

DOI: 10.13476/j.cnki.nsbdqk.2022.0093

徐泗鑫, 李蔓, 金菊良, 等. 减法集对势在佛子岭水库汛期时间域划分中的应用[J]. 南水北调与水利科技(中英文), 2022, 20(5): 935-943. XU S X, LI M, JIN J L, et al. Application of subtractive set pair potential in the determining flood season of Foziling Reservoir[J]. South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology, 2022, 20(5): 935-943. (in Chinese)

# 减法集对势在佛子岭水库汛期时间域划分中的应用

徐泗鑫<sup>1</sup>, 李蔓<sup>1</sup>, 金菊良<sup>1,2</sup>, 周戎星<sup>1</sup>, 崔毅<sup>1,2</sup>, 白夏<sup>1,2</sup>

(1. 合肥工业大学土木与水利工程学院, 合肥 230009; 2. 合肥工业大学水资源与环境系统工程研究所, 合肥 230009)

**摘要:** 为有效表征水库流域降水、径流等不确定性因素对水库汛期时间域划分的综合影响, 针对基于集对分析的汛期分期现有方法中根据人为经验确定汛期的问题, 应用水库汛期时间域划分概念, 提出采用减法集对势方法判别汛期时间域划分结果, 构建基于减法集对势的汛期时间域划分方法。以佛子岭水库汛期划分为例加以验证, 选择能够影响汛期划分的 5 个暴雨、洪水指标, 并根据当地气候特性, 进行佛子岭水库汛期时间域划分, 其中汛期分期包含前汛期、主汛期、伏旱期和后汛期 4 个分期, 最后与集对分析两元和三元联系数法进行对比分析。应用结果表明: 用减法集对势法进行水库汛期时间域划分简便实用, 汛期划分成果合理, 与集对分析两元和三元联系数法的分期结论相一致, 能客观反映佛子岭流域暴雨洪水特性对汛期影响的态势, 能直观区分非汛期和汛期的界限。提出的减法集对势法用于汛期时间域划分合理可行, 在水库汛期时间域划分中具有推广应用前景。

**关键词:** 汛期时间域划分; 汛期分期; 防洪兴利; 集对分析; 减法集对势; 佛子岭水库

中图分类号: TV62 文献标志码: A 开放科学(资源服务)标识码(OSID):



我国季风区水库流域的入库河道水位每年有规律性的水位上涨时期, 叫汛期。汛期分期是指找出全年中入库河道水位相对比较高的几个时期<sup>[1-2]</sup>, 为汛前检查、汛期防洪兴利、汛后水毁修复等水库管理提供科学依据。汛期时间域划分<sup>[3]</sup>是指既找出入库水位比较高的几个时期, 又找出入库河道水位正常和干枯的时期。即汛期时间域划分不仅对汛期的内部进行划分(即汛期分期), 还对汛期与非汛期的界限进行划分。水库汛期时间域划分作为汛限水位的基础性工作, 对于水库安全运行管理具有重要的指导意义。大多水库在整个汛期以较低水位运行来满足防洪要求<sup>[2]</sup>, 由于没有进行汛期时间域划分, 水库防洪与兴利协调程度低, 降低了水库作用<sup>[4]</sup>。

汛期分期作为汛期时间域划分的重要组成部分

被国内外学者<sup>[5-10]</sup>研究的很多, 水库汛期分期实际上是水库流域降水、径流等多种不确定性因素的综合评判问题, 近年来集对分析在处理不确定性问题方面独特、新颖, 考虑周全<sup>[10]</sup>, 例如: 谢飞等<sup>[11]</sup>成功用集对分析法对滦河潘家口水库汛期进行分期; 莫崇勋等<sup>[12]</sup>将集对分析方法应用于澄碧河水库汛期分期, 在前汛期和主汛期之间识别出了过渡期; 严培胜等<sup>[13]</sup>考虑洪水为影响三峡水库汛期分期主要因素, 基于汛期每天联系数进行汛期分期。这些汛期分期方法中, 大多数采用经验法人为设定汛期时间, 具有很强人为主观性<sup>[3]</sup>。在应用集对分析联系数方法时, 常常因忽略差异系数项没有进一步挖掘汛期与非汛期之间、不同分期之间的转化信息。

为此, 在上述研究基础上, 应用水库汛期时间域

收稿日期: 2021-09-25 修回日期: 2022-03-15 网络出版时间: 2022-10-08

网络出版地址: <https://kns.cnki.net/kcms/detail/13.1430.tv.20220929.1552.002.html>

基金项目: 国家重点研发计划项目(2018YFC0407206); 国家自然科学基金项目(52109009); 中央高校基本科研业务费专项资金资助项目(JZ2020HGQA0202)

作者简介: 徐泗鑫(1994—), 男, 安徽六安人, 主要从事结构水文学研究。E-mail: XUSIXIN1994@126.com

通信作者: 金菊良(1966—), 男, 江苏吴江人, 教授, 博士, 博士生导师, 主要从事结构水文学研究。E-mail: JINJL66@126.com

划分概念丰富和发展了汛期分期的内涵,应用集对分析中的联系数减法集对势方法<sup>[14-17]</sup>构建水库汛期时间域划分方法,进一步增强集对分析在汛期时间域划分中的合理和直观性,在佛子岭水库<sup>[18]</sup>开展实证研究,为集对分析在水库汛期时间域划分的应用探索新途径。

## 1 基于减法集对势的汛期时间域划分方法

### 1.1 减法集对势方法

联系数是赵克勤<sup>[19]</sup>在集对分析理论基础上提出的一个综合定量指标,其核心是表征有关联的两个集对的同、异、反关系。设两个集合  $X$  和  $Y$ ,  $X$  有  $n$  项表征其特征的指标,即  $X=(x_1, x_2, \dots, x_n)$ ,  $Y$  亦有  $n$  项表征其特征的指标,即  $Y=(y_1, y_2, \dots, y_n)$ , 则  $X$  和  $Y$  构成集对  $H(X, Y)$ 。表征  $H(X, Y)$  关系的三元联系度为

$$u = a + bi + cj \quad (1)$$

式中:  $a$ 、 $b$ 、 $c$  分别表示集对系统的同一度、差异度、对立度;  $a$ 、 $b$ 、 $c$  的取值区间均为  $[0, 1]$ , 同时须满足  $a+b+c=1$ ;  $i$  为差异度系数,  $i \in [-1, 1]$ ;  $j$  为对立度系数, 一般取值为  $j=-1$ <sup>[19]</sup>。

