

# 辛安泉流量衰减成因分析及泉流量预测

邓安利

(山西省水利建设开发中心,山西太原 030002)

**摘要** 通过对辛安泉的泉水动态分析,获得了泉流量衰减变化的趋势。在岩溶水系统分析的基础上,采用数学相关模型对辛安泉的流量与大气降雨和人工开采进行了分析,研究了泉流量与大气降雨的延迟、滞后效应,分析认为 20 世纪 70 年代以来大气降雨的持续减少和 80 年代中后期人类的强烈活动,是造成泉流量衰减的主要原因。同时采用数学相关模型对辛安泉流量进行适时预测。

**关键词** 辛安泉;流量衰减;岩溶水系统;大气降雨;延迟和滞后效应

**中图分类号** :TV211.1      **文献标识码** :A      **文章编号** :1004-693X(2007)03-0048-04

## Attenuation causes and forecast of flowrate of Xin'an Spring

DENG An-li

(Shanxi Water Conservancy Development Center, Taiyuan 030002, China)

**Abstract** The trend of the spring discharge attenuation was given based on water dynamics in Xin'an Spring. On the basis of analyzing karst water system, the time delay and lag effect between spring discharge and precipitation was studied by use of mathematical model. The study shows that the continuous decrease of precipitation since the 1970s and the strong human activity at the middle-late 1980s were the important causes of the decline of spring discharge. Finally the flowrate of the Xin'an Spring was timely forecasted using mathematical model.

**Key words** Xin'an Spring; discharge attenuation; karst water system; precipitation; time delay and lag effect

### 1 辛安泉的基本情况

#### 1.1 泉域概况

辛安泉域位于山西省长治市太行山中段西侧,总面积为 1.1 万  $\text{km}^2$ ,其中裸露岩溶区面积为 2200  $\text{km}^2$ ,是山西省的第二大岩溶泉<sup>[1]</sup>。在构造上,辛安泉域处于沁水向斜东翼与太行山复背斜的交接处。该泉的含水层由奥陶系中统灰岩、泥灰岩组成。辛安泉共有泉点 170 余个,其中较大的泉组包括辛安村以上的林滩泉、西流泉、苇泉、南流泉,合称王曲泉群,辛安村以下的实会泉、车流泉,合称实会泉群。各泉组分布于西流村至北耽车之间约 16 km 长的浊漳河河谷中,出露标高为 600 ~ 615 m。两泉群多年平均流量为 9.29  $\text{m}^3/\text{s}$ (1957 ~ 2000 年),是浊漳河清水流量的主要水源,在山西省各岩溶大泉中,仅次于

娘子关泉而居第二位。

#### 1.2 泉流量动态特征

##### 1.2.1 年际变化特征

自 1957 年起,辛安泉的最大年均流量为 14.45  $\text{m}^3/\text{s}$ ,出现于 1964 年,最小年均流量为 3.98  $\text{m}^3/\text{s}$ ,出现于 2000 年,流量极值之比接近 3.5:1。辛安泉在 44 年间(1957 ~ 2000 年)的流量均方差为 2.923  $\text{m}^3/\text{s}$ ,占多年平均流量的 31.5%。图 1 可说明辛安泉流量的年际变化具有波动性。

根据图 1 中流量曲线的变化特征,可将辛安泉流量的全变化过程以 1980 年为界划分为两个阶段。在前一阶段,泉流量波动明显,但各年度流量相差不大,均在 11  $\text{m}^3/\text{s}$  左右,而在后一阶段,泉流量的波动性明显减弱,几乎呈单调下降趋势,到 2000 年,辛安泉流量比 1980 年时减少 7.09  $\text{m}^3/\text{s}$ ,约下降了 64%。

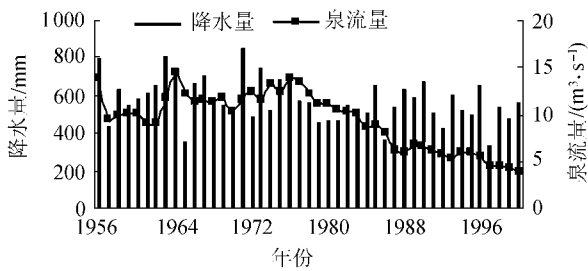


图1 泉流量及降水量多年变化

### 1.2.2 年内变化特征

辛安泉的月流量(1958~1993年)统计分析表明,该泉出现频率最高的月流量值为10~12 m<sup>3</sup>/s。在同一年份内,辛安泉各月流量占年内总流出量的5.55%~11.52%,大部分为7%~10%;各年度月流量均方差(该指标可反映年内流量波动状况)为0.119~2.824 m<sup>3</sup>/s,占当年泉流量的1.8%~24.4%,同一年份内各月流量的分配比较均匀。

