

基于物元分析的流域产流预报

冯利华, 龚建林

(浙江师范大学 地理系, 浙江 金华 321004)

摘要: 利用前期的预报因子进行计算, 使物元分析具有了预报功能。通过反复调整各因子的等级分界值(经典域和节域), 可以使流域产流计算等级和实际等级的拟合率达到最大, 其结果比较好。实例表明这是流域产流预报的一种有效的新方法。

关键词: 流域产流; 物元分析; 经典域; 节域; 关联函数

文献标识码: B

文章编号: 1000—288X (2004) 04—0063—04

中图分类号: P333.4

Runoff Production Forecast for a Drainage Basin Based on Matter Element Analysis

FENG L i-hua, GONG J ian-lin

(Department of Geography, Zhejiang Normal University, Jinhua 321004, Zhejiang Province, China)

Abstract: Calculation by means of existing forecast factors can enable matter element analysis to have forecast functions. Continuously readjusting the grade limit value (classical domain and joint domain) of every factor can maximize the ratio of historical runoff to actual runoff production in a drainage basin. It is shown by example that this is a new and effective method for runoff production forecasting in drainage basins.

Keywords: runoff production of drainage basin; matter element analysis; classical domain; joint domain; correlative function

目前, 流域产流的预报方法主要有 4 大类^[1]: 直接求定法; 降水径流相关曲线法; 经验系数法; 流域水文模型法。这些方法从不同的角度和重点考虑问题, 各有各的优缺点。事实上, 流域产流是下垫面、降雨特性和人类活动等多种因素综合作用的结果。这些因素往往互不相容, 并且产流的中间过程是模糊不清的。由于新近出现的物元分析是一门研究不相容和模糊问题的科学^[2], 为此, 拟根据物元分析的原理和方法, 对流域产流作一预报研究, 以供商榷。

1 用于流域产流预报的物元分析方法

在物元分析中, 把事物 N 及其特征 c 和量值 x 的三元有序组合称为物元。

$$R = (N, c, x) \quad (1)$$

如果事物 N 需要用 n 个特征 c_1, c_2, \dots, c_n 和对应量值 x_1, x_2, \dots, x_n 来描述, 那么称为 n 维物元, 并用矩阵表示为(2)式

$$R = (N, c_i, x_i) = \begin{bmatrix} N & c_1 & x_1 \\ & c_2 & x_2 \\ & \vdots & \vdots \\ & c_n & x_n \end{bmatrix} \quad (2)$$

(1) 确定经典域

$$R_{0j} = (N_{0j}, c_i, x_{0ij}) = \begin{bmatrix} N_{0j} & c_1 & x_{01j} \\ & c_2 & x_{02j} \\ & \vdots & \vdots \\ & c_n & x_{0nj} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} N_{0j} & c_1 & < a_{01j} & b_{01j} > \\ & c_2 & < a_{02j} & b_{02j} > \\ & \vdots & \vdots & \vdots \\ & c_n & < a_{0nj} & b_{0nj} > \end{bmatrix} \quad (3)$$

式中: N_{0j} ——事物的第 j 个等级 ($j = 1, 2, \dots, m$); c_i ——事物第 j 个等级的第 i 个特征; x_{0ij} —— N_{0j} 关于 c_i 的量值范围, 即各等级关于对应特征的经典域 $< a_{0ij}, b_{0ij} >$ 。

(2) 确定节域

$$R_p = (P, c_i, x_{pi}) = \begin{bmatrix} P & c_1 & x_{p1} \\ & c_2 & x_{p2} \\ & \vdots & \vdots \\ & c_n & x_{pn} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} P & c_1 & < a_{p1} & b_{p1} > \\ & c_2 & < a_{p2} & b_{p2} > \\ & \vdots & \vdots & \vdots \\ & c_n & < a_{pn} & b_{pn} > \end{bmatrix} \quad (4)$$

式中: P ——事物等级的全体; x_{pi} —— P 关于 c_i 的量值范围——节域 $\langle a_{pi}, b_{pi} \rangle$ 。这里要求 $x_{0ij} < x_{pi}$ 。

