

文章编号:1001-4810(2003)02-0092-04

娘子关泉域降水补给的时滞研究

郝永红¹, 黄登宇², 刘洁¹, 王学萌³

(1. 山西大学环境与资源学院, 山西太原 030006; 2. 山西大学生命科学与技术学院, 山西太原 030006;
3. 山西省农业科学院, 山西太原 030006)

摘要:针对娘子关泉域降水补给的时滞问题展开研究,根据泉域水文地质条件的灰色系统特征,提出了带有时滞的灰色关联分析模型,并运用该模型对泉域不同区域的降水量与泉水流量进行了时滞分析,结果表明,娘子关泉域不同区域的降水对娘子关泉的补给时滞存在差异,位于中间主流带的阳泉市、平定、盂县、昔阳与和顺的降水时滞为2年;位于西南、西北径流区边缘的寿阳和左权的降水时滞为4年。

关键词:娘子关泉;灰色关联分析;时滞

中图分类号:P333.1 **文献标识码:**A

0 前言

娘子关泉是我国北方最大的岩溶泉,地处山西省阳泉东部绵河河谷,多年平均流量 $10.93\text{m}^3/\text{s}$ (1956—1996)。娘子关泉域面积 7217km^2 ,主要包括阳泉市、平定、盂县、昔阳、寿阳、和顺以及左权等7个市、县。娘子关泉是当地著名的旅游景点,娘子关泉水及泉域岩溶地下水是当地主要的供水水源,在工农业生产和日常生活中起着举足轻重的作用。随着区域经济的发展,对岩溶水资源的开采逐年增加,人们愈来愈关注泉域岩溶水资源管理,对泉域进行系统的研究已成为各级政府和管理部门关注的热点^[1]。

在泉域地下水管理中,泉域的降水与泉水流量的关系是一个关键性的问题。泉域不同区域的降水对泉水流量的补给状况;不同区域的降水经过入渗、汇流、形成泉水出露地表的时间,即补给时滞等,都是进行泉域开发利用规划和保护的基础性工作^[2,3]。为此,本文根据灰色系统理论,提出了带有时滞的灰色关联分析模型,并运用该模型对山西娘子关泉域的降水补给时滞进行了较系统的定量分析研究,为降水入渗补给时滞的确定做了新的尝试。

1 泉域水文地质条件及其灰色系统特征

1.1 泉域水文地质条件

娘子关泉域位于沁水向斜之东北翼,为一北东向翘起的大向斜,下古生界碳酸盐岩由北面及东面向凹陷中心倾斜,构成单斜状岩溶蓄水构造,其基底为太古变质岩类,覆盖层为上古生界及中生界三叠系碎屑岩层^[4]。

中奥陶统碳酸盐岩为娘子关泉域岩溶水的主要含水层,以纯灰岩、斑状白云岩为主,夹三层膏溶角砾岩,其厚度为 $467\sim 628\text{m}$,分布于整个泉域,广泛出露于泉域东部地区(图1)。出露面积达 2282km^2 。地表节理裂隙发育,据统计,裂隙率可达 $1.5\%\sim 3.8\%$,为降水入渗和河水入渗提供了良好的通道。地下深处以溶蚀裂隙、蜂窝状溶孔为主,它们与少量溶洞组成的贮水空间从而构成巨大的含水系统。

娘子关泉域是一个独立的水文地质单元,泉域的天然边界为地表分水岭、地下分水岭及隔水岩层。泉域西高东低,西部多为上古生界二叠系、中生界三叠系砂页岩覆盖,覆盖层厚度在 $90\sim 1200\text{m}$,与下伏石炭系整合接触;下伏石炭系灰岩厚 $80\sim 220\text{m}$,平行不整合于中奥陶统灰岩之上。大气降水入渗在这里形成

