

# 基于主成分分析的干旱综合指标构建及其应用

常文娟<sup>1,2,3</sup>, 梁忠民<sup>4</sup>, 马海波<sup>1,2</sup>

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, 湖北 武汉 430072;
3. 中国水利水电科学研究院流域水循环模拟与调控国家重点实验室, 北京 100038;
4. 河海大学水文水资源学院, 江苏 南京 210098)

**摘要:**探讨了干旱综合指标的构建,提出采用主成分分析法将降雨、径流及土壤含水量等水文气象要素融合为一个干旱综合指标,并将该指标应用于干旱过程识别和干旱频率分析,且以南盘江上游西桥水文站以上区域为例,将基于干旱综合指标计算的干旱重现期同基于降雨、径流和土壤含水量等单指标计算的干旱重现期进行对比分析。结果表明:采用主成分分析法构建的干旱综合指标是合理可行的。

**关键词:**干旱指标;主成分分析;干旱识别;重现期

中图分类号:S16

文献标识码:A

文章编号:1000-0852(2017)01-0033-06

近年来,区域性干旱灾害在我国频繁发生,对工农业生产和人民生活产生了巨大影响,干旱问题已引起社会各界的高度关注并成为当前水资源管理和灾害学领域的研究热点,其中,干旱指标的研究是开展防旱减灾战略研究的核心内容之一。通常,土壤水分应该是度量干旱最客观的要素,然而,大部分地区缺乏土壤干湿状况的长系列历史观测记录。为了描述和研究干旱及其变化,降雨、径流等水文气象要素往往被视为表征干旱的指标。目前,常用的干旱指标包括:连续无雨日数/降水量距平百分率<sup>[1]</sup>、标准化降水指数(SPI)<sup>[2]</sup>、降水Z指数<sup>[3]</sup>、帕尔默干旱指数(PDSI)<sup>[4]</sup>、综合干旱指数<sup>[5]</sup>、地表水供给指数(SWSI)<sup>[6]</sup>等。各类指标自提出以来,国内外学者对干旱指标的选取进行了探讨<sup>[7-8]</sup>,代表性的研究有:Keyantash和Dracup对气象、水文和农业干旱的各种客观定量指数进行了评价,认为描述气象干旱的代表性指标为降水成数,描述水文干旱的代表性指标为总缺水量,描述农业干旱的代表性指标为土壤含水量<sup>[9]</sup>。童海滨、姚玉璧等探讨了降水、气象干旱及农业干旱指标,提出了新的干旱指标,认为所建立的指标应有时空尺度<sup>[10-11]</sup>。杜继稳等对降水量距平百分率、标准化降水指数、相对湿润度指数、

综合气象干旱指数、土壤相对湿度干旱指数及帕尔默(Palmer)干旱指数等6个干旱指数的使用条件进行了分析<sup>[12-13]</sup>;谢五三等采用累积频率法对降水距平百分率、Z指数、标准化降水指数(SPI)、相对湿润度指数、综合气象干旱指数等五种干旱指标的阈值进行了修正<sup>[14]</sup>;舒金扬等借用洪水预报模型成果构建了一种度量干旱程度的水量供需平衡指数<sup>[15]</sup>;王劲松对比分析了综合气象干旱指数、标准化降水指数、帕默尔干旱指数、降水距平百分率和K干旱指数等几种干旱监测指数在黄河流域的应用情况<sup>[16]</sup>;董前进等在阐述水文干旱与气候干旱、农业干旱、社会经济干旱关系的基础上,对当前水文干旱研究进行了分类评述<sup>[17]</sup>;李柏贞等综述了国内外广泛应用的各类干旱指标,包括气象、土壤墒情、作物生态等指标的优缺点及其在农业上的适用性<sup>[18]</sup>;翟家齐等构建了标准水资源指数(SWRI)水文干旱评估指标,形成水文干旱识别、评估及特征分析基本框架<sup>[19]</sup>。综上所述,现有干旱指标研究多侧重于选取一种或几种因素描述干旱灾情特征,然而,由于干旱本身的复杂性,仅以单个要素或多要素的简单组合描述干旱难以全面揭示干旱的形成机理及干旱带来的全部影响。因此,构建一个具有机理性

收稿日期:2016-06-02

基金项目:湖北省教育厅科学技术研究项目(B2015255);三峡大学科学基金(KJ2013B072);2016年度流域水循环模拟与调控国家重点实验室代表性成果培育课题(2016CG05)

