

文章编号:1001-4810(2001)01-0011-06

山西晋祠泉在引水条件下的可再生性研究^①

孙才志^{1,2},王金生¹,林学钰¹

(1. 北京师范大学环境科学研究所,北京 100875;2. 辽宁师范大学地理系,大连 116029)

摘 要:应用模糊线性回归与时间序列分析手段,通过分析长期动态资料,建立起晋祠泉流量与降水量、汾河渗漏量、矿坑排水量及人工开采量之间的模糊关系方程;在此基础上预测了在万家寨引黄工程完工后,晋祠泉域在地下水得到涵养条件下的可再生性,同时还预测了不同方案调控条件下,晋祠泉的大致出流时间。在一般情况下,晋祠泉的大致出流时间在 2007~2009 年之间。为了实现晋祠早日复流,节流是今后最重要的管理措施,同时应该注意晋祠泉的水质保护问题。

关键词:晋祠泉;可再生性;模糊预测;时间序列分析

中图分类号:P642. 253

文献标识码:A

0 引 言

晋祠是我国著名的旅游胜地和国家重点文物保护单位。自从 70 年代以来,由于长期过量开采岩溶地下水,导致岩溶地下水位区域性大幅度下降,泉流量持续衰减,直到 1994 年 4 月断流。晋祠泉断流是一个标志性事件,它显示了泉域内的地下水在经过多年的连续超采后,水资源的可持续性已经遭到严重破坏。

正在加紧建设的万家寨引黄工程,从偏关县西北的黄河干流万家寨水利枢纽取水,引水流量 $48\text{m}^3/\text{s}$,设计年引水量 $12\times 10^8\text{m}^3$,其中向太原供水区的引黄南干线分水 $25.8\text{m}^3/\text{s}$,设计年引水量 $6.4\times 10^8\text{m}^3$,其中一期工程竣工时间为 2001 年。由于新的替代水源的到来,对于扭转泉域地下水长期超采局面,使长期处于“透支”状态的地下水“休养生息”、恢复活力具有重要的意义。在这种情况下,晋祠泉能否恢复出流?何时出流?这已经成为当地政府和旅游部门非常关心的问题。本文拟针对这一问题做一个简要的探讨。

1 晋祠泉的自然概况

晋祠泉是我国北方岩溶大泉之一,它位于太原市

西南 25km 处的晋祠镇,出露于太原—交城大断裂的北端,从中奥陶统马家沟组灰岩中溢出。晋祠泉的形成主要是由于太原西山岩溶水在向盆地运动过程中受到边山断层东侧弱透水的第四系阻挡而成(图 1),为典型的山前断裂溢流泉,该泉为非全排型泉^[1]。

从晋祠岩溶水系统来看,其北部边界为康家会——柳科府断裂构造带与变质岩山区接触,为隔水边界;西部边界为近南北向展布于柳科府—罗家曲—石家滩—狐爷岭—文裕河水库一带的狐爷山山字型构造带,与西部变质岩山区接壤,为隔水边界;南部边界为西边山断裂带,为弱透水边界;东部边界,其北段以柳林河河谷为界,南接北石槽背斜至王封地垒。晋祠岩溶水系统的地下水来源主要有三部分:一是在汾河以北接受降水补给,赋存于灰岩中,流向东南,越过汾河,由潜水转变成承压水;其二由汾河水渗漏补给;其三是泉域附近的岩层,直接接受大气降水的入渗补给。晋祠泉域的具体水文地质条件可参考文献^[1]。

2 模糊线性回归与时间序列分析

2.1 模糊线性回归^[2]

