

三峡库区气象干旱演变特征及致灾因子危险性评价

郑金涛¹, 彭涛^{1,2,3}, 董晓华^{1,2,3}, 刘冀^{1,2,3}, 常文娟^{1,2,3}, 林青霞^{1,2,3}, 王佳宝¹

(1.三峡大学 水利与环境学院, 湖北 宜昌 443002; 2.水资源安全保障湖北省协同创新中心, 武汉 430072; 3.三峡库区生态环境教育部工程教育中心, 湖北 宜昌 443002)

摘 要:近年来三峡库区干旱灾害发生的强度和频率呈现加剧趋势,因此识别干旱的时空特征及致灾因子危险性,对于区域干旱预警和防旱减灾具有重要意义。利用三峡库区及周边地区 18 个气象站 1960—2015 年共 56 年的降水资料,采用标准化降水指数(SPI),运用游程理论和 Mann-Kendall 检验法分析了气象干旱时空演变特征,并进一步评估了三峡库区干旱致灾因子危险性。结果表明:(1) 三峡库区年尺度的 SPI 值呈现平缓下降趋势,整体趋向全域干旱化,1989 年为突变年;(2) 各季节干旱站次比变化不大,总体呈缓慢上升趋势;夏、秋季干旱强度表现为上升趋势,春、冬季则相反;四季中,干旱强度和干旱站次比增幅最为显著的是秋季;干旱强度按冬、春、夏和秋季的顺序依次减小;(3) 各季节 SPI 值存在明显的空间差异性,春季三峡库区东北部 SPI 值呈下降趋势,而西南部总体表现为不显著上升趋势,夏季则与春季相反;秋季全域化干旱趋势较为显著;冬季中西部 SPI 值呈不显著下降趋势,而东北地区呈现不显著上升趋势;(4) 春、夏、秋季干旱频率较低的地区主要分布在三峡库区东北部,干旱频率较高地区则呈现显著的空间差异,冬季则相反;干旱频率大小随春、夏、秋和冬季逐渐增大;(5) 三峡库区季尺度干旱危险性空间分布整体表现为中等和较低级别,春、夏季危险性等级总体处于中、低危险性,秋、冬季则整体呈现为中等危险性。秋、春、冬和夏季干旱致灾危险性依次递减。研究结果可为三峡库区水资源管理和干旱风险评估提供参考依据。

关键词:气象干旱; 标准化降水指数; 时空分布; 致灾危险性; 三峡库区

中图分类号:P426.616

文献标识码:A

文章编号:1005-3409(2020)05-0213-08

Evolution Characteristics of Meteorological Drought and Assessment of Risk of Disaster Factors in the Three Gorges Reservoir Area

ZHENG Jintao¹, PENG Tao^{1,2,3}, DONG Xiaohua^{1,2,3}, LIU Ji^{1,2,3},
CHANG Wenjuan^{1,2,3}, LIN Qingxia^{1,2,3}, WANG Jiabao¹

(1.College of Hydraulic & Environmental Engineering, China Three Gorges University, Yichang, Hubei 443002, China;
2.Hubei Collaborative Innovation Center for Water Resources Security, Wuhan 430072, China; 3.Engineering Education Center of Ecological Environment of the Three Gorges Reservoir Area, Ministry of Education, Yichang, Hubei 443002, China)

Abstract: In recent years, the intensity and frequency of drought disasters in the Three Gorges Reservoir Area (TGRA) have shown an aggravating trend. Therefore, it is of great significance to identify the spatial-temporal characteristics of drought and the risk factors of drought. The precipitation data of 18 meteorological stations in the TGRA and surrounding area from 1960 to 2015 were used to analyze the spatial-temporal evolution characteristics of meteorological drought, and further evaluate the risk of drought disaster factors in the TGRA based on the standardized precipitation index (SPI), run theory, and Mann-Kendall test. The results showed that: (1) the annual SPI value in the TGRA indicated a slow downward trend, and the whole area tended to be arid, with an abrupt change point in 1989; (2) there was not significant change in drought station ratio in each season, and it showed a slowly increasing trend in general; the drought intensity in summer and autumn showed an upward trend, while it was the opposite in spring and winter; among the

收稿日期:2020-02-28

修回日期:2020-03-10

资助项目:国家重点研发计划项目(2017YFC0405603,2017YFC0405606);国家自然科学基金(51709151);水电工程水文气象重大关键技术应用研究(DJ-ZDZX-2016-02)

第一作者:郑金涛(1999—),男,辽宁朝阳人,本科在读,从事水文与水资源方面的研究。E-mail:870428401@qq.com

通信作者:彭涛(1973—),男,湖南保靖人,副教授,博士,从事水文水资源与生态水文方面的研究。E-mail:pengtao306@163.com

four seasons, the most significant increase of drought intensity and drought station ratio was autumn; the drought intensity decreased in the order: winter > spring > summer > autumn; (3) the SPI value of each season had obvious spatial difference; in spring, the SPI value in the northeast area of the TGRA showed a decreasing trend, while the SPI value in the southwest of TGRA exhibited an insignificant increasing trend; the SPI value in summer was the opposite of that trend in spring; in autumn, drying trend was more significant in almost the entire TGRA; in winter, the SPI value in the mid-west of the TGRA showed an insignificant decline, while those in the northeast of TGRA presented an insignificant increase; (4) the areas with low drought frequency in spring, summer and autumn mainly distributed in the northeast of the TGRA, while the areas with high drought frequency showed significant spatial differences; the spatial distribution of drought frequency in winter was opposite to that in other seasons; the drought frequency increased gradually in the sequence: spring < summer < autumn < winter; (5) the spatiotemporal distribution of seasonal drought risk in the TGRA generally was medium and relatively low level; the risk levels of spring and summer were generally medium and low, respectively, while those of autumn and winter were medium; the drought disaster risk decreased in the sequence: autumn > spring > winter > summer. These results can provide reference for water resources management and drought risk assessment in the TGRA.

