

气候突变下基于 Z 指数的松潘县旱涝演变分析

侯雨乐¹, 赵景波²

(1.阿坝师范学院, 四川 汶川 623002; 2.中国科学院 地球环境研究所 黄土与第四纪地质国家重点实验室, 西安 710061)

摘 要:为分析松潘县气候变化及其旱涝演变特征,基于松潘县 1960—2015 年的气象数据和太阳黑子观测数,对气温变化规律、 Z 指数旱涝灾害变化、太阳活动与旱涝关系等进行了研究。结果表明:1960—2015 年松潘县年均气温呈显著上升趋势,年际变化率是 $0.24^{\circ}\text{C}/10\text{ a}$ 。松潘县年均气温的上升,年均极端低温的贡献率更大。年均气温在 1994 年发生突变,1994 年后增温增速。松潘县多年平均降水量呈现不明显减少趋势,降水波动性较大,冬春季降水呈增加趋势,夏秋季降水呈减少趋势。气候突变后,季节降水变化更加复杂化。近 56 a 来松潘县共计旱涝灾害 28 次,平均 2 a 发生一次。洪灾、旱灾各 14 次,发生频率均为 25%。气候突变以后的旱涝出现频率更高。松潘县旱涝与太阳黑子周期关系密切, Z 指数变化与太阳黑子活动存在较强的匹配性。太阳黑子数达到峰值当年或者前后一年, Z 指数也会出现相应的升高或降低变化。太阳黑子极值年及其附近出现旱涝灾害的概率更高,应加强防灾减灾工作。

关键词:气温突变; Z 指数; 旱涝演变; 太阳黑子; 松潘县

中图分类号:P426.616; P338⁺.6

文献标识码:A

文章编号:1005-3409(2021)04-0165-06

Analysis of Evolution of Drought and Flood Disasters in Songpan County Under Abrupt Climate Change Based on Z Index

HOU Yule¹, ZHAO Jingbo²

(1.Aba Teachers College, Wenchuan, Sichuan 623002, China; 2.State Key Laboratory of Loess and Quaternary Geology, Institute of Earth Environment, Chinese Academy of Sciences, Xi'an 710075, China)

Abstract: In order to analyze the climate change and its evolution characteristics of drought and flood disasters in Songpan County, based on the meteorological data and sunspot observation data in Songpan County from 1960 to 2015, the law of temperature change, Z index drought and flood disaster change, the relationship between solar activity and drought and flood were studied. The results show that the average annual temperature in Songpan County showed a significant upward trend, and the annual change rate was $0.24^{\circ}\text{C}/\text{decade}$; the contribution rate of the annual extreme low temperature was greater than that of the average annual temperature rise in Songpan County; the abrupt change of average annual temperature occurred in 1994; after 1994, the growth rate of temperature increased; the annual average precipitation in Songpan County showed no obvious decreasing trend, and the precipitation fluctuated greatly; the precipitation increased in winter and spring, and decreased in summer and autumn; after abrupt climate change, the change of seasonal precipitation became more complicated; In recent 56 years, there have been 28 times of drought and flood in Songpan County, with an average of once every two years; there have been 14 events of floods and 14 events of droughts, the both of the frequency were 25%; the frequency of drought and flood disasters was higher after abrupt climate change. There is a close relationship between the drought and flood in Songpan County and the sunspot cycle, and there is a strong matching between the change of Z index and sunspot activity. In the year or before and after one year when the sunspot number reaches its peak, the Z index will also increase or decrease accordingly. The probability of drought and flood disaster is very high in sunspot extreme year and its vicinity. Disaster prevention and mitigation should be strengthened.

收稿日期:2020-09-06

修回日期:2020-09-19

资助项目:阿坝师范学院校级重点项目(ASA19-13);阿坝州科技局项目(20YYJSYJ0034);四川省科技厅项目(21RKX0483);黄土与第四纪地质国家重点实验室项目(SKLLQG1428)

第一作者:侯雨乐(1983—),男,山西交城县人,副教授,硕士,主要从事区域自然地理研究。E-mail:512570915@qq.com

通信作者:赵景波(1953—),男,山东滕州人,教授,博士生导师,主要从事区域环境研究。E-mail:zhaobjb@snnu.edu.cn

Keywords: abrupt change of temperature; Z-index; evolution of drought and flood; sunspot; Songpan County