和经典的线性回归分析类似,设变量 y 和它的相

^① 基金项目:研究成果获国家重点基础研究项目—973 项目(项目编号:G1999036406)资助

作者简介:孙才志(1970—),男,博士后,讲师,水文地质专业。

收稿日期:2000-11-26

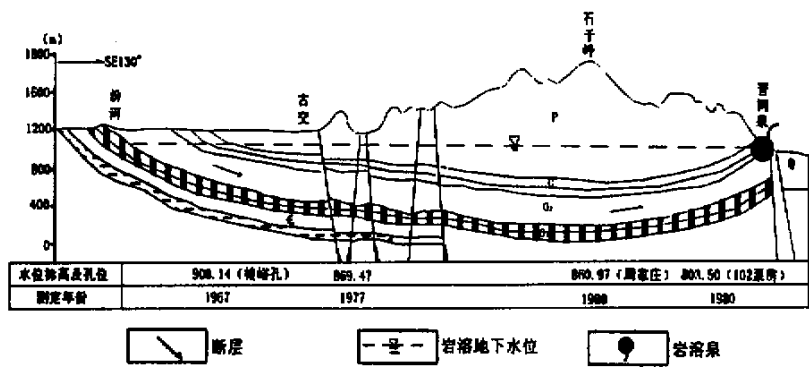


图 1 晋祠泉水文地质剖面图(引自参考文献[1],略有修改)
Fig. 1 Hydrogeological profile of Jinchi spring

关因素 $x_1, x_2, \dots, x_n$ 有线性关系:

$$y = A_0 + A_1x_1 + A_2x_2 + \dots + A_nx_n \tag{1}$$

回归分析是利用已知的 m 组观测数据: $(y_i, x_{1i}, x_{2i}, \dots, x_{ni}), i=1, 2, \dots, m$ 去估计回归系数 A_j 。但在模糊线性回归分析中,认为模型具有模糊性,具体地说,回归系数 A_j 是模糊数,模型的拟合值 $\hat{y}_i$ 与观测值 y_i 之间的偏差就是由这种模糊性引起的。

通常取 A_j 为三角模糊数 $A(\alpha, c)$,它的隶属函数(图 2)为:

$$\mu A(z) = \begin{cases} 1 - \frac{|z - \alpha|}{c} & \alpha - c \leq z \leq \alpha + c \\ 0 & \text{其它} \end{cases} \tag{2}$$

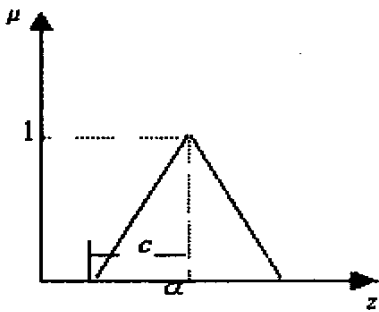


图 2 三角模糊数图

Fig. 2 Figure of triangle fuzzy number

图 2 的通俗意义是 A “大约”是 α ,称 α 为 A 中心值, c 为 A 的模糊幅度,和通常所说“精度”的含义相反。

三角模糊数 $A(\alpha, c)$ 有通常的线性性质,即

$\begin{cases} 1^0 & kA(\alpha, c) = A(k\alpha, kc) \quad k > 0 \\ 2^0 & A_1(\alpha_1, c_1) + A_2(\alpha_2, c_2) = A(\alpha_1 + \alpha_2, c_1 + c_2) \end{cases}$

万方数据

(3)

考虑到输入和输出之间不一定有确定关系,为使模型与实际更吻合,需要对输出数据进行模糊化,使对应 y_i 的模糊输出为三角模糊数 $\hat{y}_i(y_i, e_i)$, e_i 依据实际问题而定。于是容易得出式(1)中 $\hat{y}_i$ 的隶属函数为:

$$\mu_{\hat{y}}(\hat{y}_i) = \begin{cases} 1 - \frac{|y_i - \sum_{j=0}^n \alpha_j x_{ji}|}{\sum_{j=0}^n c_j |x_{ji}|} & (\sum_{j=0}^n \alpha_j x_{ji} - \sum_{j=0}^n c_j |x_{ji}| \leq y_i \leq \sum_{j=0}^n \alpha_j x_{ji} + \sum_{j=0}^n c_j |x_{ji}|) \\ 0 & \text{其它} \end{cases} \tag{4}$$

