

DOI :10.3876/j.issn.1000-1980.2010.06.017

地下水可开采系数计算结果的可靠度与敏感性

季叶飞¹, 束龙仓¹, 王振龙²

(1. 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;

2. 安徽省水利水资源重点实验室, 安徽 蚌埠 233000)

摘要: 为了分析地下水可开采系数计算结果的可靠程度及其对模型参数的敏感性, 从参数存在的不确定性角度出发, 采用蒙特卡罗方法对地下水可开采系数进行可靠度分析, 结合实例定量分析了包气带对降水的有效利用系数 α_p 、降水入渗补给系数 α_g 、作物对潜水蒸发的有效利用系数 C 、给水度 μ 和灌溉回归系数 β 等 5 个参数的不确定性对地下水可开采系数计算结果的影响, 分析了不同可靠度对应可开采系数(可开采量)的变化规律, 并阐述了不同离势系数对可开采系数计算结果的影响。结果表明: 参数服从正态分布时 50% 可靠度对应的可开采量比参数取均值时的可开采量小; 地下水可开采系数计算结果对模型参数的敏感性排序从大到小为 α_g 、 α_p 、 μ 、 β 、 C 。

关键词: 地下水; 可开采系数; 可靠度; 敏感性; 不确定性

中图分类号: P641.2 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-1980(2010)06-0688-05

地下水资源评价的主要任务之一是计算可开采量(或允许开采量)。常用地下水可开采量的计算方法有水均衡法、数值法以及数理统计法等。本文采用以水均衡法为基础的地下水多年调节计算模型计算地下水可开采系数, 进而计算可开采量($Q_{\text{可采}} = \rho Q_{\text{补}}$, 其中 ρ 为可开采系数)。

地下水资源评价过程中存在着许多不确定性因素。根据不确定因素产生的原因, 分为以下两大类^[1-2]: (a) 源于水资源系统本身的客观不确定性; (b) 源于对水资源系统认识不全面的主观不确定性。2006 年, Tung 等^[3-4]阐述了风险分析的基本方法, 并给出了实例研究。束龙仓等^[5-6]首次用灵敏度分析的方法对地下水可开采量计算过程中的不确定因素进行了定量分析, 用蒙特卡罗法确定地下水可开采量, 并对山西晋祠泉域地下水开采进行了风险分析。之后, 也有许多学者开展此方面的研究, 如李如忠等^[7]运用未确知数学理论, 提出了盲信息下地下水资源补给量计算模型和可开采量的未确知风险分析方法, 束龙仓等^[8]考虑水文地质参数的不确定性, 对地下水补给量的可靠度进行计算等。本文针对地下水可开采系数计算模型涉及参数的不确定性, 采用蒙特卡罗方法对地下水可开采系数计算结果进行了可靠度及敏感性分析。

1 研究方法

1.1 地下水多年调节计算模型

地下水多年调节计算模型包括 2 个部分: 土壤水调节计算模型与地下水调节计算模型。土壤水调节计算模型针对地下水水面以上的包气带, 地下水调节计算模型针对地下水水面以下的饱和带。

对于农灌区包气带, 根据水量平衡原理, 可得:

$$\Delta W = \alpha_p P + (1 - \beta)m_a + CE_g - ET \quad (1)$$

式中: ΔW ——土壤蓄水量的变化量, mm; α_p ——包气带对降水的有效利用系数; P ——降水量, mm; β ——灌溉回归系数; m_a ——灌溉水量, mm; C ——作物对潜水蒸发量的有效利用系数; E_g ——潜水蒸发量, mm; ET ——土壤蒸散发量, mm。由式(1)可知 ΔW 反映了包气带的调节能力, 本文通过 ΔW 决定灌溉水量。

对于农灌区饱和带, 根据水量平衡原理, 得

$$-1000\mu\Delta H=\alpha_gP-E_g-D-Q_{\text{开}}$$

(2)

$$\rho=\frac{\alpha_gP-E_g-D}{\alpha_gP}$$

(3)

式中： μ ——含水层给水度； ΔH ——地下水埋深变化量， m ； α_g ——降水入渗补给系数； D ——弃水量， mm ； $Q_{\text{开}}$ ——地下水开采量（包括灌溉水量及农村生活、牲畜用水，以 mm 计）； ρ ——可开采系数。当地下水埋深在 0.5 m 以浅时，农作物处于受渍状态，为保证农作物正常生长，应将 0.5 m 以浅的地下水作为弃水处理。当地下水埋深大于 8 m 时，超出了泵的扬程，应对对应的 m_a 进行修正。由式（2）可知 ΔH 反映了地下水的调节能力。