近 50 a 来全球变暖更趋明显,旱涝等与极端天气有关的自然灾害事件正不断增加^[1-2]。气候是不稳定的,冷期或暖期的气候均存在突变,极端天气事件是气候突变的典型表现^[3]。气温、降水异常是造成旱涝变化的主要原因之一,也是定量研究区域冷暖、干湿演替的重要依据,并得到广泛承认和应用。长江上游等地区的干旱、极端降水及其造成的损失呈上升趋势^[4-5]。2020 年入夏以来,长江多地遭遇因强降雨引发的内涝、山洪等灾害,长江流域降水偏多,但降水时空分布不均,涝重于旱,已致千万人受灾。王帅兵等^[6]利用 SPI 和 Z 指数分析了洮河流域的干旱趋势,发现这两种指数在年尺度的旱情分析上一致性较高。刘志雄^[7]、齐冬梅^[8]等认为 Z 指数可较好地作为反映长江上游流域、四川地区旱涝指标。戴洋等^[9]利用 1961—2008 年的气候水文数据得出,20 世纪 90 年代后期若尔盖湿地进入暖干期,年均气温在 1997 年前后发生突变。郑景云等^[10]研究指出,2016 年长江流域重大洪灾的主要成灾因子是梅雨期内的强降水频繁、时间长等,ENSO 等极端事件是造成历史上异常丰梅事件的大气环流背景。气候突变、旱涝频发等问题对区域生态稳定、防灾减灾带来了一系列连锁危机。松潘县地处青藏高原东缘,是岷江源头,也是岷江流域、成都平原生态屏障的重要组成部分,作为川西北生态系统中重要一环,松潘地区生态环境在维持系统功能、生物多样性等方面有着不可或缺的地位。但由于其特殊的区位条件,也是属于全球气候变化的敏感区,气候突变下的气温降水异常、旱涝等极端气候事件频发等严重威胁着地区农业生产和生态稳定。因此,开展本区的气温降水变化、旱涝演替、监测、防灾减灾研究有着重要现实意义。本文利用松潘县 1960—2015 年的气温、降水连续观测数据,基于 Z 指数对该区气温突变前后气候变化、旱涝演变情况进行分析讨论,对区域气候变化、防灾减灾、流域生态建设等方面研究具有重要科学参考价值。

1 研究区概况

松潘县^[11]位于四川省阿坝州东北部,介于 32°06′—33°09′ N,102°38′—104°15′ E,面积约 8 486 km²,地处岷山山脉中段,地貌东西差异显著,由东南陡峻的壁峰、狭窄的沟谷向西北缓而开阔的丘状高原及高平原过渡,县境西北高,东南低,河流密布,是岷江、涪江水系发源地。松潘县小气候多样且灾害性天气活动频繁。年均降雨量约 720 mm,干湿季分明,

雨季降雨量占全年降雨量的 72% 以上。多年平均气温 5.7℃,多大风天气^[12]。

2 资料与方法

本文采用松潘县气象站的逐月气象资料进行分析,其降水、气温数据均来自国家气象信息中心(<http://data.cma.cn/>)的实测资料,完整可靠。对数据的季节分析以常见的气象划分法作为四季划分依据,即以 3—5 月为春季,6—8 月为夏季,9—11 月为秋季,12 月—次年 2 月为冬季。

计算松潘县年平均气温、极端气温、降水量的变化趋势,并利用 SPSS, MATLAB 等软件平台中的最小二乘法、一般线性模型、Mann-Kendall 法、小波分析等方法进行趋势分析、显著性检验、突变检验、周期变化等分析,其具体原理和过程详见参考文献^[13—14]。

旱涝 Z 指数法是能较明显地确定区域旱涝等级的方法,在我国广泛应用于宏观分析长时段的旱涝标准^[15],尤其是应用在单站旱涝指标中^[16]。主要涉及公式为:

$$Z_i = \frac{6}{C_s} \left(\frac{C_s}{2} \varphi_i + 1 \right)^{\frac{1}{3}} - \frac{6}{C_s} + \frac{C_s}{6} \quad (1)$$

$$C_s = \frac{1}{n\sigma^3} \sum_{i=1}^n (x_i - x)^3 \quad (2)$$

$$\varphi_i = \frac{x_i - x}{\sigma} \quad (3)$$

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_i - x)^2} \quad (4)$$

$$x = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i \quad (5)$$

式中: Z_i 为旱涝指数; C_s 为偏态系数; φ_i 为标准变量; x_i 为某一时段的降雨量(mm); n 为样本数; x 为时段尺度下这 n 年的平均降雨量(mm); σ 为标准差。