根据三角模糊数的性质和模糊集理论中拟合度的定义,可以推导出拟合值 $\hat{y}_i$ 和实测值 y_i 之间的拟合度 h_i 为(限于篇幅,具体推导过程略,详细推导可参见文献[2]):

$$h_i = \begin{cases} 1 - \frac{|y_i - \sum_{j=0}^n \alpha_j x_{ji}|}{\sum_{j=0}^n c_j |x_{ji}| + e_i} & (\sum_{j=0}^n \alpha_j x_{ji} - \sum_{j=0}^n c_j |x_{ji}| - e_i \leq y_i \leq \sum_{j=0}^n \alpha_j x_{ji} + \sum_{j=0}^n c_j |x_{ji}| + e_i) \\ 0 & \text{其它} \end{cases} \tag{5}$$

同时,定义模糊线性回归模型的模糊度 S 为:

$$S = \sum_{j=0}^n c_j \tag{6}$$

在模糊数学中,拟合度与模糊度是两个不相容的指标,从拟合度的角度看,模型的模糊度越大,拟合度越好;从预测精度的角度看,模糊度越小越精确。因此在给出求参准则时,要求两者兼顾。求参准则是:给定

模型一个拟合度标准 H ,使模糊度 S 最小。基于这一原理,可知模糊线性回归模型中的参数可以通过如下的规划模型(I)求解。

目标函数: $\min F = S = \sum_{j=0}^n c_j$

约束条件:
$$\begin{cases} \sum_{j=0}^n x_{ij}\alpha_j + (1-H)\sum_{j=0}^n |x_{ij}|c_j \geqslant y_i - (1-H)e_i \\ \sum_{j=0}^n x_{ij}\alpha_j - (1-H)\sum_{j=0}^n |x_{ij}|c_j \leqslant y_i + (1-H)e_i \\ i = 1,2,\cdots,m \end{cases}$$

2.2 时间序列分析^[3,4]

在随机理论中,对于一个零均值平稳时间序列,一般可以通过下面的 ARMA(p,q)(自回归滑动平均)模型来描述:

$$Y(t) - \varphi_1 Y(t-1) - \cdots - \varphi_p Y(t-p) = z(t) - \theta_1 z(t-1) - \cdots - \theta_q z(t-q)$$

(7)

这里 $\varphi_1, \varphi_2, \cdots, \varphi_p; \theta_1, \theta_2, \cdots, \theta_q$ 为模型参数, p, q 为模型的阶数, $z(t)$ 为正态白噪声,即 $E[z(t)] = 0, E[Z(t)]^2 = \sigma_z^2$ 。

ARMA(p,q)模型建模方法主要依据 Box 和 Jenkins 的相关函数法。首先计算 $Y(t)$ 的自相关及偏相关函数 ρ_k 和 $\psi_{kk}(k=1,2,\cdots,L)$,其中 L 为计算的自相关及偏相关函数的个数,一般取 $L=[N/10]$ 。先由 ρ_k 和 ψ_{kk} 的截尾性可确定模型类型(AR(p)、MA(q)或 ARMA(p,q))和模型的阶,再由矩估计方法得到模型参数的初估计,最后由 Marquardt 阻尼最小二乘估计得到模型参数的精估计。

由于在许多文献中都可以查阅到它的计算原理,本文不再赘述。具体计算原理及程序可见文献[4~6]。

3 晋祠泉流量的模拟与预报

3.1 晋祠泉流量的模拟

通过分析晋祠泉域内的多年泉流量、降水量、汾河渗漏量、人工开采量及矿坑排水量资料(限于篇幅,上述诸量的具体数据略,具体数值可见参考文献[5~6],并结合现代统计理论可知,晋祠泉流量与当年及前一年降水量、汾河渗漏量存在着明显的正相关关系,而与人工开采量、矿坑排水量存在着明显的负相关关系。应用规划模型(II)可以得出如下的模糊线性回归模型:

$$Q_{\text{泉}}(t) = A_0 + A_1 P(t-1) + A_2 P(t) + A_3 Q_{\text{渗}}(t) - A_4 Q_{\text{开}}(t) - A_5 Q_{\text{矿}}(t)$$

(8)

模型中各参数的值见表 1。

表 1 模糊线性回归模型中的参数值

Tab. 1 Parameter value in fuzzy regression model

j	A_0	A_1	A_2	A_3	A_4	A_5
α_j	1.3821	0.00054	0.00068	0.1167	-0.4661	-1.8145
c_j	0	0	0	0	0.0231	0.1374