作者简介:常文娟(1985-),女,山西平遥人,讲师,博士后,主要从事水文水资源方面研究。E-mail:cwj1116@126.com

通讯作者:梁忠民(1962-),男,辽宁凤城人,教授,博导,主要从事水文及水资源方向研究。E-mail:zmliang@hhu.edu.cn

的干旱综合表征指标,对于客观描述和分析该场干旱显得极其重要。

一次干旱事件的影响因素往往是多方面的,如降雨、蒸发、径流、土壤含水量等,在干旱问题中,通常侧重从影响旱情的某个或某些因素建立不同形式的干旱表征指标。目前,不同部门从各自的角度选取指标分析其干旱频率,导致对同一场干旱发生频率(或重现期)的描述不统一。如,一场干旱发生以后,气象部门从降雨气象的角度选取干旱表征指标描述该场干旱的发生频率,水利部门从水文河道径流的角度描述该场干旱,农业部门从土壤墒情、作物生理的角度描述该场干旱。然而,理论上讲,一场干旱应该对应一个频率,因此,我们希望能够设计出一个综合干旱表征指标来描述干旱发生的频率,从而使得多指标计算干旱频率问题得到简化,同时又可以反映出干旱特征的内在规律。基于此,本文提出采用主成分分析“降维、综合、独立”的思想来构造一个综合干旱表征指标,以降雨、还原后的径流、土壤含水量等具备随机特性的水文气象要素融合为一个干旱综合表征指标。在此基础上,将该综合指标应用于干旱过程的识别和干旱重现期的计算。

## 1 干旱综合表征指标构建

主成分分析(Principal Component Analysis,简称PCA),是通过降维技术,用较少的变量代替原来较多变量,同时保证新变量(主成分)之间彼此独立,通常采用主成分方差累积贡献率(达85%以上)原则选取主成分个数,进而确定的主成分新变量。主成分分析的基本步骤<sup>[20]</sup>为:

(1)考虑到各要素变量的量纲和数量级存在不一致现象,需要对数据进行标准化处理,其计算公式为:

$$x'_{ij} = \frac{x_{ij} - \bar{x}_i}{\sigma_i}, (i=1, 2, \dots, m, j=1, 2, \dots, n) \quad (1)$$

式中: $x_{ij}$ 为第*i*个指标的第*j*个观测值; $x'_{ij}$ 为标准化后第*i*个指标的第*j*个观测值; $\bar{x}_i$ 为第*i*个指标的均值; $\sigma_i$ 为第*i*个指标的方差。

(2)计算协方差矩阵:

$$S_{ij} = \frac{1}{m-1} \sum_{h=1}^m (x'_{ij} - \bar{x}'_i)(x'_{hj} - \bar{x}'_h), (h=1, 2, \dots, m) \quad (2)$$

式中: $\bar{x}'_i$ 为标准化后第*i*个指标的均值; $\bar{x}'_h$ 为标准化后第*h*个指标的均值。

(3)求解主成分:设 $\lambda_1 > \lambda_2 > \dots > \lambda_p$ 为协方差矩阵的*p*个特征值, $v_1, v_2, \dots, v_p$ 为相应的特征向量,则样本的*p*个主成分为:

$$D_{ij} = \frac{1}{m-1} \sum_{k=1}^p v_{ik} \cdot x'_{kj}, \text{其中: } i=1, 2, \dots, p, j=1, 2, \dots, n \quad (3)$$

(4)计算贡献率:第*i*个主成分 $D_i$ 的贡献率为:

$$g_i = \frac{\lambda_i}{\sum_{i=1}^p \lambda_i} \quad (4)$$

主成分的贡献率反映的是主成分综合原始变量(或指标)信息的能力,一般而言,前*k*( $k \leq p$ )个主成分的累积贡献率不低于85%就达到降维目的。

鉴于主成分分析的上述思想,考虑到常用于描述干旱的降雨、径流以及土壤含水量等要素之间的相关性及其表征干旱的特性,同时借鉴国家气象干旱等级标准中综合干旱指数CI的构建模式<sup>[5]</sup>,本文采用主成分分析法将降雨量(Precipitation)、径流量(Runoff)和土壤含水量(Soil Moisture)等水文气象要素综合为一个干旱综合表征指数(PRSM),其计算公式为:

$$PRSM = \sum_{i=1}^p w_i D_i \quad (5)$$

$$D_i = v_1 P_r + v_2 R_f + v_3 S_m \quad (6)$$

$$w_i = \frac{g_i}{\sum_{i=1}^p g_i} \quad (7)$$

式中: $D_i$ 为第*i*个主成分,其为原始指标降雨、径流和土壤含水量的线性组合; $w_i$ 为第*i*个主成分的权重系数; $P_r$ 为标准化面平均降雨指数; $R_f$ 为标准化面平均径流指数; $S_m$ 为标准化面平均土壤含水量指数; $v_1, v_2, v_3$ 为降雨、径流和土壤含水量指标协方差矩阵的特征向量; $g_i$ 为第*i*个主成分的贡献率。其中,土壤含水量指标采用SWAT模型模拟得到。