根据 Z 变量的正态分布曲线,将其划分为 7 个旱涝等级,见表 1。

表 1 Z 指数指标下的旱涝等级及其频次

Z 指数范围	旱涝等级	数值等级	发生频次
(1.645, +∞)	重涝	1	3
(1.037, 1.645]	大涝	2	3
(0.842, 1.037]	偏涝	3	8
[-0.842, 0.842]	正常	4	28
[-1.037, -0.842)	偏旱	5	3
[-1.645, -1.037)	大旱	6	8
(-∞, -1.645)	重旱	7	3

3 结果与分析

3.1 气候变化分析

3.1.1 年均气温与极端气温变化 1960—2015 年松潘县年均气温呈显著上升趋势(图 1),通过了 95%水平下的显著性检验。气温的年际变化率是 0.24℃/10 a,明显高于我国中部、华南地区近 50 a 年均气温上升速率^[17]。年均气温最高值出现在 2006 年的 7.28℃;最低值出现在 1977 年的 5.06℃。由松潘县四季平均气温线性倾向变化表(表 2)可知,各季节增温幅度不一,冬季增温最为显著。

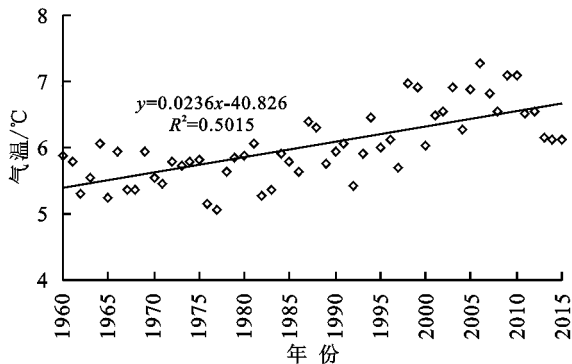


图 1 1960—2015 年松潘县年均温变化

表 2 松潘县季节平均气温线性倾向变化

季节	线性方程	相关系数	季节气温变化率/ (℃/10 a)
春季	$y=0.013x-19.50$	0.126	0.13
夏季	$y=0.019x-24.95$	0.236	0.19
秋季	$y=0.024x-42.45$	0.300	0.24
冬季	$y=0.036x-75.44$	0.439	0.36

注:方程中的 y 表示季节平均气温,x 表示年份。

为更好地分析近 56 a 来气温变化,做出松潘县年均极端气温变化图(图 2)。可知,松潘县年均极端高温的波动范围在 19.42~23℃,且呈现出波动增加态势,但在 20 世纪 90 年代明显偏低。年均极端低温的波动范围为-7.51~-3.84℃,显著波动增加,上升速率达 0.44℃/10 a,1990 年后明显整体偏高。松潘县年均气温的上升,年均极端低温的贡献率更大。

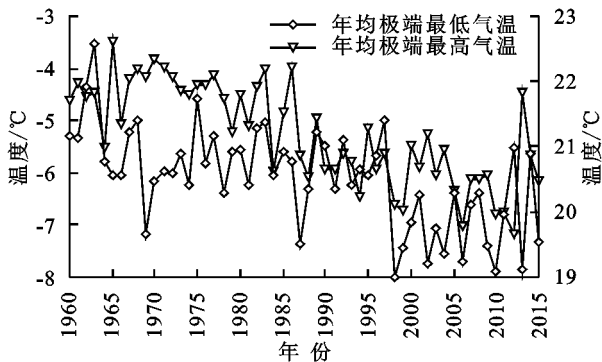


图 2 1960—2015 年松潘县年均极端温度变化

3.1.2 年均气温突变检验 图 3 是基于 MATLAB 的松潘县年均气温的 Mann-Kendall 突变分析结果。可知,1980 年以后,UF 曲线一直大于 0,且呈现出增加趋势。说明从 1980 年开始,本地年均气温整体上凸显了上升态势,持续时间较长,通过了 0.05 下的显著性水平检验。UF,UB 曲线在其置信区间内的 1994 年出现交叉,说明年均气温在 1994 年前后发生了突变。1980—1994 年均气温的距平值为-0.15℃,1995—2015 年的距平值达 0.5℃。可推断,从 20 世纪 80 年代开始,本地逐渐进入暖期,1994 年后增温迅速。甄硕等^[18]在研究 1967—2014 年若尔盖气候变化时指出,若尔盖高原蒸发量在 1994 年、1999 年突变,气温在 1997 年突变,研究都表明在 20 世纪 90 年代中后期气候发生了突变。