将应用(8)式计算的拟合值与实测值比较,求出拟合误差;然后将拟合误差应用 ARMA(p,q)模拟,通过分析截尾性质,采用的模型为 ARMA(4,3),其具体形式为:

$$e(t) = -0.0997e(t-1) + 0.0724e(t-2) + 0.0123e(t-3) - 0.0102e(t-4) - 0.4225z(t) + 0.0781z(t-2) - 0.0793z(t-3)$$

(9)

将(8)式与(9)式合并,即可得到如下晋祠泉水流量的拟合方程:

$$Q_{\text{泉}}(t) = A_0 + A_1 P(t-1) + A_2 P(t) + A_3 Q_{\text{渗}}(t) - A_4 Q_{\text{开}}(t) - A_5 Q_{\text{矿}}(t) + e(t)$$

(10)

将各变量的实际观测值代入到模型(10)中,即可得到各年份的拟合值,将拟合值与实测值进行对比(图 3),以此验证模型的可靠程度,并决定是否可以应用该模型来预报未来的泉水流量。

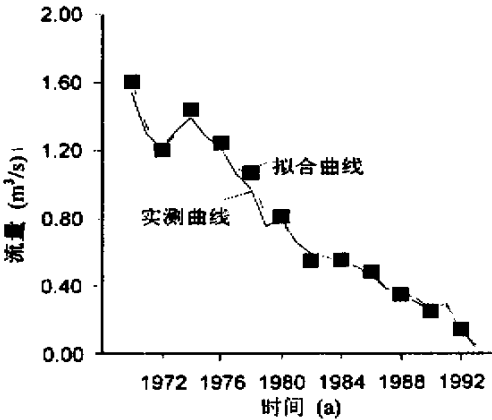


图 3 计算与实测曲线对比图

Fig. 3 Comparison curves of calculation and observation

由图 3 可以看出,拟合值与实测值的拟合效果非常好,因此可以应用该模型来预报晋祠泉未来的泉流量。

3.2 晋祠泉流量的预报

3.2.1 降水量预报及其保证率

本次研究根据晋祠泉域内降水量 1954~1993 年共 40 年的实测资料,采用皮尔逊(Pearson)Ⅲ型概率密度曲线来描述降水量的保证率,即:

$$Y = \frac{\beta^\alpha}{\Gamma(\alpha)}(X - \alpha_0)^{\alpha-1}e^{-\beta(X-\alpha_0)}; \alpha_0 = X(1 - \frac{2C_v}{C_s});$$
$$\alpha = 4/C_s^2; \beta = 2/XC_vC_s; X = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n X_n$$

$$C_v = \frac{1}{x} \sqrt{\frac{\sum (x_i - \bar{x})^2}{(n-1)}}; C_s = \frac{\sum (x_i - \bar{x})^3}{(n-3)\bar{x}^3 C_v^3}$$

式中 Y 为随机变量 X 的概率密度函数; $\Gamma(\alpha)$ 为 α 的 Γ 函数; α 为偏态参数; β 为离散度参数; C_s 为偏态系数; C_v 为偏差系数。

根据皮尔逊(Pearson)Ⅲ型概率密度曲线计算的历史降水量保证率见表 2。

表 2 降水量、汾河渗漏量保证率(1954—1993)

Tab. 2 Security rate of precipitation and Fenhe river's leakage

保证率 (%)	5	10	20	50	75	90	95
降水量 (mm)	628.18	576.20	519.88	427.57	355.25	303.26	272.93
渗漏量 (m ³ /s)	2.15	1.85	1.53	1.02	0.71	0.49	0.38

本次研究降水量预报采用频谱分析法,即:

$$V_{(t)} = A_0 + \sum_{i=1}^K [A_i \cos(2\pi i t/n) + B_i \sin(2\pi i t/n)]$$

(11)

式(11)中:

$$A_0 = \frac{1}{n} \sum_{t=1}^n X(t)$$
$$A_i = \frac{2}{n} \sum_{t=1}^K X(t) \cos(2\pi i (t-1)/n)$$
$$B_i = \frac{2}{n} \sum_{t=1}^K X(t) \sin(2\pi i (t-1)/n)$$