(3) 列出待评物元。将待评事物, 用物元表示为

$$R_k = (P, c_i, x_{pi}) = \begin{bmatrix} P_k & c_1 & x_1 \\ & c_2 & x_2 \\ & \vdots & \vdots \\ & c_n & x_n \end{bmatrix} \quad (5)$$

式中: P_k ——待评事物 ($k = 1, 2, \dots, l$); x_i —— P_k 关于 c_i 的量值, 即各特征的实际数据。

(4) 计算权系数。这里利用成对比较法来确定权数集, 即根据专家咨询意见, 对 n 个指标中任意 2 个指标之间的重要性进行比较, 给出比值 d_{ij} (可以取专家赋值的均值; $i, j = 1, 2, \dots, n$), 得到判断矩阵 D 。对矩阵 D 的每一行元素先相乘, 再求 n 次方根, 得一向量 $\beta = (\beta_1, \beta_2, \dots, \beta_n)^T$, 其中 $\beta_i = (\prod_{j=1}^n d_{ij})^{1/n}$ ($i = 1, 2, \dots, n$)。作归一化处理, 即令 $a_i = \beta_i / (\sum_{i=1}^n \beta_i)$, 从而得到了权数集合为: $A = (a_1, a_2, \dots, a_n)^T$, 并且满足了 $\sum_{i=1}^n a_i = 1$ 。

(5) 确定关联函数。令

$$Y_j(x_i) = \frac{\rho(x_i, x_{0ij})}{\rho(x_i, x_{pi}) - \rho(x_i, x_{0ij})} \quad (6)$$

$$\text{式中: } \rho(x_i, x_{0ij}) = \frac{|x_i - (a_{0ij} + b_{0ij})/2| - (b_{0ij} - a_{0ij})/2}{(b_{0ij} - a_{0ij})/2} \quad (7)$$

$$\rho(x_i, x_{pi}) = \frac{|x_i - (a_{pi} + b_{pi})/2| - (b_{pi} - a_{pi})/2}{(b_{pi} - a_{pi})/2} \quad (8)$$

那么待评事物 P_k 关于第 j 个等级的关联函数:

$$Y_j(P_k) = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n a_i Y_j(x_i) \quad (9)$$

(6) 评定事物等级。根据最大隶属原则, 在 $Y_j(P_k)$ 中寻求最大的关联函数值:

$$Y_j(P_k) = \max [Y_1(P_k), Y_2(P_k), \dots, Y_m(P_k)] \quad (10)$$

那么待评事物 P_k 应归属于第 j 个等级。

2 基于物元分析的流域产流预报实例

流域产流是一个受下垫面和降雨特性等多种因素综合作用的非线性过程, 因此, 影响产流的因素可分为 2 大类^[3]。第一类是流域下垫面因素(流域的自然地理以及水文地质因素), 如流域的地理位置、面积、土壤种类和结构、植被情况、水利农林措施以及地下水或不透水岩层埋深等。对于一个流域来说, 下垫面因素在一定时期内的变化是不大的。由于实测的水文资料已反映了这些因素的影响, 因此在制作预报方

案时, 除了要进行实地调查以便分析产流规律以外, 对下垫面因素一般不作单独处理。第二类是气象及土壤湿润情况因素, 如雨量、雨强、降雨历时和时空分布、土壤含水量以及气温、湿度、风向、风力等与流域蒸散发能力有关的因素等。这些因素变化频繁, 降雨产流的变化主要是由这些因素造成的。

进一步的分析结果表明, 一场降雨产生的径流量大小主要取决于 2 个方面: 降雨特性(包括雨量、雨强、降雨历时)和土壤湿润情况(土壤含水量)^[1]。降雨特性可从实测的降雨资料获得, 而土壤含水量的实测资料很少, 而且不易得到整个流域面上的数值, 因此水文学上常用前期影响雨量 P_a 作为土壤含水量的一个评价指标^[4]。以淮河流域为例说明物元分析在流域产流预报中的应用。