Keywords: meteorological drought; SPI; spatial-temporal distribution; disaster risk; the Three Gorges Reservoir Area

近年来,由于全球各种极端气象灾害事件的频发和气候变化的直接影响,干旱逐渐成为对人类影响最大的自然灾害之一^[1],对人类经济社会发展和生态环境状况等都造成了巨大影响^[2]。我国北方大部 and 南方部分地区频繁发生的干旱以及由于干旱缺水所造成的社会、经济和生态环境损失巨大,对我国经济社会的可持续发展产生严重影响^[3]。据统计,平均每年我国旱灾受灾面积占比高达 55%,在各类自然灾害中所占比例最大,干旱区域的扩展在近 30 a 里表现为由北向南、由西向东的趋势^[4]。因此,研究区域气象干旱的演变特征及致灾因子危险性,对于区域干旱预警和防旱减灾具有重要意义。

干旱现象是指某一地区水分条件较当地自然正常情况持续性偏少的一种自然现象^[5],主要分为气象干旱、农业干旱、水文干旱和社会经济干旱^[6],其中气象干旱评估是农业干旱、水文干旱和社会经济干旱的监测和预警的基础^[7]。近年来,国内外学者对不同地域的不同气象干旱开展了许多深入研究,提出了综合气象干旱指数^[8]、帕尔默干旱烈度指数(PDSI)^[9]、降水距平百分率指数(Pa)、GEV 干旱指数^[10]、SAPI 指数^[11]、降水平均等待时间指数(AWTP)^[12]、标准化降水蒸散发指数(SPEI)^[13]、标准化降水指数(SPI)^[14]等气象干旱指数。邹旭恺等^[15]采用综合气象干旱指数 CI 对过去 60 a 我国及十大江河流域的干旱变化趋势进行了分析统计;张永等^[16]对 61 a 来我国西北地区的季节均值和年均值利用帕尔默干旱指数进行了分析;Vi-

cente-Serrano 等采用 SPEI 对全球变暖和全球干旱气候进行分析,发现 SPEI 是一种对全球变暖敏感程度较高的干旱指数;对以上干旱指数的比较表明,SPI 指数计算方便、能有效地消除降水时空分布差异,可以反映不同时期各个地区的旱涝状况^[17]。

三峡库区作为重要的生态廊道,对推进长江流域的经济社会可持续发展具有不可替代的作用。库区属亚热带季风气候,受降水及地形地貌等因素的影响,干旱已经成为三峡库区最常见、影响最广的气象灾害^[18]。目前,国内学者对于三峡库区的干旱变化特征作了许多研究。如何永坤等^[19]应用干旱动态评估指数,分析了三峡库区春旱、夏旱和伏旱的变化,并预测三峡工程建成后库区的干旱程度将有所降低;张强等^[20]分析了三峡库区 2006 年夏季的气候特征,同时根据降水资料详细剖析了高温和干旱的主要成因;叶殿秀等^[18]利用三峡库区 1961—2006 年逐日降水量等资料,分析得出库区年平均干旱日数缓慢增长;刘晓冉等^[21]依据三峡库区近 58 a 的降水数据,采用 Z 指数对三峡库区夏季干旱和洪水的变化进行了分析。但上述研究侧重单一干旱特征变量分析库区的气象干旱时间变化规律,忽视了干旱多变量空间演变的属性特征,且对气象干旱因子致灾危险性评价研究甚少。基于此,本文选用 SPI 指数、采用干旱强度、站次比和干旱频率等指标研究三峡库区气象干旱多变量的时空分布特征,并对三峡库区季尺度干旱致灾因子危险性空间格局进行评价,为三峡库区干旱评估和

可持续水资源管理提供参考依据。

1 资料与方法

1.1 研究区概况

三峡库区位于长江上游,涉及因三峡水库修建而被淹没的湖北省秭归县、兴山县、夷陵区、巴东县以及重庆市巫山县、巫溪县、奉节县、云阳县、开县、万州区、忠县、涪陵区、丰都县、武隆县、石柱县、长寿区、渝北区、巴南区、江津区和重庆核心城区等,总面积约为 5.8 万 km²。库区年降水量 1 000~1 400 mm,降水主要集中在 4—9 月,年平均气温 17~19℃。研究表明,三峡水库蓄水后库区年降水量并没有发生显著变化^[22]。三峡库区的主要地貌特征为东南地势高,西北地势低,高差较大。

1.2 数据来源

本文所用数据资料全部来自中国气象科学数据共享服务网(<https://www.nmic.cn/>)提供的湖北省、四川省和重庆市共 54 个气象站的降水资料,从中选取三峡库区及周边地区 18 个气象站 1960—2015 年的逐日平均降水资料,其中缺测的 2 个站点的部分月份采用线性回归插补进行处理,即将其他相邻站点历年相同月份的数据做时间序列回归处理,以保证数据的完整性。

1.3 研究方法

1.3.1 标准化降水指数(SPI 指数) 标准化降水指数(SPI)结构简单^[23],在降水时空分布不同的情况下可以相互进行比较,由于降水是偏态分布^[24],所以可采用指数中的 Γ 分布来计算相应时段内降水量的累计概率分布,计算公式如下:

$$SPI=S\frac{t-(c_2t+c_1)t+c_0}{[(d_3t+d_2)t+d_1]t+1.0}$$

(1)

$$t=\sqrt{\ln\frac{1}{G(x)^2}}$$

(2)

