

DOI :10.3876/j.issn.1000-1980.2012.01.022

基于模糊随机模拟的后寨河岩溶泉流量衰减风险

柯婷婷,束龙仓,鲁程鹏,张蓉蓉

(河海大学水文水资源与水利工程科学国家重点实验室,江苏 南京 210098)

摘要:通过对贵州省后寨河岩溶泉流域泉流量与降水时间序列的动态分析,首先模拟了不同降水条件下泉流量的衰减过程线,建立了枯季泉流量与前期降水量之间的数学表达式,然后采用蒙特卡罗方法,利用随机模拟与三角模糊数耦合模型,进行泉流量衰减风险分析研究,得到了泉流量的概率分布。结果表明,泉流量小于 $0.1 \text{ m}^3/\text{s}$ 的概率为 43.5%。建议采取防范措施,以降低当地泉流量衰减的风险。

关键词:泉流量衰减;风险分析;蒙特卡罗方法;随机模拟;三角模糊数

中图分类号:P641 文献标志码:A 文章编号:1000-1980(2012)01-0113-05

Depletion risk assessment of discharge of Houzhaihe karst spring based on coupling method of stochastic simulation with triangular fuzzy numbers

KE Ting-ting, SHU Long-cang, LU Cheng-peng, ZHANG Rong-rong

(State Key Laboratory of Hydrology-Water Resources and Hydraulic Engineering,
Hohai University, Nanjing 210098, China)

Abstract: Based on dynamic analysis of the time series of spring discharge and precipitation in the Houzhaihe karst spring basin in Guizhou Province, depletion curves of the spring discharge under different precipitation conditions were simulated and mathematical functions for the spring discharge in dry seasons and antecedent precipitation were established. The Monte-Carlo method and the coupling method of stochastic simulation with triangular fuzzy numbers were used to conduct the depletion risk assessment of the spring discharge, based on which the probability distribution of the spring discharge was obtained. The results show that the probability for the spring discharge of less than $0.01 \text{ m}^3/\text{s}$ was 43.5%. It is suggested that preventive measures should be taken to reduce the depletion risk of spring discharge in the study area.

Key words: depletion of spring discharge; risk assessment; Monte-Carlo method; stochastic simulation; triangular fuzzy numbers

贵州省岩溶泉水分布极其广泛,水资源量非常丰富,是贵州省城市生活与工农业用水的重要水源。然而,近年来,贵州省各岩溶泉的流量在不同程度上均有所下降,一些常流性泉逐渐变成了季节性泉,给当地居民的生活带来极大的影响。马腾等^[1-5]对泉流量衰减的原因进行了分析,结果表明:大气降水变化和人类活动是影响泉流量衰减的最主要原因;泉流量的补给一般发生在 5—10 月,研究降水和泉流量之间的关系,对于理解泉的水文地质行为和优化水资源管理有很重要的意义。蒙特卡罗方法又称统计试验方法,是人工产生和利用随机数方法的总称。目前,该方法已经在地下水允许开采量的确定、水环境评价以及降水量的预测等方面得到应用^[6-10]。

本文以贵州省后寨河岩溶泉为研究区域,模拟了不同补给状态下泉流量衰减过程线,建立了枯季时期泉流量衰减预测模型,并在此基础上采用蒙特卡罗方法以及随机模拟与三角模糊数耦合模型,对泉流量衰减进

行风险分析研究.

1 泉流量衰减过程模拟

1.1 研究区概况

后寨地下河流域位于黔中高原的普定南部,海拔高程一般在 1 220~1 400 m 之间,最高为 1 585 m,最低为 1 218 m,相对高差一般在 250~300 m 之间,最大相对高差达 363 m.多年平均气温 15.1℃,多年平均降雨量 1 343.6 mm.每年 5—10 月为雨季,各站降水量 1 060.9~1 173.9 mm,占年均降水量的 83.6%~90.2%;11 月—翌年的 4 月为枯季,各站降水量 177.1~215.5 mm,占年均降水量的 9.8%~16.4%.每年除洪水季节中的暴雨引起地下水位上升而使地表短暂积水外,绝大部分降水到达地面后均迅速转入地下补给岩溶水.岩溶区岩溶含水层的管道、溶洞充分发育,使得雨季水流到达地面后,通过管道等大裂隙通道迅速流出系统,枯季径流急剧衰减.泉流量的衰减直接影响着当地居民的生活和工农业发展,也成为制约这一地区经济发展的重要因素^[1].

