

吴杰峰, 陈兴伟, 高路. 水文干旱对气象干旱的响应及其临界条件[J]. 灾害学, 2017, 32(1): 199–204. [WU Jiefeng, CHEN Xingwei and GAO Lu. Response of hydrological drought to meteorological drought and its critical conditions[J]. Journal of Catastrophology, 2017, 32(1): 199–204. doi: 10.3969/j.issn.1000-811X.2017.01.035.]

## 水文干旱对气象干旱的响应及其临界条件<sup>\*</sup>

吴杰峰<sup>1</sup>, 陈兴伟<sup>1,2,3</sup>, 高路<sup>1,2,3</sup>

(1. 福建师范大学地理科学学院, 福建福州 350007; 2. 福建省陆地灾害监测评估工程技术研究中心, 福建福州 350007; 3. 湿润亚热带山地生态国家重点实验室培训基地, 福建福州 350007)

**摘要:** 流域水文干旱对气象干旱的响应是干旱研究的重要问题。以东南沿海晋江流域为例, 选取 1960–2010 年逐月实测降水和径流数据, 采用标准化降水指数 (Standardized Precipitation Index, SPI) 和标准化径流指数 (Standardized Streamflow Index, SSI) 两个干旱指数 (分别代表气象干旱和水文干旱) 及游程理论对流域主要干旱事件特征进行识别, 应用 Logarithm 函数, 建立水文干旱对气象干旱特征的响应关系模型, 从而进一步分析了水文干旱对气象干旱的响应关系, 并提出了气象干旱演进为水文干旱临界条件的概念。结果表明, 多时间尺度的 SPI 与 SSI 指数可以有效反映晋江流域气象、水文干旱历时及烈度, 用 Logarithm 函数可以比较好地建立晋江流域水文干旱对气象干旱的响应关系模型, 得到气象干旱演进为水文干旱的临界条件为气象干旱历时 1.45 个月、烈度 0.8, 该模型的建立也为基于气象干旱监测实现水文干旱预警提供了可能。

**关键词:** 干旱指数; 水文干旱; 气象干旱; 响应关系; Logarithm 函数; 临界条件; 晋江流域

**中图分类号:** X43; P426; S42 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-811X(2017)01-0199-06

doi: 10.3969/j.issn.1000-811X.2017.01.035

干旱是指由于水分的收与支或供与求不平衡形成的水分短缺现象<sup>[1]</sup>。干旱因固有的特征 (频率大、持续时间长、影响范围广等) 显示出高危害性<sup>[2-4]</sup>。如 2012 年的美国中西部地区的干旱造成 120 亿美元的农业损失<sup>[5]</sup>。我国平均每年有约  $2\,000 \times 10^4 \text{ km}^2$  耕地受到干旱的威胁<sup>[5]</sup>。根据水循环组分环节, 干旱可分为气象干旱、农业干旱、水文干旱和社会经济干旱四类<sup>[7-8]</sup>, 其中以降雨量为指标的气象干旱是最普遍和基本的, 而以径流量为指标的水文干旱被认为是最彻底的干旱。通常而言, 在干旱持续期内, 水文干旱与气象干旱不会同时发生, 二者在发生时间及严重程度上存在密切的响应关系<sup>[9]</sup>。

水文干旱对气象干旱响应分析的主要方法包括水文模型模拟法和资料分析法。水文模型模拟法在探讨干旱类型间的空间变化规律方面具有不可替代的作用。如 Niu 等<sup>[10]</sup>利用大尺度分布式水文模型 VIC 模型输出的径流数据及历史实测降水数据, 评估了西江流域水文干旱与气象干旱的空间动态演变特征。资料分析法是基于实测水文、

气象资料, 进行干旱特征相关性分析, 适用于资料充足地区, 可靠性强, 目前应用较多<sup>[11-14]</sup>。如 Vicente-Serrano 等<sup>[11]</sup>在地中海区域研究表明, 该地区水文干旱对气象干旱的平均响应时间为 1~4 个月。Zhao 等<sup>[12]</sup>利用游程理论识别泾河流域水文、气象干旱的持续时间, 通过二者的发生时间确定响应时间为 4 个月左右。何福力等<sup>[13]</sup>通过时滞互相关分析法指出黄河流域水文干旱与流域干旱、半干旱气候区的气象干旱有 1~5 个月滞时。张建龙等<sup>[14]</sup>通过分析不同时间尺度的水文、气象干旱指数相关性表明, 南盘江流域水文干旱对气象干旱的响应时间约 6 个月。