当 $G(x)>0.5$ 时, $G(x)=1.0-G(x)$, $S=1$; $G(x)\leq 0.5$ 时, $S=-1$ 。其中 $G(x)$ 是降水分布概率; X 为降水量值; S 为概率密度正负系数, $G(x)$ 由以下公式计算:

$$G(x)=\frac{\beta^\gamma}{\beta\Gamma(\gamma)_0}\sum_0^xx^{\gamma-1}e^{-\frac{x}{\beta}}dx,\quad x>0$$

(3)

式中: β, γ 分别为 Γ 分布函数的形状和尺度参数; $c_0=2.515\ 517$; $c_1=0.802\ 853$; $c_2=0.010\ 328$; $d_1=1.432\ 788$; $d_2=0.189\ 269$; $d_3=0.001\ 308$ 。SPI 指数对应的干旱等级划分见表 1^[25]。

1.3.2 游程理论 游程理论是一种对时间序列进行

分析的统计方法^[26],常用于干旱事件的识别。首先计算出 SPI 值,然后使用游程理论将干旱历时(一次干旱事件所持续的时间)和干旱强度(在干旱事件过程中 SPI 的累计值的相反数)这两个特征变量分离。设定 X_0, X_1 和 X_2 (X 表示 SPI 值)为判断干旱事件的 3 个截取水平,利用如下过程对干旱事件进行识别^[27]:

表 1 基于 SPI 指数的干旱等级划分

等级	SPI 值	干旱等级
1	(-0.5, 0.5]	正常
2	(-1.0, -0.5]	轻微干旱
3	(-1.5, -1.0]	中等干旱
4	(-2, -1.5]	严重干旱
5	(-∞, -2]	特旱

(1) 如果某月的 SPI 值小于 X_1 (取 -0.5, 为发生轻微干旱时的 SPI 值) 时, 则此月初步判定为干旱;

(2) 如果某次干旱事件的历时为 1 个月, 当其 SPI 值大于 X_2 (取 -0.3, 为 1 个或多个时段判断干旱事件发生最大值), 则可以认为此月未发生干旱, 划分为非干旱事件;

(3) 如果某 2 次干旱事件发生的时间间隔为 1 个月, 且间隔月的 SPI 值小于 X_0 (取 0), 可以将这 2 次发生的干旱事件综合为 1 次事件。

1.3.3 干旱评估指标 (1) 干旱频率(P_i)。在研究某个区域内某站点在某年份内发生干旱的频繁程度, 通常采用干旱频率进行计算评价, 计算公式为^[28]:

$$P_i=(\frac{n}{N})\times 100\%$$

(4)

式中: i 表示不同测站代号; n 表示此站发生干旱的年数; N 表示资料序列总年数。

(2) 干旱强度(S_{ij})。如果对某区域内干旱严重程度进行评价, 可以用某单站某时段内的 SPI 绝对值, 即干旱强度来代表。干旱强度越小, 代表此地干旱情况不明显。计算公式为^[29]:

$$S_{ij}=\frac{1}{m}\sum_{i=1}^m|SPI_i|$$

(5)

式中: i 为不同测站代号; j 为某年份; m 为发生干旱的站数。

(3) 干旱站次比(P_{ij})。在某区域内干旱发生的站数与全部测站数的比叫做干旱站次比, 表示干旱影响的程度和严重性, 计算公式为:

$$P_j=(\frac{m}{M})\times 100\%$$

(6)

式中: j 为不同年份; m 为某年发生干旱的站点数; M 为站点总数。

1.3.4 Mann-Kendall 检验法 Mann-Kendall 检验

法(简称 M-K 检验)是一种广泛应用于水文气象要素时间序列趋势分析的非参数统计检验方法。在 M-K 趋势检验中,当 $|Z|$ 大于等于 1.96,2.32 时,说明分别通过了 95%和 99%信度检验。 Z 值大于 0 表示上升趋势,小于 0 表示下降趋势。若在 M-K 检验中所绘制的 UF 和 UB 曲线有交点,且交点同时位于在临界线内,则交点的时刻为突变开始的时间^[30]。

1.3.5 干旱致灾因子危险性评价 干旱灾害致灾因子危险性评价是通过干旱强度和干旱频率综合评价一个地区的干旱灾害的危险性等级,用于干旱灾害致灾危险性指数 R 来表示,计算公式如下^[31]:

$$R_i = P_i \times S_i \tag{7}$$

式中: i 表示站点编号; P 表示干旱频率; S 表示干旱强度。计算得出的干旱灾害致灾危险性指数还需要进行归一化处理。计算公式如下:

$$D_i = (R_i - R_{\min}) / (R_{\max} - R_{\min}) \tag{8}$$

式中: i 表示站点编号; D 表示干旱灾害致灾危险性指数归一化值; R_{\max} 表示干旱灾害致灾危险性指数序列最大值; R_{\min} 表示干旱灾害致灾危险性指数序列最小值,等级划分表见表 2^[32]。

表 2 干旱灾害致灾危险性指数等级划分

危险性等级	R 值范围	危险性等级
1	[0,0.15)	较低危险性
2	[0.15,0.5)	低危险性
3	[0.5,0.75)	中等危险性
4	[0.75,0.9)	较高危险性
5	[0.9,1]	高危险性

2 结果与分析

2.1 三峡库区气象干旱时间变化特征

2.1.1 SPI 指数变化趋势及突变特征 由图 1 得知,1960—2015 年三峡库区年尺度的 SPI 值呈现下降趋势,下降速率为 0.049/10 a;SPI 值上下震荡剧烈,但总体表现为平缓下降趋势,有逐渐干旱化的趋势。从年尺度的 SPI 值来看,气象干旱主要发生在 1960—1967 年、1975—1979 年、1993—1997 年、2000—2007 年和 2008—2014 年,其中以 2006 年旱情最为严重(重旱),SPI 值达-1.624。1986—2015 年,SPI 值波动起伏明显,说明极端洪涝和干旱事件发生频繁且强度相对较大。M-K 检验的 UF 曲线结果显示,近 56 a 来三峡库区的 SPI 指数总体呈现下降趋势,在 1964 年超过了 0.05 检验线,其余年份均在 0.05 显著性水平检验线以内,UF,UB 相交在 1989 年,说明 1989 年为突变年份。