联系数是一种定量描述集对系统不确定性关系的结构函数<sup>[20-21]</sup>。集对势是在联系数的基础上发展而来的,在联系数表达式  $u=a+bi+cj$  中,同一度项  $a$ 、对立度项  $cj$  是相对确定的模糊关系,差异度项  $bi$  是相对不确定的模糊关系。同时,同一度  $a$ 、差异度  $b$ 、对立度  $c$  在宏观层面上是相对确定的值,差异度系数  $i$  在微观层面上是相对不确定的,可根据研究问题的需要而继续分解。由此演化出减法集对势等多种类型的联系数伴随函数<sup>[15, 21-25]</sup>。金菊良等<sup>[15]</sup>提出了三元减法集对势  $s_f(u)$  为

$$s_f(u) = a - c + b(a - c) = (a - c)(1 + b) \quad (2)$$

式(2)是将式(1)中差异度项  $bi$  按照比例取值法<sup>[15-16]</sup>进行分配得到的,即从宏观角度出发,将差异度项  $bi$  按  $b\{a/(a+b+c)\}$ 、 $b\{c/(a+b+c)\}$  的比例分配到同一度项  $a$ 、对立度项  $cj$  中。式中:  $s_f(u)$  为减法集对势,  $j=-1, a+b+c=1$ 。当式(1)中差异度项  $bi$  无限接近同一度项时,这时可近似忽略  $b\{c/(a+b+c)\}$  这一部分的影响,即  $i=1, s_f(u)=(a+b)-c$ ; 当式(1)中差异度项  $bi$  无限接近对立度项时,这时可近似忽略  $b\{a/(a+b+c)\}$  这一部分的影响,即  $i=-1, s_f(u)=a-(b+c)$ ; 当  $i=1$  或  $i=-1$  时,反映集对事件本身所处

的两个极端状态<sup>[15]</sup>。显然  $s_f(u) \in [-1, 1]$ , 可以将减法集对势分为 5 个等级: I 级反势  $s_f(u) \in [-1, -0.6)$ , II 级偏反势  $s_f(u) \in [-0.6, -0.2)$ , III 级均势  $s_f(u) \in [-0.2, 0.2]$ , IV 级偏同势  $s_f(u) \in (0.2, 0.6]$ , V 级同势  $s_f(u) \in (0.6, 1]$ 。

### 1.2 汛期时间域划分方法

基于减法集对势方法的水库汛期时间域划分基本思路是将各汛期时间域划分指标值与对应的汛期时间域划分标准构成一个集对,对一个集对所包含的同一性、差异性、对立性关系进行分析,并利用减法集对势结合当地气候特性,得出汛期时间域划分结果。具体步骤如下:

流域汛期分期的主要影响因素有暴雨和洪水特性、天气系统及大气环流季节变化等<sup>[11]</sup>。分析汛期时间域划分的主要影响因子,并构建确定汛期时间域划分的指标体系,  $A_i=(x_{i1}, x_{i2}, \dots, x_{im})$ 。  $i$  表示计算时段的序列号 ( $i=1, 2, \dots, N$ ),  $m$  为汛期时间域划分指标系统的指标数。

确定汛期时间域划分的标准数  $K$  及划分标准<sup>[11-12]</sup>。根据研究水库的降水径流等来水变化特征确定汛期时间域划分标准,这里取  $K=3$ , 即非汛期  $B_1$ 、前汛期  $B_2$  和主汛期  $B_3$ 。各指标划分标准定义为  $[0, S_1)$ 、 $[S_1, S_2)$ 、 $[S_2, +\infty)$ , 分别对应集合  $B_1$ 、 $B_2$ 、 $B_3$ , 其中  $S_1$  和  $S_2$  表示汛期时间域划分指标的分期标准界限值。非汛期可构建集合  $B_1=(1, 1, \dots, 1)$ , 前汛期可构建的集合  $B_2=(2, 2, \dots, 2)$ , 主汛期可构建的集合  $B_3=(3, 3, \dots, 3)$ 。

根据上述汛期的时间域划分标准,集合  $A_i$  中的评价样本经归一化后<sup>[11]</sup>, 评价指标样本  $A_i$  与主汛期评价标准  $B_3$  组成一个集对  $H_i=(A_i, B_3)$ , 计算集对联系数。

比较  $A_i$  与  $B_3$  对应的符号元素, 分别统计符号相同的、符号相差为 1 及符号相差为 2 的个数, 即相应为联系数中属于同一度  $s$ 、差异度  $f$  和对立度  $p$  的个数, 代入式(1)中<sup>[19]</sup>, 其中  $a=s/m, b=f/m, c=p/m$ , 求出各时段各指标集合与标准集合  $B_3$  的联系数, 并利用式(2)计算各时段样本联系数的减法集对势值  $s_f(u_i)$ , 判断这些联系数的整体发展趋势、识别汛期时间域:  $s_f(u_i)$  中若处于反势则判为非汛期, 同势为主汛期, 其他为前汛期、后汛期和伏早期。当  $s_f(u_i)$  为偏同式、偏反势或均势时, 时段位于主汛期之前的是前汛期, 位于主汛期与主汛期之间的是伏早期, 位于主汛期之后的是后汛期。

## 2 实例分析

### 2.1 基于减法集对势的汛期时间域划分方法论证

选取文献 [5] 和 [12] 中的溪洛渡水库流域和澄碧河水库流域水文气象数据,计算两流域各时段水文气象与汛期联系系数减法集对势值,并判断汛期分期结果,最后与原文对比,详见表 1。