实际上, 一个完整的干旱事件特征应包括干旱历时 (开始至终止日期)、严重程度 (水分累积亏缺量) 和平均强度 (平均水分亏缺量)<sup>[15-16]</sup>。就水文干旱对气象干旱的响应而言, 同样应该包括响应的开始时刻和持续时间, 以及相应的严重程度之间的关系。从这种意义上讲, 上述文献 [11–14] 探讨的仅仅是水文干旱开始时间与气象干旱的时间差, 还不是完全意义上的响应关系。而文献

<sup>\*</sup> 收稿日期: 2016-07-03 修回日期: 2016-08-18

基金项目: 福建省高校产学研合作科技重大项目 (2015Y4002)

第一作者简介: 吴杰峰 (1991–), 男, 安徽阜阳人, 硕士研究生, 主要从事水文水资源研究. E-mail: Jiefengwu987@163.com

通讯作者: 陈兴伟 (1963–), 男, 福建福鼎人, 教授, 博士生导师, 主要从事水文水资源环境研究.

E-mail: cxwchen215@fjnu.edu.cn

[17-18]通过建立水文、气象干旱特征之间的线性模型,分析水文干旱与气象干旱特征间的相关性,又从另一种角度探讨了水文干旱对气象干旱的响应。

综上所述,进一步理清水文干旱对气象干旱响应的概念,比较全面地分析响应关系,对于深化干旱问题的研究具有重要的意义。因此,本研究以东南沿海典型流域的福建晋江流域为例,采用资料分析法,基于流域内 1960-2010 年逐月降水及径流数据,选取普遍使用的标准化降水指数(Standardized Precipitation Index,  $SPI$ )<sup>[19]</sup>和标准化径流指数(Standardized Streamflow Index,  $SSI$ )<sup>[20]</sup>两种干旱指数分别代表气象干旱和水文干旱,在对流域主要干旱事件特征识别的基础上,尝试建立水文、气象干旱特征的关系,比较全面地分析水文干旱对气象干旱的响应。

## 1 研究区概况

晋江流域位于我国 21 世纪“海上丝绸之路”的起点福建省泉州市(图 1)。流域内有东溪、西溪两大支流,两溪汇流于下游双溪口的石砵水文站。该区域地形以西北戴云山脉为主,地势由西北向东南降低,形成西北高,东南低的特点。地貌以中山、低山为主,地势险峻,河流深切,山地开发强度大。气候属于典型的亚热带湿润气候区,多年平均气温 20~21℃,最冷月 1、2 月份平均气温为 12.1℃,最热 7 月平均气温为 28.6℃,相差 16.5℃。多年平均降水量为 1 202 mm,3-9 月份为多雨季节,7 个月的降水量占年降水总量的 83.8%,10 月至次年 2 月份为枯水季,5 个月的降水量只占全年降水总量的 16.2%<sup>[21]</sup>。该地区是福建省经济最发达的地区之一,以 2012 年为例,泉州市 GDP 总量占全省总量的四分之一,而地表水资源拥有量仅为全省的 8%<sup>[22]</sup>,与经济社会发展的需求严重不相匹配。由于特殊的气候、地形及地貌条件,流域水灾害问题突出,为福建省干旱最严重的区域之一<sup>[23-24]</sup>。

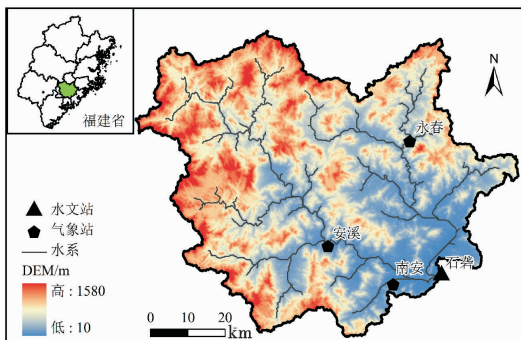


图 1 研究区位置

## 2 数据来源与研究方法

### 2.1 数据来源

径流数据选取位于流域下游的石砵水文站(下文称石砵站)1960-2010 年逐月径流数据,该站点控制了 90% 的流域面积,对分析整个流域的水文干旱状况具有较好的代表性,数据来源于福建省水资源勘测局。降雨数据为流域内三个主要气象站点(南安、安溪和永春站)的 1960-2010 年逐月降水数据,数据完整,无缺测数据,来源于福建省气象局。

