

基于集对原理的年径流状态时序变化特性分析

王红芳¹, 王素芳², 王文圣^{1,3}, 丁晶¹

(1. 四川大学水电学院, 四川 成都 610065; 2. 邯郸市勘测设计研究院, 河北 邯郸 056021;
3. 中国气象局成都高原气象研究所, 四川 成都 610072)

摘要: 提出了基于集对原理的年径流状态时序特性分析法。该法在年径流状态划分的基础上, 用年径流状态时间序列来构造集对, 通过联系度中的同、异、反来反映 t 年径流状态与 t+ 年径流状态的转换特性。长江干、支流上的几个水文站年径流的状态时序特性分析表明, 建议方法概念清楚、计算简单、结果合理。

关键词: 集对分析; 年径流; 状态; 特性

中图分类号: P333 文献标识码: A 文章编号: 1004-7328(2007)05-0031-04

Characteristics of variation for annual runoff state based on set pair analysis

WANG Hong-fang¹, WANG Su-fang², WANG Wen-sheng^{1,3}, DING Jing¹

(1. School of Hydraulic Engineering, Sichuan University, Chengdu 610065, China;

2. Handan Hydroelectric Investigation and Design Institute, Handan 056021, China;

3. Chengdu Institute of Plateau Meteorology, Chengdu 610072, China)

Abstract: The principle of set pair analysis (SPA) has been attempted to apply to characteristics analysis of variation for annual runoff state. At first, annual runoff sequences are classified to state sequences, then annual runoff state sequences compose to set pair, finally, characteristic of variation between t and t+ annual runoff state are reflected by relational degree. According to the data from several important hydrology stations in the Yangtze Rive, Characteristics of variation for annual runoff state have been studied. The results show that the concept is clear, simple and the outcomes are reasonable.

Key words: set pair analysis; annual runoff; state; characteristic

径流变化特性分析对地区水资源的合理开发和高效、可持续利用具有重要意义。径流特性分析一般包括时间上和空间上两方面, 基于集对原理对年径流在时序上的变化特性进行分析, 以研究年径流的演变规律。

集对分析^[1](SPA)在水文水资源中具有较为广阔的应用前景^[2]。目前 SPA 在径流预测^[3]、相似流域

选择^[4]、水文频率曲线拟合度的评价^[5]、水文预测模型优劣的评估^[6]、峰和量关系分析^[7]等方面有了初步的探讨和应用。此外, SPA 在水资源评价、生态脆弱性评估、水安全决策、水文相关分析等^[8-11]领域也具有较强的适用性。鉴于 SPA 优良特性, 提出了基于集对原理的年径流状态时序变化特性分析方法, 并用长江干、支流上的几个重要水文站的年径流资料为例进行了计算、分析, 表明建议法是可行的, 结果是合理的。

1 集对分析原理

SPA 是把被研究的客观事物之间确定性联系与不确定性联系作为一个确定不确定系统来分析处

收稿日期: 2007-07-27

基金项目: 国家自然科学基金(50679047, 50779042, 50739002)和中国气象局成都高原气象实验室基金(LPM2007004)资助。

作者简介: 王红芳(1981-), 女, 硕士研究生, 主要从事水文水资源系统分析研究工作。

理^[1]。所谓集对是指有一定联系的两个集合组成的对子,SPA原理就是在一定的背景下,对组成集对的两个集合(A,B)的特性做同一性、差异性、对立性分析。并用联系度表达式描述,即:

$$\mu_{A-B} = \frac{S}{N} + \frac{F}{N}i + \frac{P}{N}j \quad (1)$$

式中: N 为集合特性的总项数; S 为同一性的个数; P 为对立性的个数; F 为差异性的个数; i 为差异不确定系数,在(-1,1)区间视不同情况取值,有时仅起差异标记作用; j 为对立系数,在计算中 j=-1,有时仅起对立标记作用。

为简便,一般令 a=S/N,称为在研究问题下的同一度, b=F/N 称为差异度, c=P/N 称为对立度。则式(1)可写成:

$$\mu_{A-B} = a+bi+cj \quad (2)$$

式中: μ_{A-B} 为集对(A,B)之间的联系度; a、b、c 分别表征集合 A 和 B 所呈现出的相同、相异、相反的关系,其中 a、b、c 满足归一化条件。a、b、c 集中反映出 A 和 B 的关系结构,表示了不确定性关系。

2 基于集对原理的年径流状态时序特性分析的基本思想和步骤

2.1 主要思路

所谓年径流状态时间序列特性分析,就是将年径流时间序列{X_t} (t=1, 2, ..., n) 转换成一年径流状态序列{S_t} (t=1, 2, ..., n) 并记为一个集合 A, 将年径流时间序列{S_t} 滞后一年作为另一个集合 B, 即 {S_t} (t=1+, 2+, 3+, ..., n)。将这两个集合相应构成一个集对(A, B), 计算集对的联系度, 通过联系度这一指标, 来分析年径流状态在时序上的演变特性。

