝等级明显高于汉江中游地区。总体来说,SWAP 指数均呈现从上游的西北地区到下游的东南地区先逐渐减小到后增大的趋势。

3.2. 旱涝急转事件特征分析

3.2.1. 未来气候变化情景下 SWAP 指数及旱涝事件年际变化

图 6 给出了汉江流域 2021~2050 年 SWAP 指数年际变化情况。在未来 2021~2050 年间，汉江流域两种气候情景下 SWAP 指数均呈现不显著上升趋势。其中 RCP4.5 情景下 SWAP 指数上升速度较 RCP8.5 情景快，且 SWAP 指数的年际变化波动较 RCP8.5 情景大。

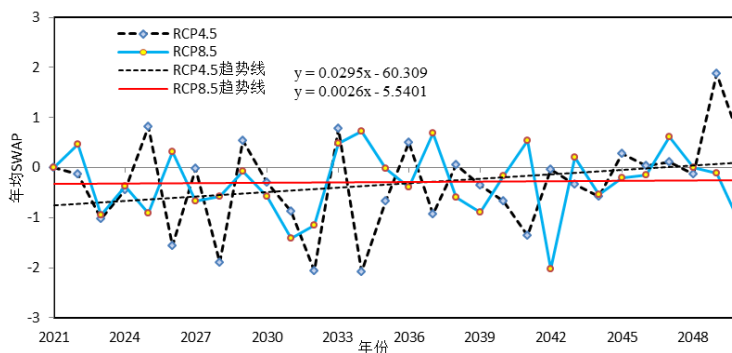


Figure 6. Interannual variation of SWAP index from 2021 to 2050 in Hanjiang River basin

图 6. 汉江流域 2021~2050 年 SWAP 指数年际变化

由表 3 可知，汉江流域未来 RCP4.5、RCP8.5 情景下干旱事件频率呈逐渐减小趋势，到 2050 s 发生频率降至最小；相反，洪涝事件频率呈逐渐增大趋势，到 2050 s 增至最大。其中等级较高的干旱事件主要集中在 2030 s、2040 s，等级较高的洪涝事件主要集中在 2050 s。从整体看，2021~2050 年汉江流域两种气候情景下干旱事件发生的频率(达到 35%左右)均大于洪涝事件发生的频率(为 19%左右)，干旱事件的威胁性更大。

Table 3. Frequency of different drought and flood grades in two future climate scenarios

表 3. 未来两种气候情景下不同旱涝等级发生频率

事件等级	2030 s		2040 s		2050 s		2021~2050 年	
	rcp4.5	rcp8.5	rcp4.5	rcp8.5	rcp4.5	rcp8.5	rcp4.5	rcp8.5
特涝	0.00	0.00	0.00	0.00	14.00	0.67	4.67	0.22
重涝	0.00	0.00	0.67	1.33	5.33	4.67	2.00	2.00
中涝	2.00	0.67	0.00	10.00	0.67	6.00	0.89	5.56
轻涝	12.67	8.67	16.00	12.67	8.00	9.33	12.22	10.22
正常	40.67	46.67	24.67	45.33	64.00	48.67	43.11	46.89
轻旱	17.33	17.33	22.67	14.67	6.67	10.67	15.56	14.22
中旱	13.33	19.33	14.67	13.33	0.67	9.33	9.56	14.00
重旱	11.33	4.67	5.33	2.67	0.00	4.67	5.56	4.00
特旱	2.67	2.67	16.00	0.00	0.67	6.00	6.44	2.89

3.2.2. 历史及未来旱涝急转事件频次及强度时空演变

图 7 给出汉江流域各站点不同时期旱涝急转事件发生频次。从旱涝急转事件发生频次看，历史时期涝转旱事件年平均次数为 0.5 次左右，未来时期 RCP4.5 情景下为 0.6 次左右，呈上升趋势，而 RCP8.5 情景下为 0.3 次左右，呈下降趋势。历史时期旱转涝事件年平均次数为 0.7 次左右，未来时期 RCP4.5 情景下为 0.7 次左右，RCP8.5