表 1 溪洛渡水库减法集对势与模糊联系度对比和澄碧河水库流域减法集对势与联系数对比

Tab. 1 Comparison between the pair potential and fuzzy connection degree in Xiluodu Reservoir basin and comparison between the pair potential and connection number of subtraction set in Chengbihe Reservoir basin

时段	澄碧河水库流域		溪洛渡水库流域	
	本文 (减法集对势)	文献[12] (联系数)	本文 (减法集对势)	文献[5] (模糊联系度)
4月上旬	-1.00	-1.0		
4月中旬	-1.00	-1.0		
4月下旬	-1.00	-1.0		
5月上旬	-0.84	-0.6	-1.00	0
5月中旬	-0.36	-0.2	-1.00	0
5月下旬	0	0	-1.00	0
6月上旬	0.64	0.4	-0.96	0.043
6月中旬	0.96	0.8	-0.60	0.170
6月下旬	1.00	1.0	0.36	0.170
7月上旬	0.96	0.8	0.84	0.768
7月中旬	0.84	0.6	1.00	1.000
7月下旬	0.84	0.6	1.00	1.000
8月上旬	1.00	1.0	1.00	1.000
8月中旬	0.60	0.6	1.00	1.000
8月下旬	0.64	0.4	1.00	1.000
9月上旬	0	0	0.96	0.876
9月中旬	-0.28	-0.2	0.84	0.811
9月下旬	-0.96	-0.8	0.48	0.617
10月上旬	-1.00	-1.0	-0.64	0.223
10月中旬	-0.48	-0.4	-0.64	0
10月下旬	-0.96	-0.8	-1.00	0

由表 1 可知:根据澄碧河水库流域和溪洛渡水库流域当地水文气象特性,采用文献 [12] 和 [5] 中的汛期划分标准时,采用减法集对势与文献 [12] 和 [5] 判别汛期分期结果基本一致。汛期分期结果见表 2。通过对这两个流域资料的验证,说明采用减法集对势方法判别汛期分期具有适用性和可靠性。

表 2 汛期分期结果

Tab. 2 Flood season staging results

时段	澄碧河水库流域		溪洛渡水库流域	
	本文	文献[12]	本文	文献[5]
4月上旬	前汛期	前汛期		
4月中旬	前汛期	前汛期		
4月下旬	前汛期	前汛期		
5月上旬	前汛期	前汛期	前汛期	前汛期
5月中旬	过渡期	过渡期	前汛期	前汛期
5月下旬	过渡期	过渡期	前汛期	前汛期
6月上旬	主汛期	过渡期	前汛期	前汛期
6月中旬	主汛期	主汛期	前汛期	前汛期
6月下旬	主汛期	主汛期	过渡期	过渡期
7月上旬	主汛期	主汛期	主汛期	主汛期
7月中旬	主汛期	主汛期	主汛期	主汛期
7月下旬	主汛期	主汛期	主汛期	主汛期
8月上旬	主汛期	主汛期	主汛期	主汛期
8月中旬	主汛期	主汛期	主汛期	主汛期
8月下旬	主汛期	过渡期	主汛期	主汛期
9月上旬	过渡期	过渡期	主汛期	主汛期
9月中旬	后汛期	后汛期	主汛期	主汛期
9月下旬	后汛期	后汛期	过渡期	主汛期
10月上旬	后汛期	后汛期	后汛期	过渡期
10月中旬	后汛期	后汛期	后汛期	后汛期
10月下旬	后汛期	后汛期	后汛期	后汛期

文献 [12] 中 6 月上旬和 8 月下旬为过渡期,采用减法集对势判别这两个月为主汛期。这是由于在采用直接途径求联系数时  $i$  取 0 会忽略了差异度系数对汛期分期产生的影响,所以汛期分期中每个时段的计算结果与采用减法集对势方法相比:当每个时段与汛期的联系程度趋于同一时,计算结果较减法集对势值偏小;当每个时段与汛期的联系程度趋于对立时,计算结果较减法集对势值偏大。所以选择减法集对势来判断汛期分期更加直观,数据信息利用更充分。

### 2.2 基于减法集对势的汛期时间域划分的应用

佛子岭水库位于江淮流域之间,汛期拦蓄大量洪水,保障淮河上游支流淠河中下游的防洪安全,辅助淮河干流蓄洪,为下游城市供水以及淠史杭灌区提供了稳定的水源<sup>[26]</sup>。

佛子岭水库是以防洪、灌溉为主要目标,同时满足供水、发电等目标的综合利用型年调节水库,水库所在流域多年平均年降水量 1 515 mm,多年平

均径流量 16.2 亿 m<sup>3</sup>[27]。

初夏佛子岭流域天气潮湿多雨,6 月中旬以后,雨带在江淮流域徘徊,即梅雨[28]。据研究[28],佛子岭水库所属淮河支流淝河东源上游平均梅雨季节始于 6 月 19 日,7 月 13 日结束,表现为梅雨期集中、持续时间长的特点,此后,受台风降水的制约,如果台风较少,7 月中旬至 8 月中旬易出现“伏旱”天气[29]。

目前,佛子岭水库在管理运行过程中,执行的分期标准为:主汛期为 6 月 15 日—8 月 31 日,后汛期为 9 月 1 日—9 月 15 日。

### 2.2.1 数据处理

由于天气系统及大气环流资料获取较困难,一般从暴雨和洪水的时程分布规律及变化特性作为特征因子,探讨汛期时间域划分问题。暴雨是气象因素的反映,洪水则是暴雨与流域下垫面条件的综合体现[11]。收集了佛子岭水文站 1965—2017 共 50 年的日均流量数据(其中 1969、1973、2004 年资料缺失)和佛子岭水库坝址以上 13 个遥测雨量站的日雨量数据,面雨量数据由所选的 13 个遥测雨量站用泰勒多边形公式计算得到。