上述诸式中, $X(t)$ 为降水量实测值; n 为降水量系列资料长度; K 为谐波数,当 n 为偶数时, $K=n/2$,当 n 为奇数时, $K=(n-1)/2$; t 为预报时段; $V(t)$ 为第 t 时段降水量预报值。降水量预报值见表 3。

3.2.2 汾河渗漏量预报及其保证率

汾河渗漏量与降水量、汾河流量等随机变量存在着密切的关系,它是一个典型的水文随机量,因此也可以应用皮尔逊Ⅲ型概率密度曲线来描述和应用频

谱分析来预报未来渗漏量,具体的计算结果见表 3。

表 3 降水量、汾河渗漏量预报值

Tab. 3 Forecasting value of precipitation and Fenhe river's leakage

年份	2000	2002	2004	2006	2008	2010
降水量(mm)	228.26	557.04	399.16	407.86	371.73	414.37
渗漏量(m ³ /s)	0.94	0.32	0.15	0.49	0.53	0.36

3.2.3 人工开采量的确定^[6]

研究区内的岩溶水开采量根据目前的开采现状及万家寨引黄的实现情况来确定。本次研究采用了两种方案。方案一为研究区 2001 年之前按现状实际开采量(1.0835m³/s)进行开采,2002—2010 年按晋祠泉域地下水可开采量(0.6199m³/s)进行开采;方案二为研究区 2001 年之前按现状实际开采量(1.0835m³/s)进行开采,2002—2004、2005—2010 年分别按规划削减后的开采量 0.5285m³/s 和 0.5311m³/s 进行开采。

3.2.4 矿坑排水量的确定

根据煤矿的未来生产规模及研究区的实际情况,矿坑排水量取 2000 年的排水量作为预报模型中的矿坑排水量。

3.4.5 晋祠泉流量的预报

将各种预报因子的预测值代入到预测模型(10)中,即可得到晋祠泉在未来的泉流量(此种预报方式简称为方式一)。晋祠泉流量的预报值见图 4~5。

在此应该说明的是,由于晋祠泉自从 1994 年断流以后,晋祠泉长期处于一种“透支”状态,在万家寨引黄工程完工以后,地下水资源可以得到“涵养”,在未来的某一时刻,预报模型的预报值为一正值,但这只说明了在正常条件下晋祠泉应该出流,而晋祠泉目前实际上处于一种断流的变异条件下,因此实际的出流时间应为在以前“透支”的地下水资源得到充分弥补后。因此,本次研究取的出流原则为:

$$\sum_{t=1994}^T Q(t) > 0$$

(12)

此时的 T 为晋祠泉出流的时间。

由于降水的不确定性和随机性,未来降水量的预报难免会有偏差(尽管拟合得较好),这无疑给预测工作带来了很大的难度。因此本次研究还按降水量、汾河渗漏量保证率的方法来预测晋祠泉的未来出水量,即在模型中降水量与汾河渗漏量都取 75% 保证率,即降水量 355.25mm,汾河渗漏量 0.71m³/s。(此种预报方式简称为方式二)。在这种预报方式下,晋祠泉