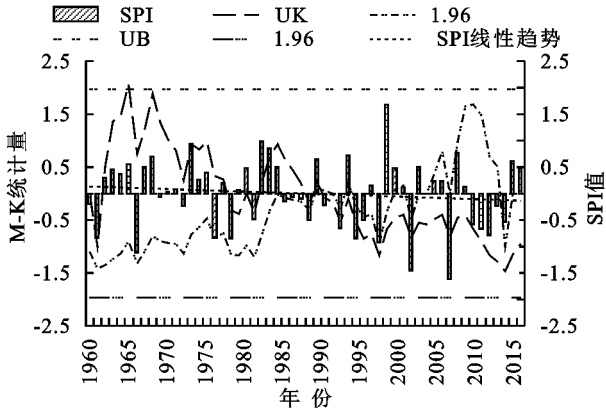


图 1 1960—2015 年三峡库区 SPI 指数的年际变化及 M-K 突变检验

2.1.2 干旱强度和站次比的变化趋势 由图 2 可知,三峡库区 56 a 来各季节站次比都呈现逐年上升趋势,但上升趋势较缓慢,整体变化较稳定;干旱强度春、冬两季呈现下降趋势,夏、秋两季呈现上升趋势。值得注意的是,秋季干旱强度与干旱站次比增加较为明显,皆为四季最高值。

春季,三峡库区干旱站次比为 0%~88.89%,最大值发生在 1965 年。干旱站次比总体呈现缓慢增长趋势,平均增长率为 0.013/10 a,共有 7 a 全域无干旱事件发生;自 1990 年后干旱站次比在 50%以上的区域性干旱事件频繁发生,说明近 30 a 来春季干旱区域较大;干旱强度波动与站次比波动相似度较高,干旱强度变化趋势率为 0.025/10 a,呈现缓慢下降趋势。在 1960—2015 年 56 a 中,不明显干旱发生年份占 14.29%,轻微干旱年份占 44.64%,中度干旱年份占 33.93%,重度干旱占 7.13%。

夏季,三峡库区干旱站次比发生范围为 0%~94.44%,最大值出现在 2005 年。干旱站次比趋向缓慢增长,平均增长率为 0.004/10 a,在四季中平均增幅最小。共有 9 a 全域无干旱事件发生,1980—2007 年全域无干旱事件发生较为集中,共发生 8 次;干旱站次比在 50%以上的区域性干旱事件在 56 a 中分布较为均匀;干旱强度变化趋势率为 0.016/10 a,呈现缓慢上升趋势。2006 年干旱强度为历年最大值。在 1960—2015 年 56 a 中,不明显干旱发生年份占 16.07%,轻微干旱年份占 46.43%,中度干旱年份占 33.93%,重度干旱占 3.57%。

秋季,三峡库区干旱站次比发生范围为 0%~88.89%,最大值出现在 1998 年、2009 年。干旱站次比呈现较明显增长趋势,平均增长率为 0.05/10 a,在四季中平均增幅最大。1960—1989 年全域无干旱事件发生较为集中,共发生 10 次;干旱站次比在 50%以上的区域性干旱事件在 1990 年后频繁发生;干旱

强度变化趋势率为 0.084/10 a,呈现较为显著上升趋势,为四季中最高。干旱强度最大发生在 1991 年,在 1960—2015 年 56 a 中,不明显干旱发生年份占 19.64%,轻微干旱年份占 44.64%,中度干旱年份占 35.72%,重度干旱占 0%。

冬季,三峡库区干旱站次比发生范围为 0%~88.89%,最大出现在 1983 年、1993 年、2009 年。干旱站次比趋向缓慢下降,平均下降率为 0.024/10 a。共有 1 a 全域无干旱事件发生,为 1992 年;干旱站次

比在 50%以上的区域性干旱事件发生地区广,发生年份均匀分布在 56 a 间,值得注意的是,2009—2013 共五年连续发生区域性干旱事件;干旱强度变化趋势率为 0.022/10 a,呈现缓慢下降趋势。干旱强度最大值发生在 1961 年;除 1986—1994 年波动较为明显外,其余年份干旱强度均在平均值上下波动。在 1960—2015 年 56 a 中,不明显干旱发生年份占 1.79%,轻微干旱年份占 28.57%,中度干旱年份占 60.71%,重度干旱占 7.13%,干旱较其余三个季节更明显。