上述地下水多年调节计算模型取旬为计算时段，通过时段内的灌溉水量 m_a 进行耦合。

1.2 蒙特卡罗法

蒙特卡罗法（Monte-Carol method，MC 法）又称为统计试验法，广泛应用于不同领域的工程风险分析，是目前风险分析的常用方法之一。依据概率的定义，某事件发生的概率可用大量试验中该事件发生的概率估算^[9]。因此，可先对功能函数中涉及的随机变量进行随机抽样，获得变量的随机数，然后把这些抽样值分别代入功能函数，确定系统失效与否，并统计失效次数，计算出失效次数 m 与总抽样次数 n 的比值，此值即为所求的风险率（可靠度 = $1 - \text{风险率}$ ）^[10]。本文对地下水可开采系数计算结果的可靠度分析步骤如图 1 所示。

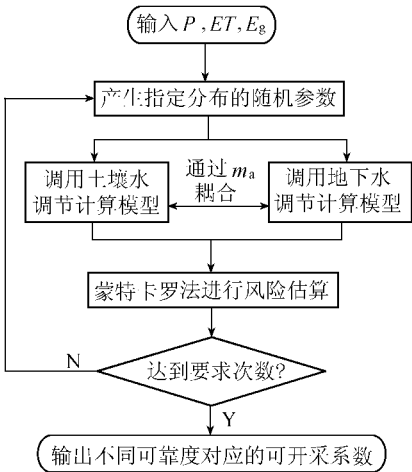


图 1 可开采系数计算结果可靠度分析步骤
Fig. 1 Flow chart of reliability analysis of
culated results of allowable withdrawal coefficient

2 实例研究及结果分析

2.1 参数变化规律

实例研究区选择安徽淮北地区。如前所述，计算模型涉及以下 5 个参数：包气带对降水的有效利用系数 α_p 、降水入渗补给系数 α_g 、作物对潜水蒸发量的有效利用系数 C 、给水度 μ 和灌溉回归系数 β 。研究区参数取值采用安徽淮北地区五道沟水文水资源实验站试验成果。五道沟水文水资源实验站是全国首批成立的水文水资源实验站之一，占地 1.4 万 m^2 ，为大型水文水资源综合试验站，建站至今已有 50 多年的历史。自 1965 年设立简测以来，有关“四水”转化、灌溉排水、地下水动态、潜水蒸发、作物需水量等实验资料从未间断过，并取得了丰富的研究成果，为水文水资源学科的研究起到了较好的支撑作用。根据五道沟水文水资源实验站试验研究资料，作物对潜水蒸发量的有效利用系数 C 随着埋深的变化而变化，当地下水埋深处于 $0.5\sim 1.0\text{ m}$ 时，其值为 $0.65\sim 0.85$ ；地下水埋深位于 $1.0\sim 2.0\text{ m}$ 时，其值为 $0.85\sim 0.90$ ；当地下水埋深大于 2 m 后，作物对潜水蒸发的有效利用系数达到 0.95 。根据大量的抽水试验，给水度的取值为 $0.032\sim 0.047$ 。利用灌溉回归试验资料分析得灌溉回归系数 β 取值为 $0.10\sim 0.15$ ，包气带对降水的有效利用系数 α_p 、地表径流系数 α_s 、降水入渗补给系数 α_g 的取值范围见表 1。

五道沟水文水资源实验站试验资料表明，降水入渗补给系数 α_g 随着埋深与降水量的大小变化而变化^[11]，因此，模型中的 α_g 也随着埋深与降水量的大小而变。

本文采用 2 种方案对可开采系数计算结果的可靠度进行分析，方案一所有参数均服从均匀分布。许多实际问题中的变量，都服从或近似服从正态分布，此外，有研究表明，若变量受到大量微小、独立随机因素影响，那么变量一般服从正态分布，故方案二参数均服从正态分布。

2.2 可开采系数可靠度计算

应用蒙特卡罗法分别对 2 种不同方案地下水可开采系数计算结果进行可靠度分析，其结果如表 2 所

表 1 降水分配系数取值

Table 1 Values of distribution coefficient
of precipitation

旬水量/ mm	α_p	α_s	α_g
< 15	0.80	0 ~ 0.05	0.20 ~ 0.15
15 ~ < 30	0.72	0.05 ~ 0.10	0.23 ~ 0.18
30 ~ < 50	0.65 ~ 0.50	0.10 ~ 0.25	0.40 ~ 0.10
50 ~ < 100	0.54 ~ 0.40	0.15 ~ 0.33	0.45 ~ 0.13
≥ 100	0.50 ~ 0.33	0.20 ~ 0.39	0.47 ~ 0.11

示.由传统方法(取均值)通过模型计算得到可开采系数为 0.644 36,在正态分布情况下,离势系数 C_v 取 0.01,0.50,1.00,1.50 时对应的可靠度分别为 32.11%,3.02% 2.55% 和 2.12%;而均匀分布情况下,其可靠度仅为 7.71%,若按照此值计算可开采量指导实际生产,可能会导致不良后果.因此,一般指导生产实际的可开采系数需在模型调节计算出的可开采系数上乘以一个小于 1 的折扣系数^[11].通过蒙特