### 2.2 研究方法

#### 2.2.1 $SPI$ 与 $SSI$

$SPI$  作为气象干旱评价指标,是表征某时期内降水量出现概率的指标,适用于月以上时间尺度的干旱监测与评估<sup>[19,25]</sup>。其原理为降水量通常服从偏态分布,而非正态分布,在干旱监测过程中,多采用  $T$  分布概率密度函数描述降水量随时间的变化状况,然后进行正态标准化得到标准化降水指数。计算步骤如下。

假设某一时间段的降水量  $x$  满足  $T$  分布概率密度函数  $f(x)$  为:

$$f(x) = \frac{1}{\gamma^\beta T(\beta)} x^{\beta-1} e^{-\frac{x}{\gamma}} \quad (1)$$

式中:  $\gamma$ 、 $\beta$  分别是形状和尺度参数;  $x > 0$ 、 $\gamma > 0$ 、 $\beta > 0$ ,  $\gamma$ 、 $\beta$  可用极大似然法计算,一定时间尺度的降水量  $x$  的累积概率为:

$$F(x) = \int_0^x f(x) dx \quad (2)$$

对  $T$  分布概率进行正态标准化得到:

$$SPI = S \frac{t - (c_2 t + c_1) t + c_0}{((d_3 t + d_2) t + d_1) t + 1.0}; \quad (3)$$

$$t = \sqrt{2 \ln(F)} \quad (4)$$

当  $F > 0.5$  时,  $S = 1$ ; 当  $F \leq 0.5$  时,  $S = -1$ , 其中  $c_0 = 2.515\ 517$ ,  $c_1 = 0.802\ 853$ ,  $c_2 = 0.010\ 328$ ,  $d_1 = 1.432\ 788$ ,  $d_2 = 0.189\ 269$ ,  $d_3 = 0.001\ 308$ 。 $SSI$  作为水文干旱评价指标其计算步骤与  $SPI$  类似,本文不做复述,仅给出了  $SPI$  与  $SSI$  的干旱等级<sup>[14,25]</sup>,如表 1 所示。

表 1  $SPI$  与  $SSI$  干旱等级分类

等级	分类	$SPI$ 值	$SSI$ 值
1	无旱	$0.00 \leq SPI$	$0.00 \leq SSI$
2	轻旱	$-1.00 \leq SPI < 0.00$	$-1.00 \leq SSI < 0.00$
3	中旱	$-1.50 \leq SPI < -1.00$	$-1.50 \leq SSI < -1.00$
4	重旱	$-2.00 \leq SPI < -1.50$	$-2.00 \leq SSI < -1.50$
5	极旱	$SPI < -2.00$	$SSI < -2.00$

### 2.2.2 干旱特征要素的提取

干旱特征的提取采用游程理论<sup>[26]</sup>(图2)。即假设给定值 $X$ 来截取一个随时间变化的离散系列 $X_t$ , 当 $X_t$ 在一个或多个时段内连续大于 $X$ 时, 出现正游程; 而当 $X_t$ 连续小于 $X$ 时, 则出现负游程。在干旱研究中, 把负游程的长度称作干旱历时( $D$ ), 即干旱开始至结束时间的长度; 负游程的总量称为干旱烈度( $M$ ), 也称干旱的严重程度, 即干旱历时内所有小于截断水平值的累积之和; 平均强度( $I$ )为干旱历时内的平均水分亏缺量。值得注意的是, 通常干旱发展过程缓慢且历时长, 在一场干旱持续时期内, 由于某些原因, 如临时性的降水, 可能出现若干“子干旱”, 如图2显示。这种相邻的几次“子干旱”构成了相互关联的非独立干旱事件, 但它们实质上是一场干旱事件<sup>[27]</sup>。定义此时的干旱历时和烈度为初始“子干旱”至末尾“子干旱”的历时及烈度之和。设定 $X=0$ 为截断水平, 初步判断某时间段是否发生干旱, 结合文献<sup>[28]</sup>, 定义“子干旱”的合并方法, 对干旱特征进行识别。首先识别流域气象干旱特征, 然后识别相应的水文干旱特征。由于干旱平均强度可由干旱历史和干旱烈度关系得出, 本文主要利用干旱历时( $D$ )与干旱烈度( $M$ )两个指标描述干旱事件特征。