1.2 泉流量衰减曲线模拟

流量的衰减过程可以用指数函数来描述^[12-13],即

$$Q_t = Q_0 e^{-\alpha t} \tag{1}$$

式中: Q_t —— t 时刻的流量; Q_0 ——衰减开始时刻流量; α ——衰减系数.式(1)为本文流量衰减曲线的拟合方程.

为了更好地理解泉流量衰减方程中各参数的意义,根据 1981—1991 年降水和泉流量时间序列,模拟了不同降水条件下泉流量衰减过程(图 1).其中:补给状况发生在每年的 5—10 月,衰减时期为每年的 11 月—翌年的 4 月.1981 年为枯水年,降水量只有 435.6 mm;1991 年为丰水年,降水量达到 1 688.5 mm.从图 1 可以看出,不同降水补给状态下泉流量衰减曲线可以大致划分为 3 个阶段:第 1 阶段的衰减系数大,对应于岩溶水的快速流,主要是管道水作用;第 3 阶段的衰减系数小,对应于慢速流,主要是裂隙水作用的结果;第 2 阶段介于两者之间,由裂隙水和管道水共同作用.

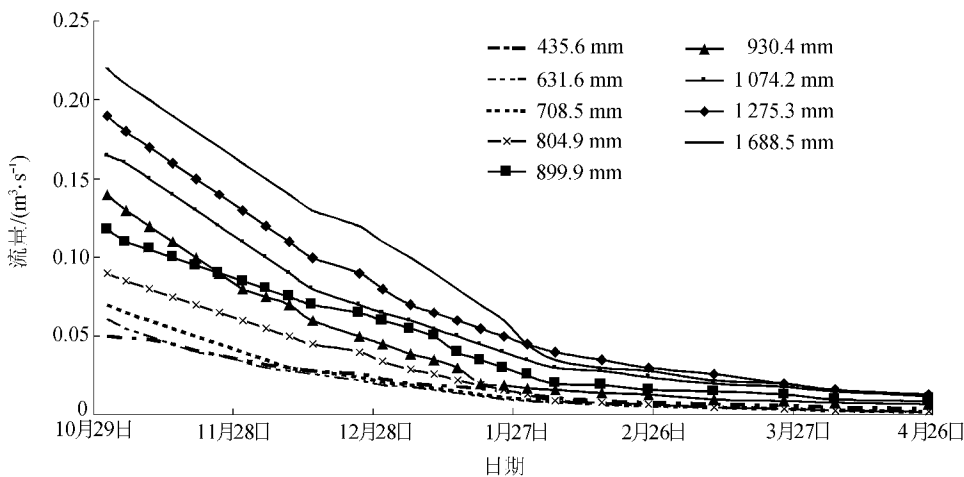


图 1 不同降水量条件下泉流量衰减曲线

Fig. 1 Depletion curves of spring discharge under different precipitation conditions

从图 1 还可以看出,泉流量的衰减曲线主要取决于初始流量,补给季节降水量大时曲线表现为陡峭,补给季节降水量小时曲线表现为平坦.图 2 和图 3 分别给出了衰减系数、初始流量和前期补给值的相关关系.从图 2 和图 3 可以看出,初始流量和衰减系数都与前期降水补给值有关,且为线性相关,表达式为

$$Q_0 = 0.000\,2r - 0.023\,5 \tag{2}$$

$$\alpha = 7.52 \times 10^{-5}r + 0.119\,9 \tag{3}$$

从而根据式(1)得到该地区的流量衰减方程为

$$Q_t = (0.000\,2r - 0.023\,5)e^{-(7.52 \times 10^{-5}r + 0.119\,9)t} \tag{4}$$

式中: Q_t —— t 时刻的流量, m^3/s ; r ——前期累积降水量, mm.式(4)可用来预测枯季时期泉流量以及确定临

界时期的泉流量风险值.