卡罗法进行可靠度分析,以参数服从均匀分布算得的结果为例,得到可靠度为 50% 情况下的可开采系数为 0.597 75(表 2),比传统方法计算值小 0.046 61.根据安徽淮北地区地下水资源演变情势与开采潜力研究报告,淮北地区多年平均平原区地下水总补给量为 65.72 亿 m^3 ,那么可开采量为 39.284 亿 m^3 ,比传统计算方法得到的可开采量(42.347 亿 m^3)小 3.063 亿 m^3 .若以此值指导实际开采,肯定比传统方法更为安全.参数服从正态分布时,不管离势系数 C_v 如何取值,分析结果与参数服从均匀分布的情况一致,在此不再赘述.

离势系数常用来描述变量的离散程度,当 $C_v \leq 0.01$ 时参数呈现弱变异性,当 $0.01 < C_v \leq 1$ 时参数呈现中等变异性,当 $C_v > 1$ 时参数呈现强变异性^[12].由前述可知,正态分布情况下,参数的变异性越强,传统方法算得的可开采系数的可靠度越小.图 2 为参数在正态分布情况下,不同离势系数对应可开采系数的可靠度.由图 2 知,可开采系数的可靠度随着离势系数的不同而不同,大致呈现如下规律:离势系数越大,对应可开采系数的可靠度越小,风险越大.反映在图上的规律为,离势系数越大,对应的曲线斜率越小,可开采系数对应的可靠度越小.图 2 中 $C_v = 0.01$ 的曲线很陡,说明参数呈现弱变异性时,参数不确定性对可开采系数的计算结果影响不大;图 2 中 $C_v = 1.00$ 与 $C_v = 1.50$ 的曲线基本重合,说明当参数呈现强变异性时,增大 C_v 对可靠度分析计算结果影响不大,而两条曲线都很缓,说明参数不确定性对可开采系数的计算结果影响很大.

综上所述,不管参数服从何种概型的分布,由计算参数不确定性引起的地下水可开采系数(可开采量)的风险不容忽视.实际应用时,从保护地下水安全以及可持续开发利用的角度出发,应将模型算得的可开采系数乘以一个小于 1 的折扣系数或可将较高可靠度对应的地下水可开采系数作为实际的地下水可开采系数.此外,参数的变异性对计算结果的影响也不能忽视,尤其当参数呈现强变异性时.

2.3 可开采系数计算结果对参数的敏感性分析

为进一步说明参数对模型计算结果的影响,利用蒙特卡罗法对地下水多年调节计算模型涉及的 5 个参数进行敏感性分析.步骤如下:首先令参数 α_p 服从某种分布,其余 4 个参数为均值不变,采用图 1 的步骤得出由参数 α_p 影响下不同可靠度对应的可开采系数.同理,得到由其余 4 个参数影响下不同可靠度对应的可开采系数.通过分析相同可靠度变幅下对应的可开采系数变幅说明各个参数对可开采系数计算结果的敏感程度,结果如图 3 和图 4 所示.从图 3 可明显看出,均匀分布情况下由参数 α_g 的不确定性引起的可开采系数的变幅最大,其后依次为 α_p , μ , β , C .所以,参数服从均匀分布情况下,可开采系数计算结果对参数的敏感性排序从大到小为 α_g , α_p , μ , β , C .参数服从正态

表 2 可开采系数可靠度分析成果

Table 2 Results of reliability analysis of allowable withdrawal coefficient					
可靠度/%	均匀分布	正态分布			
		$C_v = 0.01$	$C_v = 0.50$	$C_v = 1.00$	$C_v = 1.50$
50	0.597 75	0.631 07	0.581 31	0.576 27	0.576 04
60	0.590 58	0.627 40	0.575 39	0.570 82	0.571 00
70	0.584 11	0.623 23	0.569 81	0.565 86	0.565 79
80	0.576 53	0.618 30	0.563 93	0.560 72	0.560 52
90	0.568 47	0.611 13	0.556 99	0.553 62	0.553 60
95	0.562 71	0.605 45	0.551 05	0.548 47	0.548 37

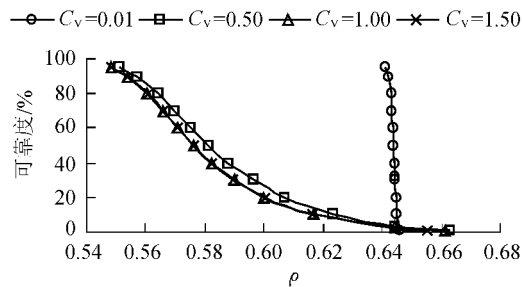


图 2 不同离势系数对应可开采系数的可靠度

Fig. 2 Reliabilities of allowable withdrawal coefficient corresponding to different dispersion coefficients C_v