基金项目:山西省青年科技研究基金项目(20021028),太原市科技启明星计划项目

作者简介:郝永红(1964—),男,山西平遥人,副教授,主要从事水资源系统分析、水资源管理等研究。

收稿日期:2003-04-18

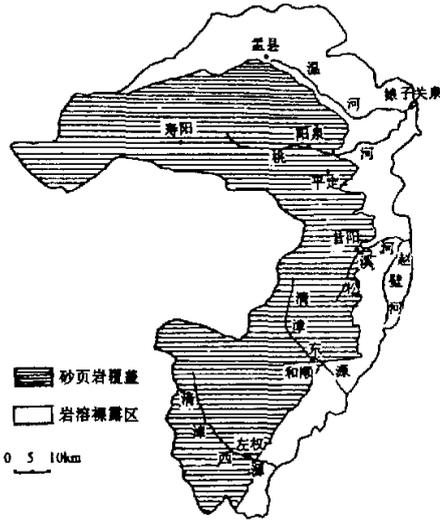


图 1 娘子关泉域水文地质图
Fig. 1 Hydrogeological map of the Niangziguan Spring Basin

浅层地下水,以微弱裂隙含水层为主,其次为石炭系层间岩溶水或河床冲积层潜水。这些浅层水是深层岩溶含水层的间接补给水源。西部岩溶水埋深为 230~380m,层间岩溶水埋深为 120~180m。泉域东部为岩溶裸露区,大气降水直接入渗补给深层岩溶水。东部岩溶水埋深为 20~180m。

娘子关泉域中奥陶统岩溶地下水具有统一的地下水位,以娘子关泉为排泄基准。泉域岩溶水由南、北、西向东汇集,在东部由于桃河、温河汇集成的绵河河谷的深切,以及隔水底板下奥陶统白云岩的抬升,使深部岩溶水出露形成娘子关泉群^[1]。泉域南北两个水位低凹带为泉水的主要补给区,岩溶含水层含水微弱,地下水力坡度 5%~8%。泉域东部、平定的中部、巨城、移粮一带为泉域的汇流区,含水层厚度为 5~210m 水位埋深 4.4~209m,单位涌水量 1.1~10m³/h·m。地下水力坡度为 0.9%~1.0%。温河石桥以东、桃河西武庄以东至苇泽关断层一带为排泄区,排泄区含水层厚度为 15~49m,水位埋深 9.4~61m,单位涌水量 13.4~20.4m³/h·m,地下水力坡度为 3.5%。

泉域为温带半干旱大陆性气候,多年平均气温 8.7~10.9℃,多年平均降水量为 551.5mm(1956—1996),多年平均蒸发量 1202mm。桃河、温河、松溪河、潇河及清漳河西源、清漳河东源为泉域内主要河流。

1.2 泉域的灰色系统特征

所谓灰色系统是指部分信息已知、部分信息未知或非确知的系统,亦即信息不完全的系统。在娘子关泉域水文地质过程中,首先影响这个过程的因素的作用不完全明确。人们一般概括为气候条件、地形条件、地表植被、地质构造、人类活动等。但是我们不能准确地把握每一项因素的作用范围和机制。其次,系统的结构和运行机制不完全明确。泉域岩溶含水系统具有含水介质的多重性,具有裂隙流与管流并存、层流与紊流并存、线性流与非线性流并存、连续流与孤立水体并存等特殊水流特征,使得难以准确了解泉域含水层的结构,给定量表达泉水的运行机制带来了不确定因素^[5]。第三,泉域水文地质信息不完全确知。泉域的地下水观测资料主要集中在阳泉和平定,泉域的其余大多数地区观测资料很少,观测资料间断,不连续,这给泉域的数值模拟计算带来了更大的不确定性。综上所述,娘子关泉域具有明显的灰色系统特征^[6]。