情景下为 0.6 次左右, 相比历史时期, 未来两种气候情景下旱转涝的发生频次没有明显变化。旱涝急转事件年平均次数均介于一年一遇与两年一遇之间, 证明事件筛选方案较为合理, 并未使事件频繁发生。对比旱涝事件发生频次可以看出, 无论是历史时期还是未来时期两种气候情景下, 涝转旱发生频次较少, 旱转涝发生频次较高, 证明洪涝事件发生完以后发生干旱事件的概率较低, 旱转涝事件的可能性更高, 更具威胁性。

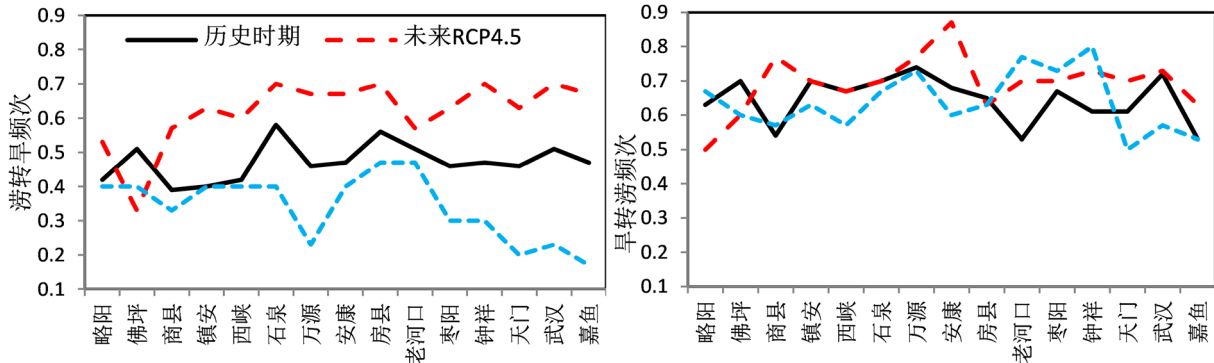


Figure 7. Frequency of drought and flood at different periods in Hanjiang River basin

图 7. 汉江流域各站点不同时期旱涝急转事件发生频次

从图 8 及图 9 汉江流域旱涝急转事件发生的平均强度看, 相比历史时期, RCP4.5 情景下涝转旱平均强度无明显变化, RCP8.5 情景下平均强度呈下降趋势; RCP4.5、RCP8.5 情景下旱转涝平均强度均呈上升趋势, 其中 RCP8.5 下的上升趋势更加显著。总体而言, 在历史及未来时期, 旱转涝事件的平均强度均高于涝转旱事件的平均强度, 旱转涝事件的威胁性更大。从空间分布看, 历史时期涝转旱平均强度较高的主要分布在汉江中上游地区, 旱转涝事件强度较高的主要分布在汉江上游西北地区及汉江中游。未来 RCP4.5 情景下, 涝转旱事件平均强度较高的主要分布在汉江上游西北地区及汉江中游; 旱转涝事件除佛坪、略阳站点及汉江下游强度较低外, 其他地区平均强度较高。未来 RCP8.5 情景下, 涝转旱事件平均强度较高的主要分布在汉江中、下游, 旱转涝事件平均强度较高主要分布在汉江上游的西北地区及汉江中、下游。