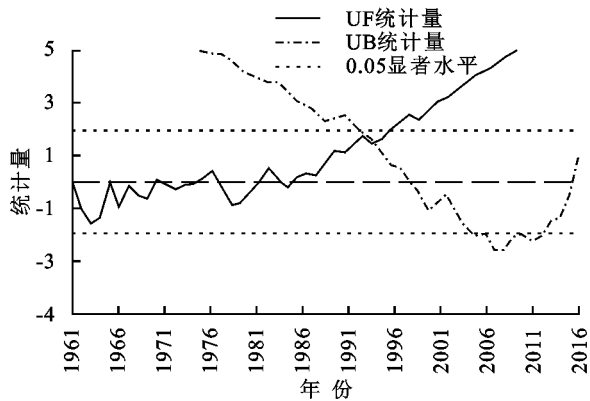


图 3 松潘县年均气温突变分析

3.1.3 松潘县降水量变化 应用气候倾向率对松潘县近 56 a 来降水量进行分析,松潘县多年平均降水量为 719.69 mm,不同年代降水波动性较大,呈现不明显减少趋势,但未通过 95%的显著性检验。年降水累积距平是年降水量值与多年平均值偏差的累加,距平累积序列可直观地确定降水量的年际变化特点^[19-20]。年降水累积距平值持续增大时,说明该时期年均降水距平持续大于 0;年降水量距平累积持续变小时,表明该时段内年均降水距平持续小于 0。做出松潘县年降水量累积距平变化曲线图(图 4)。可知,20 世纪 70 年代到 80 年代中期年降水量明显增加,且多处于丰水年状态。1978 年累积距平值最大,高达 205.27 mm。1994 年前后直到 21 世纪初,降水量波动减少,降水年际变化较大。2008 年累积距平值最低,达-314.26 mm。但近年来降水又呈增加态势。研究表明^[9,18,21-22],阿坝州在 1961—1989 年降水整体呈上升趋势;1990—2014 年整体呈下降趋势。附近的若尔盖高原 20 世纪 90 年代以来气温上升趋势明显,气候整体上朝暖干化方向发展。这与本文的研究结论大致一致。

松潘县近 56 a 来降水总体呈不明显减少趋势。各季节降水变化不一,夏秋季降水量为下降趋势;冬春季降水量呈上升趋势。只有春季降水变化通过了 0.05 的显著性检验,且春季降水的变化率最大。由松潘县季节降水量变化表(表 3)可知,冬春季降水在气温突变前的距平值均为负值,低于多年平均降水量;在突变后,距平值皆转为正值,降水量增多。而夏秋季降水变化则相反,在突变以后,整体呈少雨趋势,其中夏季降水在 1995—2015 年的距平值最大,减少最为明显。本地年均降水量的减少趋势应与夏秋降水减少紧密相关。季节降水变化的复杂化,也加剧了松潘地区旱涝灾害频度。

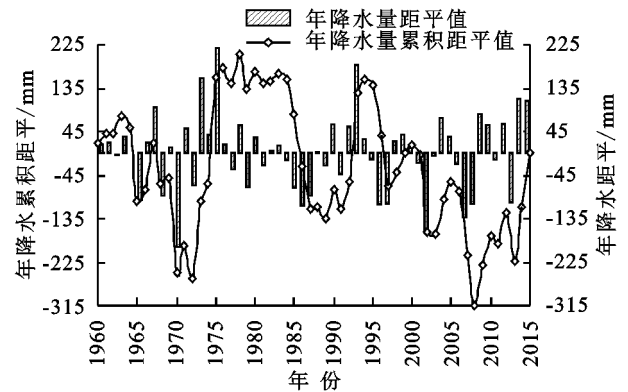


图 4 松潘县年降水量累积距平变化

表 3 松潘县季节降水量变化

季节	突变前降水	突变后降水	季节降水变化率/ (mm/10 a)
	距平值/mm	距平值/mm	
春季	-3.75	6.25	2.61
夏季	4.00	-6.67	-1.16
秋季	1.47	-2.45	-1.22
冬季	-0.34	0.57	0.19