根据佛子岭流域洪水特性和气候特征,选用佛子岭水库坝址以上流域 4 月上旬至 10 月下旬的降雨洪水资料。汛期计算时段以旬为单位,共有 21 个旬。各时段能够影响汛期划分的 5 个暴雨、洪水指标  $X_m(m=5)$  包含:旬中暴雨日总数( $X_1$ )、旬多年平均雨量( $X_2$ )、旬中最大 3 d 雨量值( $X_3$ )、旬多年平均来水量( $X_4$ )、旬中年最大洪峰出现次数( $X_5$ )。其中:旬中暴雨日总数是指佛子岭流域统计的 50 年中(1965—2017)汛期降水量  $p>50$  mm 的天数;旬多年平均雨量是指水库控制流域 13 个代表站各旬面平均降水量均值;旬最大 3 d 雨量均值是指统计 50 年内各旬内最大 3 d 雨量的均值;旬多年平均来水量是指统计 50 年各旬上游来水量均值;年最大洪峰出现次数是指统计 50 年中最大洪峰在各旬内出现的次数。各时段划分指标特征值见表 3。

佛子岭水库控制流域降雨径流相对较多的时段为 4 月上旬至 10 月下旬。由于时间跨度长,故汛期时间域划分标准数目  $K$  取 3。非汛期可构建集合  $B_1=(1, 1, 1, 1, 1)$ ,前汛期和后汛期(在主汛期之前为前汛期,在主汛期之后为后汛期)可构建集合  $B_2=(2, 2, 2, 2, 2)$ ,主汛期构建集合  $B_3=(3, 3, 3, 3, 3)$ 。

基于均值标准差法进行评价等级的区间划分,  $B_1 \in [0, x + k_1s)$ ,  $B_2 \in [x + k_1s, x + k_2s)$ ,  $B_3 \in [x + k_2s, \infty)$ , 其中,  $x$ 、 $s$  分别为各指标  $X_i$  包含的所有样本均值和均

方差,  $k_1$ 、 $k_2$  为经验系数,通常取值范围为  $[-1, 1]$ 。 $k_1$ 、 $k_2$  的取值影响阈值的选取从而影响汛期时间域划分的结果,本文依次以间隔 0.1 为步长在  $[-1, 1]$  进行取值[10],结合当地水文气象特性,筛选最优取值。最终确定  $k_1=-0.5$ 、 $k_2=0.5$ [10,12]。指标均值、均方差及分类标准结果见表 4。

表 3 佛子岭水库汛期划分各指标特征值  
Tab. 3 Characteristic values of indexes for flood season division of Foziling Reservoir

集合	时段	$X_1/d$	$X_2/mm$	$X_3/mm$	$X_4/万m^3$	$X_5/次$
$A_1$	4月上旬	3.0	9.0	29.2	407.5	0
$A_2$	4月中旬	1.0	9.7	28.7	392.5	1
$A_3$	4月下旬	1.0	10.6	15.9	488.8	1
$A_4$	5月上旬	3.0	11.9	38.5	570.0	4
$A_5$	5月中旬	12.0	13.3	44.2	695.0	3
$A_6$	5月下旬	7.0	11.4	36.0	544.3	2
$A_7$	6月上旬	11.0	13.9	39.5	561.3	0
$A_8$	6月中旬	10.0	13.2	39.9	646.3	5
$A_9$	6月下旬	28.0	17.9	71.2	969.8	4
$A_{10}$	7月上旬	19.0	17.1	61.9	1 232.6	5
$A_{11}$	7月中旬	17.0	12.9	49.6	960.0	6
$A_{12}$	7月下旬	14.0	13.1	45.3	614.0	2
$A_{13}$	8月上旬	12.0	14.2	51.1	612.0	3
$A_{14}$	8月中旬	13.0	13.9	51.0	735.6	7
$A_{15}$	8月下旬	17.0	15.2	57.8	629.9	4
$A_{16}$	9月上旬	12.0	13.0	42.1	504.3	2
$A_{17}$	9月中旬	6.0	10.1	30.9	361.5	0
$A_{18}$	9月下旬	5.0	8.4	26.2	274.7	0
$A_{19}$	10月上旬	6.0	10.0	30.1	282.7	0
$A_{20}$	10月中旬	2.0	8.4	22.1	232.2	1
$A_{21}$	10月下旬	3.0	8.3	20.7	232.6	0

构建集合  $H=(A_i, B_j)$  并计算其联系数,由此,根据式(2)进一步计算各指标样本联系数的减法集对势并进行汛期时间域划分,结果见表 5。

### 2.2.2 数据分析

由图 1 并结合佛子岭水库流域雨水春夏秋冬少的水文气象特性可以看出:9 月 21 日到次年的 4 月 30 日,此时正值佛子岭流域的秋冬季节前后,降雨量较少。佛子岭水库减法集对势值接近于 -1,说明样本降雨径流情况与汛期各指标特征具有对立性,此时段为非汛期;从 5 月 1 日到 6 月 20 日,佛子岭流域降雨量逐渐增多。样本指标值与汛期特征值的减法集对势值处于偏同势、均势、偏反势,联系

趋势日渐加强,此时段为前汛期;从6月21日到7月20日,佛子岭流域进入梅雨期,样本值与汛期评价指标值的减法集对势值接近于1,联系趋势很紧密,此时段为主汛期;从7月21日到8月10日,江淮地区经常出现伏旱,由于受伏旱天气影响,佛子岭流域内的降雨量减少,样本值与汛期联系数集对势趋于减弱,此时段可单独判为“伏旱期”,来水量

于前汛期后汛期相当;从8月11日到8月31日,佛子岭流域易受台风影响,台风带来大量降雨,雨强大,历时短。由减法集对势可知样本值与汛期评价指标值的联系趋势紧密,此时段为主汛期;从9月1日至9月20日,佛子岭流域进入秋冬季节,降雨减少。汛期时间域划分样本值与汛期联系数集对势趋于减弱,此时段为后汛期和非汛期。