## 2 干旱综合表征指标在干旱频率分析中的应用

### 2.1 干旱过程识别

干旱研究中,通常采用游程理论<sup>[21]</sup>进行干旱识别,本文以干旱综合表征指数(PRSM)的月相对距平值进行干旱识别,即以综合水文要素值偏离同期多年平均值的程度识别干旱,计算公式为:

$$Ma = \frac{M_{i,j} - \bar{M}_j}{\bar{M}_j} \quad (8)$$

式中:  $M_{ij}$  为第  $i$  水平年、第  $j$  月的干旱综合表征指数值;  $\overline{M_j}$  为第  $j$  月的干旱综合表征指数的多年平均值;  $M_n$  为干旱综合表征指数相对距平值, 当该值为负时, 表明综合水文要素在该月偏少, 距平绝对值越大, 表明偏离平均水平程度越大。

现有的一些研究认为过多的小干旱事件会影响干旱事件的统计分析, 设定 3 个截断水平(表达阈值的概念, 下同)  $x_{s0}$ 、 $x_{s1}$  和  $x_{s2}$  对识别出的小干旱过程进行适当的处理或合并<sup>[22-24]</sup>, 如图 1 所示, 阈值  $x_{s1}$  用于确定全部的干旱过程; 阈值  $x_{s0}$  用于对识别出的相邻干旱过程进行合并; 而阈值  $x_{s2}$  用于对识别出的小干旱过程进行处理。在干旱过程的识别中, 截断水平的选取是关键, 选取的截断水平要能够反映水文序列多年的平均水平和水分的需求<sup>[25]</sup>。本文采用上述理论, 选取水文序列的相对负距平值作为截断水平, 识别干旱过程, 不合并相邻干旱过程, 不处理小干旱过程。

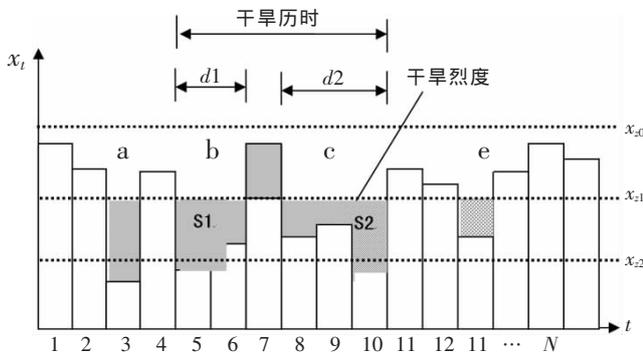


图 1 干旱过程识别及特征变量的提取

Fig.1 Identifying drought process and extracting its characteristic variables

### 2.2 干旱频率分析

目前, 关于水文频率的研究, 洪水频率研究的较为成熟, 经历了由传统的洪峰、时段洪量单变量频率分析逐步发展为峰、量组合的多变量频率分析的漫长过程。然而, 干旱问题的研究起步较晚, 干旱频率的计算没有完全按照洪水频率分析的思路进行, 而是按现有的多变量方法直接处理多个变量的频率分析问题。如, 随着游程理论的发展, 采用游程概率理论分析干旱频率。近年来, 国内学者马秀峰将游程分析理论<sup>[26-27]</sup>引入干旱问题的研究中, 通过伯努力试验, 定义状态发生的平均概率、游程的期望频次、期望长度、迁移概率等概念描述游程长度的数字特征, 用随机试验次数定义游程长度的重现期。

设在每次试验中能发生某随机事件的状态概率为  $p_z$ , 如果连续进行  $T(x)$  次重复试验, 就可能出现一

次长度不小于  $x$  的游程, 则  $T(x)$  就称为该随机事件的游程长度不小于  $x$  的重现期, 其计算公式为:

$$T(x) = x + \frac{p_z^{-x} - 1}{1 - p_z} \quad (9)$$

对于以月为步长的取样方式, 而习惯上采用年遇水平表示重现期, 因此, 可以通过公式(10)对重现期进行换算:

$$T(x) = \frac{1}{12} \left[ x + \frac{p_z^{-x} - 1}{1 - p_z} \right] \quad (10)$$