3.1.4 松潘县旱涝灾害变化特征 降水量突增、强降水事件频发、降水量锐减是诱发旱涝灾害的主要因素。某时期降水量与多年平均值之间的偏差可在一定程度上说明旱涝的程度。参考研究成果^[8],利用 Z 指数等级来表示松潘县长期旱涝等级变化(图 5)。依据表 1 划分标准,近 56 a 来松潘县共计旱涝灾害 28 次,平均每 2 a 发生一次。由图 5 可知,洪灾、旱灾各 14 次,发生频率均为 25%。大涝及以上洪灾 6 次,发生频率为 10.71%;偏涝 8 次,频率为 14.29%。偏旱 3 次,频率为 5.36%。大旱及以上旱灾 11 次,频率为 19.64%。从灾情上看,松潘地区旱涝灾害以中度以上为主,受灾影响严重。

为了更好反馈旱涝变化情况,对气温突变前后的旱涝频率进行计算,做出气温突变前后旱涝灾害频率变化图(图 6)。可知,1960—1994 年这 35 a 间,本区正常年份 19 次,重旱 2 次、大旱 3 次;偏旱 3 次;偏涝 4 次,大涝 1

次,重涝 3 次。气温突变后,1995—2015 年这 21 a 间,正常年份有 9 a,大早有 5 次,大涝有 2 次,偏涝有 4 次;重旱 1 次。旱涝出现频率为 57.14%,高出 1994 年以前的旱涝出现频率 11.43%。虽然气温突变以后,重涝、重旱等极端灾害出现频率没有增多,但是大旱、涝灾出现的频率激增,旱涝灾害更加频发。

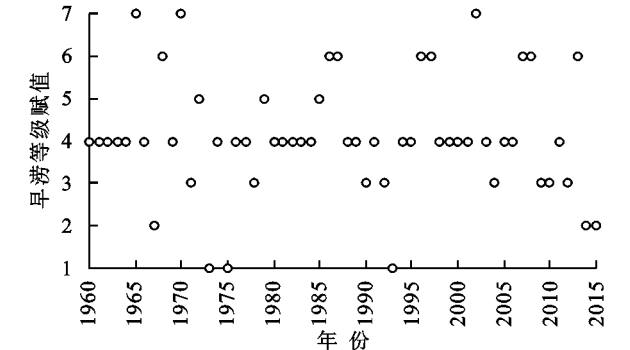


图 5 Z 指数下的松潘县旱涝等级变化

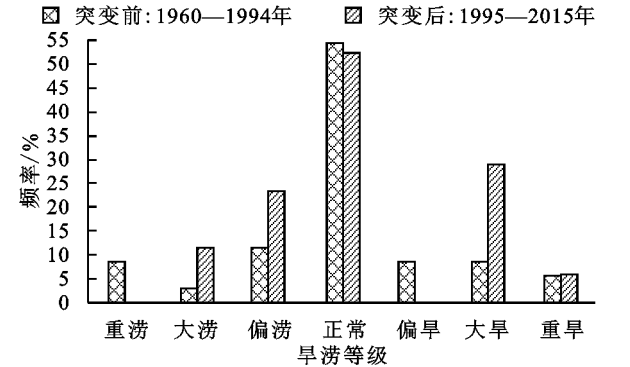


图 6 松潘县气温突变前后旱涝灾害频率变化

根据前人研究成果和当地实际,将持续 3 年及以上的旱涝灾害定义为重大旱涝事件。经统计,1985—1987 年连续 3 年发生旱灾,且以大旱为主,3 年的年降水距平值均小于 -71 mm,远低于往年正常降水均值。据地方志记载,1987 年上半年,沿河一带严重干旱,麦类、洋芋出苗不壮,严重减产。2009—2012 年连续 4 年当地均为偏涝年份,降水均大于多年平均值。2012 年入夏以后,连续 60 多天的降雨造成松潘县发生洪灾,其中 6 月 29 日的特大暴雨袭击,致使多个乡镇停电、出现泥石流灾害,沿途农田被冲毁。这两个时段均可认为是重大旱涝事件,旱涝灾害与降水量的大增、锐减有很大关联性。