表4 均值、均方差、分类标准

Tab. 4 mean value, mean square error and classification standards

类别	$X_1/d$	$X_2/mm$	$X_3/mm$	$X_4/万m^3$	$X_5/次$
均值	9.6	12.2	39.6	568.9	2.4
均方差	6.8	2.7	19.3	250.5	2.1
非汛期	[0, 6.2)	[0, 10.8)	(0, 32.7]	(0, 443.7]	(0, 1.3]
前后汛期	[6.2, 13]	[10.8, 13.5]	(32.7, 46.6]	(443.7, 694.2]	(1.3, 3.5]
主汛期	(13, $\infty$ ]	(13.5, $\infty$ ]	(46.6, $\infty$ ]	(694.2, $\infty$ ]	(3.5, $\infty$ ]

表5 减法集对势分期结果

Tab. 5 results of subtraction set pair potential

集合	时段	$X_1$	$X_2$	$X_3$	$X_4$	$X_5$	$a$	$b$	$c$	结果	
										减法集对势	汛期分期
$A_1$	4月上旬	1	1	1	1	1	0	0	1.0	-1.00	非汛期
$A_2$	4月中旬	1	1	1	1	1	0	0	1.0	-1.00	非汛期
$A_3$	4月下旬	1	1	1	2	1	0	0.2	0.8	-0.96	非汛期
$A_4$	5月上旬	1	2	2	2	3	0.2	0.6	0.2	0	前汛期
$A_5$	5月中旬	2	2	2	3	2	0.2	0.8	0	0.36	前汛期
$A_6$	5月下旬	2	2	2	2	2	0	1.0	0	0	前汛期
$A_7$	6月上旬	2	3	2	2	1	0.2	0.6	0.2	0	前汛期
$A_8$	6月中旬	2	2	2	2	3	0.2	0.8	0	0.36	前汛期
$A_9$	6月下旬	3	3	3	3	3	1.0	0	0	1.00	主汛期
$A_{10}$	7月上旬	3	3	3	3	3	1.0	0	0	1.00	主汛期
$A_{11}$	7月中旬	3	2	3	3	3	0.8	0.2	0	0.96	主汛期
$A_{12}$	7月下旬	3	2	2	2	2	0.2	0.8	0	0.36	伏旱期
$A_{13}$	8月上旬	2	3	3	2	2	0.4	0.6	0	0.64	伏旱期
$A_{14}$	8月中旬	3	3	3	3	3	1.0	0	0	1.00	主汛期
$A_{15}$	8月下旬	3	3	3	2	3	0.8	0.2	0	0.96	主汛期
$A_{16}$	9月上旬	2	2	2	2	2	0	1.0	0	0	后汛期
$A_{17}$	9月中旬	1	1	1	1	1	0	0	1.0	-1.00	非汛期
$A_{18}$	9月下旬	1	1	1	1	1	0	0	1.0	-1.00	非汛期
$A_{19}$	10月上旬	1	1	1	1	1	0	0	1.0	-1.00	非汛期
$A_{20}$	10月中旬	1	1	1	1	1	0	0	1.0	-1.00	非汛期
$A_{21}$	10月下旬	1	1	1	1	1	0	0	1.0	-1.00	非汛期

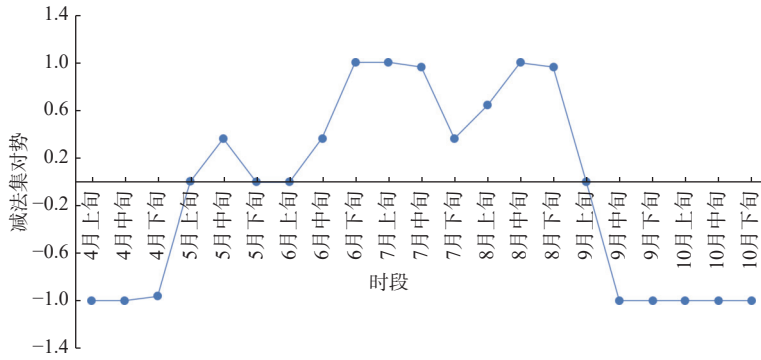


图 1 佛子岭水库汛期减法集对势  
Fig. 1 Subtractive set pair potential in flood season of Foziling Reservoir

由表 6 和图 2 可以看出: 减法集对势划分结果与文献 [11]和文献 [12] 的划分结果趋势大体一致, 说明减法集对势应用于汛期时间域划分是可行的。在汛期时间域划分上, 根据集对分析所表达样本与汛期之间的同一性、差异性、对立性的关系, 将联系数减法集对势为反势的时段判为非汛期是合理的; 相比较文献 [11] 和文献 [12], 在汛期中增加了伏旱

期, 使水库留有充足的水量来应对伏旱期供水需求, 有效预防了旱涝急转的情况发生, 使汛期分期更具有针对性和实用性; 相比当地水库管理部门现行调度章程, 本文增加了前汛期, 分期结果更为详细具体, 便于实际应用。综上, 减法集对势进一步挖掘了汛期时间域划分集对系统中的关系结构信息, 在佛子岭水库汛期时间域划分的应用是可行的。

表 6 集对分析方法分期结果  
Tab. 6 Staging results of set pair analysis methods

方法	前汛期	过渡期	主汛期	伏旱期	过渡期	后汛期	非汛期
文献[11]	4月1日至 5月10日		5月11日至 9月10日			9月11日至 10月31日	
文献[12]	4月1日至 4月30日	5月1日至 6月20日	6月21日至 8月31日		9月1日至 9月20日	9月21日至 10月31日	
现行标准			6月15日至 8月31日			9月1日至 9月15日	9月16日至 翌年6月15日
本文集对势方法	5月1日至 6月20日		6月21日至 7月20日 8月11日至 8月31日	7月21日至 8月10日		9月1日至 9月20日	9月20日至 翌年4月30日

