

# 降水入渗补给滞时的确定及其在泉流量模拟与预测中的应用

季叶飞, 邹靖, 顾锦, 张维

(河海大学水文水资源学院, 江苏 南京 210098)

**摘要:** 由于岩溶含水系统的调蓄作用, 降水入渗补给泉水具有明显的滞后, 滞后时间视具体水文地质条件而定。本文以济南泉域为例, 利用逐步回归方法确定降水对泉水入渗补给的滞时为一年, 说明不仅当年的降水量对泉流量有贡献, 前一年的降水量对泉流量也有明显的贡献, 并得到了相应的泉流量模拟与预测模型, 得到了较好的模拟与预测精度, 证明考虑降水入渗补给滞时的泉流量模拟与预测模型比不考虑的模型精度要高。

**关键词:** 逐步回归; 降水入渗补给滞时; 泉流量模拟与预测; 济南泉域

中图分类号: P338.9

文献标识码: A

文章编号: 1000-0852(2008)06-0030-03

## 1 模型介绍

多元回归分析所采用的模型有多元线性回归模型、逐步回归模型、逐段回归模型和门限回归模型等。上述回归模型各有各的优点, 在泉流量模拟与预测中应根据特定泉域的实际情况而定。本文所采用的逐步回归模型利用逐步回归方法来挑选因子, 在已选因子中能“就次剔除”, 在未选因子中能“择优录取”, 具有“吐故纳新”的功能<sup>[1]</sup>。因此, 能够分析泉流量影响因子之间的主次关系, 提高模拟精度。

逐步回归方法在建立回归方程时不是把全部因子都进入回归方程, 而是先定义一个衡量因子对预报对象重要性的指标(方差贡献大小), 逐步从因子中挑选出对预报对象影响显著的因子, 建立“最优”的回归方程, 这就是逐步回归的总体思路<sup>[2]</sup>。当既不能引入新的因子, 也不能剔除已有因子时即为逐步回归的终止点, 此时引入的因子对模拟与预测对象的综合影响最显著, 因子的引入次序反映了因子的重要程度。

## 2 泉流量模拟

济南泉域的泉水属于岩溶泉, 其主要的补给来源为大气降水, 而降水首先要通过包气带进入饱和带补给地下水, 再通过岩溶含水系统的调解作用对泉流量产生影响, 这就决定了降水入渗补给泉水具有一段时间的滞后。这种滞后现象说明  $t$  时刻降水发生后, 不仅会对  $t$  时刻的泉流量产生贡献, 对  $t+1$ 、 $t+2$ 、 $\dots$ 、 $t+i$  ( $i$  即本文所述的降水入渗补给滞时) 时刻的泉流量都有贡献, 并有研究表明在岩溶发育地区这种滞后现象非常明显<sup>[3-6]</sup>。那么, 滞时  $i$  的确定就成为泉流量模拟与预测模型建立的关键。

本文采用的逐步回归方法原理简单, 使用参数少, 预报效果较好, 尤其适合于水文地质条件比较复杂, 其他方法无法使用的情况<sup>[7]</sup>。

1959~1980 年济南泉域泉水流量、降水量以及地下水开采量变化情况见图 1。由图 1 可知整个实测期可分为两个阶段, 第一阶段为 1959~1967 年, 第二阶段为 1968~1980 年。第一阶段泉流量明显大于开采量, 第二阶段反之。利用逐步回归方法对两阶段分别进行回归分析, 确定其降水入渗补给的滞时和影响因素间的主次关系。

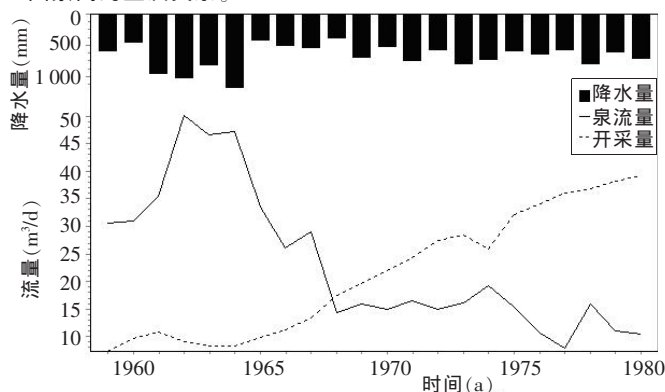


图 1 1959~1980 年济南泉域泉水流量、降水量以及地下水开采量变化过程  
将 1959~1967 年的实测数据组成一个标准化正规方程组, 据此得到的零步增广矩阵为:

$$R^{(0)} = \begin{bmatrix} 1.00 & 0.12 & -0.52 & 0.82 \\ 0.12 & 1.00 & -0.66 & 0.60 \\ -0.52 & -0.66 & 1.00 & -0.78 \\ 0.82 & 0.60 & -0.78 & 1.00 \end{bmatrix}$$

收稿日期: 2008-02-29

基金项目: 2007 年江苏省高等学校大学生实践创新训练计划 (编号: S2007016)

作者简介: 季叶飞 (1986-), 男, 江苏常熟人, 硕士研究生, 主要从事地表水与地下水相互转化方面的研究。

该零步增广矩阵也是各泉流量影响要素之间相关程度的体现,即各泉流量影响要素间的相关系数见表1。

表1 各泉流量影响要素相关系数				
	$P_t$	$P_{t-1}$	$K_t$	$Q_t$
$P_t$	1.00	0.12	-0.52	0.82
$P_{t-1}$	0.12	1.00	-0.66	0.60
$K_t$	-0.52	-0.66	1.00	-0.78
$Q_t$	0.82	0.60	-0.78	1.00

注: $P_t$ 表示当年降水量; $P_{t-1}$ 表示前一年的降水量; $K_t$ 表示当年开采量; $Q_t$ 表示当年泉流量

根据零步增广矩阵计算方差贡献,并取F-检验的临界值 $F^*=3^{[8]}$ ,通过逐步回归的思路得到第一阶段泉流量的回归方程为:

$$Q_t=7.252+0.024P_t+0.016P_{t-1}$$

(1)

式(1)中先引入因子 $P_t$ 后引入因子 $P_{t-1}$ ,而没有引入因子 $K_t$ ,说明这一阶段降水量对泉流量的影响占主要地位。从图1中看出第一阶段开采量一直处于相当低的水平,对泉流量的影响甚微。同时,由式(1)得到第一阶段降水入渗补给泉水的滞时 $i=1a$ 。

同理,对第二阶段用相同的方法,在取相同显著性水平的情况下得到第二阶段的泉流量回归方程为:

$$Q_t=6.137-0.430K_t+0.019P_t+0.012P_{t-1}$$

(2)

式(2)中因子的引入次序为: $K_t$ 、 $P_t$ 、 $P_{t-1}$ ,说明随着地下水开采量的增加,其对泉流量的影响越来越显著,这一点从方程引入变量的次序即可得出。从图1看出该阶段地下水开采量较第一阶段明显增大,而泉流量也明显地呈现下降趋势。若不采取有效的保护措施,泉水将会出现断流现象。同时,由式(2)得到第二阶段降水入渗补给泉水的滞时 $i=1a$ 。

在不考虑降水入渗补给滞时的情况下,用逐步回归方法得到两阶段的泉流量回归方程分别为:

第一阶段:

$$Q_t=17.279+0.027P_t$$

(3)

第二阶段:

$$Q_t=13.962-0.335K_t+0.015P_t$$

(4)

本文从以下两方面比较两种情况下模型的优劣。一是回归方程的复相关系数,见表2。

表2 复相关系数比较		
时段	第一阶段	第二阶段
不考虑补给滞时	0.822	0.806
考虑补给滞时	0.963	0.906

由表2的数据看出考虑降水入渗补给滞时的回归方程的复相关系数均大于不考虑的情况,第一阶段复相关系数提高0.141,第二阶段提高0.100,两阶段的提高幅度均较大。说明考虑降水入渗补给滞时能够大大提高模拟对象与影响因子之间的线性相关性。二是从模型模拟精度的角度来比较两模型的优劣,从图2看出虚线与实线的接近程度比点划线与实线的接近程度高得多,说明考虑降水入渗补给滞时的模型模拟精度要比不考