据以上分析, 选用降雨特性和土壤湿润情况作为前期预报因子, 原始数据来源于参考文献。表 1 列出了淮河流域墙夼水库实测的 10 场降雨形成的产流深度和前期预报因子。这里待评事物为产流深度 ($k = 1, 2, \dots, 10$)。特征为预报产流深度的 7 个前期预报因子: c_1 ——前期影响雨量 P_a (mm); c_2 ——主产流历时(h); c_3, c_4, c_5 ——流域内次降雨量最大、降雨强度最强的代表站连续 1, 3, 5 h 最大雨强(mm/h); c_6 ——流域内次降雨量最小、降雨强度最弱的代表站连续 3 h 最大雨强(mm/h); c_7 ——全过程面均雨量(mm) ($i = 1, 2, \dots, 7$)。

表 1 淮河流域墙夼水库实测产流深度和前期预报因子

场次	y	c ₁	c ₂	c ₃	c ₄	c ₅	c ₆	c ₇
1	39.2	88.65	4.24	80.17	65.11	26.13	67.91	2.91
2	16.5	107.96	8.14	25.10	60.8	53.2	67.32	0.67
3	18.0	41.25	2.43	75.29	17.17	50.9	40.55	5.9
4	22.4	31.88	10.31	05.25	12.19	17.4	29.88	0.4
5	0.6	25.45	2.20	30.9	27.5	56.0	0.24	4.0
6	11.6	17.67	18.13	20.11	42.9	28.7	37.64	1.1
7	14.8	65.70	6.33	10.24	23.17	45.10	67.75	2.1
8	7.1	24.48	4.21	45.15	47.10	00.8	23.32	7.8
9	41.1	73.30	37.33	80.11	30.6	78.9	00.100	8.9
10	178.1	43.23	31.87	10.29	03.17	42.26	23.265	8.8

根据预报要求, 将产流深度 y (mm) 分为 8 个等级: $0 < y < 25$; $25 < y < 50$; $50 < y < 75$; $75 < y < 100$; $100 < y < 125$; $125 < y < 150$; $150 < y < 175$; $175 < y < 200$, 前期预报因子也分为 8 个等级 ($j = 1, 2, \dots, 8$)。根据产流深度的计算等级与实际等级的拟合率达到最大的原则, 在计算过程中, 反复调整各因子的等级分界值, 最后得到拟合率最大时各因子的等级分界值(表 2)。

表 2 拟合率最大时前期预报因子的等级分界值

因子	1	2	3	4	5	6	7	8	x_{pi}
c_1	16 ~ 32	28 ~ 40	36 ~ 48	48 ~ 60	60 ~ 72	72 ~ 84	84 ~ 96	96 ~ 108	10 ~ 110
c_2	2 ~ 7	3 ~ 7	14 ~ 15	15 ~ 20	20 ~ 25	25 ~ 30	30 ~ 35	35 ~ 40	1 ~ 42
c_3	10 ~ 17	18 ~ 28	38 ~ 40	40 ~ 50	50 ~ 60	60 ~ 70	70 ~ 80	80 ~ 90	8 ~ 92
c_4	9 ~ 10	10 ~ 19	17 ~ 21	21 ~ 25	25 ~ 29	29 ~ 33	33 ~ 37	37 ~ 42	8 ~ 44
c_5	4 ~ 8	8 ~ 12	12 ~ 16	16 ~ 20	20 ~ 24	24 ~ 28	28 ~ 32	32 ~ 36	2 ~ 38
c_6	3 ~ 7	7 ~ 8	9 ~ 12	12 ~ 16	16 ~ 20	20 ~ 24	24 ~ 28	28 ~ 33	1 ~ 35
c_7	30 ~ 95	80 ~ 100	90 ~ 110	110 ~ 140	140 ~ 170	170 ~ 200	200 ~ 230	230 ~ 280	20 ~ 285

(1) 确定经典域。根据产流深度的大小, 确定出前期预报因子 8 个等级的经典域, 如第 1 等级的经典域为其它等级的经典域见表 2。

$$R_{01} = (N_{01}, c_i, x_{01i}) = \begin{bmatrix} N_{01} & c_1 & < 16 & 32 > \\ & c_2 & < 2 & 7 > \\ & \vdots & \vdots & \vdots \\ & c_7 & < 30 & 95 > \end{bmatrix}$$