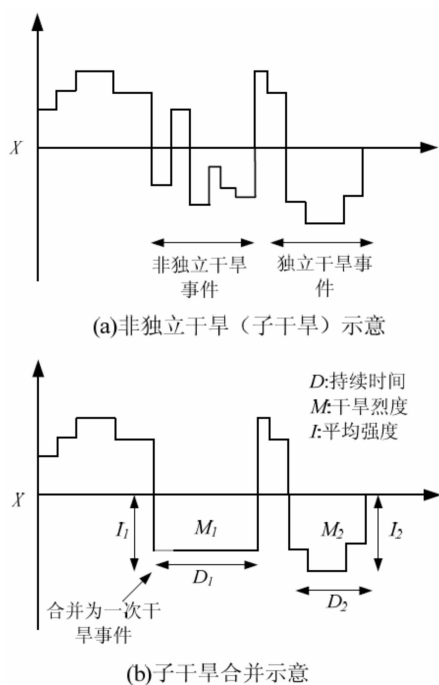


图2 干旱特征描述

### 2.2.3 水文-气象干旱特征关系模型的建立

考虑到水文干旱对气象干旱的密切响应关系, 尝试建立水文-气象干旱特征要素的关系模型, 分析二者的响应关系。特征要素包括水文干旱历时与气象干旱历时、水文干旱烈度与气象干旱烈度之间的响应关系。具体拟合函数的选取, 依据干旱事

件特征值变化的趋势和复相关系数的高低而定。

## 3 结果分析

### 3.1 流域主要气象、水文干旱事件识别

利用晋江流域1960-2010年三个主要气象站(南安、安溪和永春气象站)逐月降水量的算术平均值代表流域面雨量计算 $SPI$ 。以流域下游石碇水文站1960-2010年逐月径流数据, 分析与 $SPI$ 相同时间尺度的 $SSI$ 序列值, 通过游程理论对1960-2010年期间流域主要气象、水文干旱事件特征进行识别, 并选取重要干旱年份进行验证。

由于该地区多季节性干旱<sup>[23-24]</sup>, 利用游程理论对三个月时间尺度的 $SPI$ 、 $SSI$ 进行干旱特征提取(共31场), 并将识别出的气象干旱特征列于表2的第二栏, 相应的水文干旱特征列于表2的第三栏。该流域旱情资料有限, 但该地区属于福建省水资源最贫乏的区域, 其旱情与全省旱情关系密切<sup>[23-24]</sup>, 故选取福建省重要干旱年份资料进行验证分析。文献<sup>[21]</sup>统计了1950-1995年间, 全省受旱面积在 $20 \times 10^4 \text{ hm}^2$ 以上的干旱年份; 相关资料记载(<http://www.doc88.com/p-652201703763.html>)重要的干旱年份, 一并列于表2的第四栏。由于干旱现象的复杂性及干旱统计记载的干旱类别不明确, 识别的干旱事件与实际干旱事件其含义不完全一致, 但也有一定的可比性, 可用来初步判别干旱识别结果的合理与否。结果表明, 本文识别出了晋江流域大部分重要干旱事件, 其中气象干旱历时最长的年份为1980年, 时间由1980年6月持续到1982年11月, 历时共30个月, 干旱烈度为18.89。相应的, 该时间段的水文干旱历时达32个月, 时间由1980年6月持续到1983年1月, 干旱烈度为21.95。可见, 多时间尺度的 $SPI$ 与 $SSI$ 干旱指数可以有效地反映晋江流域气象、水文干旱历时及烈度。

### 3.2 水文-气象干旱特征关系模型的建立

#### 3.2.1 水文-气象干旱的响应关系

根据表2中统计的气象干旱和水文干旱特征要素结果, 可以建立水文-气象干旱特征响应关系模型。将表2中序号为1~21的干旱事件特征用于建模, 后10场干旱事件特征用于模型验证。