虑降水入渗补给滞时的模型要高,即考虑降水入渗补给滞时的模型更加接近实际的情况。此外,定义:相对误差=(模拟值-实测值)/实测值;以相对误差的绝对值小于或等于30%作为模拟合格<sup>[9]</sup>,计算得考虑降水入渗补给滞时的模型在整个实测期内模拟的相对误差为-15.1%,合格;不考虑降水入渗补给滞时的模型为44.2%,不合格。两个模型模拟结果的相对误差也说明考虑降水入渗补给滞时的模型要优于不考虑的模型。

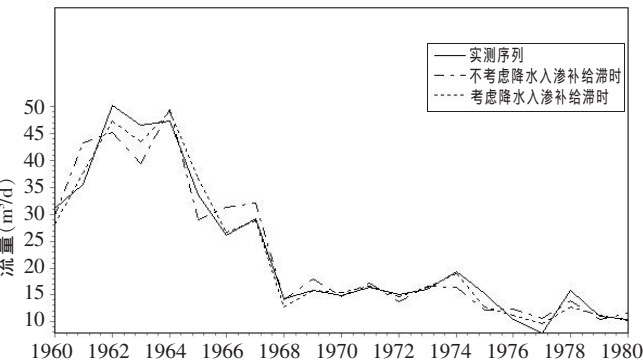


图2 模拟结果比较

3 泉流量预测

济南是全国第一个也是唯一一个“地下水保护行动计划”的试点城市。济南素以“泉城”闻名中外,但近年来,由于水资源紧缺,地下水开采没有得到很好地管理和保护,泉域的地下水环境遭到了严重破坏,致使泉水流量急剧衰减,甚至有断流的危险,引起了各级领导和社会各界的极大关注。如何让泉水常年喷涌,凸现泉城特色,关系到济南的可持续发展。利用式(2)中的数学模型,对1981年和1982年的泉流量进行预测,结果见表3。

表3 趵突泉流量预测结果表				
年份		预测值 (万 m³/d)	实测值 (万 m³/d)	相对误差(%)
1981	不考虑补给滞时	7.52	5.50	36.7
	考虑补给滞时	6.41	5.50	16.5
1982	不考虑补给滞时	10.15	5.10	99.1
	考虑补给滞时	5.70	5.10	11.9

由表3的预测结果表明,若以相对误差的绝对值小于或等于30%作为预测合格<sup>[9]</sup>,那么考虑降水入渗补给滞时的模型预测结果均合格,而不考虑降水入渗补给滞时的模型预测结果均不合格,说明考虑降水入渗补给滞时的泉流量预测模型与实际情况符合较好,具有实际运用价值。

4 结论

分析结果表明,济南泉域降水入渗补给滞时为一年,即由于降水入渗补给的滞后作用,不仅当年的降水量对当年泉水流量有明显的贡献,前一年的降水量对当年泉水流量也存在明显的贡献,或者说当年的降水量不仅对当年的泉流量有影响,对

次年的泉流量也有影响。同时,通过逐步回归的方法对泉流量进行模拟得出,考虑降水入渗补给滞时的模型不管是在泉流量与其影响因子之间的相关程度方面,还是在模型模拟精度方面都要优于不考虑降水入渗补给滞时的模型。分别运用考虑和不考虑降水入渗补给滞时的模型进行泉流量预测,其结果表明考虑降水入渗补给滞时的模型精度较高,与实际符合较好。此外,通过逐步回归的方法还能够分清不同阶段模拟对象与影响因子之间的主次关系。

参考文献:

- [1] 范钟秀.中长期水文预报[M].南京:河海大学出版社,1999, 58-69.
- [2] 汤成友,郭丽娟,王 瑞.水文时间序列逐步回归随机组合预测模型及其应用[J].水利水电技术,2007, 38(6): 1-4.
- [3] 曹建生,刘昌明,张万军,等.典型小流域裂隙岩体渗流补给特征试验

研究[J].水利学报,2005, 36(11): 1335-1340.