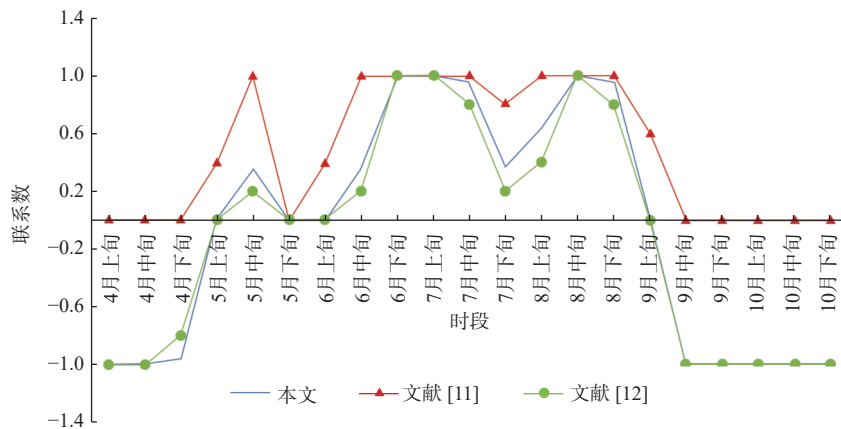


图 2 集对分析不同方法分期结果  
Fig. 2 Staging results of set pair analysis

### 3 结论

应用汛期时间域划分的概念, 结合减法集对势

方法找出了佛子岭水库汛期和非汛期, 同时也对汛期内进行了划分, 相比其他汛期分期研究中大多数

根据经验人为设定汛期时间域的方法,集对分析法更为简单且客观,为水库调度管理提供了简便可靠的汛期分期方法。

减法集对势是在集对分析的基础上,对集对系统的不确定信息进行了更精准、更合理的刻画和挖掘,计算结果与二元和三元联系数计算结果均非常接近,其不仅能够反映系统状态的总体发展趋势,更考虑差异不确定系数的影响,对不确定信息进行了更精准、更合理的分配,为准确判别汛期时间域提供了新的有效途径。

汛期时间域划分结果表明:梅雨和台风是影响佛子岭水库降雨和径流增加的主要因素,在梅雨期和台风来临时,要注意提前预泄,使水库留有充分的防洪库容来应对上游大量的洪水。8月中旬由于伏旱导致上游来水量减少,在8月上旬要注意防洪与泄洪的尺度,使水库留有充足的水量来应对伏旱期供水需求。

#### 参考文献(References):

- [1] 吴成国,金菊良,周玉良,等.确定水库分期汛限水位的神经网络调洪演算方法[J].*应用科学学报*,2009,27(3):288-293.(WU C G,JIN J L,ZHOU Y L,et al. Application of neural networks to determine limited water level of reservoir flood routing[J]. *Journal of Applied Sciences: Electronics and Information Engineering*,2009,27(3):288-293.(in Chinese)) DOI: CNKI:SUN:YYKX.0.2009-03-016.
- [2] 蒋海艳,莫崇勋,韦逗逗,等.水库汛期分期研究综述[J].*水利水电科技进展*,2012,32(3):75-80.(JIANG H Y,MO C X,WEI D D,et al. Review of reservoir flood season staging[J]. *Advances in Science and Technology of Water Resources*,2012,32(3):75-80.(in Chinese)) DOI: 10.11705/j.issn.1672-643X.2020.05.18.
- [3] 李俊,宋松柏,王贺佳.基于指标筛选的汛期时间域划分及合理性分析[J].*应用基础与工程科学学报*,2021,29(1):123-134.(LI J,SONG S B,WANG H J. Determining flood season based on index screening and rationality analysis of division results[J]. *Journal of Basic and Engineering*,2021,29(1):123-134.(in Chinese)) DOI: 10.16058/j.issn.1005-0930.2021.01.011.
- [4] 吴成国.水库洪水资源化调度方案优选智能方法与应用[D].合肥:合肥工业大学,2009.(WU C G. Intelligent methods and their applications to optimal selection of schemes for floodwater utilization by reservoir operation[D].Hefei:Hefei University of Technology,2009.(in Chinese)) DOI: 10.7666/d.y1508648.
- [5] 刘浅奎,王文圣,余思怡,等.熵权模糊集对分析法在溪洛渡水库汛期分期中的应用[J].*水利水电工程学报*,2020(6):16-22.(LIU Q K,WANG W S,YU S Y,et al. Application of fuzzy set pair analysis method based on entropy weight in flood season staging of Xiluodu Reservoir[J]. *Hydro-Science and Engineering*,2020(6):16-22.(in Chinese)) DOI: 10.12170/20191205001.
- [6] 贾敏,母晓妃.模糊集分析法在水库汛期分期中的应用[J].*水资源与水工程学报*,2015,26(2):178-181.(JIA M,MU X F. Application of fuzzy sets analysis method in staging flood season of reservoir[J]. *Journal of Water Resources and Water Engineering*,2015,26(2):178-181.(in Chinese)) DOI: 10.11705/j.issn.1672-643X.2015.02.34.
- [7] 刘攀,郭生练,王才君,等.三峡水库汛期分期的变点分析方法研究[J].*水文*,2005,25(1):18-23.(LIU P, GUO S L,WANG C J,et al. Flood season staged for Three Gorges Reservoir based on the change-point approach[J]. *Hydrology*,2005,25(1):18-23.(in Chinese)) DOI: CNKI:SUN:SWZZ.0.2005-01-005.
- [8] 刘克琳,王银堂,胡四一,等. Fisher最优分割法在汛期分期中的应用[J].*水利水电科技进展*,2007(3):14-16,37.(LIU K L,WANG Y T,HU S Y,et al. Application of Fisher optimal dissection method to flood season division[J]. *Advances in Science and Technology of Water Resources*,2007(3):14-16,37.(in Chinese)) DOI: 10.3880/j.issn.1006-7647.2007.03.004.
- [9] 高波,刘克琳,王银堂,等.系统聚类法在水库汛期分期中的应用[J].*水利水电技术*,2005,36(6):1-5.(GAO B,LIU K L,WANG Y T,et al. Application of system clustering method to dividing flood season of reservoir[J]. *Water Resources and Hydropower Engineering*,2005,36(6):1-5.(in Chinese)) DOI: 10.3969/j.issn.1000-0860.2005.06.001.
- [10] 虞慧,刘星根,王姣,等.基于集对分析的不同分类方法对汛期分期的影响[J].*人民长江*,2021,52(3):9-15.(YU H,LIU X G,WANG J,et al. Influence of different classification methods on flood season division based on set pair analysis[J]. *Yangtze River*,2021,52(3):9-15.(in Chinese)) DOI: 10.16232/j.cnki.1001-4179.2021.03.002.
- [11] 谢飞,王文圣.集对分析在汛期分期中的应用研究[J].*南水北调与水利科技*,2011,9(1):60-63.(XIE F,WANG W S. Set pair analysis and its application to the division of flood period[J]. *South-to-North Water Transfer and Water Science & Technology*,2011,9(1):60-63.(in Chinese)) DOI: 10.3724/SP.J.1201.2011.01060.
- [12] 莫崇勋,钟欢欢,王大洋,等.集对分析方法在澄碧