利用统计软件origin8.0中函数拟合功能, 试验表明, Logarithm函数模型中的三参数对数形式可以比较好地描述水文干旱与气象干旱特征因子之间的关系。模型的基本形式如:

$$y = a + b \ln(x + c). \quad (5)$$

式中:  $y$  为水文干旱历时或烈度,  $x$  为气象干旱历时或烈度。利用表2中前21场气象、水文干旱特征因子得到其中干旱历时的响应关系:

表2 1960-2010年主要干旱事件特征识别与实际重要干旱事件对比

序号	气象干旱			水文干旱			福建省重要干旱事件
	开始至结束时间	干旱历时 $D$ /月	干旱烈度 $M$	开始至结束时间	干旱历时 $D$ /月	干旱烈度 $M$	记载年份
1	1960.11-1961.02	4	3.57	1960.11-1961.01	3	3.23	×
2	1962.02-1962.04	3	2.72	1962.02-1962.03	2	1.62	√
3	1962.07-1963.06	12	14.67	1962.08-1963.09	14	16.20	√
4	1963.10-1963.12	3	2.22	1963.11-1963.12	2	4.06	√
5	1964.04-1965.05	14	13.77	1964.04-1965.05	14	13.75	×
6	1965.09-1966.05	9	5.62	1965.09-1966.08	12	9.29	√
7	1966.09-1968.01	17	15.98	1966.11-1968.07	21	23.95	√
8	1968.08-1968.11	4	3.98	1968.10-1968.12	3	8.35	√
9	1969.07-1969.12	6	3.9	1969.09-1969.12	4	3.13	×
10	1971.03-1971.10	8	9.07	1971.04-1972.07	16	14.93	√
11	1974.01-1974.04	4	3.31	1974.02-1974.05	4	1.61	×
12	1974.07-1974.10	4	2.65	1974.08-1974.10	3	2.54	×
13	1977.01-1977.10	10	6.77	1977.03-1978.03	13	8.31	√
14	1978.05-1978.11	7	3.60	1978.06-1979.02	9	6.10	√
15	1979.06-1980.01	8	4.01	1979.06-1980.02	9	6.66	×
16	1980.06-1982.11	30	18.89	1980.06-1983.01	32	21.95	√
17	1983.07-1984.03	9	10.03	1983.08-1984.04	9	10.96	√
18	1984.07-1984.08	2	0.62	1984.07-1984.08	2	1.60	√
19	1984.12-1985.01	2	2.28	1985.01	1	0.42	√
20	1985.10-1986.02	5	3.77	1985.11-1986.03	5	4.65	√
21	1986.08-1986.10	3	4.26	1986.09-1986.12	4	4.65	√
22	1987.06-1987.10	5	3.52	1987.06-1987.10	5	3.73	×
23	1988.06-1988.08	3	4.74	1988.06-1988.08	3	5.42	√
24	1990.12-1991.11	10	9.37	1991.03-1992.01	11	10.90	√
25	1993.09-1994.01	5	3.52	1993.09-1994.02	6	3.87	√
26	1995.04-1995.06	3	3.26	1995.05-1995.07	3	3.52	√
27	1995.10-1996.02	5	6.99	1995.11-1996.03	5	8.10	√
28	1999.02-1999.06	5	2.97	1999.04-1999.07	4	2.53	√
29	2001.12-2002.07	8	6.31	2002.03-2002.11	9	7.51	×
30	2003.03-2005.01	23	15.32	2003.04-2005.04	25	19.47	√
31	2009.01-2009.11	11	14.27	2009.03-2010.01	11	15.14	√

注：×表示无统计值，√表示有统计值

$y = -147.8466 + 44.6597\ln(x + 25.9513)$ 。(6)

干旱烈度的响应关系:

$y = -164.8327 + 49.2041\ln(x + 27.7010)$ 。(7)

复相关系数分别为0.93和0.84(通过了0.05显著水平检验),可见流域水文干旱特征与气象干旱特征具有密切的响应关系(图3)。

3.2.2 水文-气象干旱响应关系模型的验证

将表2中后10场气象干旱事件特征(序号为

22~31)分别代入拟合方程(6)和(7)中,得到相应的气象干旱条件下的水文干旱特征模拟值,与实际水文干旱特征值的比较如表3。表明除第28场(1991年)的干旱历时和干旱烈度及第31场(2009年)干旱历时的相对误差较大外,其余基本上小于30%,说明由Logarithm函数模型确定的气象干旱和水文干旱的响应关系是合理的。