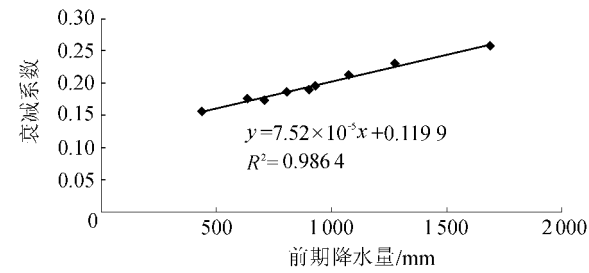


图 2 前期降水量与衰减系数的关系

Fig. 2 Relationship between antecedent precipitation and depletion coefficient

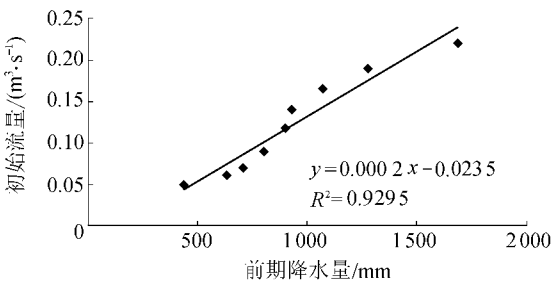


图 3 前期降水量与初始流量的关系

Fig. 3 Relationship between antecedent precipitation and initial discharge

2 泉流量衰减风险分析

2.1 研究步骤

建立三角模糊数进行风险评价的过程^[7]如下:

a. 模糊变量三角模糊数的表达. 设 a_1, a_2 和 a_3 分别为模糊变量 A 的最小可能值、最可能值和最大可能值, 这里 $a_1 < a_2 < a_3$. A 可用以式 (5) 为隶属函数的三角模糊数 $A = \{a_1, a_2, a_3\}$ 表示.

$$\mu_A(x) = \begin{cases} \frac{x - a_1}{a_2 - a_1} & (a_1 \leq x \leq a_2) \\ \frac{a_3 - x}{a_3 - a_2} & (a_2 < x \leq a_3) \\ 0 & (x < a_1 \text{ 或 } x > a_3) \end{cases} \tag{5}$$

式中: x ——模糊变量在论域中的可能值变量; $\mu_A(x)$ ——隶属函数.

b. 三角模糊数的随机模拟. 用式 (5) 的隶属函数曲线与 x 轴围成的面积 $\frac{a_3 - a_1}{2}$ 除该隶属函数, 得到的值可作为三角模糊数 A 的可能性概率密度函数:

$$f_A(x) = \begin{cases} \frac{x - a_1}{(a_2 - a_1)(a_3 - a_1)} & (a_1 \leq x \leq a_2) \\ \frac{a_3 - x}{(a_3 - a_2)(a_3 - a_1)} & (a_2 < x \leq a_3) \\ 0 & (x < a_1 \text{ 或 } x > a_3) \end{cases} \tag{6}$$

将式 (6) 转换成概率分布函数, 再利用逆变换法得到可能值变量 x 的随机模拟公式为

$$x = \begin{cases} a_1 + [u(a_2 - a_1)(a_3 - a_1)]^{0.5} & \left(u \leq \frac{a_2 - a_1}{a_3 - a_1}\right) \\ a_3 - [(1 - u)(a_3 - a_2)(a_3 - a_1)]^{0.5} & \left(u > \frac{a_2 - a_1}{a_3 - a_1}\right) \end{cases} \tag{7}$$

式中: u 为区间 $[0, 1]$ 上的均匀分布随机数. 随机模拟 x 的过程, 就是通过计算机程序先产生 $[0, 1]$ 区间上的一系列均匀分布随机数 $u_1, u_2, \dots, u_m$, 将这些随机数代入式 (7) 即得到可能值变量的大量模拟系列 $x_1, x_2, \dots, x_m$, 于是可以把三角模糊数及其函数之间的运算简化为普通的实数之间的运算, 其中 m 为随机模拟的试验次数.