式中:  $x$  为某种状态发生游程长度, 在干旱频率分析中, 游程长度  $x$  反映的是干旱历时;  $p_z$  为游程长度迁移概率, 表达式为:

$$p_z = \frac{n}{n-1} \cdot \frac{E-1}{E} \quad (11)$$

式中:  $n$  为干旱总时段数;  $E$  为游程的期望长度, 其计算公式为:

$$E = \frac{\sum_{x=1}^n x g(x)}{\sum_{x=1}^n g(x)} \quad (12)$$

式中:  $g(x)$  为游程长度期望频次, 一些学者通过伯努力试验, 并求解差分方程, 给出了游程长度期望频次  $g(x)$  的函数。

### 3 实例应用

本文以云南省曲靖境内南盘江上游西桥水文站以上区域为研究对象, 研究区域如图 2 所示, 以该区域内的沾益县、麒麟区和陆良县 3 个县级行政区为计算单元, 采用 1991~2012 年各县逐月面平均雨量、径流量和土壤含水量构成样本系列, 其中, 以主要控制断面流量作为各县的区域径流, 如以西桥站径流作为南盘江上游西桥水文站以上区域的径流, 土壤含水量数据由 SWAT 模型模拟得到(具体过程本文不做赘述)。

由前述主成分分析干旱综合指标构建方法, 可确定研究区域降雨、径流和土壤含水量要素协方差矩阵的特征向量  $v_1, v_2, v_3$  和主成分权重系数  $w_i$  如表 1 所示。

沾益县第一主成分为:  $D_{沾1} = 0.57P_{r1} + 0.61R_{f1} + 0.55S_{m1}$

第二主成分为:  $D_{沾2} = 0.63P_{r1} + 0.10R_{f1} - 0.77S_{m1}$

沾益县第一主成分和第二主成分的累积贡献率为 89.3%, 表明前两个主成分能够综合反映原始降雨、径流和土壤含水量等干旱影响要素包含的大部分信息, 因此, 分别以第一主成分和第二主成分贡献率

在其累积贡献率中所占的比重将两个主成分综合,构成干旱综合表征指数: $PRSM_{沾益}=0.79D_{沾1}+0.21D_{沾2}$ 。

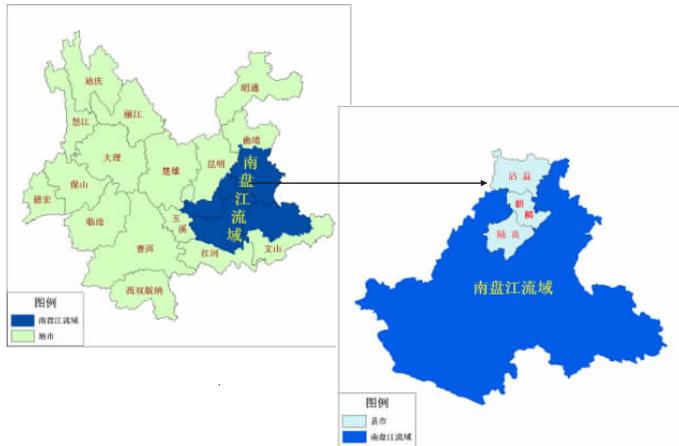


图2 研究区域示意图

Fig.2 The study area

表1 干旱综合表征指标主成分特征向量和权重系数计算结果

Table1 The principal component characteristic vector and weight coefficient calculation results of the drought comprehensive indicators

	沾益县	麒麟区	陆良县
第一主成分	$v_1$	0.57	0.62
	$v_2$	0.61	0.64
	$v_3$	0.55	0.45
第二主成分	$v_1$	0.63	0.37
	$v_2$	0.10	0.26
	$v_3$	-0.77	-0.89
权重系数	$w_1$	0.79	0.71
	$w_2$	0.21	0.29

同理,麒麟区第一主成分为: $D_{麒1}=0.69P_{r2}+0.70R_{r2}+0.23S_{m2}$

第二主成分为: $D_{麒2}=0.18P_{r2}+0.14R_{r2}-0.97S_{m2}$

麒麟区第一主成分和第二主成分的累积贡献率为90.9%,干旱综合表征指数: $PRSM_{麒麟}=0.65D_{麒1}+0.35D_{麒2}$ 。

陆良县第一主成分为: $D_{陆1}=0.62P_{r3}+0.64R_{r3}+0.45S_{m3}$

第二主成分为: $D_{陆2}=0.37P_{r3}+0.26R_{r3}-0.89S_{m3}$

陆良县第一主成分和第二主成分的累积贡献率为90.1%,干旱综合表征指数: $PRSM_{陆良}=0.71D_{陆1}+0.29D_{陆2}$ 。

式中: $j=1,2,3$ 分别代表沾益县、麒麟区和陆良县; $P_{ij}$ 、 $R_{ij}$ 和 $S_{mj}$ 分别为沾益县、麒麟区和陆良县的标准化面平均降雨、径流和土壤含水量。