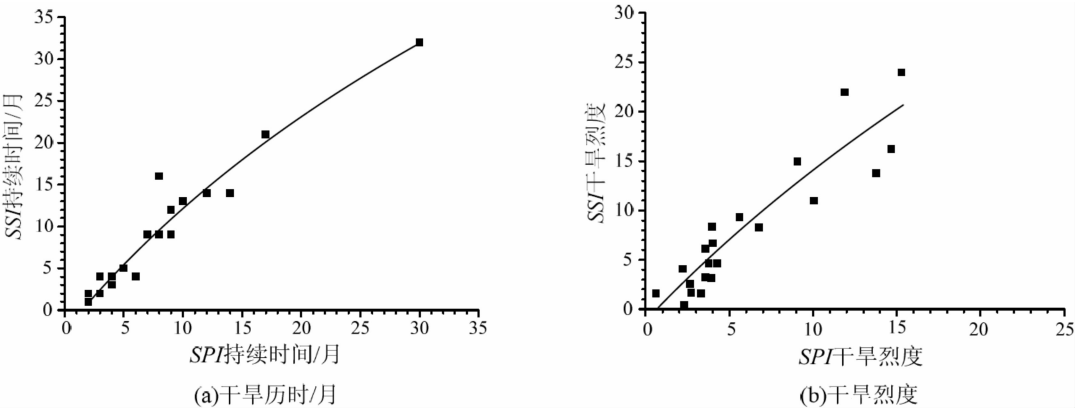


图3 水文干旱对气象干旱的响应关系

表 3 水文干旱事件特征实测值与模拟值对比

序号	干旱历时 D			干旱烈度 M		
	实测值/月	模拟值/月	相对误差/%	实测值	模拟值	相对误差/%
22	5	6.44	28.80	3.73	4.48	20.11
23	3	3.46	15.33	5.42	6.37	17.53
24	11	13.13	19.36	10.90	12.93	18.62
25	6	6.44	7.33	3.87	4.84	25.06
26	3	3.46	15.33	3.52	4.07	15.63
27	5	6.44	28.80	8.10	9.66	19.26
28	4	6.44	61.00	2.53	3.61	42.69
29	9	10.57	17.44	7.51	8.70	15.84
30	25	26.91	7.64	19.47	20.25	4.01
31	11	14.35	30.45	15.14	19.04	25.76

### 3.2.3 水文干旱发生的临界条件

进一步分析拟合方程(6)和(7), 当水文干旱历时和烈度为 0 时, 相应的气象干旱历时和烈度分别为 1.45 月和 0.8。即对晋江流域来讲, 从时间上看, 当气象干旱历时 1.45 个月时, 将发生水文干旱事件, 此时气象干旱的烈度为 0.8; 可以将这两个值定义为气象干旱演进为水文干旱的临界条件。Edoss 等<sup>[17]</sup>、李运刚等<sup>[18]</sup>建立的水文-气象干旱特征的线性关系模型, 虽然反映了水文、气象干旱在干旱历时及严重程度上的响应关系, 但用简单的线性关系无法得到这种临界条件, 当然他们也没有提出临界条件这样的概念。本文研究得到的图 3 和拟合方程(6)、(7)的结果, 比较全面地解释了水文干旱与气象干旱的响应关系。主要表现在, 一方面, 解释的干旱特征不仅包括干旱历时, 也包括干旱烈度(平均强度)。另一方面, 进一步定义了气象干旱演进为水文干旱的临界条件, 从而为实现水文干旱早期预警提供了可能。

## 4 结论

(1) 水文干旱对气象干旱的响应关系, 实际上可以表述为水文干旱历时、烈度与气象干旱相应要素之间的关系, 其中包括气象干旱演进为水文干旱的临界条件;

(2) 多时间尺度的 *SPI* 与 *SSI* 指数可以揭示的晋江流域干旱事件与历史记录相吻合, 表明 *SPI* 与 *SSI* 指数可以有效反映该流域水文、气象干旱的干旱历时及烈度;

(3) 利用 Logarithm 函数建立的晋江流域水文干旱对气象干旱的响应模型, 得到该流域气象干旱演进为水文干旱的临界条件为气象干旱平均历时 1.45 个月, 干旱烈度为 0.8, 也为基于气象干旱的监测实现水文干旱的预警提供了可能。