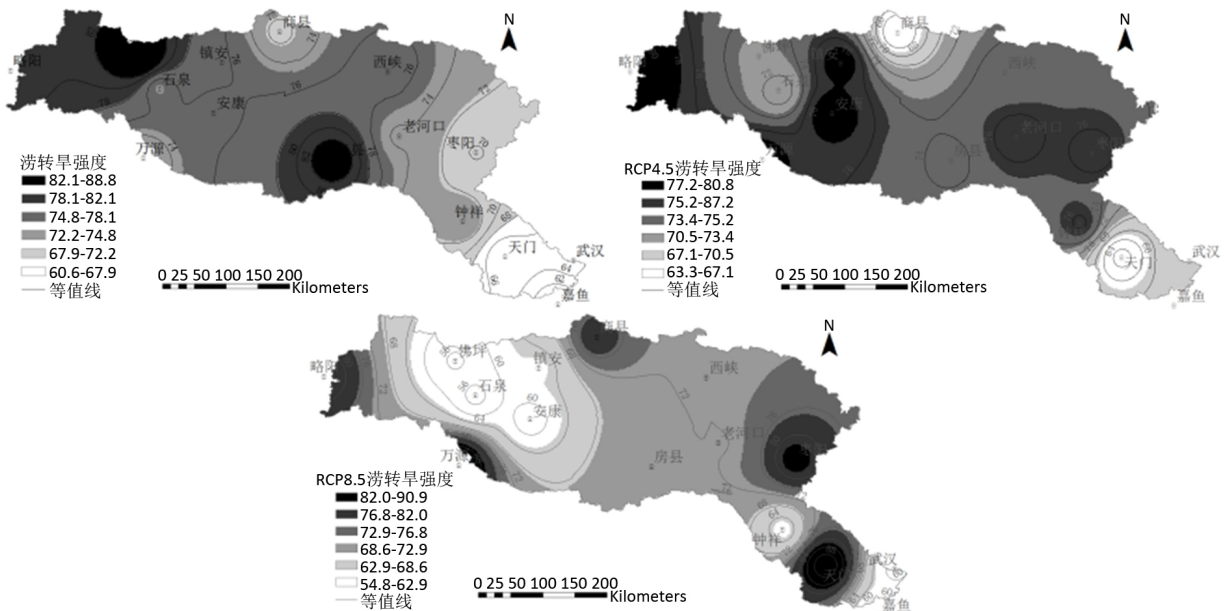


Figure 8. Spatial distribution of intensity of flood-drought under historical and RCP4.5 and RCP8.5 scenarios in Hanjiang River basin