在此基础上,分别以截断水平为-0.1、-0.2、-0.3、

-0.4、-0.6、-0.8、-1.0进行干旱过程识别,结合《云南减灾年鉴》(1991~2011)、《中国气象灾害大典:云南卷》及《云南水旱灾害》等统计资料中关于曲靖地区历史干旱的描述,选定截断水平为-0.4识别的干旱过程,与实际旱情描述相符。本文基于1991~2012年逐月降雨量、径流量和土壤含水量指标,以截断水平 $P_a=R_a=S_a=-0.4$ 进行干旱过程识别,认为相对距平值在-0.4以下发生一次干旱过程,识别西桥水文站以上区域干旱过程,沾益县识别的干旱过程如图3所示。

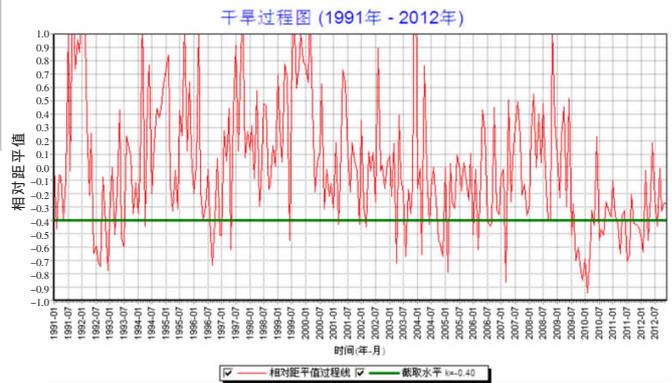


图3 基于干旱综合指数的沾益县干旱过程识别

Fig.3 Drought process identification of the Zhanyi county based on drought comprehensive indicators

结合干旱过程识别结果,根据游程分析计算干旱频率理论,计算连旱历时的平均概率、游程期望和迁移概率,并将干旱历时进行分组,构造干旱连旱长度的概率分布函数,计算其超过概率,在此基础上,计算游程长度的重现期。以沾益县为例,干旱频率计算结果如表2所示,并将干旱综合指标计算的重现期与降雨、径流和土壤含水量单指标计算的干旱重现期进行对比。

由表2可以看出,沾益县在1991~2012共22年内,基于干旱综合表征指标识别的干旱过程共32场,2009年9月~2010年3月期间,发生了历时7个月重现期约54年一遇的干旱;基于降雨指标识别的干旱过程共58场,最长连旱历时为5个月,发生在2009年11月~2010年3月期间,干旱重现期约为48年一遇;基于径流指标识别的干旱过程共25场,最长连旱历时为12个月,相应的重现期约为54年一遇;对于2009年9月~2010年5月这一场干旱而言,其重现期约为14年一遇;而基于土壤含水量指标识别的干旱过程共35场,最长连旱历时为10个月,发生在2009年8月~2010年5月期间,其干旱重现期约为40年一遇。对于沾益县2009年7月~2010年5月这一典型干旱过程而言,采用本文构建的综合指标计算的重现期约为54

表2 沾益县干旱重现期计算结果

Table2 The results of drought period in the Zhanyi county

综合干旱指标			降雨指标			径流指标			土壤含水量指标		
连旱长度/月	发生次数	重现期/a	连旱长度/月	发生次数	重现期/a	连旱长度/月	发生次数	重现期/a	连旱长度/月	发生次数	重现期/a
$x$	$G(x)$	$T(x)$	$x$	$G(x)$	$T(x)$	$x$	$G(x)$	$T(x)$	$x$	$G(x)$	$T(x)$
1	20	0.3	1	40	0.4	1	15	0.2	1	18	0.2
2	7	0.8	2	14	1	2	3	0.5	2	9	0.6
3	2	2.0	3	2	4	3	2	1	3	3	1
4	1	2.0	4	1	16	6	2	4	7	3	9
5	1	4.5	5	1	48	8	1	9	9	1	24
6	0	24				9	1	14	10	1	40
7	1	54				12	1	54			

年一遇,间于降雨、径流和土壤含水量单指标计算的干旱重现期之间,与当地了解实际的干旱频率基本一致。能够明确回答一场干旱的综合频率这一问题。同理,对麒麟区和陆良县单指标与综合指标计算的重现期进行了分析(见表3),其分析结果与沾益县所述基本一致。

表3 基于干旱综合指标的麒麟区和陆良县重现期计算结果

Table3 The results of drought period based on drought comprehensive indicators at Qilin and Luliang

麒麟区			陆良县		
连旱长度/月	发生次数	重现期/a	连旱长度/月	发生次数	重现期/a
$x$	$G(x)$	$T(x)$	$x$	$G(x)$	$T(x)$
1	18	0.2	1	32	0.3
2	7	0.55	2	7	1
3	11	1.0	3	1	3
4	4	1.8	8	2	511
5	3	3			
6	1	5			
7	1	9			