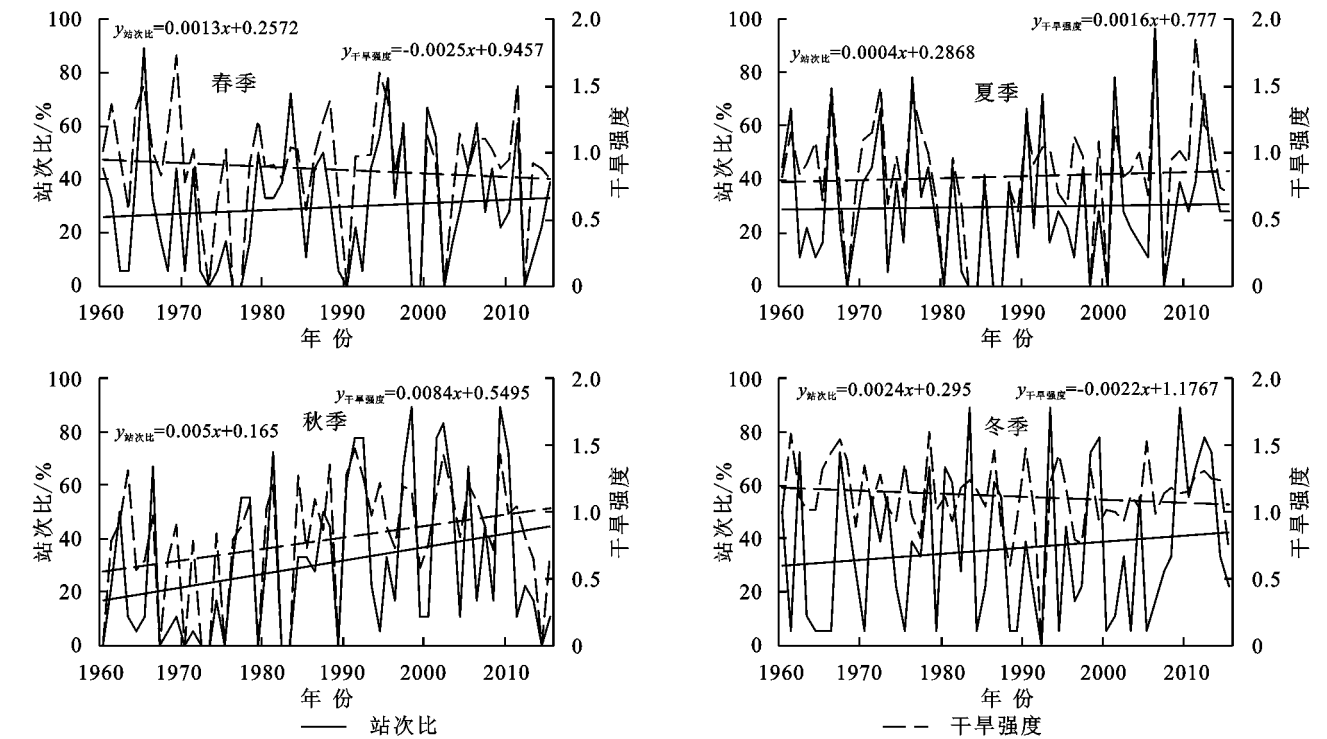


图 2 1960—2015 年三峡库区各季节干旱站次比和干旱强度变化趋势

2.2 三峡库区气象干旱空间演变特征

2.2.1 气象干旱变化趋势空间分布特征 采用 M-K 检验和克里金 (Kriging) 空间插值方法,对三峡库区气象干旱不同季节的趋势变化及空间分布特征进行分析,见图 3。从图 3 可知,春季 SPI 指数在三峡库区东北部总体呈现下降趋势,其中奉节站周边大部分地区表现为显著下降趋势;而西南部总体趋向不显著上升;夏季 SPI 值在三峡库区北部整体表现为不显著上升趋势,南部则呈不显著下降趋势;秋季 SPI 指数在整个区域均表现为下降趋势,其中利川和奉节站、兴山站附近地区呈现显著下降趋势,这说明秋季干旱化趋势显著;冬季 SPI 值在三峡库区中部和西部大部分地区呈现不显著下降趋势,但东北地区趋向不显著上升,主要分布在巴东、兴山、五峰和宜昌站附近。

2.2.2 气象干旱频率空间分布特征 由图 4 可知,

春、夏、秋呈现明显相似性,都表现为兴山、巴东站附近地区干旱频率最小,但干旱频率较高的空间分布有所不同。春季干旱频率平均值为 29.6%,从三峡库区西南部向东北部逐渐减小,最高值在合川站,为 35.7%;最低值在兴山站,为 3.6%;夏季干旱频率平均值为 29.9%,最高值位于三峡库区西南部的合川站和中部的万州站,干旱频率均为 37.5%,最低值位于兴山站,为 0%;秋季干旱频率平均值为 30.7%,最高值出现在利川站,干旱频率 41.1%;最低值出现在兴山站,为 10.7%;冬季干旱频率空间分布与其它三个季节相反,干旱频率高值区出现在三峡库区东北部,最高发生在兴山站,为 56.4%;最低发生在长寿站,为 28.6%。冬季干旱频率平均值为 33.6%,较春、夏、秋、年平均值都要高,说明三峡库区冬季较其它季节旱情更为严重,且随着春、夏、秋、冬四季的变化,干旱频率逐渐增加。