2 带有时滞的灰色关联分析模型

设在系统行为序列中,系统特征序列为:

$$X_c = (X_c(t)), \quad t = 1, 2, \dots, n \quad (1)$$

式中: t ——为时间的离散点;

n ——为离散点个数。

第 j 相关因素行为序列,时滞为 τ 时可表达为:

$$X_{j\tau} = (X_{j\tau}(t - \tau)), \quad t = 1, 2, \dots, n$$

$$\tau = 0, 1, 2, \dots, m; j = 1, 2, \dots, L \quad (2)$$

式中: τ —— $X_{j\tau}$ 相对于 X_c 的滞后时段;

L ——相关因素序列个数。

由于时滞问题的特殊性,(2)中的 $t - \tau$ 取负整数仍有意义。即当 $\tau = 0$ 时 $t - \tau = 1, 2, \dots, n$; 当 $\tau = 1$ 时 $t - \tau = 0, 1, 2, \dots, n - 1$; 当 $\tau = 2$ 时 $t - \tau = -1, 0, 1, \dots, n - 2$; 以此类推,当 $\tau = m$ 时 $t - \tau = -m + 1, -m + 2, \dots, -m + n$ 。

求 X_c 和 $X_{j\tau}$ 的均值像,令

$$\bar{X}'_c = (\bar{X}'_c(t)) = \frac{X_c}{\bar{X}_c}, \quad t = 1, 2, \dots, n \quad (3)$$

式中 $\bar{X}'_c = \frac{1}{n} \sum_{t=1}^n X_c(t)$

$$\bar{X}'_{j\tau} = (\bar{X}'_{j\tau}(t - \tau)) = \frac{X_{j\tau}}{\bar{X}_{j\tau}}, \quad t = 1, 2, \dots, n$$

$$\tau = 0, 1, 2, \dots, m; j = 1, 2, \dots, L \quad (4)$$

式中 $\bar{X}'_{j\tau} = \frac{1}{n} \sum_{t=1}^n X_{j\tau}(t - \tau)$

那么,系统特征序列 X_c 与带有时滞的相关因素

行为序列 X_{jr} 的灰色关联系数为:

$$\gamma_{cjr} = \frac{\min_{j,r} \min_t |X'_c(t) - X'_{jr}(t - \tau)| - \min_{j,r} \min_t |X'_c(t) - X'_{jr}(t - \tau)|}{|X'_c(t) - X'_{jr}(t - \tau)| - \min_{j,r} \min_t |X'_c(t) - X'_{jr}(t - \tau)|} \quad (5)$$

关联度为:

$$\gamma_{cjr} = \frac{1}{n} \sum_{t=1}^n \gamma(t, t - \tau) \quad (6)$$

因为关联度反映的是 2 个数列的几何相似程度, 即 2 个数列的关联度愈高, 其几何相似程度也愈高^[7,8]。因此, 最大关联度所对应的时滞就是客观存在的时滞, 记为 τ^* 。为此, 按照大小顺序将 $m+1$ 个关联度 γ_{cjr} 排列起来, 最大关联度所对应的滞后时段 τ^* 就是要求的时滞 τ^* 。

3 泉域降水补给时滞的计算结果

以 1965—1996 年娘子关泉 32 年的年平均流量

资料作为特征序列 X_c , 分别以 1958—1996 年泉域内阳泉市、平定、孟县、昔阳、寿阳、和顺及左权等 7 个市、县的降水资料的不同时滞序列(1965—1996; 1964—1995; 1963—1994; 1962—1993; 1961—1992; 1960—1991; 1959—1990; 1958—1989) 组成相关因素行为序列 X_{jr} , 运用带有时滞的灰色关联分析模型进行关联度计算。

根据前人研究成果, 娘子关泉流量与包括当年在内的前 7 年降水量关系最大^[9]。因此, 本文采用的时滞分别为 0, 1, 2, ..., 7 年。计算结果列于表 1。