由表3可以看出,1991~2012年间,基于干旱综合指标识别的麒麟区干旱过程共45场,最长连旱历时为7个月,发生在2009年11月~2010年3月期间,干旱重现期约为9年一遇;识别的陆良县干旱过程共42场,连旱历时最长为8个月,连续发生了两次,分别发生在2009年8月~2010年3月和2011年7月~2012年2月期间,相应的重现期约为511年一遇,表明对于2009年7月~2010年5月这一典型干旱过程而言,陆良县的干旱程度相对其它两个地区较为严重,与当时的实际旱情基本一致。

#### 4 结语

干旱指标对于旱情特征的分析极为重要,由于不同行业对干旱的认识不同,且干旱各要素影响时序的不

同,基于降雨要素识别的干旱过程对应的重现期与基于径流要素以及基于土壤含水量要素识别的干旱过程对应的重现期是存在差别的。本文尝试采用一种同时考虑气象、水文、农业干旱表征要素的综合指标来描述干旱,为干旱指标的进一步研究提供参考。同时,干旱识别过程中截取水平的选取,干旱重现期的计算本文未做深入探讨,如何更加合理、科学地识别干旱过程客观反映区域的实际旱情,还有待进一步研究。

#### 参考文献:

- [1] SL424-2008,旱情等级标准[S].(SL424-2008, Standard of Classification for Drought Severity [S]. (in Chinese))
- [2] Thomas B MCKEE, Nolan J DOESKEN, John KLEIST. Drought monitoring with multiple time scales [A]. 9th Ams Conference on Applied Climatology[C]. 1995:233-236.
- [3] Hong WU, Michael J HAYES, Albert WEISS, et al. An evaluation of the standardized precipitation index, the China-z index and the statistical Z-score[J]. International Journal of Climatology, 2001, 21 (6):745-758.
- [4] Wayne C.PALMER. Meteorological Drought[M]. Springer Science,1965.
- [5] GB/T 20481-2006, 气象干旱等级[S]. (GB/T 20481-2006, Classification of Meteorological Drought Category [S]. (in Chinese))
- [6] BA SHAFER, LE DEZMAN. Development of a surface water supply index (SWSI) to assess the severity of drought conditions in snow-pack runoff areas [A]. 50th Annual Western Snow Conference[C]. 1982:164-175.
- [7] Richard R, HEIM JR. A review of twentieth-century drought indices used in the United States [J]. Bulletin of the American Meteorological Society, 2002,83(8):1149-1165.
- [8] 闫桂霞. 综合气象干旱指数及其应用研究 [D]. 南京: 河海大学, 2009. (YAN Guixia. Integrated meteorological drought index and its application [D]. Nanjing: Hohai University, 2009. (in Chinese))
- [9] John KEYANTASH, John A DRACUP. The quantification of drought: an evaluation of drought indices[J]. Bulletin of the American Meteorological Society, 2002, 83(8):1167-1180.
- [10] 董海滨,陆宝宏,周祥林,等. 关于降水干旱指标的设想[J]. 水文,