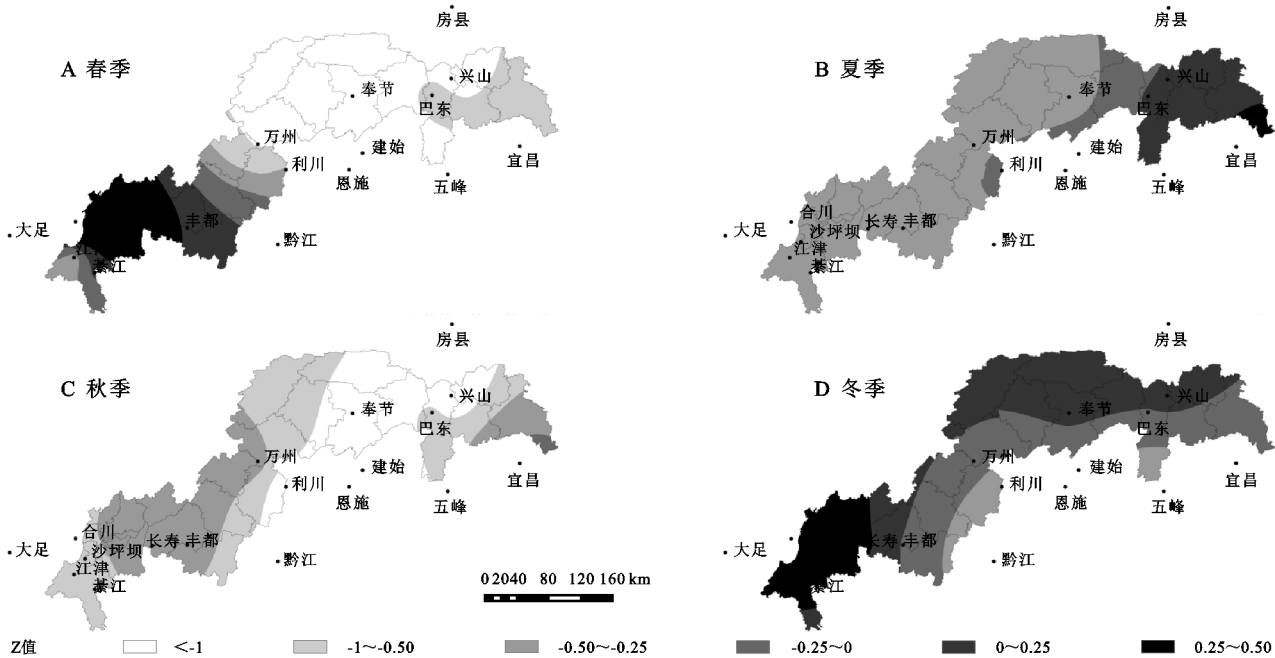


图 3 1960—2015 年三峡库区不同季节气象干旱变化趋势 M-K 检验

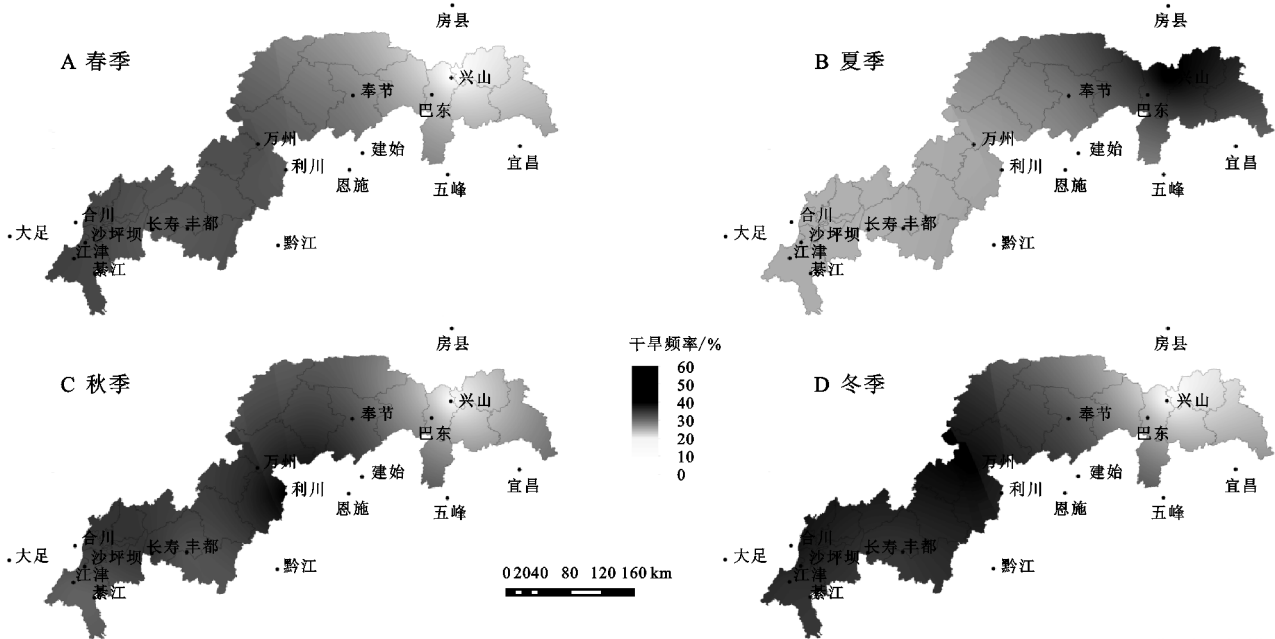


图 4 1960—2015 年三峡库区不同季节的干旱频率空间分布

2.3 干旱致灾因子危险性等级的空间分布

从图 5 可以看出,三峡库区干旱危险性整体表现为中等和较低级别,其中春、夏季危险性等级的空间分布较为均匀,总体分别处于中等和较低等级,秋、冬季总体均处于中等级别,但部分地区具有较高和高危险性等级,存在明显的地区差异。春季三峡库区干旱危险性全域处于较为均匀的中危险性等级,仅在万州、利川站附近干旱具有较低危险性等级,地区差异化不明显;夏季三峡库区干旱危险性全域处于均匀的较低等级,在万州、利川、沙坪坝站附近干旱危险性级别呈中危险性等级,地区差异性为四季

中最小;秋季三峡库区干旱危险性分布较春、夏季差异化明显,但全域大部分仍表现为中危险性等级,在利川、沙坪坝、江津和綦江站干旱危险性等级较低,而兴山、奉节、万州和合川站附近干旱危险性等级相对较高,其中万州站级别最高,呈高危险性等级,其余兴山、奉节和合川站则呈较高危险性等级;冬季三峡库区干旱危险性分布总体与秋季分布相似,即三峡库区大部分地区表现为中危险性等级,兴山、奉节和丰都站气象干旱危险性级别较低;巴东、五峰、万州、沙坪坝和綦江站表现为较高危险性等级,江津站表现为高危险性等级。