2.2 年径流量丰、平、枯状态的划分标准

已知年径流时间序列{X_t} (t=1, 2, ..., n), 按 [(1+) \bar{x} ,], [(1-) \bar{x} , (1+) \bar{x}], [0, (1-) \bar{x}] 的分类标准, 将年径流时间序列{X_t} 分为丰、平、枯 3 级状态 S。其中, \bar{x} 为某站多年平均年径流量, 定义为标准系数, 的取值原则是保证年径流量丰、平、枯 3 种状态在实测长期序列中发生的次数大致相同, 一般取 <0.2。

2.3 合理构造集对

年径流时间序列{X_t} 划分为状态序列{S_t} 后, 将年径流量状态序列{S_t} (t=1, 2, ..., n) 构成一个集合 A, 滞后一年的年径流量状态{S_t} (t=1+, 2+, ..., n) 相应地构成一个集合 B, 若 A 和 B 序列中的对应处于同一状态(丰、丰) 定义为同; 若处于相邻状态(丰、

平) 定义为异; 若处于相隔状态(丰、枯) 定义为反。由集对(A, B) 可以统计出同一性、差异性、对立性的个数。

由于集合总项数 N=n- 为已知, 这样, 取 =1、=2、=3 就可按式(2) 获得集对(A, B) 的联系度表达式, 分别记为 μ_{A-B_1} , μ_{A-B_2} 和 μ_{A-B_3} , 见式(3)、式(4) 和式(5)。

μ_{A-B_1} 表示 t 年年径流量状态和(t+1) 年年径流量状态出现相同、相异、相反 3 种情况的联系程度; μ_{A-B_2} 表示 t 年年径流量状态和(t+2) 年年径流量状态出现相同、相异、相反 3 种情况的联系程度; μ_{A-B_3} 表示 t 年年径流量状态和(t+3) 年年径流量状态出现相同、相异、相反 3 种情况的联系程度。实际上, a₁ 表示 t 年和(t+1) 年出现同一状态的概率; b₁ 表示 t 年和(t+1) 年出现相异状态的概率; c₁ 表示 t 年和(t+1) 年出现相反状态的概率。类似地, a₂ 表示 t 年和(t+2) 年出现同一状态的概率; b₂ 表示 t 年和(t+2) 年出现相异状态的概率; c₂ 表示 t 年和(t+2) 年出现相反状态的概率。a₃ 表示 t 年和(t+3) 年出现同一状态的概率; b₃ 表示 t 年和(t+3) 年出现相异状态的概率; c₃ 表示 t 年和(t+3) 年出现相反状态的概率。

$$\mu_{A-B_1} = a_1+b_1i+c_1j \quad (3)$$

$$\mu_{A-B_2} = a_2+b_2i+c_2j \quad (4)$$

$$\mu_{A-B_3} = a_3+b_3i+c_3j \quad (5)$$

2.4 年径流量状态的时序特性分析

年径流量状态的时序特性分析, 实际上就是由式(3)、式(4) 和式(5) 表示的联系度特性来表征。其中, t 年和 t+1 年状态的特性以式(3) 为基础进行分析; t 年和 t+2 年状态的特性以式(4) 为基础进行分析; t 年和 t+3 年状态的特性以式(5) 为基础进行分析。

3 实例分析

现取长江上游干流寸滩站(1893—2003 年) 年径流量以及长江流域四川境内的屏山站(1940—2003 年) 年径流量、高场站(1940—2003 年) 年径流量和李家湾站(1952—2004 年) 年径流量序列为例进行分析。

首先, 以屏山站 1940—1994 年共 55 年的年径流量为建模数据, 对年径流状态时序变化特性进行分析。计算 $\bar{x}=4\ 506$, 取 =0.08, 按前述分类标准, 将年径流量进行丰、平、枯状态分类, 分别用级别 、 、 表示。

然后, 将 [1940—(1994-)] 年径流状态级别序列构成一个集合 A, 滞后 (=1, 2, 3) 年的年径流量状态级别序列 [(1940+)—1994] 相应地构