- 2005,25(2):4-8. (TONG Haibin, LU Baohong, ZHOU Xianglin, et al. Tentative suggestions on precipitation-based drought index [J]. Journal of China Hydrology, 2005,25(2):4-8. (in Chinese))
- [11] 姚玉璧,张存杰,邓振镛,等. 气象、农业干旱指标综述[J]. 干旱地区农业研究, 2007,25(1):185-189+211. (YAO Yubi, ZHANG Cunjie, DENG Zhenyong, et al. Overview of meteorological and agricultural drought indices [J]. Agricultural Research in the Arid Areas, 2007,25(1):185-189,211. (in Chinese))
- [12] 杜继稳. 陕西省干旱监测预警评估与风险管理 [M]. 北京: 气象出版社, 2008. (DU Jiwen. Drought Monitoring and Early Warning Assessment and Risk Management in Shaanxi Province[M]. Beijing: China Meteorological Press, 2008. (in Chinese))
- [13] 乔丽,杜继稳,薛春芳,等. 干旱指标在陕西省适用性研究[J]. 干旱地区农业研究, 2010,28(2):1-6. (QIAO Li, DU Jiwen, XUE Chunfang, et al. Applicability of drought indices in Shaanxi province[J]. Agricultural Research in the Arid Areas, 2010,28(2):1-6. (in Chinese))
- [14] 谢五三, 田红. 五种干旱指标在安徽省应用研究 [J]. 气象, 2011,37(4):503-507. (XIE Wusan, TIAN Hong. Study on the application of five drought indexes in Anhui province [J]. Meteorological Monthly, 2011,37(4):503-507. (in Chinese))
- [15] 舒金扬, 董依生. 利用水文监测数据构建干旱程度指标的方法[J]. 水文, 2012,32(6):38-41. (SHU Jinyang, DONG Nongsheng. How to determine drought indexes by using observed hydrological data [J]. Journal of China Hydrology, 2012,32(6):38-41. (in Chinese))
- [16] 王劲松,李忆平,任余龙,等. 多种干旱监测指标在黄河流域应用的比较[J]. 自然资源学报, 2013,28(8):1337-1349. (WANG Jinsong, LI Yiping, REN Yulong, et al. Comparison among several drought indices in the Yellow river valley [J]. Journal of Natural Resources, 2013,28(8):1337-1349. (in Chinese))
- [17] 董前进,谢平. 水文干旱研究进展[J]. 水文, 2014,34(4):1-7. (DONG Qianjin, XIE Ping. Advances in hydrological drought research [J]. Journal of China Hydrology, 2014,34(4):1-7. (in Chinese))
- [18] 李柏贞,周广胜. 干旱指标研究进展 [J]. 生态学报, 2014,34(5):1043-1052. (LI Baizhen, ZHOU Guangsheng. Advance in the study on drought index [J]. Acta Ecologica Sinica, 2014,34(5):1043-1052. (in Chinese))
- [19] 翟家齐,蒋桂芹,裴源生,等. 基于标准水资源指数(SWRI)的流域水文干旱评估——以海河北系为例[J]. 水利学报, 2015,46(6):687-698. (ZHAI Jiaqi, JIANG Guiqin, PEI Yuansheng, et al. Hydrological drought assessment in the river basin on standard water resources index (SWRI): a case study on the northern Haihe river [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2015,46(6):687-698. (in Chinese))
- [20] 林盛吉. 基于统计降尺度模型的钱塘江流域干旱预测和评估[D]. 杭州: 浙江大学, 2011. (LIN Shengji. Drought Analysis Using Statistical Downscaling Models in Qiantang River Basin [D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2011. (in Chinese))
- [21] 彭高辉,夏军,马秀峰,等. 黄河流域干旱频率分布及轮次数字特征分析[J]. 人民黄河, 2011,33(6):3-5,12,149. (PENG Gao-hui, XIA Jun, MA Xiufeng, et al. Analysis of drought frequency distribution and round digital characteristics of the Yellow river basin [J]. Yellow River, 2011,33(6):3-5,12,149. (in Chinese))
- [22] 闫宝伟,郭生练,肖义,等. 基于两变量联合分布的干旱特征分析[J]. 干旱区研究, 2007,24(4):537-542. (YAN Baowei, GUO Shenglian, XIAO Yi, et al. Analysis on drought characteristics based on bivariate joint distribution [J]. Arid Zone Research, 2007,24(4):537-542. (in Chinese))
- [23] 陆桂华,闫桂霞,吴志勇,等. 基于copula函数的区域干旱分析方法[J]. 水科学进展, 2010,21(2):188-193. (LU Guihua, YAN Guixia, WU Zhiyong, et al. Regional drought analysis approach based on copula function [J]. Advances in Water Science, 2010,21(2):188-193. (in Chinese))
- [24] 周玉良,袁潇晨,金菊良,等. 基于Copula的区域水文干旱频率分析[J]. 地理科学, 2011,31(11):1383-1388. (ZHOU Yuliang, YUAN Xiaochen, JIN Juliang, et al. Regional hydrological drought frequency based on copulas [J]. Scientia Geographica Sinica, 2011,31(11):1383-1388. (in Chinese))
- [25] Anne K FLEIG, Lena M TALLAKSEN, Hege HISDAL, et al. A global evaluation of streamflow drought characteristics [J]. Hydrology and Earth System Sciences Discussions, 2006,10(4):535-552.
- [26] 马秀峰. 随机序列轮长与轮次的统计规律 [J]. 水科学进展, 1994,5(2):95-103. (MA Xiufeng. Statistical regularity of random sequence length and turn round [J]. Advances in Water Science, 1994,5(2):95-103. (in Chinese))
- [27] 马秀峰,夏军. 游程概率统计原理及其应用[M]. 北京: 科学出版社, 2011. (MA Xiufeng, XIA Jun. The Principle and Application of Run Probability Statistics Theory [M]. Beijing: Science Press, 2011. (in Chinese))

## Construction of Drought Composite Indicator Based on Principal Component Analysis and Its Application

CHANG Wenjuan<sup>1,2,3</sup>, LIANG Zhongmin<sup>4</sup>, MA Haibo<sup>1,2</sup>

(1. College of Hydraulic & Environmental Engineering, China Three Gorges University, Yichang 443002, China;