流量的预报值见图 6~7。

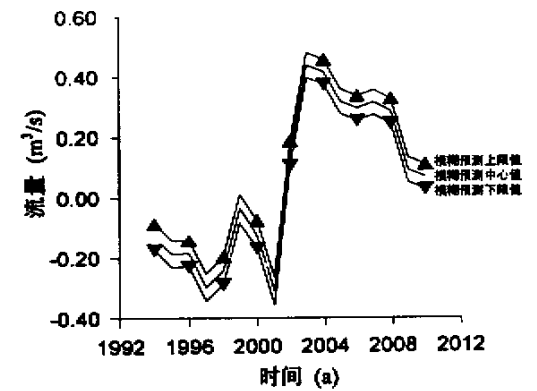


图 4 一方式下第一方案预测图

Fig. 4 Forecasting curve of the first project in the first mode

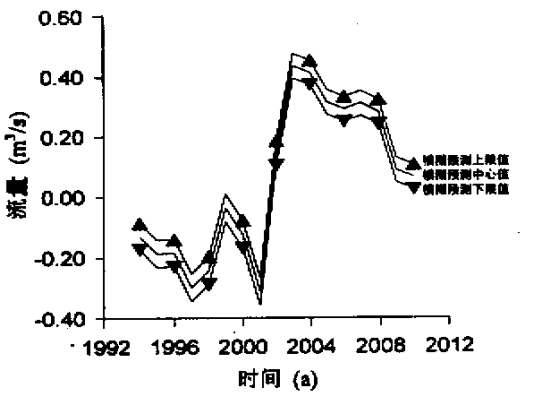


图 5 一方式下第二方案预测图

Fig. 5 Forecasting curve of the second project in the first mode

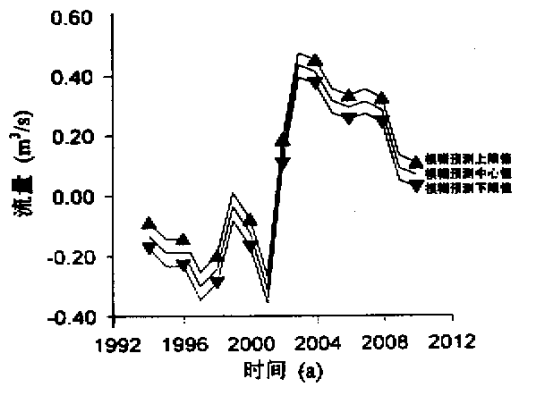


图 6 二方式下第一方案预测图

Fig. 6 Forecasting curve of the first project in the second mode
万方数据

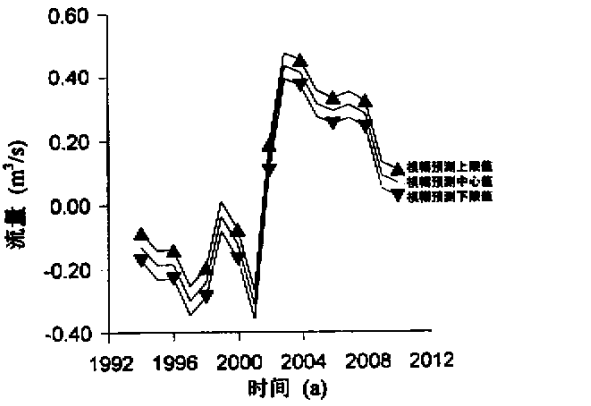


图 7 二方式下第二方案预测图

Fig. 7 Forecasting curve of the second project in the second mode

根据出流原则(12)式,可知晋祠泉的大致出流时间(表 4)。在表 4 中,出流时间早是根据模糊预测上限曲线推测的;出流时间中是根据模糊预测曲线中心值推测的;出流时间晚是根据模糊预测曲线下限值推测的。

在此必须明确的是,在未来的十几年里,若遇到连续偏丰水年,晋祠泉有可能提前出流;反之,若遇到连续偏枯水年,则出流时间有可能推后。此外,因引黄水先入汾河,从而使汾河渗漏量增加,这在一定程度上会导致晋祠泉复流时间提前。

表 4 晋祠泉的大致出流时间表

Tab. 4 The approximate recovery time of Jinci spring

方式	方案一			方案二		
	早	中	晚	早	中	晚
方式一	2005	2007	2010 后	2005	2006	2009
方式二	2006	2009	2010 后	2006	2008	2010 后

4 晋祠泉的管理措施

(1) 晋祠泉流量逐年减少的原因,其原因固然较多,但人工开采岩溶水是主导因素。因此,在晋祠泉域内应严禁增加新开采岩溶水的取水工程和设施。如晋祠泉与平泉属于同一个泉域,平泉地区过量开采岩溶水,将袭夺晋祠泉的补给带宽度,导致晋祠泉流量的减少。为了恢复晋祠泉的可再生性,在开化至平泉一带,应对现有的取水设施采取关闭和控制其开采量的措施。

(2) 晋祠泉流量的衰减,不仅与人类开采岩溶水有关,而且与煤矿排水关系密切。今后应从提高煤矿

排水的利用效率上下大气力,将煤矿排水与当地的工农业用水紧密地结合起来,减少工农业对地下水的开采。

(3)除了上述节流措施外,还应作好开源工作,即人为地增加补给量。根据山西省第一水文地质大队的研究成果知,在晋祠泉域的补给区玄泉寺附近,具有得天独厚的岩溶地下水人工调蓄的条件,在此处修建地表水库,可以最大限度地拦蓄汾河洪水,因该地段又为灰岩裸露地段,水库蓄水渗漏补给地下水是切实可行的。