3.1.5 周期变化特征 基于 MATLAB 的 Morlet 小波计算可对区域旱涝灾害的时间分布序列进行有效分析^[23]。图 7 是松潘县 Z 指数数值的 Morlet 小波系数实部等值线图。可知,1960—1990 年旱涝变化存在 10~11 a 附近的震荡周期;1991—2015 年的震荡周期约 4 a, 9 a。太阳黑子活动除了呈现规律明显的约 11 a, 22 a 周期外,还有 9.8 a, 10 a 等周期变化^[24]。本区旱涝灾害的震荡周期与太阳活动周期高度接近。

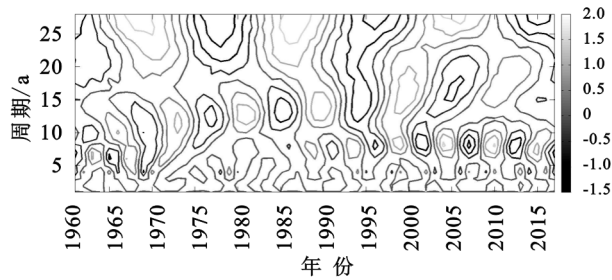


图7 松潘县旱涝Z指数的小波分析

3.2 太阳黑子与松潘县旱涝关系讨论

3.2.1 太阳黑子与旱涝的相关性分析 太阳活动的周期变化是引发旱涝等自然灾害爆发的重要因子,降水极值变化与太阳黑子数极值变化相联系,在太阳黑子极值年附近易出现旱涝灾害。根据国际上对太阳黑子最小/最大循环规定^[25]及参考比利时皇家天文台提供的太阳黑子数据(<http://www.sidc.oma.be/silso/datafiles>)可知,太阳黑子已完成第24个最小/最大周期活动。太阳黑子数的极大值年用M表示,极小值年用m表示。1960—2015年期间,出现了5个m年,分别是1964年、1976年、1986年、1996年、2008年,在这5个m年的前后一年里,太阳黑子数量也分别处于低谷区。5个M年:1968年、1979年、1989年、2001年、2014年,在这5个M年的前后一年里,太阳黑子数量也分别处在高峰期。为分析太阳黑子变化与旱涝关系,做出旱涝Z指数与太阳黑子数的关系图(图8),可知,各年太阳黑子数与对应时段的Z指数具有明显相关关系。在太阳黑子数到达极值年附近均有大、特大旱涝灾害发生。1968年、1986年、1996年、2014年太阳黑子数达到峰值时,当年均有(特)大旱涝发生。1964年、1976年、1986年、1996年、2001年、2008年、2014年是太阳黑子的极值年,在其 ± 1 a,本地也均有(特)大旱涝发生。说明松潘县Z指数变化与太阳黑子活动存在较强的匹配性。即,太阳黑子数达到峰值当年或者前后一年,Z指数也会相应的升高或降低。

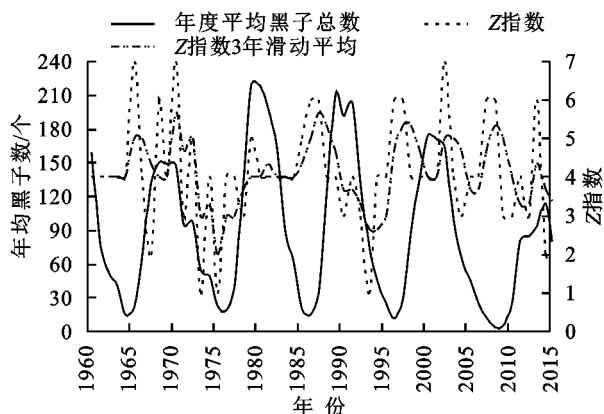


图8 旱涝Z指数与太阳黑子数的关系

3.2.2 太阳黑子极值年附近的旱涝灾害 近56a来,在太阳黑子活动极值年及其前后一年发生的旱涝灾害达18次,占总旱涝灾害数的64.29%。在这5个极小值m年中,1986年、1996年、2008年当地均大旱。m年前后一年:重旱1次,大旱3次,重涝1次,偏涝1次。在这5次m年及其前后一年的旱涝灾害中,旱涝发生年数占这15a间的60%。其中,主要发生的是旱灾,旱灾次数占到77.78%。在5个极大值M年中,1968年、1979年、2014年均有旱涝灾害发生,大旱、偏旱、大涝各一次。M年前后一年:重旱1次,大旱1次,大涝2次,偏涝2次。在这5次M年及其前后一年的旱涝灾害中,旱涝发生年数也占这15a间的60%。其中,主要发生的是洪涝灾害,旱灾、洪灾次数各占到44.44%,55.56%。由此,在太阳黑子极值年及其附近年出现旱涝灾害的概率更高,应加强当地的防灾减灾工作。在极大值年和极小值年出现旱涝灾害的几率一样,但在极小值年附近出现旱灾的频率更高。