2. Hubei Provincial Collaborative Innovation Center for Water Resources Security, Wuhan 430072, China

3. State Key Laboratory of Simulation and Regulation of Water Cycle in River Basin, China Institute of Water Resources and Hydropower Research, Beijing 100038, China; 4. College of Hydrology and Water Resources, Hohai University, Nanjing 210098, China)

**Abstract:** The construction of comprehensive index of drought was presented and the individual hydrology meteorological elements, such as rainfall, runoff and soil moisture content, were integrated as a comprehensive drought index using the Principal Component (下转第 82 页)

门开启时应所有闸门都开到同一开高, 会避免这种现象发生, 测次 42 流速分布图见图 6。

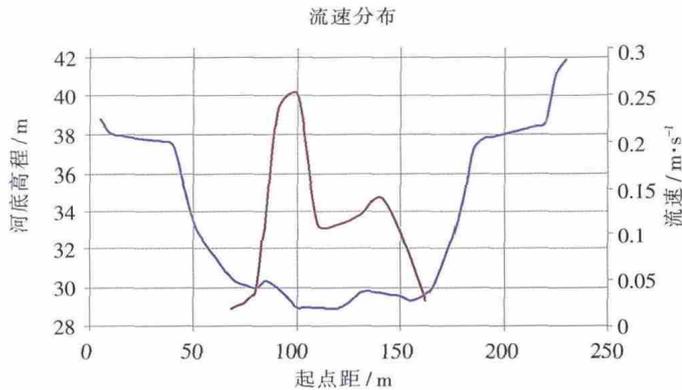


图 6 测次 42 流速分布图

Fig.6 The velocity distribution of the 42nd measurement

由于流速仪测流历时比较长, 是一个时段内部分流量的积分过程, 而能坡法计算的是瞬时流量, 受流速脉动的影响, 瞬时流量变化比较大, 造成瞬时流量与流速仪法测得结果不会完全重合, 缆道测流采用一点法, 精度相对较低, 可以采用多点法施测。总体来说, 能坡法测流精度可以满足规范要求。但是, 由于受不确定因素影响, 测量结果会存在一定的波动, 其稳定性不如流速仪法测流, 不过作为实时自动监测应用, 其方便性、

可靠性、记录资料的完整性及远程传输等优点, 提高了工作效率和水文信息化水平。

#### 4 结语

能坡法流量实时在线自动监测系统实现了流量测验的实时自动监测、远程监视及网络共享等。基于能坡的垂线平均流速分布模型以过水断面为基础, 通过一条或两条测速垂线, 借用大断面, 可快速、精确地计算出断面流量。由于只测 1~2 条垂线平均流速, 大大地缩短了测流历时, 在陡涨陡落的中小河流抢测洪峰时, 测验精度会高于常测法, 适合在大洪水期间报讯、水文巡测、水文应急测验、水资源监测等场合使用。

#### 参考文献:

- [1] 田淳, 刘少华. 声学多谱测流原理及其应用[M]. 郑州: 黄河水利出版社, 2003. (TIAN Chun, LIU Shaohua. Acoustic Doppler Flow Principle and Its Application [M]. Zhengzhou: Yellow River Press, 2003. (in Chinese))
- [2] 颜开. 用曼宁公式计算均质边壁河道中垂线平均流速问题初探[J]. 水文, 1993, (2):29-35. (YAN Kai. Discussion on using Manning formula to calculate vertical mean flow velocity in homogeneous side wall channel [J]. Journal of China Hydrology, 1993,(2):29-35. (in Chinese))

### Application of Real-time Flow Monitoring System with Energy Grade Method at Shenqiu Station

HAN Xinqing

(Zhoukou Hydrology and Water Resources Survey Bureau of Henan Province, Zhoukou 466000, China)

**Abstract:** The real-time flow monitoring system with energy grade method combined with the advanced technology such as computer processing and network data transmission, can change the traditional hydrological elements monitoring methods into the digital process of information collection, storage and transferring. The system was used at the Shenqiu Station. The measured results were compared with those from current meter method, so as to verify the reliability and rationality.

**Key words:** energy grade method; model; application; comparative analysis

(上接第 38 页) Analysis method. The relative anomaly characterization of drought indicators was employed to identify the drought process by Run theory. Run theory was applied to probabilistically describe the frequency characteristics of drought, eventually to achieve a comprehensive analysis for the drought frequency. Then, the area above the Youxiquiao Hydrometry Station in Nanpanjiang upstream was selected as a pilot to calculate the drought return period using the presented theories and methods and contrast to the return period of single drought index. The results show that the constructed comprehensive drought index using the Principal Component Analysis method is reasonable and feasible.

**Key words:** drought index; principal component analysis; drought identifying; return period