图 8. 历史及未来 RCP4.5、RCP8.5 两种情景下汉江流域涝转旱强度空间分布

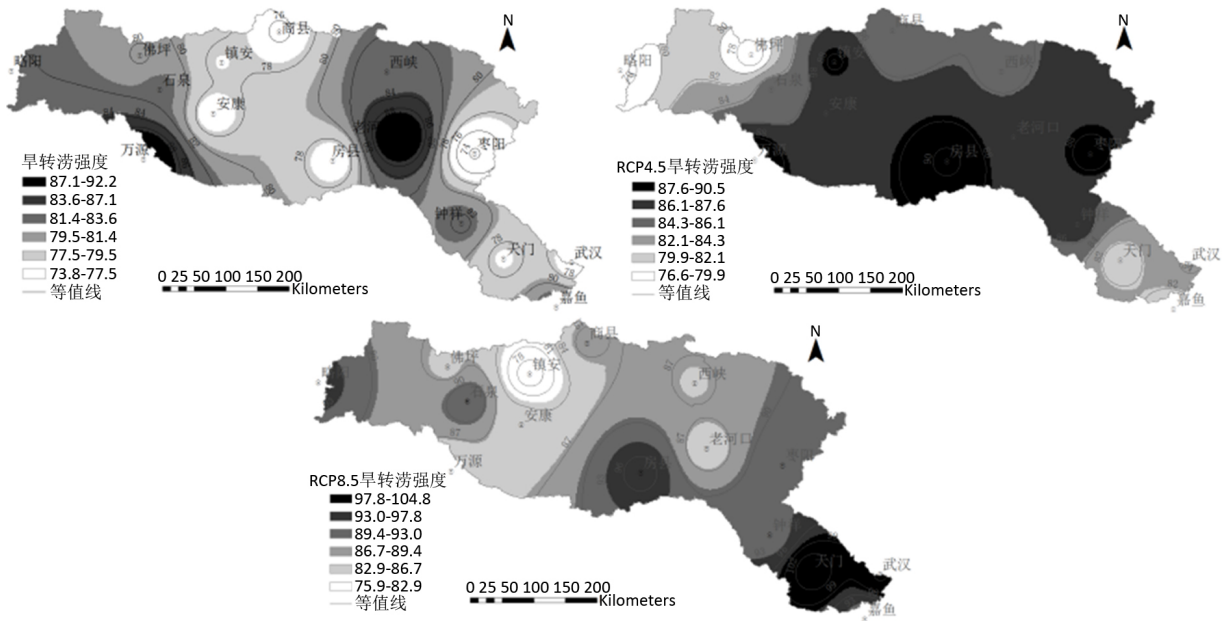


Figure 9. Spatial distribution of intensity of drought-flood under historical and RCP4.5 and RCP8.5 scenarios in Hanjiang River basin
图 9. 历史及未来 RCP4.5、RCP8.5 两种情景下汉江流域旱转涝强度空间分布

4. 结论

本文以汉江流域 15 个气象站点 1961~2017 年实测及 GCM 模型模拟的逐日降水数据,采用标准化加权平均降水指数(SWAP),分析了汉江流域历史及未来两个时期 SWAP 指数的时空变化规律及旱涝事件的演变特征,得出以下几个结论:

- 1) 历史时期汉江流域年降水量呈不显著上升趋势,上升速率为 0.48 mm/年;SWAP 指数呈先下降后上升再下降后上升的趋势;在未来两种气候情景下,SWAP 指数均呈不显著上升趋势,且 RCP4.5 情景下的上升速度比 RCP8.5 快,SWAP 指数的年际变化波动也较大。
- 2) 历史及未来时期汉江流域干旱事件发生频率均大于洪涝事件发生频率,干旱事件的威胁性更大。未来两种气候情景下干旱事件的频率呈逐渐减小的趋势,到 2050 s 发生频率降至最小;洪涝事件的发生频率呈逐渐增大的趋势,到 2050 s 增至最大。
- 3) 历史时期汉江流域旱涝事件频次在空间分布上不均匀,干旱事件频次最多的主要分布在汉江上游的略阳、西峡站点附近和汉江下游;洪涝事件频次最多的主要分布在汉江上游的西北和南部地区及汉江下游。典型旱涝年 SWAP 指数均呈现从上游的西北地区到下游的东南地区先逐渐减小到后增大的趋势。1966 年汉江中下游地区的干旱等级明显高于汉江上游地区;1983 年汉江上游和下游的洪涝等级明显高于汉江中游地区。
- 4) 与历史时期相比,未来 RCP4.5 情景下涝转旱事件频次呈上升趋势,而 RCP8.5 情景下发生频次呈下降趋势;未来两种气候情景下旱转涝的发生频次没有明显变化。历史及未来时期下,涝转旱发生频次及平均强度均小于旱转涝,旱转涝发生的可能性更高,威胁性更大。

基金项目

国家自然科学基金重点项目(51339004);国家重点研发计划(2017YFA0603702)。

参考文献

[1] FRICH, P., ALEXANDER, L. V., DELLA, P., et al. Observed coherent changes in climatic extremes during the second half of