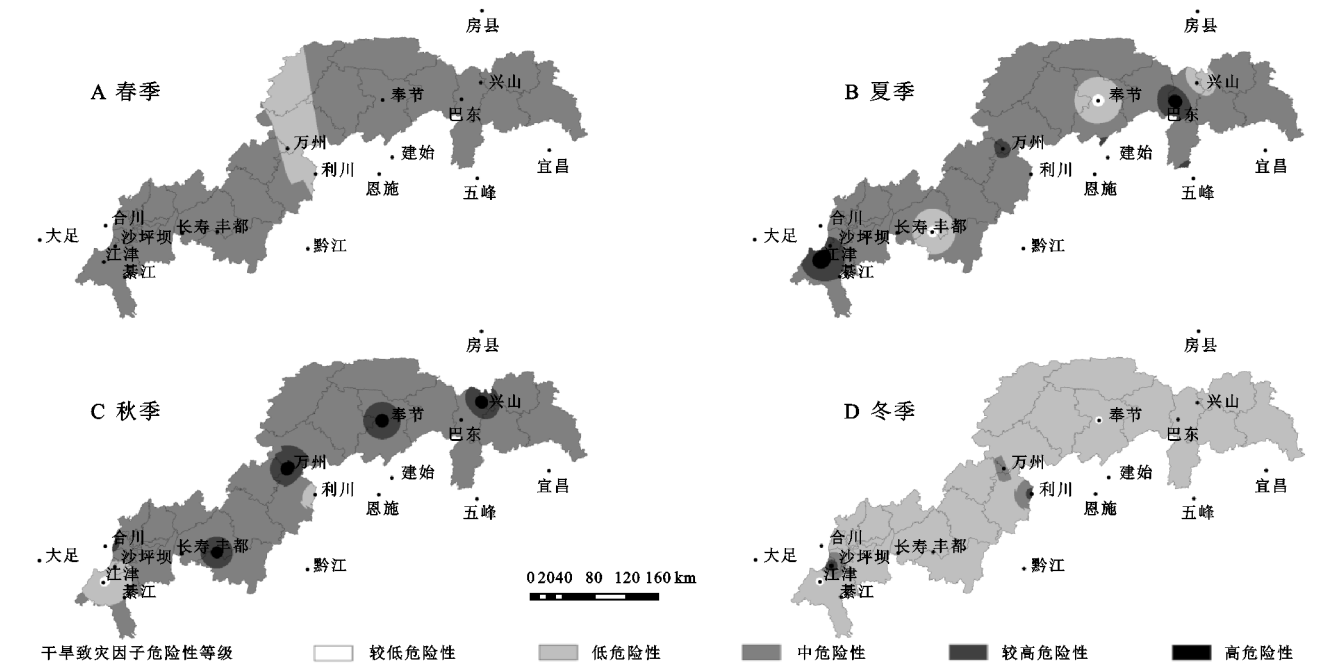


图 5 1960—2015 年三峡库区各季节气象干旱致灾危险性等级的空间分布

3 结论

基于 1960—2015 年三峡库区及周边地区 18 个控制气象站的降水资料,采用标准化降水指数 SPI 对三峡库区的气象干旱演变特征及其致灾因子危险性进行分析,得到以下主要结论:

(1) 近 56 a 来三峡库区年尺度的 SPI 值呈平缓下降趋势,20 世纪 80 年代后极端旱涝事件频发,突变年份为 1989 年;

(2) 三峡库区季尺度干旱变化趋势空间分布差异性较显著,春季三峡库区东北部呈下降趋势,而西南部总体趋向不显著上升,夏季则相反;秋季全域性下降趋势较为明显;冬季除东北部分地区外,均呈不显著下降趋势;

(3) 三峡库区各季节干旱站次比逐年缓慢上升,且随春、夏、秋和冬季逐渐增大,但整体变化较稳定;干旱强度春、冬季下降,夏、秋季上升,秋季干旱强度与干旱站次比增加趋势为四季最高,干旱强度按冬、春、夏和秋季顺序逐渐减小;

(4) 三峡库区干旱频率空间分布特征在春、夏和秋季具有相似性,即表现为西南地区干旱频率较大,东北地区干旱频率较小,冬季则相反;干旱频率大小随春、夏、秋和冬季逐渐增大,冬季旱情最为严重;

(5) 三峡库区季尺度干旱致灾危险性的空间分布整体表现为中、低危险性等级,春、夏季分布较为均匀,为中、低等级;秋、冬季在局部地区存在较高和高危险性等级,总体为中危险性等级。干旱致灾危险性按秋、冬、春和夏季顺序递减。

参考文献:

[1] Tu X J, Wu H O, Singh V P, et al. Multivariate design of socioeconomic drought and impact of water reservoirs [J]. Journal of Hydrology, 2018,566(1):192-204.

[2] 刘宪锋,朱秀芳,潘耀忠,等.农业干旱监测研究进展与展望[J].地理学报,2015,70(11):141-154.

[3] 何福力,胡彩虹,王纪军,等.基于标准化降水、径流指数的黄河流域近 50 年气象水文干旱演变分析[J].地理与地理信息科学,2015,31(3):73-79.

[4] 翁白莎,严登华.变化环境下中国干旱综合应对措施探讨[J].资源科学,2010,32(2):109-116.

[5] 屈艳萍,吕娟,苏志诚,等.抗旱减灾研究综述及展望[J].水利学报,2018,49(1):115-125.

[6] Wilhite D A, Glantz M H. Understanding the drought phenomenon: the role of definitions[J]. Water International, 1985,10(3):111-120.

[7] 李忆平,李耀辉.气象干旱指数在中国的适应性研究进展[J].干旱气象,2017,35(5):709-723.

[8] Liu Y L, Yan J P, Cen M Y. The Relationship between precipitation heterogeneity and meteorological drought/flood in China[J]. Journal of Meteorological Research, 2016,30(5):758-770.

[9] Palmer W C. Meteorological drought[M]. Washington, D C, U. S; Department of Commerce, 1965.