成一个集合 B, 集合 A 和集合 B 构成集对 (A, B), 见表 1。

表 1 屏山站年径流分类及构造的集对

年份	年径流量	集对 (A ₁ , B ₁)		集对 (A ₂ , B ₂)		集对 (A ₃ , B ₃)	
		集合 A ₁	集合 B ₁	集合 A ₂	集合 B ₂	集合 A ₃	集合 B ₃
1940	4 410						
1941	4 650						
1942	3 380						
1943	3 830						
1944	3 880						
1945	5 170						
1946	4 340						
1947	4 700						
1948	5 280						
1949	6 060						
1950	4 260						
1951	4 480						
1952	4 370						
1953	4 120						
1954	5 820						
1955	5 140						
1956	4 210						
1957	5 260						
1958	4 080						
1959	3 670						
1960	4 180						
1961	4 140						
1962	5 130						
1963	4 450						
1964	4 870						
1965	6 140						
1966	5 670						
1967	3 780						
1968	5 360						
1969	3 810						
1970	4 510						
1971	4 090						
1972	3 680						
1973	3 870						
1974	5 880						
1975	3 780						
1976	3 770						
1977	3 890						
1978	4 580						
1979	4 170						
1980	4 810						
1981	4 500						
1982	4 020						
1983	3 820						
1984	3 910						
1985	5 030						
1986	4 260						
1987	5 100						
1988	4 160						
1989	4 910						
1990	5 240						
1991	5 620						
1992	3 530						
1993	4 720						
1994	3 370						

将集合 A 的级别值与集合 B 的级别值进行逐一比较, 统计符号相同的个数, 记为 S (表示同一性); 统计符号相差一级的, 记为 F (表示差异性), 如

与、与; 统计符号相差二级的, 记为 P (表示对立性), 如与。由式(2)得到集对(A, B)的联系度, 分别记为 μ_{A-B_1} 、 μ_{A-B_2} 、 μ_{A-B_3} , 计算结果见式(6)、式(7)和式(8)。

$$\mu_{A-B_1} = 0.431 + 0.431i + 0.138j \quad (6)$$

$$\mu_{A-B_2} = 0.267 + 0.555i + 0.178j \quad (7)$$

$$\mu_{A-B_3} = 0.32 + 0.44i + 0.24j \quad (8)$$

用同样的方法, 对寸滩站、高场站和李家湾站进行分析, 计算结果见表 2。

表 2 寸滩站、高场站和李家湾站联系度计算结果

分类	寸滩站			高场站			李家湾站		
	$\tau=1$	$\tau=2$	$\tau=3$	$\tau=1$	$\tau=2$	$\tau=3$	$\tau=1$	$\tau=2$	$\tau=3$
a	0.431	0.267	0.32	0.4	0.259	0.264	0.442	0.404	0.268
b	0.431	0.555	0.44	0.4	0.5	0.528	0.488	0.429	0.488
c	0.138	0.178	0.24	0.2	0.241	0.208	0.070	0.167	0.244

由式(6)、式(7)和式(8)及表 2 对长江主要河流年径流状态时序特性分析如下: 各条河流, 在丰、平、枯状态变化上, 由 t 年到 t+1 年转换成相同的状态和相异的状态的概率比较大, 而相反的状态比较小。也就是说, 若在 t 年为丰状态时, t+1 年状态为枯的概率为 20%甚至不到 15%, 而 t+1 年状态为平和丰的状态的概率较大, 且几乎等可能性; 若在 t 年为枯状态时, t+1 年状态为丰的概率仅为 20%甚至不到 15%, 而 t+1 年状态为平和枯的状态的概率较大, 且几乎等可能性; 若在 t 年为平状态时, t+1 年状态为丰、平和枯三种状态的可能性差不多。各条河流在丰、平、枯状态变化上, 由 t 年状态到 t+2 年状态转变上和由 t 年状态到 t+3 年状态转变上, 转换成相异状态的概率都是最大, 在 50%左右, 其次是转换成相同状态的概率较大, 而转换成相反状态的概率最小。用 1995 年以前的状态序列进行分析, 用 1995—2004 年序列进行验证。从 1995—2004 年径流状态序列实际情况分析来看, 各站由 t 年到 t+1 年转换成相同和相异的状态较多, 相反的很少; 而由 t 年状态到 t+2 年状态转变上和由 t 年状态到 t+3 年状态转变上, 转换成相异状态的数目也相对较多, 见表 3。这说明, 各条河流总体具有上述特点, 验证了这种特性的正确性。

表 3 屏山、寸滩、高场和李家湾站(1995-2004 年)实际年径流状态分类

年份	1993	1994	1995	1996	1997	1998	1999	2000	2001	2002	2003
屏山站	2	3	2	2	2	1	1	1	1	2	1
寸滩站	2	3	3	3	3	1	2	2	2	3	3
高场站	2	3	2	3	3	3	1	3	2	3	3

(下转第 40 页)