- the twentieth century. *Geophysical Research Letters*, 2002, 19: 193-212.
- [2] ZHAI, P. M., ZHANG, X. B., WAN, H., et al. Trends in total precipitation and frequency of daily precipitation extremes over China. *Climate*, 2005, 18: 1096-1108. <https://doi.org/10.1175/JCLI-3318.1>
- [3] MENZEL, L., BURGER, G. Climate change scenarios and runoff response in the Mulde catchment (Southern Elbe, Germany). *Journal of Hydrology*, 2002, 267(1-2): 53-64. [https://doi.org/10.1016/S0022-1694\(02\)00139-7](https://doi.org/10.1016/S0022-1694(02)00139-7)
- [4] GB/T 20481-2006, 气象干旱等级[S].
GB/T 20481-2006, Classification of meteorological drought. (in Chinese)
- [5] 陈方藻, 刘江, 李茂松. 60年来中国农业干旱时空演替规律研究[J]. 西南师范大学学报(自然科学版), 2011, 36(4): 111-114.
CHEN Fangzao, LIU Jiang and LI Maosong. Researches on spatial and temporal succession law of agricultural drought in the past 60 years in China. *Journal of Southwest China Normal University (Natural Science Edition)*, 2011, 36(4): 111-114. (in Chinese)
- [6] 王琪. 基于修正 Palmer 干旱指数的黄淮海流域旱涝演变规律研究[D]. 辽宁: 辽宁师范大学, 2014, 1-2.
WANG Qi. The evolution law research of drought and flood based on corrected palmer drought index in Huang-Huai-Hai Basin. Liaoning: Liaoning Normal University, 2014, 1-2. (in Chinese)
- [7] 翁白莎, 严登华. 变化环境下我国干旱灾害的综合应对[J]. 中国水利, 2010(7): 4-7.
WEN Baisha, YAN Denghua. Reflections on integrated coping strategies for drought in China in changing environment. *China Water Resources*, 2010(7): 4-7. (in Chinese)
- [8] 唐惠芳, 韩建钢. 1994年夏季我国灾害性天气概述[J]. 中国减灾, 1994(4): 6-8.
TANG Huifang, HAN Jiangang. Overview of China's severe weather in the summer of 1994. *Disaster Reduction in China*, 1994(4): 6-8. (in Chinese)
- [9] 李迅, 袁东敏, 尹志聪, 等. 2011年长江中下游旱涝急转成因初步分析[J]. 气候与环境研究, 2014, 19(1): 41-50.
LI Xun, YUAN Dongmin, YIN Zhicong, et al. Preliminary analysis of sudden turn of drought and flood in the middle and lower reaches of the Yangtze River during 2011. *Climatic and Environmental Research*, 2014, 19(1): 41-50.
- [10] 黄茹. 淮河流域旱涝急转事件演变及应对研究[D]. 北京: 中国水利水电科学研究院, 2015.
HUANG Ru. Study on the evolution and response of drought and flood events in the Huaihe River Basin. Beijing: China Institute of Water Resources and Hydropower Research, 2015. (in Chinese)
- [11] DAI, A. G., TRENBERTH, K. E. and KARL, T. R. Global variations in droughts and wet spells: 1900-1995. *Geophysical Research Letters*, 1998, 25(17): 3367-3370. <https://doi.org/10.1029/98GL52511>
- [12] 黄荣辉, 孙凤英. 热带西太平洋暖池的热状态及其上空的对流活动对东亚夏季气候异常的影响[J]. 大气科学, 1994, 18(2): 141-151.
HUANG Ronghui, SUN Fengying. Impacts of the thermal state and the convective activities in the tropical western warm pool on the summer climate anomalies in East Asia. *Scientia Atmospherica Sinica*, 1994, 18(2): 141-151. (in Chinese)
- [13] 陈隆勋, 朱乾根, 罗会邦, 等. 东亚季风研究取得重要成果[J]. 中国科学基金, 1996(4): 278-278.
CHEN Longxun, ZHU Qiagen, LUO Huibang, et al. Significant progress in the research of the east Asian monsoon. *China Science Foundation*, 1996(4): 278-278. (in Chinese)
- [14] 龚道溢, 朱锦红, 王绍武. 长江流域夏季降水与前期北极涛动的显著相关[J]. 科学通报, 2002, 47(7): 546-549.
GONG Daoyi, ZHU Jinhong, WANG Shaowu. Significant correlation of summer precipitation and early arctic oscillation in Yangtze River Basin. *Science Bulletin*, 2002, 47(7): 546-549. (in Chinese)
- [15] JU, J., LV, J., CAO, J., et al. Possible impacts of the arctic oscillation on the interdecadal variation of summer monsoon rainfall in East Asia. *Advances in Atmospheric Sciences*, 2005, 22(1): 39-48. <https://doi.org/10.1007/BF02930868>
- [16] 吴志伟, 李建平, 何金海, 等. 大尺度大气环流异常与长江中下游夏季长周期旱涝急转[J]. 科学通报, 2006, 51(14): 1717-1724.
WU Zhiwei, JI Jianping, HE Jinhai, et al. Large-scale atmospheric circulation anomaly and long-term drought and flood in summer in middle and lower reaches of the Yangtze River. *Science Bulletin*, 2006, 51(14): 1717-1724. (in Chinese)
- [17] 封国林, 杨涵涓, 张世轩, 等. 2011年春末夏初长江中下游地区旱涝急转成因初探[J]. 大气科学, 2012, 36(5): 1009-1026.
FENG Guolin, YANG Hanwei, ZHANG Shixuan, et al. A preliminary research on the reason of a sharp turn from drought to flood in the middle and lower reaches of the Yangtze River in late spring and early summer of 2011. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences*, 2012, 36(5): 1009-1026. (in Chinese)
- [18] 王胜, 田红, 丁小俊, 等. 淮河流域主汛期降水气候特征及“旱涝急转”现象[J]. 中国农业气象, 2009, 30(1): 31-34.
WANG Sheng, TIAN Hong, DING Xiaojun, et al. Climate characteristics of precipitation and phenomenon of drought-flood abrupt alternation during main flood season in Huaihe River Basin. *Chinese Journal of Agrometeorology*, 2009, 30(1): 31-34. (in Chinese)