- 河水库汛期分期中的应用[J]. *水力发电*, 2016, 42(1): 14-17. (MO C X, ZHONG H H, WANG D Y, et al. Application of set pair analysis on flood season staging in Chengbihe Reservoir[J]. *Water Power*, 2016, 42(1): 14-17. (in Chinese)) DOI: [10.3969/j.issn.0559-9342.2016.01.004](https://doi.org/10.3969/j.issn.0559-9342.2016.01.004).
- [13] 严培胜, 王先甲, 孙志禹. 集对分析在三峡水库汛期分期中的应用[J]. *武汉大学学报(工学版)*, 2012, 45(3): 310-313. (YAN P S, WANG X J, SUN Z Y. Application of set pair analysis theory to stage analysis of flood seasons in Three Gorges Reservoir[J]. *Engineering Journal of Wuhan University*, 2012, 45(3): 310-313. (in Chinese)) DOI: [CNKI:SUN:WS-DD.0.2012-03-008](https://doi.org/CNKI:SUN:WS-DD.0.2012-03-008).
- [14] 金菊良, 沈时兴, 潘争伟, 等. 水资源集对分析理论与应用研究进展[J]. *华北水利水电大学学报(自然科学版)*, 2017, 38(4): 54-66. (JIN J L, SHEN S X, PAN Z W, et al. Advances in theoretical and applied research on set pair analysis method for water resources system[J]. *Journal of North China University of Water Resources and Electric Power (Natural Science Edition)*, 2017, 38(4): 54-66. (in Chinese)) DOI: [10.3969/j.issn.1002-5634.2017.04.008](https://doi.org/10.3969/j.issn.1002-5634.2017.04.008).
- [15] 金菊良, 沈时兴, 郦建强, 等. 基于联系数的区域水资源承载力评价与诊断分析方法[J]. *华北水利水电大学学报(自然科学版)*, 2018, 39(1): 1-9. (JIN J L, SHEN S X, LI J Q, et al. Assessment and diagnosis analysis method for regional water resources carrying capacity based on connection number[J]. *Journal of North China University of Water Resources and Electric Power (Natural Science Edition)*, 2018, 39(1): 1-9. (in Chinese)) DOI: [10.3969/j.issn.1002-5634.2018.01.001](https://doi.org/10.3969/j.issn.1002-5634.2018.01.001).
- [16] 金菊良, 赵行玥, 崔毅, 等. 半偏减法集对势在区域旱灾风险评估中的应用[J]. *水利水运工程学报*, 2021(1): 36-44. (JIN J L, ZHAO X Y, CUI Y, et al. Application of semipartial subtraction set pair potential method to the dynamic assessment of regional drought risk[J]. *Hydro-Science and Engineering*, 2021(1): 36-44. (in Chinese)) DOI: [10.12170/20200901005](https://doi.org/10.12170/20200901005).
- [17] 金菊良, 沈时兴, 崔毅, 等. 半偏减法集对势在引黄灌区水资源承载力动态评价中的应用[J]. *水利学报*, 2020, 52(5): 507-520. (JIN J L, SHEN S X, CUI Y, et al. Dynamic evaluation of water resources carrying capacity in the Yellow River diversion irrigation district based on semipartial subtraction set pair potential[J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2020, 52(5): 507-520. (in Chinese)) DOI: [10.13243/j.cnki.slxb.20200561](https://doi.org/10.13243/j.cnki.slxb.20200561).
- [18] 王伟. 浅议佛子岭水库群的生态建设[J]. *江淮水利科技*, 2016(4): 25-26. (WANG W. Discussion on ecological construction of Foziling Reservoir group[J]. *Jianghuai Water Resources Science and Technology*, 2016(4): 25-26. (in Chinese)) DOI: [CNKI:SUN:JHSL.0.2016-04-012](https://doi.org/CNKI:SUN:JHSL.0.2016-04-012).
- [19] 赵克勤. 集对分析及其初步应用[M]. 杭州: 浙江科技出版社: 2000. (ZHAO K Q. Set Pair Analysis and its Preliminary Application[M]. Hangzhou: Zhejiang Science and Technology Press: 2000. (in Chinese))
- [20] 金菊良, 周戎星, 崔毅, 等. 结构水资源学概论[J]. *华北水利水电大学学报(自然科学版)*, 2021, 42(3): 7-19. (JIN J L, ZHOU R X, CUI Y, et al. Introduction to structural water resources science[J]. *Journal of North China University of Water Resources and Electric Power (Natural Science Edition)*, 2021, 42(3): 7-19. (in Chinese)) DOI: [10.19760/j.Ncwu.Zk.2021029](https://doi.org/10.19760/j.Ncwu.Zk.2021029).
- [21] 金菊良, 张浩宇, 崔毅, 等. 联系数伴随函数的若干问题探讨[J]. *黑龙江大学工程学报*, 2020, 11(2): 1-10. (JIN J L, ZHANG H Y, CUI Y, et al. Discussions on some problems for adjoint function of connection number[J]. *Journal of Heilongjiang Hydraulic Engineering College*, 2020, 11(2): 1-10. (in Chinese)) DOI: [10.13524/j.2095-008x.2020.02.015](https://doi.org/10.13524/j.2095-008x.2020.02.015).
- [22] 金菊良, 刘鑫, 周戎星, 等. 水资源承载力动态评价的引力减法集对势方法[J]. *水利水运工程学报*, 2021(2): 38-45. (JIN J L, LIU X, ZHOU R X, et al. Gravity based subtractive set pair potential method for dynamic evaluation of water resources carrying capacity[J]. *Hydro-Science and Engineering*, 2021(2): 38-45. (in Chinese)) DOI: [10.12170/20200402002](https://doi.org/10.12170/20200402002).
- [23] 金菊良, 何飘, 张浩宇, 等. 减法全邻联系数及其在区域水资源承载力趋势分析中的应用[J]. *西北大学学报(自然科学版)*, 2020, 50(3): 438-446. (JIN J L, HE P, ZHANG H Y, et al. Subtractive full neighbor connection number and its application in trend analysis of regional water resources carrying capacity[J]. *Journal of Northwest University (Natural Science Edition)*, 2020, 50(3): 438-446. (in Chinese)) DOI: [10.16152/j.cnki.xdxbzr.2020-03-014](https://doi.org/10.16152/j.cnki.xdxbzr.2020-03-014).
- [24] 董涛, 王振龙, 金菊良, 等. 基于风险矩阵和五元减法集对势的区域旱灾风险链式传递诊断评估方法[J]. *灾害学*, 2020, 35(4): 222-227. (DONG T, WANG Z L, JIN J L, et al. Chain transfer diagnosis and evaluation method of regional drought risk based on risk matrix and five element subtraction set pair potential[J]. *Journal of Catastrophology*, 2020, 35(4): 222-227. (in Chinese)) DOI: [10.3969/j.issn.1000-811X.2020.04.041](https://doi.org/10.3969/j.issn.1000-811X.2020.04.041).