## 参考文献:

- [1] 张强. 华北地区干旱指数的确定及其应用[J]. 灾害学, 1998, 13(4): 34-38.
- [2] Mishra V, Cherkauer K A. Retrospective droughts in the crop growing season: Implications to corn and soybean yield in the Midwestern United States[J]. Agricultural and Forest Meteorology,

- 2010, 150(7/8): 1030-1045.
- [3] Dai A, Trenberth K E, Qian T T. A global dataset of Palmer Drought Severity Index for 1870-2002: Relationship with soil moisture and effects of surface warming[J]. Journal of Hydrometeorology, 2004, 5(6): 1117-1130.
- [4] 雷向杰, 李茜, 王娟, 等. 陕西关中地区旱涝演变规律和 21 世纪旱涝特点分析[J]. 灾害学, 2016, 31(3): 101-109.
- [5] Huang S, Huang Q, Chang J, et al. Linkages between hydrological drought, climate indices and human activities: a case study in the Columbia river basin[J]. International Journal of Climatology, 2016, 36(1): 280-290.
- [6] 陈家琦, 王浩, 杨小柳, 等. 水资源学[M]. 北京: 科学出版社, 2002: 43-44.
- [7] Dracup J A, Lee K S, Paulson Jr E G. On the definition of droughts[J]. Water Resources Research, 1980, 16(2): 297-302.
- [8] 耿鸿江. 干旱定义评述[J]. 灾害学, 1993, 8(1): 17-21.
- [9] 耿鸿江, 沈必成. 水文干旱的定义及其意义[J]. 干旱地区农业研究, 1992, 10(4): 91-94.
- [10] Niu J, Chen J, Sun L. Exploration of drought evolution using numerical simulations over the Xijiang (West River) basin in South China[J]. Journal of Hydrology, 2015, 526: 68-77.
- [11] Vicente-Serrano S M, Lopez-Moreno J I. Hydrological response to different time scales of climatological drought: an evaluation of the Standardized Precipitation Index in a mountainous Mediterranean basin[J]. Hydrology and Earth System Sciences, 2005, 9: 523-533.
- [12] Zhao L, Lyu A, Wu J, et al. Impact of meteorological drought on streamflow drought in Jinghe River River basin of China[J]. Chinese Geographical Science, 2014, 24(6): 694-705.
- [13] 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): 69-75.
- [14] 张建龙, 王龙, 杨蕊, 等. 南盘江流域水文干旱对气象干旱的响应特征[J]. 南水北调与水利科技, 2014, 12(3): 29-32.
- [15] 徐向阳. 水灾害[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2006: 93-102.
- [16] 冼卓燕, 武传号, 黄国如. 基于 SPEI 的北江飞来峡流域干旱时空演变特征分析[J]. 灾害学, 2015, 30(3): 198-203.
- [17] Edossa D C, Babel M S, Das Gupta A. Drought analysis in the A-wash river basin, Ethiopia[J]. Water Resources Management, 2010, 24(7): 1441-1460.
- [18] 李运刚, 何娇楠, 李雪. 基于 SPEI 和 SDI 指数的云南红河流域气象水文干旱演变分析[J]. 地理科学进展, 2016, 35(6): 758-767.
- [19] McKee B T, Nolan J, Kleist J. The relationship of drought frequency and duration to time scales[G]//The Eighth Conference on Applied Climatology, Anaheim California, 1993: 179-184.
- [20] Shukla S, Wood A W. Use of a standardized runoff index for characterizing hydrologic drought. Geophysical Research Letters, 2008, 35(2): 41-46.
- [21] 鹿世瑾, 王岩. 福建气候[M]. 北京: 气象出版社, 2012: 155-156, 173-174.
- [22] 福建省水利厅. 2012 年福建省水资源公报[R], 福州: 福建省水资源管理中心, 2013: 8-9.
- [23] 林文鹏, 陈霖婷. 福建省干旱灾害的演变及其成因研究[J]. 灾害学, 2000, 15(3): 56-60.
- [24] 吴杰峰, 陈兴伟, 高路, 等. 基于标准化径流指数的区域水文