c. 泉流量衰减风险的估计. 设泉流量系统的质量状态变量为 Q , 给定的泉流量控制值为 Q_c , 则泉流量衰减风险可定义为

$$R = P(Q \leq Q_c) \tag{8}$$

质量状态变量 Q 可用所研究问题的系统模型来描述和计算. 采用三角模糊数的随机模拟方法可以得到水环境系统的质量状态变量的模拟序列 $\{Q_j | j = 1, 2, \dots, m\}$, m 为随机模拟的试验次数. 研究表明, 试验次数越多, Q 的频率分布越接近于其真实的概率分布. 实际应用时 m 一般取频率分布收敛时所对应的试验次数. 若

统计序列 $\{Q_j\}$ 中小于水环境质量的控制限值 Q_c 的数目为 m_z ,则水环境风险的估计值为

$$R_z = m_z/m$$

(9)

根据风险估计值和模拟序列 $\{Q_j\}$ 的统计特征,可提出处理水环境风险的相应对策.

2.2 风险分析结果

分别利用1996年和2000年的降水量数据对建立的泉流量衰减模型进行检验.根据前期降水补给量,利用式(4)计算出枯季泉流量,并与实测值进行比较分析,结果见图4.从图4可以看出,除个别时间段存在误差外,实测值和计算值拟合效果较好,说明建立的泉流量预测模型有一定的可实施性.

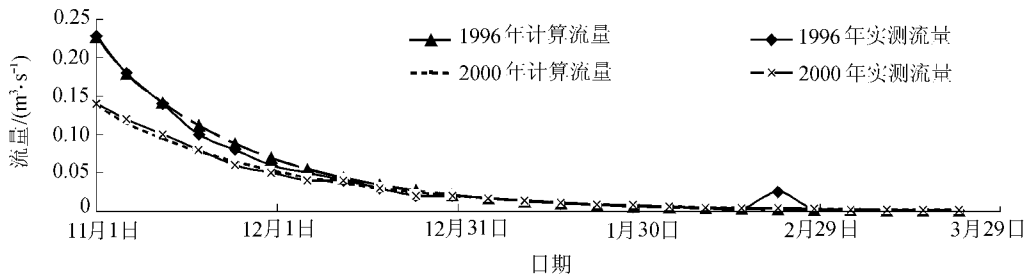


图4 1996年和2000年泉流量衰减过程线实测值与计算值的比较

Fig. 4 Comparison of observed and calculated spring discharges in 1996 and 2000

采用基于三角模糊数的蒙特卡罗方法,利用式(4)求得的泉流量值以及相应的概率分布见表1.从表1可知,泉流量小于 $0.10\text{ m}^3/\text{s}$ 的概率为43.5%,说明发生危机事件的风险比较大,必须加强防范措施.研究表明,

泉流量衰减主要是人类活动影响所造成的.因此,为了将泉流量控制在一定的范围之内,即使泉流量能够满足当地居民的生活用水以及农业需水要求,可以从增加降水补给量入手.由于当地岩溶裸露区较多,降水到达地面之后没有植被的滞留作用而直接沿地表流走,导致真正进入地下空间的水量很少,使得泉流量逐渐减少,甚至出现断流现象.因此,可以通过植树造林,增加森林覆盖率等措施来减少泉断流的风险.

3 结 语

本文研究了不同降水条件下泉流量的衰减变化过程.为了更进一步了解各参数对泉流量衰减的影响,本文建立了枯季泉流量和降水量之间的数学关系式.分析结果表明,初始流量和衰减系数都随着降水量的增加而增加,且表现为很好的线性相关关系.根据此分析结果,本文建立了泉流量与降水量之间的反指数关系式,并以此关系式预测了枯季任何给定时间段内的泉流量.

本文利用三角模糊数的蒙特卡罗方法,对泉流量衰减进行了风险分析,得到了泉流量小于 $0.1\text{ m}^3/\text{s}$ 的概率为43.5%的分析结果.为了降低泉流量断流的风险,满足当地居民的生活用水需求,本文提出了应通过提高森林覆盖率,减少耕地面积等人为措施来增加降水补给量,从而使得泉流源源不断的建议.本研究结果为指导当地水资源分配提供了很好的理论依据.