(2) 确定节域。根据 x_{0ij} x_{pi} 的要求, 确定出前期预报因子的节域为表 2。

$$R_P = (P, c_i, x_{pi}) = \begin{bmatrix} P & c_1 & < 10 & 110 > \\ & c_2 & < 1 & 42 > \\ & \vdots & \vdots & \vdots \\ & c_7 & < 20 & 285 > \end{bmatrix}$$

(3) 列出待评物元。根据表 1 所列数据, 把第 1 场产流深度的 7 个因子用物元表示为(其余类似)。

$$R_1 = (P_1, c_i, x_i) = \begin{bmatrix} P_1 & c_1 & 88 & 65 \\ & c_2 & 4 \\ & \vdots & \vdots \\ & c_7 & 91 & 2 \end{bmatrix}$$

(4) 计算权系数。利用式(6), 根据专家咨询意见, 得到 7 个因子的权系数 $A = [0.1(c_1), 0.1(c_2), 0.1(c_3), 0.2(c_4), 0.1(c_5), 0.2(c_6), 0.2(c_7)]$ 。

(5) 计算关联函数值。利用式(7)~(9), 计算得到第 1 场产流深度各等级的 $Y_j(x_i)$:

$Y_1(x_1) = -0.73, Y_2(x_1) = -0.70, \dots, Y_8(x_1) = -0.26$, 其余的 $Y_j(x_i)$ 值见表 3。

再利用式(10), 计算得到第 1 场产流深度各等级的关联函数值 $Y_j(P_1)$:

$$\begin{aligned} Y_1(P_1) &= \sum_{i=1}^7 a_i Y_1(x_i) \\ &= a_1 Y_1(x_1) + a_2 Y_1(x_2) + \dots + a_7 Y_1(x_7) \\ &= 0.1 \times (-0.73) + 0.1 \times 2 + \dots + 0.2 \times 0.06 \\ &= -0.08 \end{aligned}$$

$$Y_2(P_1) = 0.01, \dots$$

其它产流深度各等级的关联函数值如表 4 所示。

表 3 第 1 场产流深度各等级的 $Y_j(x_i)$

因子	1	2	3	4	5	6	7	8
c_1	-0.73	-0.70	-0.66	-0.57	-0.44	-0.18	0.28	-0.26
c_2	2.00	0.50	-0.77	-0.79	-0.84	-0.88	-0.90	-0.91
\vdots	\vdots	\vdots	\vdots	\vdots	\vdots	\vdots	\vdots	\vdots

表 4 历次产流深度各等级的关联函数值、计算等级和符合情况

场次	1	2	3	4	5	6	7	8	j	符合
1	-0.08	0.01	-0.20	-0.28	-0.44	-0.51	-0.53	-0.63	2	
2	-0.07	-0.38	-0.72	-0.78	-0.83	-0.86	-0.88	-0.81	1	
3	0.25	-0.30	-0.25	-0.30	-0.39	-0.47	-0.57	-0.63	1	
4	-0.04	-0.16	-0.25	-0.29	-0.40	-0.52	-0.60	-0.65	1	
5	-0.23	-0.57	-0.84	-0.88	-0.91	-0.92	-0.94	-0.94	1	
6	0.53	-0.02	-0.43	-0.53	-0.64	-0.72	-0.76	-0.80	1	
7	-0.13	-0.16	-0.16	-0.18	-0.30	-0.44	-0.54	-0.60	1	
8	0.20	0.11	-0.41	-0.57	-0.67	-0.74	-0.78	-0.81	1	
9	-0.25	-0.07	-0.29	-0.41	-0.51	-0.56	-0.61	-0.56	2	
10	-0.65	-0.59	-0.51	-0.46	-0.42	-0.36	-0.27	0.47	8	

(6) 评定产流深度等级。根据最大隶属原则,在 $Y_j(P_k)$ 中寻求最大的关联函数值 $Y_j(P_k)$, 那么各场产流深度应归属于第 j 个等级。就第 1 场产流深度各等级的关联函数值而言:

$$Y_j(P_1) = \max(-0.08, 0.01, -0.20, -0.28, -0.44, -0.51, -0.53, -0.63) = 0.01$$