- 干旱指数构建与识别[J]. 山地学报, 2016, 34(3): 282-289.
- [25] Wang Y, Chen X, Chen Y, et al. Flood/drought event identification using an effective indicator based on the correlations between multiple time scales of the Standardized Precipitation Index and river discharge[J]. Theoretical and Applied Climatology, 2015, 17(5): 1-10.
- [26] Yevjevich V. Objective approach to definitions and Investigations of Continental Hydrologic Droughts[M]. Hydrology Paper23, Colorado State U, Fort Collins, 1967.
- [27] 冯平, 朱元胜. 径流调节下的水文干旱识别[J]. 自然科学进展, 1999, 9(9): 848-853.
- [28] 周玉良, 周平, 金菊良, 等. 基于供水水源的干旱指数及在昆明干旱频率分析中应用[J]. 水利学报, 2014, 45(9): 1038-1047.

## Response of Hydrological Drought to Meteorological Drought and its Critical Conditions

WU Jiefeng<sup>1</sup>, CHEN Xingwei<sup>1, 2, 3</sup> and GAO Lu<sup>1, 2, 3</sup>

(1. College of Geographical Sciences, Fujian Normal University, Fuzhou 350007, China;  
2. Fujian Provincial Engineering Research Center for Monitoring and Assessing Terrestrial Disasters, Fuzhou 350007, China; 3. State Key Laboratory Breeding Base of Humid Subtropical Mountain Ecology, Fuzhou 350007, China)

**Abstract:** The response of hydrological drought to meteorological drought is an important subject for drought research. Taking the Jinjiang River basin which is located in southeastern China as the study area and based on the monthly streamflow and precipitation observed records from 1960 to 2010, the Standardized Precipitation Index (SPI) and Standardized Streamflow Index (SSI) were chosen to represent meteorological drought and hydrological drought, respectively. The run theory was used to identify the main drought events and their characteristics. The relationship between the characteristics of hydrological drought and meteorological drought were established with Logarithm function. Then the response of hydrological droughts to meteorological droughts was discussed and the concept of critical condition that meteorological drought evolved into hydrological drought was proposed. The results indicated that the SPI and SSI indices can effectively reflect the duration and magnitude of drought in Jinjiang River basin. The Logarithm function modeled well the relationship of the hydrological drought response to the meteorological drought. When the duration of meteorological drought were 1.45 months and magnitude reached 0.8, hydrological drought happened. The relationship is applicable to early warning of hydrological drought based on meteorological drought monitoring.

**Key words:** drought index; hydrological drought; meteorological drought; response characteristics; Logarithm function; critical condition; Jinjiang River basin

(上接第 186 页)

## Research and Application of Flood Submerged Information Precise Extraction Based on Typical Remote Sensing Image Fusion Method

XIE Qiuxia<sup>1</sup>, ZHANG Jiahui<sup>2</sup>, LU Kun<sup>1</sup>, SUN Yunxiao<sup>2</sup> and ZHANG Linlin<sup>3</sup>

(1. Geomatics College, Shandong University of Science and Technology, Shandong 266590, China;  
2. Institute of Remote Sensing and Digital Earth, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100094, China;  
3. Sanya Branch of Institute of Remote Sensing, Sanya 572000, China)

**Abstract:** Flood disaster monitoring is one of the important research directions in the field of remote sensing application. It is a key problem to be solved urgently to extract flood information rapidly and accurately. The HIS transform, wavelet transform method and Gram-Schmidt (GS) transform method were chosen in this paper. The flood thematic information was highlighted by using these image fusion methods. In order to select the best image fusion method, the accuracy of fusion results was evaluated in terms of the fidelity of spectral information and integration degree of spectral information. Secondly, the single band pseudo-color density segmentation method was carried out to achieve the purpose of rapid and efficient extraction flood thematic information. Finally, the new method of pseudo-color density segmentation method of coupling GS and wavelet transform was proposed, which was used to accurately extract flood information. The results show that wavelet transform image fusion is the most appropriate fusion method with the highest fidelity of spectral information and maximal integration degree of spectral information, accuracy is the highest; In high precision, rapid flood monitoring drawing and application analysis, pseudo-color density segmentation method of coupling GS and wavelet transform is better than that of single wavelet transform method, extraction effect is better.

**Key words:** flood disaster; remote sensing; image fusion; flood information; precise extraction