## 2 岩溶水系统分析

### 2.1 大气降水输入的滞后与延迟效应

#### 2.1.1 滞后效应

根据图1,当年大的降水并没有引起当年泉流量的迅速增加,分析表明,大气降水对辛安泉流量的影响具有滞后效应,一次降水发生后,并不会立刻使泉流量产生明显的变化,而是需要经过渗入岩溶水系统后,才可能使泉流量做出反应。通过对泉流量与降水量月系列进行错位时间不同的互相关分析,可以推断滞后时间的长度。经过分析,峰值对应时间均相差12个月左右,这是由于辛安泉岩溶水系统的降水量具有很强的年内周期性和降水量年内分布极为相似的缘故。根据第一个峰值对应的时间,可推测辛安泉流量响应大气降水输入的滞后时间应小于1年<sup>[2]</sup>。

#### 2.1.2 延迟效应

大气降水对辛安泉流量的影响除具有滞后效应外,还具有延迟效应。将泉流量与前期多年降水量进行相关分析,为了衡量二者线性相关关系的密切程度,采用相关系数检验法,见表1。二者的相关系数远大于相关系数临界值,相关性十分显著。这意味着辛安泉流量的大小不仅仅取决于当年或前某一年降水量的数值,而是前期多年降水量共同作用的结果。

表1 泉流量预测结果 m<sup>3</sup>/s

年份	降水量保证率/%		年份	降水量保证率/%	
	50	95		50	95
2001	5.16	4.51	2004	4.54	1.72
2002	4.37	2.63	2005	4.38	0.65
2003	4.75	2.58	2006	4.45	0.56

### 2.2 岩溶水系统输入-输出数学模型

岩溶水系统的输入项为大气降水量与岩溶水开采量,输出项为辛安泉流量。因此,可以选取1957~2000年的泉流量、降水量及岩溶水开采量序列为建模数据。泉流量

$$Q(t) = -25.20076 + 0.000393 \times P(t-16) + 0.000158 \times P(t-15) + 0.002882 \times P(t-14) + 0.002838 \times P(t-13) + 0.002451 \times P(t-12) + 0.00339 \times P(t-11) + 0.003214 \times P(t-10) + 0.002328 \times P(t-9) + 0.004306 \times P(t-8) + 0.005953 \times P(t-7) + 0.005221 \times P(t-6) + 0.00644 \times P(t-5) + 0.00528 \times P(t-4) + 0.00372 \times P(t-3) + 0.002551 \times P(t-2) + 0.006286 \times P(t-1) + 0.003745 \times P(t) - 0.889699 \times E(t)$$

式中: $P(t)$ 为 $t$ 时刻降水量,mm; $P(t-i)$ 为 $t$ 时刻前 $i$ 年平均降水量; $E(t)$ 为 $t$ 时刻开采量,m<sup>3</sup>/s。