由于 $j = 2$, 那么第 1 场产流深度属于第 2 等级。第 1 场降雨实际形成的产流深度为 39.3mm, 属于第 2 等级, 与实际情况相符。从表 4 可知, 10 场产流深度的计算等级和实际等级都符合, 可见计算结果是比较好的。由于相似的前期预报因子组合通常会

出现相似的产流深度, 因此, 为了预报另 3 场产流深度, 可以加入它们的前期预报因子:

$$c_1 = 101.62, c_2 = 20, c_3 = 50.05, c_4 = 41.7, c_5 = 33.3, c_6 = 32.4, c_7 = 275.6;$$

$$c_1 = 44.88, c_2 = 13, c_3 = 18.6, c_4 = 11.2, c_5 = 9.26, c_6 = 2.73, c_7 = 78.2;$$

$$c_1 = 29.06, c_2 = 4, c_3 = 25.8, c_4 = 22.87, c_5 = 17.36, c_6 = 3.03, c_7 = 45.3_0$$

再次进行物元分析, 最后得到 3 场产流深度各等级的预报情况(表 5), 可见计算等级和实际等级都符合, 因此预报正确。

表 5 3 场产流深度各等级的预报情况

场次	1	2	3	4	5	6	7	8	j	实际	符合
1	-0.82	-0.80	-0.75	-0.69	-0.66	-0.65	-0.55	0.42	8	196.10	
2	-0.09	-0.05	-0.41	-0.53	-0.64	-0.71	-0.76	-0.79	2	38.60	
3	0.36	-0.25	-0.45	-0.44	-0.57	-0.66	-0.71	-0.75	1	9.00	

3 结 语

物元分析是新近出现的一种数学方法, 因它能解决客观世界中大量不相容和模糊的实际问题, 而在许多领域得到推广应用^[5]。本文利用前期的预报因子进行计算, 使物元分析具有了预报功能。同时在计算过程中, 通过反复调整各因子的等级分界值, 可使流域产流计算等级和实际等级的拟合率达到最大, 其结果较好。因此, 在流域产流的中间过程尚难认识的今天, 利用物元分析来进行流域产流预报, 并与其它方法配合使用, 无疑是一条比较有效的途径。

[参 考 文 献]

- [1] 王栋, 曹升乐 基于改进型前馈神经网络的流域产流预报模型的研究[J]. 水文, 1999, 19(6): 8—11
- [2] 蔡文 物元模型及其应用[M]. 北京: 科学技术文献出版社, 1994 267—275
- [3] 扬州水利学校 水文预报[M]. 北京: 水利电力出版社, 1983 62—63
- [4] 吴明远, 詹道江, 叶守泽 工程水文学[M]. 北京: 水利电力出版社, 1987. 127
- [5] 冯利华 物元分析在地震预报中的应用试验[J]. 地震学报, 1998, 20(6): 635—639

刊 误: 本刊 2004 年第 3 期“刍议线形开发建设项目水土流失野外巡查观测技术”一文表 1, 2 遗漏, 特增补如下, 谨向作者和读者致歉。

表 1 水土流失调查表

地点	时间		年 月 日		调查人
标段	工程类别			扰动面积/hm ²	
调查点基本情况 (包括地形, 地面坡度, 土地利用, 地面组成物质, 植被类型及其覆盖等)			调查点示意图		
开挖面积/hm ²			挖方/m ³	开挖面数量	
堆渣面积/hm ²			堆渣量/m ³	渣堆数量	
序号	类型	面积/m ²	岩土类型	坡长/m	坡度/(°)
1					流失状况
2					
⋮					
①类型填写开挖, 堆渣或回填等。⑤流失状况填写挡渣墙, 护坡类型, 裸露, 流失严重等。					

表 2 野外调查照片说明

水土流失实地景观照片	时 间	
	地点 (经纬度或里程碑)	
	地形地貌 (含地面坡度)	
	地面组成物质 (土壤)	
	植被类型与覆盖度	
	土地利用类型 (土地类型)	
	简要说明 (照片命名, 水土流失特征及有关数据, 照片中的设备或工具等):	