根据表 1 的关联度排列组成的关联序见表 2。由表 2 可见, 阳泉市、平定、孟县、昔阳与和顺在时滞为 2 年时其降水量与泉水流量关联度最大, 因此, 阳泉

表 1 娘子关泉域降水与泉水流量的时滞关联度

Tab. 1 The time-lag-existing grey incidence degrees among precipitations and discharges of Nianziguan Springs

地名 降水时滞时段	阳泉	平定	孟县	昔阳	寿阳	和顺	左权
滞后 0 年(1965—1996)	0.7474	0.7462	0.8001	0.7850	0.7736	0.7876	0.7900
滞后 1 年(1964—1995)	0.7800	0.7736	0.8156	0.8079	0.7899	0.8077	0.7976
滞后 2 年(1963—1994)	0.7885*	0.8007*	0.8360*	0.8153*	0.8157	0.8124*	0.8167
滞后 3 年(1962—1993)	0.7680	0.7843	0.8254	0.8074	0.8114	0.7979	0.8104
滞后 4 年(1961—1992)	0.7608	0.7843	0.8342	0.7984	0.8159*	0.7938	0.8206*
滞后 5 年(1960—1991)	0.7681	0.7926	0.8204	0.7917	0.8130	0.7857	0.8116
滞后 6 年(1959—1990)	0.7616	0.7778	0.8188	0.7933	0.8070	0.7702	0.8019
滞后 7 年(1958—1989)	0.7679	0.7740	0.8182	0.8036	0.8119	0.7791	0.7967

注: 表 1 中带 * 的数字为该县、市在不同时滞下的最大关联度。

表 2 娘子关泉域降水与泉水流量的时滞灰色关联序

Tab. 2 The time-lag-existing incidence orders between precipitation and discharge of the Nianziguan Spring

地名	关联序
阳泉	$\gamma_{c2} > \gamma_{c1} > \gamma_{c3} > \gamma_{c4} > \gamma_{c7} > \gamma_{c5} > \gamma_{c6} > \gamma_{c0}$
平定	$\gamma_{c2} > \gamma_{c3} > \gamma_{c4} > \gamma_{c5} > \gamma_{c6} > \gamma_{c7} > \gamma_{c1} > \gamma_{c0}$
孟县	$\gamma_{c2} > \gamma_{c4} > \gamma_{c3} > \gamma_{c5} > \gamma_{c6} > \gamma_{c7} > \gamma_{c1} > \gamma_{c0}$
昔阳	$\gamma_{c2} > \gamma_{c1} > \gamma_{c3} > \gamma_{c4} > \gamma_{c5} > \gamma_{c6} > \gamma_{c7} > \gamma_{c0}$
寿阳	$\gamma_{c2} > \gamma_{c1} > \gamma_{c3} > \gamma_{c4} > \gamma_{c5} > \gamma_{c6} > \gamma_{c7} > \gamma_{c0}$
和顺	$\gamma_{c2} > \gamma_{c1} > \gamma_{c3} > \gamma_{c4} > \gamma_{c5} > \gamma_{c6} > \gamma_{c7} > \gamma_{c0}$
左权	$\gamma_{c2} > \gamma_{c1} > \gamma_{c3} > \gamma_{c4} > \gamma_{c5} > \gamma_{c6} > \gamma_{c7} > \gamma_{c0}$

市、平定、孟县、昔阳与和顺的降水入渗补给时滞

为 2 年; 寿阳和左权在时滞为 4 年时其降水量与泉水流量关联度最大, 因此, 寿阳和左权的降水入渗补给时滞为 4 年。

从娘子关泉域岩溶水系统来看, 寿阳和左权分别位于泉域西南、西北, 属于径流区边缘, 该区包气带厚度大、径流距离长, 含水介质以溶隙为主, 又有多个层间相对隔水层存在, 因此, 该区的降水入渗补给地下水的时滞会比较长; 而阳泉市、平定、孟县、昔阳与和顺是区域岩溶水的主流带。主流带与岩溶地下河不同, 它不是个别的岩溶导水通道, 而是众多溶隙、溶洞等组成的强岩溶含水带和积极流动带。它与西南、西北径流区边缘相比具有岩溶发育程度高、富水性强而均匀、水位低平、水力坡度平缓、导水性能和动态稳定