- [4] 李砚阁,杨昌兵,耿雷华,等.北方岩溶大泉流量动态模拟及其管理[J].水科学进展,1998, 9(3): 275-281.
- [5] 邓安利. 辛安泉流量衰减成因分析及泉流量预测 [J]. 水资源保护, 2007, 23(3): 48-51.
- [6] 曹建生,刘昌明,张万军.“岩土二元结构”小流域降雨入渗补给地下水裂隙潜流过程初步研究[J].自然科学进展,2005, 15(6): 759-763.
- [7] 王艳秋,孙继彬.用时间序列逐步回归分析预报枯水期地下水位埋深[J].东北水利水电,2005, 22(250): 24-29.
- [8] 赵长森,沈 冰,董宝恩,等.和田子项目区地下水水化学分析及利用对策[J].水资源与水工程学报,2004, 15(3): 28-31.
- [9] 葛朝霞,顾月红,曹丽青,等.海温和气象因子对洪家渡水电站月径流量的影响[J].河海大学学报(自然科学版),2006,34(6):606-609.

### Determination of Precipitation Recharge Lag Time:

### Application in Spring Flow Simulation and Prediction

Ji Ye-fei, ZOU Jing, GU Jin, ZHANG Wei

(College of Hydrology and Water Resources, Hohai University, Nanjing 210098, China)

**Abstract:** Due to the regulation and storage of karstic aquifer system, precipitation infiltration recharge for spring has obvious lag time, which depends on the specific hydrogeological condition. Jinan spring area was taken as an example that the lag time was determined as one year with stepwise regression method. That is to say, not only current year precipitation contributes to the spring flow, but also the previous one. The corresponding model of spring flow simulation and prediction was developed, in which a good precision was obtained. The result shows that the precision of spring simulation and prediction model, which takes precipitation infiltration recharge lag time into account, is better than the one leaving precipitation recharge lag time out of account.

**Key words:** stepwise regression; precipitation infiltration recharge lag time; simulation and prediction of spring flow; Jinan spring area

(上接第 41 页)

程概化结果见表 3、图 8。

经计算分析,该次降雨只有 8 个时段满足形成径流的第①条件,分别为第 8、9、11、12、13、14、15、16 时段;其中只有 4 个时段满足形成径流的第②条件,分别为第 13、14、15、16 时段;第 14、15、16 时段同时满足了形成径流的第③条件。径流系数法计算径流结果见表 4。计算径流量为 3.4mm,与实测径流量 3.2mm 相比,误差 0.2mm。相对误差-6.3。

### 3 结论

均匀降雨径流特征明显,其径流系数的变化规律充分揭示了降雨前期条件、降雨特性对径流的影响。利用前期条件相同、降雨特性相同,径流结果相同这一产流机理,有机的将均匀降雨与非均匀降雨联系起来,采用径流系数法对有实测资料的非均匀降雨模拟径流计算,取得了较好效果。径流系数法似可应用于平原区天然降雨地面径流的计算与分析。

参考文献:

- [1] 章文波,付金生.不同类型雨量资料估算降雨侵蚀力[J].资源科学, 2003,25(1):35-41.
- [2] 雷志栋,胡和平,杨诗秀.土壤水研究进展与评述[J].水科学进展,

表4 2001072619次降雨径流计算表

时段	雨量	历时	雨强	$i(k)/K_s$	$\omega_k$	径流系数		径流量
$k$	$P(k)$ (mm)	$t(k)$ (min)	$i(k)$ (mm/min)	$K_s=0.106$	$\omega_0=0.55$	$\gamma$	$r$	$Q$ (mm)
8	5.0	43	0.12	>1		<0		
9	4.9	28	0.18	>1		<0		
10	4.4	62	0.07	<1				
11	2.9	20	0.14	>1		<0		
12	2.6	10	0.26	>1	>1	<0		
13	9.9	66	0.15	>1	>1	0.091 894		0.9
14	5.8	44	0.13	>1	>1		0.081 82	0.5
15	4.1	20	0.2	>1	>1		0.268 47	1.1
16	3.8	20	0.19	>1	>1		0.234 01	0.9
								3.4

1999,10(3):311-318.

- [3] 杨文智,邵明安.黄土高原土壤水分研究[M].北京:科学出版社,2000.
- [4] 汪慧敏,李宪法.北京城区雨水径流及控制[J].城市环境与城市生态, 2002,15(2):16-18.
- [5] 郭廷辅,段巧辅.径流调控理论是水土保持的精髓[EB/OL].2004-04-23.
- [6] 李栋梁,张佳丽,金建瑞,等.黄河上游径流量演变特征及成因研究[J].水科学进展,1998,9(1):22-28.