- [19] 孙鹏, 刘春玲, 张强. 东江流域汛期旱涝急转的时空演变特征[J]. 人民珠江, 2012, 33(5): 29-34.
SUN Peng, LIU Chunling, ZHANG Qiang. Spatio-temporal variations of drought-flood abrupt alternation during main flood season in East River Basin. Pearl River, 2012, 33(5): 29-34. (in Chinese)
- [20] WU, Z., LI, J., HE, J., et al. Occurrence of droughts and floods during the normal summer monsoons in the mid and lower reaches of the Yangtze River. Geophysical Research Letters, 2006, 33(5): 1. <https://doi.org/10.1029/2005GL024487>
- [21] 闪丽洁, 张利平, 陈心池, 等. 长江中下游流域旱涝急转时空演变特征分析[J]. 长江流域资源与环境, 2015, 24(12): 2100-2107.
SHAN Lijie, ZHANG Liping, CHEN Xinchu, et al. Spatio-temporal evolution characteristics of drought-flood abrupt alternation in the middle and lower reaches of the Yangtze River Basin. Resources and Environment in the Yangtze Basin, 2015, 24(12): 2100-2107. (in Chinese)
- [22] LU, E. Determining the start, duration, and strength of flood and drought with daily precipitation: Rationale. Geophysical Research Letters, 2009, 1: 1179.
- [23] LU, E., CAI, W., JIANG, Z., et al. The day-to-day monitoring of the 2011 severe drought in China. Climate Dynamics, 2014, 43(1-2): 1-9. <https://doi.org/10.1007/s00382-013-1987-2>
- [24] MANN, H. B. Non-parametric test against trend. Econometrical, 1945(13): 245-259. <https://doi.org/10.2307/1907187>
- [25] KENDALL, M. G. Rank correlation methods. Charles Griffin, 1990: 108.
- [26] 陈华, 郭生练, 郭海晋, 等. 汉江流域 1951-2003 年降水气温时空变化趋势分析[J]. 长江流域资源与环境, 2006, 15(3): 340-345.
CHEN Hua, GUO Shenglian, GUO Haijin, et al. Temporal and spatial trend in the precipitation and temperature from 1951 to 2003 in the Hanjiang Basin. Resources and Environment in the Yangtze Basin, 2006, 15(3): 340-345. (in Chinese)
- [27] YEVJEICH, V. An objective approach to definitions and investigations of continental hydrologic droughts. Denver: Colorado State University, 1967.
- [28] 陶新娥, 陈华, 许崇育. 基于 SPI/SPEI 指数的汉江流域 1961-2014 年干旱变化特征分析[J]. 水资源研究, 2015, 10(5): 404-415.
TAO Xin'er, CHEN Hua and XU Chongyu. Characteristics of drought variations in Hanjiang Basin in 1961-2014 based on SPI/SPEI. Journal of Water Resources Research, 2015, 10(5): 404-415. (in Chinese)