该模型复相关系数 $R$ 为0.997,剩余标准差 $S$ 为0.414,拟合精度非常高。泉流量拟合曲线见图2。

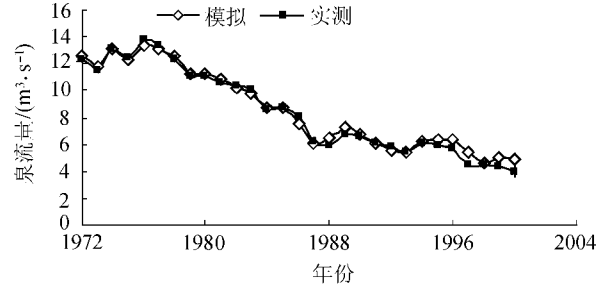


图2 泉流量拟合曲线

输入-输出模型蕴涵了该岩溶水系统的宏观特征、内部结构、输入输出关系等方面的信息:①当年降水输入项出现在模型中,表明当年大气降水对泉流量具有贡献,降水量影响泉流量的滞后时间未超过1年,除当年降水输入项外,模型中尚有前第1~16年的降水输入项,这意味着某年的泉流量是当年及前16年降水输入共同作用的结果。②模型中前第1、5、7年降水输入的特征系数远高于其他年份,说明这几年的降水输入对当年泉流量贡献最大。③前第8年后,各年份降水输入的特征系数相对较小,则说明一次降水在8年后对泉流量的影响渐趋微弱,在16年后,其影响即可忽略不计。④各年份降水输入特征系数的变化曲线呈多峰状,这是由岩溶水系统的自身结构特点所决定的。

## 3 泉流量变化原因

辛安泉自20世纪70年代后期开始,该泉流量不断下降,到2000年降到了有观测记录以来的最低点(3.98 m<sup>3</sup>/s),仅为最大流量(1964年为14.45 m<sup>3</sup>/s)

的 1/4 强。辛安泉的流量变化规律受到多年大气降水量及当年岩溶水开采量的直接影响。

### 3.1 大气降水对泉流量的影响

分析降水量序列的趋势,提取长周期成分后,将其与辛安泉流量的动态曲线加以对比,结果表明,它们之间具有内在的联系。在 20 世纪 70 年代降水量呈下降趋势,同期泉流量反而表现出上升之势。这是由于泉流量与前期多年降水量的贡献有关,并非仅受当年降水量控制,还与当年及前 16 年的降水量相关,是 17 年的降水量(当年及前 16 年)以不同权重共同作用的结果。因此,将当年及前 16 年降水量按照降水输入的特征系数加权平均后,再与泉流量曲线进行对比,结果见图 3。

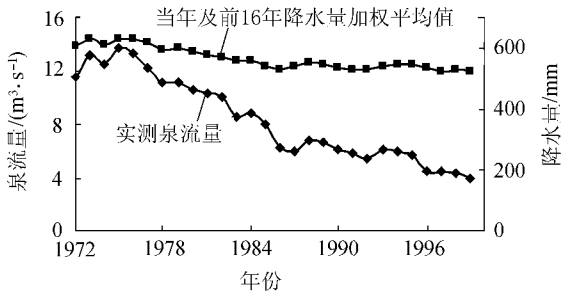


图 3 泉流量与前期多年降水量加权平均序列对比

图 3 反映了前期多年降水量(当年及前 16 年)与泉流量的关系。根据降水量曲线与泉流量曲线之间的关系,将泉流量变化分做两个阶段:第一阶段为 1980 年以前,这一阶段泉流量与降水量拟合得很好,二者的波动特征几乎完全一致。第二阶段为 1980~2000 年,这一阶段降水量的动态曲线比较平稳,而泉流量的下降趋势却非常明显。降水量曲线与泉流量曲线的变化趋势在两个阶段的差异表明,辛安泉流量变化的影响因素的重要性并非一成不变,而是随着时间的推移发生了变化。在前一阶段,大气降水是控制辛安泉流量变化的决定性因素,而在后一阶段,岩溶水开采对泉流量的削减作用开始显现出来,并日趋明显。

### 3.2 岩溶水开采对泉流量的影响

1980 年后,辛安泉流量与降水量之间变化趋势的不协调与岩溶水开采强度增加有关。辛安泉域在 1980 年以前无岩溶水开采,这一时期泉流量的变化不受人类活动干扰,可视为天然状态下的自然波动。而自 1980 年起,岩溶水开采量渐趋增加,在 1980~2000 年间,平均岩溶水开采量达到  $1.47 \text{ m}^3/\text{s}$ ,占同期平均泉流量的 21.3%,最大开采量则超过  $3 \text{ m}^3/\text{s}$ ,占当年泉流量的 81%(2000 年)。这一时期泉流量同时受到前期大气降水与当年岩溶水开采活动的控制,且岩溶水开采对它的影响呈逐渐增大趋势,