的特点,所以,主流带的降水入渗补给地下水的时滞会比较短。由此可见,以上计算结果与娘子关泉域的实际情况相吻合。

4 结 论

(1) 在娘子关泉域不同的区域具有不同的降水补给时滞,位于中间主流带的阳泉市、平定、盂县、昔阳与和顺为2年;位于西南、西北径流区边缘的寿阳和左权为4年。

(2) 带有时滞的灰色关联分析方法在娘子关泉域的实际应用表明,该方法简单易行、可操作性强,提高了降水补给时滞确定的科学性和准确性。

(3) 带有时滞的灰色关联分析方法能够有效地反映相关因素的时滞效应,能够更加准确、客观地获得相关因素间的关联特性,为相关因素的时滞效应分析提供了新方法。

参考文献

- [1] 韩祥瑞,鲁荣安,等.岩溶水系统——山西岩溶大泉研究[M].北京:地质出版社,1993:125-145.
- [2] 郝永红,王学萌.娘子关泉域岩溶水资源保护研究[J].系统工程理论与实践,2001,21(4):137-140.
- [3] 郝永红,马文正.阳泉市地下水最优控制模型及其微分动态规划—二次规划算法[J].水利学报,1997,(6):10-18.
- [4] 马文正,郝永红.娘子关泉域优化供水模型及其应用[J].系统工程学报,1992,7(2):87-96.
- [5] 钱学星.岩溶地下水运动与计算的若干问题讨论[J].水利水电科技进展,1998(8):18-22.
- [6] 夏军.灰色系统水文学[M].武汉:华中理工大学出版社,2000:1-96.
- [7] 王学萌,聂宏声等.灰色系统模型在农村经济中的应用[M].武汉:华中理工大学出版社,1991:79-113.
- [8] 刘思峰,郭天榜,党耀国等.灰色系统理论及其应用[M].北京:科学出版社,1999:40-77.
- [9] 杨光中,郭志峰.娘子关岩溶地下水开发与保护的探索[J].地下水,1997,19(2):56-68.

STUDY ON THE TIME-LAG BETWEEN PRECIPITATION AND DISCHARGE IN NIANGZIGUAN SPRING BASIN

HAO Yong-hong¹, HUANG Deng-yu², LIU jie¹, WANG Xue-meng³

(1. The College of Environment and Resources, Shanxi University, Taiyuan, Shanxi 030006, China;

2. The College of Life Science and Technology, Shanxi University, Taiyuan, Shanxi 030006, China;

3. The Academic Institute of Agriculture Science, Shanxi Province, Taiyuan, Shanxi 030006, China)

Abstract: Niangziguan Spring, the largest karst springs in North China, is located in Mianhe Valley to the east of Yangquan City, Shanxi Province. From 1958 to 1996, the average discharge of Niangziguan Spring is 10.93m³/s. The area of the spring basin is 7217km². Precipitation is the main source that supplies the karst water. The relation between precipitation and spring discharge is important for the exploitation and conservation of karst water. It is focused on the problem of the time-lag from the precipitation to the supply of the Niangziguan Spring in this paper. Based on the grey-system characteristics of the spring-basin's hydrogeologic conditions, time-lag-existing grey incidence analysis model is put forth. By using the model, the time-lag is analyzed. It is proved that the precipitation in different regions has different time-lag. The time-lag of the major groundwater runoff region in the middle of the spring basin, including Yangquan City, Pingding County, Yuxian County, Xiyang County and Heshun County, is 2 years. The time-lag of the weak groundwater runoff region in the southwest and northwest of the spring basin, including Shouyang County and Zuoquan County, is 4 years.

Key words: Niangziguan Spring; The grey incidence analysis; Time-lag