- [25] 金菊良,陈鹏飞,张浩宇,等. 五元减法集对势及其在水资源承载力趋势分析中的应用[J]. *华北水利水电大学学报(自然科学版)*, 2020, 41(2): 30-35, 42. (JIN J L, CHENG P F, ZHANG H Y, et al. Five-variable subtraction set pair potential and its application in trend analysis of resources carrying capacity[J]. *Journal of North China University of Water Resources and Electric Power (Natural Science Edition)*, 2020, 41(2): 30-35, 42. (in Chinese)) DOI: [10.19760/j.newu.zk.2020019](https://doi.org/10.19760/j.newu.zk.2020019).
- [26] 罗姗姗,宋星原,张艳军,等. 汛期分期分析方法在佛子岭水库群的应用研究[J]. *水电能源科学*, 2012, 30(2): 44-48. (LUO S S, SONG X Y, ZHANG Y J, et al. Research on application of analysis methods for flood season staging in Foziling Reservoir groups[J]. *Water Resources and Power*, 2012, 30(2): 44-48. (in Chinese)) DOI: [10.3969/j.issn.1000-7709.2012.02.013](https://doi.org/10.3969/j.issn.1000-7709.2012.02.013).
- [27] 王平. 佛子岭水库调度方式和效益分析[J]. *水电站设计*, 2002, 18(1): 76-79. (WANG P. Regulation method and efficiency analysis for Foziling Reservoir[J]. *Design of Hydroelectric Power Station*, 2002, 18(1): 76-79. (in Chinese)) DOI: [10.3969/j.issn.1003-9805.2002.01.021](https://doi.org/10.3969/j.issn.1003-9805.2002.01.021).
- [28] 周平,周玉良,金菊良,等. 基于梅雨监测指标的安徽江淮地区梅雨过程识别[J]. *水利水电工程学报*, 2020(6): 9-15. (ZHOU P, ZHOU Y L, JIN J L, et al. Meiyu identification of Yangtze-Huaihe region in Anhui province based on Meiyu monitoring indices[J]. *Hydro-Science and Engineering*, 2020(6): 9-15. (in Chinese)) DOI: [10.12170/20200823003](https://doi.org/10.12170/20200823003).
- [29] 黄峰中,周玉良,周平,等. 安徽省近60年台风降水特征分析[J]. *水电能源科学*, 2019, 37(12): 1-5. (HUANG F Z, ZHONG Y L, ZHOU P, et al. Analysis of typhoon precipitation characteristics in recent 60 years in Anhui Province[J]. *Water Resources and Power*, 2019, 37(12): 1-5. (in Chinese)) DOI: [CN-KI:SUN:SDNY.0.2019-12-001](https://doi.org/CN-KI:SUN:SDNY.0.2019-12-001).

## Application of subtractive set pair potential in the determining flood season of Foziling Reservoir

XU Sixin<sup>1</sup>, LI Man<sup>1</sup>, JIN Juliang<sup>1,2</sup>, ZHOU Rongxing<sup>1</sup>, CUI Yi<sup>1,2</sup>, BAI Xia<sup>1,2</sup>

(1. School of Civil Engineering, Hefei University of Technology, Hefei 230009, China; 2. Institute of Water Resources and Environmental Systems Engineering, Hefei University of Technology, Hefei 230009, China)

**Abstract:** To effectively characterize the comprehensive influence of uncertain factors such as precipitation and runoff on the determining flood season in the reservoir basin according to experience in the existing method of distinguishing flood season staging based on set pair analysis, a subtraction based set pair situation method was proposed to discriminate the staging results by applying the concept of determining flood season.

Taking the flood season staging of Foziling Reservoir as an example, five indexes of rainstorms and floods that can affect the division of flood season were selected. According to the local climate characteristics, the flood season of Foziling Reservoir can be divided into four periods such as the early flood season, the main flood season, the summer and drought season, the late flood season, and the bare flood season.

Finally, it is compared with the method of two-element connection number and three-element connection number. The results show that the subtraction based set pair situation method is simple and practical for determining flood season, and the results are reasonable.

It is consistent with the conclusion of the set pair analysis method of two-element connection number and three-element connection number, can objectively reflect the situation of the influence of rainstorm and flood characteristics on flood season in Foziling Reservoir, and also can intuitively distinguish the boundary between non-flood season and flood season. The subtraction set pair potential method proposed is reasonable to apply in determining the flood season of reservoirs.

**Key words:** determining flood season; flood season staging; flood control and benefit promotion; set pair analysis; subtraction set pair potential; Foziling Reservoir