参考文献:

[1] 马腾,王焰新,郝振纯.神头泉流量衰减原因分析及趋势预测[J].中国岩溶,2001,20(4):261-267.(MA Teng, WANG Yan-xin, HAO Zhen-chun. The cause analysis for the declining discharge of Shentou spring and the forecast of its evolution trend[J]. Carsologica Sinica, 2001, 20(4): 261-267.(in Chinese))

[2] 晋华,杨锁林,郑秀清,等.晋祠岩溶泉流量衰竭分析[J].太原理工大学学报,2005,36(4):488-490.(JIN Hua, YANG Suo-lin, ZHEN Xiu-qing, et al. Analysis of the reduction in flow from Jinci springs[J]. Journal of Taiyuan University of Technology, 2005, 36(4): 488-490.(in Chinese))

[3] 邓安利.山西岩溶泉流量衰减成因分析:以辛安泉为例[J].山西水利科技,2006(4):47-49.(DENG An-li. Analysis of cause of

- the discharge attenuation of the Karst springs in Shanxi Province :a case study of the Xin 'an spring[J]. Shangxi Hydrotechnics ,2006 (4) :47-49.(in Chinese))
- [4] 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) :45-51.(DENG An-li. Attenuation causes and forecast of flowrate of Xin 'an spring[J]. Water Resources Protection ,2007 ,23(3) :45-51.(in Chinese))
- [5] GATTINONI P ,FRANCANI V. Depletion risk assessment of the Nossana spring (Bergamo , Italy) based on the stochastic modeling of recharge[J]. Hydrogeology Journal ,2010 ,18 :325-337.
- [6] 韦庆,卢文喜,田竹君.运用蒙特卡罗方法预报年降水量研究[J].干旱区资源与环境 ,2004 ,18(4) :144-146.(WEI Qing , LU Wen-xi ,TIAN Zhun-jun. Application of Monter-Carlo to annual precipitation forecast[J]. Journal of Arid Land Resources and Environment ,2004 ,18(4) :144-146.(in Chinese))
- [7] 金菊良,吴开亚,李如忠.水环境风险评价的随机模拟与三角模糊数耦合模型[J].水利学报 ,2008 ,39(11) :1257-1266.(JIN Ju-liang , WU Kai-ya , LI Ru-zhong. Coupling method of stochastic simulation with triangular fuzzy numbers for water environment risk assessmen[J]. Journal of Hydraulic Engineering ,2008 ,39(11) :1257-1266.(in Chinese))
- [8] 王家华,刘炳.用于风险分析的一种连续概率分布离散化的方法[J].西安石油大学学报 :自然科学版 ,2005 ,20(2) :83-85.(WANG Jia-hua , LIU Bin. A method of the discretization of continuous probability distribution for risk analysis[J]. Journal of Xi 'an Shiyou University :Natural Science Edition ,2005 ,20(2) :83-85.(in Chinese))
- [9] 季叶飞,束龙仓,王振龙.地下水可开采系数计算结果的可靠度与敏感性[J].河海大学学报 :自然科学版 ,2010 ,38(6) :688-692.(JI Ye-fei , SHU Long-cang , WANG Zhen-long. Reliability and sensitivity analysis of calculated results of allowable withdrawal coefficient of groundwater[J]. Journal of Hohai University :Natural Sciences ,2010 ,38(6) :688-692.(in Chinese))
- [10] 束龙仓,朱元生,孙庆义,等.地下水允许开采量确定的风险分析[J].水利学报 ,2000 ,31(3) :77-81.(SHU Long-cang , ZHU Yuan-sheng , SUN Qing-yi. Risk analysis of groundwater allowable withdrawal evaluation[J]. Journal of Hydraulic Engineering ,2000 ,31(3) :77-81.(in Chinese))
- [11] 陈洪元,陈邦宇,陈波.贵州省普定后寨岩溶小流域水文特性研究[J].贵州地质 ,2005 ,22(4) :284-288.(CHEN Hong-yuan , CHEN Bang-yu , CHEN Bo. Lithologic characteristics of Houzhai Karst Small Valley , Puding , Guizhou Province[J]. Guizhou Geology , 2005 ,22(4) :284-288.(in Chinese))
- [12] 薛禹群.地下水动力学[M].北京 :地质出版社 ,1997 :37.
- [13] NEGI G C S , JOSHI V. Rainfall and spring discharge patterns in two small drainage catchments in the Western Himalayan Mountains , India[J]. Environmentalist ,2004 ,24 :19-28.