见图 4。

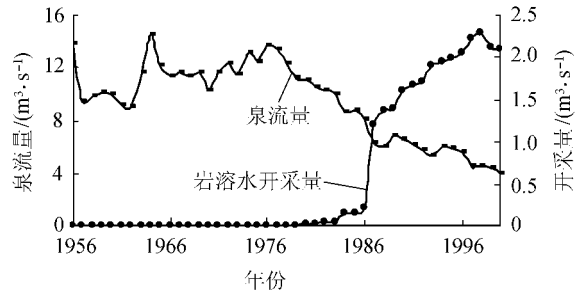


图 4 泉流量与岩溶水开采量对比曲线

### 3.3 小结

降水量是控制辛安泉流量变化的首要因素,在 1980 年以前对泉流量变化趋势及波动状况起决定性作用;1980 年以后,岩溶水开采对泉流量的削减作用是辛安泉流量呈不断下降趋势的重要因素,大气降水量减少则是该泉流量下降的另一原因。合理制定开采方案是今后科学利用和保护泉域水资源的重点工作。

## 4 泉流量预测

辛安泉是长治市城市生活与工业生产的重要水源,其流量对长治市的经济发展具有非同寻常的意义。通过数学模型的预测分析,按照现在的地下水开采强度和未来的降水量不出现极端情况,辛安泉流量将大体呈现平稳的变化趋势,而在连年干旱气候条件下,即使保证地下水开采强度不再增加,辛安泉流量也将渐趋下降,若地下水开采量进一步增加,辛安泉流量的下降趋势必随之加剧。

为获得确定的泉流量预测值,以便指导研究区的经济发展决策,必须对已建的系统模型进行改进。这样,仅需了解辛安岩溶水系统在次年的岩溶水开采计划,即可利用该模型对次年的泉流量进行适时预测。

利用 1957~2000 年的泉流量、降水量、岩溶水开采量序列资料,可以建立辛安泉流量的适时预测模型:

$$Q(t) = -25.343185 + 0.000761 \times P(t-15) + 0.00347 \times P(t-14) + 0.003615 \times P(t-13) + 0.003607 \times P(t-12) + 0.003748 \times P(t-11) + 0.002405 \times P(t-10) + 0.002537 \times P(t-9) + 0.003937 \times P(t-8) + 0.00545 \times P(t-7) + 0.00574 \times P(t-6) + 0.007671 \times P(t-5) + 0.004824 \times P(t-4) + 0.004014 \times P(t-3) + 0.003706 \times P(t-2) + 0.005644 \times P(t-1) - 0.83309 \times E(t)$$

该模型复相关系数达 0.993,剩余标准差为

0.537 拟合精度仅略差于前一模型。如已知 2001 年的岩溶水计划开采量,根据该模型即可获得 2001 年的辛安泉流量预测值。假定 2001 年的岩溶水计划开采量与 2000 年的岩溶水实际开采量相同,由此预测 2001 年辛安泉的流量为  $4.907 \text{ m}^3/\text{s}$ ,预测结果与当年的实际观测结果非常接近,该模型可以为日后合理开发辛安泉提供依据。

## 参考文献:

- [1] 韩行瑞,鲁荣安,李庆松,等.岩溶水系统——山西岩溶大泉研究[M].北京:地质出版社,1993:151.
- [2] 马腾,王焰新,邓安利,等.岩溶水系统演化与全球变化研究——以山西为例[M].武汉:中国地质大学出版社,2005:81-85.

(收稿日期 2005-11-17 编辑 舒建)

(上接第 43 页)

d. 虚拟水贸易是实现区域水资源安全、提高水资源利用效率的有效工具,必须运用虚拟水的新概念,创新水资源安全战略的管理体制与机制,建立全球化的国家水资源安全新战略。但我国对虚拟水的研究起步较晚,如何使虚拟水的计算更符合我国的实际生产情况以及如何运用虚拟水战略实现我国或局部地区的水资源安全等都需要进一步研究。