4 结论

(1) 1960—2015年松潘县年均气温呈显著上升趋势,气温的年际变化率是 $0.24^{\circ}\text{C}/10\text{a}$,高于同期全国其他地区上升率。年均极端低温在1990年开始明显整体偏高。松潘县年均气温的上升,年均极端低温的贡献率更大。通过Mann-Kendall突变分析检验,年均气温在1994年前后气候发生突变,1994年后增温增速。

(2) 松潘县多年平均降水量呈现不明显减少趋势,降水波动性较大。冬春季降水呈现增加趋势,夏秋季降水呈现减少趋势。气候突变后,季节降水变化更加复杂化,加剧了松潘地区旱涝灾害频度变化。

(3) 近56a来松潘县共计旱涝灾害28次,平均2a发生一次。洪灾、旱灾各14次,发生频率均为25%。以中度旱涝灾害以上为主。气候突变以后的旱涝出现频率高出突变前11.43%。气温突变以后,大旱、涝灾出现的频率激增,旱涝灾害更加频发。

(4) 1985—1987年、2009—2012年这两个时段认定为重大旱涝事件。旱涝灾害与降水量的大增、锐减存在极大关联性。

(5) 1960—1990年旱涝灾害存在10~11a附近的震荡周期;1991—2015年旱涝震荡周期约为4a,9a。松潘县旱涝与太阳黑子周期关系密切,Z指数变化与太阳黑子活动存在较强的匹配性,太阳黑子数达到峰值当年或者前后一年,Z指数也会相应升高或降低。在太阳黑子极值年及其附近年出现旱涝灾害的概率更高,应加强当地的防灾减灾工作。在极大值年和极小值年出现旱涝灾害的几率一样,但在极小值年附近出现的旱灾频率更高。

参考文献:

- [1] 秦鹏程,刘敏,杜良敏,等.气候变化对长江上游径流影响预估[J].气候变化研究进展,2019,15(4):405-415.
 - [2] 赵宗慈,罗勇,黄建斌.回顾 IPCC 30 年(1988—2018 年)[J].气候变化研究进展,2018,14(5):540-546.
 - [3] 郑景云,葛全胜,张丕远.气候突变:史实与意义[J].地球科学进展,1999,14(2):3-5.
 - [4] 王雨茜,杨肖丽,任立良,等.长江上游气温、降水和干旱的变化趋势研究[J].人民长江,2017,48(20):39-44.
 - [5] 袁文平,周广胜.标准化降水指标与 Z 指数在我国应用的对比分析[J].植物生态学报,2004,28(4):523-529.
 - [6] 王帅兵,李常斌,杨林山,等.基于标准化降水指数与 Z 指数的洮河流域干旱趋势分析[J].干旱区研究,2015,32(3):565-572.
 - [7] 刘志雄,肖莺.长江上游旱涝指标及其变化特征分析[J].长江流域资源与环境,2012,21(3):310-314.
 - [8] 齐冬梅,李跃清,王莺,等.基于 Z 指数的四川干旱时空分布特征[J].干旱气象,2017,35(5):734-744.
 - [9] 戴洋,罗勇,王长科,等.1961—2008 年若尔盖高原湿地的气候变化和突变分析[J].冰川冻土,2010,32(1):35-42.
 - [10] 郑景云,孙迪,刘可邦,等.过去 300 a 长江中下游异常丰梅事件变化与洪涝灾害[J].自然资源学报,2016,31(12):1971-1983.
 - [11] 李旭岷.岷江上游松潘县生态环境监测与评价[D].成都:成都理工大学,2012.
 - [12] 松潘县志编纂委员会.松潘县志[M].北京:民族出版社,1999.
 - [13] 边玉明,代海燕,张秋良,等.气温突变下内蒙古大兴安岭林区旱涝演变[J].灌溉排水学报,2018,37(4):106-112.
 - [14] 魏风英.现代气候统计诊断与预测技术[M].北京:气象出版社,1999.
 - [15] 孔锦涛,赵春子.基于 Z 指数的延边朝鲜族自治州旱涝变化研究[J].云南师范大学学报:自然科学版,2017,37(5):70-73.
 - [16] 鞠笑生,杨贤为,陈丽娟,等.我国单站旱涝指标确定和区域旱涝级别划分的研究[J].应用气象学报,1997,8(1):27-34.
 - [17] 刘可群,王海军,王凯,等.我国中部年、季平均气温变化的趋势性分析[J].长江流域资源与环境,2010,19(S1):62-66.
 - [18] 甄硕,索朗夺尔基,董李勤,等.若尔盖高原 1967—2014 年气候变化特征分析[J].西南林业大学学报,2016,36(5):138-143.
 - [19] 曹小雪,黄建武,揭毅.近 52 年来武汉市气候变化特征分析[J].江西农业学报,2014,26(9):80-85,89.
 - [20] 穆兴民,李靖,王飞,等.黄河天然径流量年际变化过程分析[J].干旱区资源与环境,2003,17(2):1-5.
 - [21] 李金建,邵雪梅,李媛媛,等.树轮宽度记录的松潘地区年平均气温变化[J].科学通报,2014,59(15):1446-1458.
 - [22] 甄英,何静.青藏高原东南缘阿坝州降水变化时空特征及突变性分析[J].水土保持研究,2018,25(4):195-199.
 - [23] 胡浩楠,刘引鸽,马凯.渭河流域百年尺度水旱特征及其影响因素[J].水土保持通报,2020,40(2):255-262.
 - [24] 曹永强,刘佳佳,高璐.近 54 年来辽西北地区降水与太阳黑子关系研究[J].地理科学,2015,35(8):1027-1032.
 - [25] 窦睿音,延军平.关中平原太阳黑子活动周期与旱涝灾害的相关性分析[J].干旱区资源与环境,2013,27(8):76-82.
- ~~~~~
- (上接第 164 页)
- [17] 黄奕龙,陈利顶,傅伯杰,等.黄土丘陵小流域地形和土地利用对土壤水分时空格局的影响[J].第四纪研究,2003,23(3):334-342.
 - [18] 朱德兰,吴发启.不同地形部位土壤水分的年变化分析[J].中国水土保持科学,2003,1(4):28-31.
 - [19] 梁宁霞.小流域尺度地形对土壤水分的影响及尺度效应[D].陕西杨凌:西北农林科技大学,2014.
 - [20] 张军,邸利,陈微尼,等.陇东黄土高原区人工刺槐林树干液流数据集(2017—2019)[J].全球变化数据学报,2020,4(1):60-67.
 - [21] 王迪海,赵忠,李剑.土壤水分对黄土高原主要造林树种细根表面积季节动态的影响[J].植物生态学报,2010,34(7):819-826.
 - [22] 王迪海.土壤水分对黄土高原主要造林树种细根表面积季节动态的影响[D].陕西杨凌:西北农林科技大学,2010.
 - [23] 李剑,赵忠,袁志发,等.黄土高原刺槐林地土壤水分垂直分布特征及其动态模型的建立[J].西北植物学报,2014,34(8):1666-1675.
 - [24] 胡小宁,赵忠,袁志发,等.黄土高原刺槐林细根生长与土壤水分的耦合关系[J].林业科学,2010,46(12):30-35.
 - [25] 孔凌霄,毕华兴,周巧稚,等.晋西黄土区不同立地刺槐林土壤水分动态特征[J].水土保持学报,2018,32(5):163-169.
 - [26] 安文明,韩晓阳,李宗善,等.黄土高原不同植被恢复方式对土壤水分坡面变化的影响[J].生态学报,2018,38(13):4852-4860.
 - [27] 张瑞,曹华,王云强,等.黄土丘陵沟壑区小流域土壤水分空间变异性及其影响因素[J].水土保持研究,2012,19(5):52-58.
 - [28] 易彩琼,王胜,樊军.黄土高原坡地退耕恢复草地的土壤水分动态[J].草地学报,2015,23(6):1182-1189.
 - [29] 祝倩.晋西北黄土区 3 种植被类型土壤含水量变化特征研究[D].太原:山西大学,2014.