从图2可以看出, 对小中甸的历史径流数据拟合较好。然后利用此模型对1988、1989、1990年的径流量进行了预测, 与实测径流量进行对比。预测结果最大误差为66.67%(1988年9月), 最小误差为0.19%(1990年2月)。非汛期预测结果的误差较小, 汛期和过渡期的预测结果误差较大。主要原因是在非汛期, 影响径流的因素比较稳定, 径流主要来自于地下水的补给, 而此时期降水主要是降雪, 其对河川径流影响很小。而在过渡期和汛期, 影响径流的因素

比较复杂, 受降雨、融雪、温度和植被、土壤等下垫面多种因素的综合作用。作为中长期预报, 相对误差小于35%即可认为合格。因此, 此模型具有一定的精度, 可以对小中甸的径流量进行预测。

参考文献:

[1] 夏军. 中长期径流预估的一种灰关联模式与预测方法[J]. 水科学进展, 1993, 4(3): 190-197.
 [2] 冯平, 杨鹏, 李润苗. 枯水期径流量的中长期预报模式[J]. 水利水电技术, 1992, (2): 6-9.

(上接第33页)

4 结语

通过集对分析在年径流状态时序变化特性分析中的应用, 得出以下初步结论:

(1) 首次将集对理论使用于年径流状态时序变化特性分析, 结果显示这是一种可行的分析方法, 为年径流状态时序变化特性分析提供了一条值得探索和实践的新途径。

(2) 这一新方法的明显优点在于: 概念清晰, 计算简单, 分析结果直观。

参考文献:

[1] 赵克勤. 集对分析及其初步应用 [M]. 杭州: 浙江科技出版社, 2000.
 [2] 王星, 王文圣, 丁晶. 集对分析在水文水资源中的应用研究 [J]. 水利水电科技进展, 2006, 26(4): 9-11.
 [3] 王红芳, 黄伟军, 王文圣, 等. 集对分析法在长江寸滩站年径

流预测中的应用[J]. 黑龙江水专学报, 2006, 33(4): 3-5.

[4] 邓红霞, 李存军, 张少文, 等. 基于集对分析的相似流域选择方法[J]. 人民黄河, 2006, 28(7): 3-4.
 [5] 王红芳, 丁晶, 王文圣, 等. 集对分析在频率曲线拟合度定量评价中的应用[J]. 水利水电技术, 2007, 38(4): 1-3.
 [6] 邓红霞, 李存军, 赵太想, 等. 基于SPA的水文预测模型评估[J]. 四川大学学报(工程科学版), 2006, 38(6): 10-12.
 [7] 朱兵, 王红芳, 王文圣, 等. 基于集对原理的峰和量关系分析[J]. 四川大学学报(工程科学版), 2007, 39(3): 29-32.
 [8] 冯利华, 张行才, 龚建林. 基于集对分析的水资源变化趋势的统计预测[J]. 水文, 2004, 24(2): 11-14.
 [9] 门宝辉, 梁川. 评价区域水资源开发利用程度的集对分析法[J]. 南水北调与水利科技, 2003, 1(6): 30-32.
 [10] 王文圣, 向红莲, 丁晶. 集对分析在水文地质单元相似性选择中的应用[A]. 高丹盈, 左其亭. 人水和谐理论[C]. 北京: 中国水利水电出版社, 2006: 320-323.
 [11] 刘慧, 龚士良. 集对分析及在地下水环境质量评价中的应用[J]. 工程勘察, 2000, (5): 16-18.

(上接第36页)

3.5 地下取水的可靠性与可行性分析

可靠性分析要对区域地下水可开采量、拟建水源地地下水补给量以及取水工程的开采能力3个方面进行分析。当区域可开采量大于区域总开采量, 拟建项目的开采从大的区域来讲是有一定保证的, 在此基础上, 当拟建水源地开采范围的补给能力尤其是相应保证率的枯水季节的补给能力以及取水工程的开采能力均大于取水量, 取水是可靠的, 否则是不可靠的。

可行性分析应在地下取水可靠性分析的基础上, 结合地下取水对区域水资源状况和其他用户的影响分析、建设项目用水合理性分析等, 综合分析地下取水的可行性。

4 结语

对建设项目水资源论证的论证范围选择、区域水资源量计算、水源地开采和补给能力计算及评价以及取水可靠性与可行性分析等内容进行了分析和讨论并给出了相应的解决方法, 但非岩溶山区建设项目水资源论证所涉及的内容远不止上述这些。因此, 进行建设项目论证不但要谨慎选择论证范围, 进行区域水资源计算和评价, 更要加强对水源地开采方案、开采能力、补给能力的分析和评价, 必要时以河谷地下水含水层作为调节, 充分利用汛期洪水补给地下水, 实现雨洪资源化, 确保建设项目有序合理充分地开发利用水资源, 同时不影响或少影响周围其他已有用户, 达到既支持经济社会的可持续发展又实现水资源的可持续利用的目的。