[10] 王澄海,王芝兰,郭毅.GEV 干旱指数及其在气象干旱预测和监测中的应用和检验[J].地球科学进展,2012,27(9):957-968.

[11] 王春林,陈慧华,唐力生,等.基于前期降水指数的气象干旱指标及其应用[J].气候变化研究进展,2012,8(3):157-163.

[12] 张凌云,简茂球. AWTP 指数在广西农业干旱分析中

- 的应用[J].高原气象,2011,30(1):133-141.
- [13] Vicente-serrano S M, Beguería S, López-moreno, J I. A multi-scalar drought index sensitive to global warming: the standardized precipitation evapotranspiration index[J]. Journal of Climate, 2010,23(7):1696-1718.
- [14] McKee T B, Doesken N J. The relationship of drought frequency and duration to time scales[C]//Proceedings of the 8th Conference on Applied Climatology, American Meteorological Society. Boston, USA,1993:179-184.
- [15] 邹旭恺,任国玉,张强.基于综合气象干旱指数的中国干旱变化趋势研究[J].气候与环境研究,2010,15(4):371-378.
- [16] 张永,陈发虎,勾晓华,等.中国西北地区季节间干湿变化的时空分布:基于 PDSI 数据[J].地理学报,2007,62(11):1142-1152.
- [17] 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.
- [18] 叶殿秀,张强,邹旭恺,等.近几十年三峡库区主要气象灾害变化趋势[J].长江流域资源与环境,2009,18(3):296-300.
- [19] 何永坤,王裕文.重庆市三峡库区干旱特征及其变化分析[J].山区开发,2001,12(12):24-26.
- [20] 张强,罗勇,廖要明,等.2006 三峡库区夏季高温干旱及成因分析[J].中国三峡建设,2007,2007(2):89-91.
- [21] 刘晓冉,程炳岩,李国平.三峡库区夏季旱涝变化特征及成因[J].应用气象学报,2010,21(5):590-597.
- [22] 陈鲜艳,宋连春,郭占峰,等.长江三峡库区和上游气候变化特点及其影响[J].长江流域资源与环境,2013,22(11):1466-1471.
- [23] 杨庆,李明星,郑子彦,等.7 种气象干旱指数的中国区域适应性[J].中国科学:地球科学,2017,47(3):81-97.
- [24] 方国华,涂玉虹,闻听,等.1961—2015 年淮河流域气象干旱发展过程和演变特征研究[J].水利学报,2019,50(5):598-611.
- [25] 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,2015,4(5):404-415.
- [26] Yevjevich V M. An objective approach to definitions and investigations of continental hydrologic drought [M]. Fort Collins: Colorado State University, 1967.
- [27] 王晓峰,张园,冯晓明,等.基于游程理论和 Copula 函数的干旱特征分析及应用[J].农业工程学报,2017,33(10):214-222.
- [28] 赵铭,张雪洋,包玉龙,等.基于 2 种标准化干旱指数分析秦皇岛近 50 年干旱状况[J].水土保持研究,2016,116(3):252-257.
- [29] 黄晚华,杨晓光,李茂松,等.基于标准化降水指数的中国南方季节性干旱近 58a 演变特征[J].农业工程学报,2010,26(7):60-69.
- [30] 何兵,高凡,唐小雨,等.基于滑动 Copula 函数的新疆干旱内陆河流水文气象要素变异关系诊断[J].水土保持研究,2019,26(1):161-167.
- [31] 李红英,张晓煜,王静,等.基于 CI 指数的宁夏干旱致灾因子特征指标分析[J].高原气象,2014,33(4):995-1001.
- [32] 王晓利,张春艳,侯西勇.1961—2017 年环渤海地区气象干旱时空特征及致灾危险性评估[J].生态学报,2019,39(13):4647-4659.

(上接第 212 页)

- [25] 李俊翰,高明秀.滨州市生态系统服务价值与生态风险时空演变及其关联性[J].生态学报,2019,39(21):7815-7828.
- [26] 陈丹,蒋贵国,张妍.基于生态服务价值的沱江流域土地景观生态风险时空分异研究[J].水土保持通报,2019,39(3):223-232.
- [27] 陈峰,李红波,张安录.基于生态系统服务的中国陆地生态风险评价[J].地理学报,2019,74(3):423-445.
- [28] Galic N, Schmolke A, Forbes V, et al. The role of ecological models in linking ecological risk assessment to ecosystem services in agroecosystems[J]. Science of the Total Environment, 2012,415(2):93-100.
- [29] Kang P, Chen W P, Wang M E. Advances in ecosystem service-based ecological risk assessment[J]. Acta Ecologica Sinica, 2016,36(5):1192-1203.
- [30] 刘世梁,侯笑云,张月秋,等.基于生态系统服务的土地整治生态风险评价与管控建议[J].生态与农村环境学报,2017,33(3):193-200.
- [31] 谢高地,鲁春霞,冷允法,等.青藏高原生态资源的价值评估[J].自然资源学报,2003,18(2):189-196.
- [32] Jones L, Norton L, Austin Z, et al. Stocks and flows of natural and human-derived capital in ecosystem services[J]. Land Use Policy, 2016,52(3):151-162.
- [33] Curran S R, de Sherbinin A. Completing the picture: the challenges of bringing“consumption”into the population-environment equation[J]. Population and Environment, 2004,26(2):107-131.
- [34] Song K, Zhao S, Gui F, et al. Ecological risk analysis methods and their application based on the emergy value of ecosystem services[J]. Advances in Environmental Protection, 2011,1(2):13-19.
- [35] Fama, E F. The behavior of stock-market prices[J]. Journal of Business, 1965,38(1):34-105.
- [36] Martin R, Thompson K, Browne C. VaR: Who contributes and how much[J]. Risk, 2001,14(8):99-102.