(4)在引黄河水到达太原以后,研究区将由现状地下水占绝对优势的单一供水水源结构向引黄水源、本地地下水水源、本地地表水水源并存、并重的新水源结构转变。新的水源结构可以提高城市的供水量和供水保证率,为城市的可持续发展创造良好的水源保障。但其前提是必须做到统一规划、合理分配、加强管理,否则就会导致供水市场的混乱和无序竞争,其后果很可能是重现其它远离城市引水工程曾经出现过的地下水继续超采、外引水售不出去、工程投资收不回来而造成不能维持运转的局面。

(5)本次研究侧重于晋祠泉流量的模拟与预测,对晋祠泉的水质问题没有涉及。应该指出的是,位于晋祠泉域补给区的古交区是我国非常有名的煤炭基地之一,根据发展规划,它将成为一个具有几十万人口的中型矿区,其“三废”处理的好与坏,将直接影响晋祠泉的污染程度。根据水质监测资料,古交地区的地下水和地表水已被污染,晋祠泉域内也出现了部分水质超标(Mn、Cr⁶⁺、Pb、挥发酚、氰等)的水点,有关

部门应该给予足够的重视。

5 结 论

本文在充分分析晋祠泉流量动态的基础上,应用模糊线性回归技术和时间序列分析方法模拟并预报了晋祠泉在不同方案、不同方式下的流量变化过程,并大致估算出了晋祠泉在不同条件下的出流时间。在一般情况下晋祠泉的大致出流时间在 2007~2009 年之间。为了实现晋祠泉的可持续开发利用,根据晋祠泉的影响因素,节流是今后恢复晋祠泉可再生性的最重要管理措施,在补给区可以通过人工调蓄的方式增加晋祠泉的地下水资源量,同时应该注意晋祠泉的水质保护问题。

参考文献:

[1] 韩行瑞,鲁荣安,李庆松. 岩溶水系统——山西岩溶大泉研究[M]. 北京:地质出版社,1993:211—228.

[2] 于九如,杨泽华. 模糊线性回归及其应用实例[J]. 系统工程理论与实践,1995,15(4):32—37.

[3] 周德才,孙亦鸣. 计算机随机模拟原理、方法及计算程序[M]. 广州:华南理工大学出版社,1998:201—220.

[4] 施阳,李俊. Matlab 语言工具箱—Toolbox 实用指南[M]. 西安:西北工业大学出版社,1998:83—98.

[5] 山西省地矿局第一水文地质工程地质队. 太原西山岩溶水资源评价[R]. 1984,10:79—183.

[6] 山西省水资源研究所,太原市水资源管理委员会,水利部南京水文水资源研究所联营体. 山西省万家寨引黄工程太原供水区地下水合理利用与调控规划[R]. 1998,5:173—224.

RESEARCH ON THE JINCI SPRING’S RECOVERY AFTER THE USE OF WATER FROM THE YELLOW RIVER AS MUNICIPAL WATER SUPPLY

SUN Cai-zhi^{1,2}, WANG Jin-sheng², LIN Xue-yu²

(1. Environment Science Research Institute of Beijing Normal University, Beijing 100875, China;
2. Geography Department of Liaoning Normal University, Dalian 116029, China)

Abstract: This paper established a fuzzy equation of the discharge of the Jinci spring, precipitation, Fenhe river’s leakage, drainage of coal mine and artificial yield of water on the basis of applying fuzzy linear regression and time series analysis and analyzing long-time regime information, and then forecasted the recovery of the Jinci spring after the completion of the Wanjiazhai project, the approximate recovery time of the Jinci spring was predicted under different conditions. In general, the recovery time is 2007~2009. Water saving is the most important countermeasures for the Jinci spring’s recovery, and its water quality should be protected at the same time.

Key words: Jinci spring; Renewable capacity; Fuzzy forecast; Time series analysis