## 参考文献:

- [1] 夏军,朱一中.水资源安全的度量:水资源承载力的研究与挑战[J].自然资源学报,2002,17(3):262-269.
- [2] 陈德敏,乔兴旺.中国水资源安全法律保障初步研究[J].现代法学,2003,25(5):118-121.
- [3] 赵军凯,赵秉栋,冷传明.中国水资源安全与可持续利用[J].南阳师范学院学报:自然科学版,2004,3(3):67-70.
- [4] 王渺琳,刘春德,易瑜.岷江流域水资源安全问题[EB/OL].[2004-08-30].<http://www.hwcc.com.cn/newsdisplay>.
- [5] FALKEMARK M. The massive water scarcity now threatening africa-why isn't it being addressed[J]. Ambio,1989,18(2):112-118.
- [6] POSTEL S. Last oasis: facing water scarcity[M]. The Worldwatch Environmental Alert Series, New York: W. W. Norton & Co. 1992.
- [7] RASKINS P G, KIRSHEN P. Water futures: assessment of long-range patterns and problems[C]//Background Document for Chapter 3 of the Comprehensive Assessment of the Freshwater Resources of the World. Boston: Stockholm Environment Institute, 1997.
- [8] 贾绍凤,张军岩,张士锋.区域水资源压力指数与水资源安全评价指标体系[J].地理科学进展,2002,21(6):538-545.
- [9] 夏军.水资源安全的度量:水资源承载力的研究与挑战(一)[J].海河水利,2002(2):5-8.
- [10] APPELGERN B, OHLSSON L. Social resource scarcity: a critical factor in the Nile Basine[C]//Conference paper prepared for Nile 2002. Kigali, 1998: 22-27.
- [11] APPELGERN B, KLOHN W. Management of water scarcity: a focus on social capacities and options[J]. Physical Chemistry Earth (B), 1999, 24(4): 361-373.
- [12] OHLSSON L. Water conflicts and social resource scarcity[J].

Physical Chemistry Earth (B) 2000, 25(3): 213-220.

- [13] 徐中民,龙爱华.中国社会化水资源稀缺评价[J].地理学报,2004,59(6):982-984.
- [14] 张翔,夏军,贾绍凤.水安全定义及评价指数的应用[J].资源科学,2005,27(3):145-149.
- [15] STEVEN D M, CAROLINE S, JEREMY M. Water poverty index: a tool for integrated water management[C]//3rd WaterNet/Warfsa Symposium "Water Demand Management for Sustainable Development". Dares Salaam, 2002.
- [16] CARDINE S. Calculating a water poverty index[J]. World Development, 2002, 30(7): 1195-1210.
- [17] 姜文来.中国 21 世纪水资源安全对策研究[J].水科学进展,2001,12(1):66-71.
- [18] 贾绍凤,何希吾,夏军.中国水资源安全问题及对策[J].中国科学院院刊,2004,19(5):347-351.
- [19] 伍新木,李雪松.保障水资源安全的关键是制度创新[EB/OL].[2004-08-18].<http://www.gmw.cn>.
- [20] 宁立波,肖春娥.水权制度冲突与水资源安全[J].地理与地理信息科学,2004,20(3):61-63.
- [21] 闵庆文,于贵瑞,余卫东.西北地区水资源安全的生态系统途径[J].水土保持研究,2003,10(4):272-307.
- [22] 郑通汉.论水资源安全与水资源安全预警[J].中国水利,2003(11):19-22.
- [23] 龚明,李重荣,王陶.汉江水质预警系统研究[J].人民长江,2002,33(11):38-42.
- [24] 李秉文,刘明,冯明祥.辽河流域水质预警预报系统的探讨[J].东北水利水电,2000,18(9):39-42.
- [25] 陈惠君,唐允吉,吴贵彬.广西桂江水质预警预报信息系统的研究[J].陕西水力发电,1997,12(2):50-52.
- [26] ALLAN J A. Fortunately there are substitutes for water otherwise our hydro-political futures would be impossible[C]//Priorities for Water Resources Allocation and Management. London: ODA, 1993: 13-26.
- [27] 程国栋.虚拟水:水资源安全与水安全研究的创新领域[EB/OL].[2006-05-29].<http://www.studa.net/shuili/060529/17234022.html>.
- [28] 张志强,程国栋.虚拟水、虚拟水贸易与水资源安全新战略[J].资源环境,2004(3):7-10.
- [29] 程国栋.虚拟水——中国水资源安全战略的新思想[J].中国科学院院刊,2003(4):260-265.
- [30] 王新华.中部四省虚拟水贸易的初步研究[J].华南农业大学学报:社会科学版,2004,3(3):33-38.

(收稿日期 2005-10-10 编辑 徐娟)