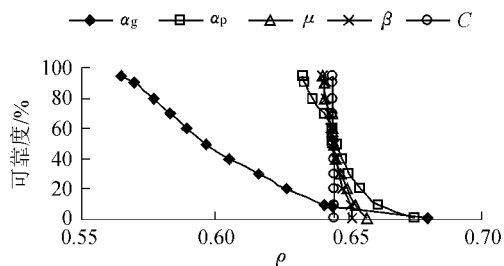


图 3 均匀分布单参数变化时可开采系数对应的可靠度

Fig. 3 Reliabilities of allowable withdrawal coefficient under uniform distribution and variation of single parameter

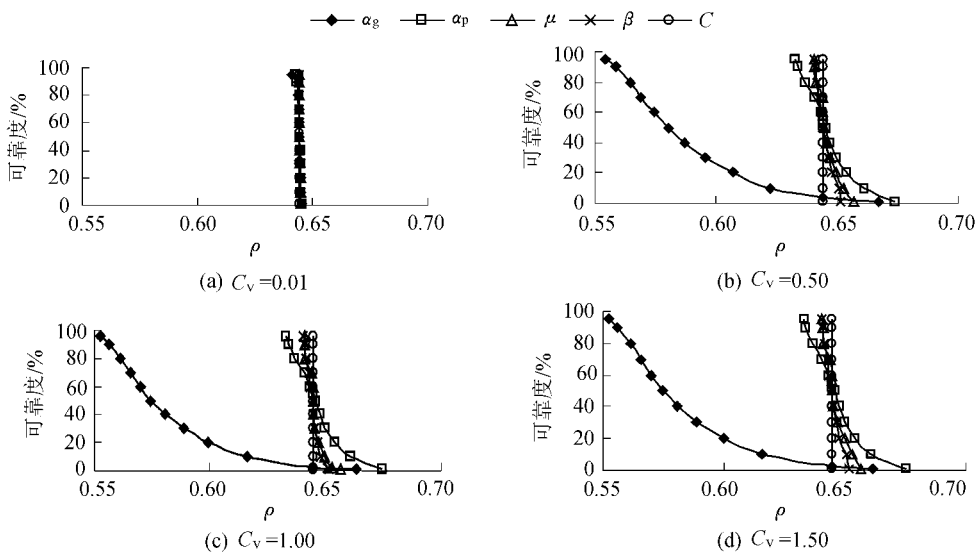


图 4 正态分布单参数变化时可开采系数对应的可靠度

Fig. 4 Reliabilities of allowable withdrawal coefficient under normal distribution and variation of single parameter

分布情况时,同样根据参数的变异性进行分析.从图 4 知,当参数呈现弱变异性时,由前述分析知由参数不确定性引起的可开采系数计算结果的影响不大,可靠度变化相同幅度,不管由哪个参数不确定性引起的可开采系数变幅均不大,从图 4 中可以看出几乎不变,研究可开采系数计算结果对参数的敏感程度意义不大;但当参数呈现中等变异性或强变异性时,由图 4 可以看出,可靠度变化相同幅度条件下,由参数 α_g 的不确定性引起的可开采系数的变幅最大,其后依次为 α_p , μ , β , C . 所以,参数服从正态分布情况下,可开采系数计算结果对参数的敏感性排序从大到小为 α_g , α_p , μ , β , C .

由上述分析知,参数服从均匀分布或者正态分布(参数呈现弱变异性的除外),可开采系数的计算结果对模型涉及参数的敏感性排序从大到小为 α_g , α_p , μ , β , C .

3 结 语

在分析水文地质参数不确定性的基础上,对由地下水多年调节计算模型算得的地下水可开采系数进行可靠度分析,并以安徽淮北地区为例,得到不同可靠度情况下的可开采系数,并比较了不同可靠度对应的可开采系数(可开采量).同时得到了不同离势系数对地下水可开采系数计算结果的影响,离势系数越大,地下水可开采系数的计算结果可靠度越低.最后,分析了可开采系数计算结果对模型参数的敏感性排序.因此,在地下水资源评价过程中要特别注意参数的不确定性、参数变异性以及敏感参数的确定.

参考文献:

[1] SUTER G W. Treatment of risk in environmental impact assessment[J]. Environ Management, 1987, 11(3) : 295-303.

[2] 束龙仓, 朱元胜. 地下水资源评价中的不确定性因素分析[J]. 水文地质工程地质, 2000(6) : 6-8. (SHU Long-cang, ZHU Yuan-sheng. Analysis of uncertainties in groundwater resource evaluation[J]. Hydrogeology and Engineering Geology, 2000(6) : 6-8. (in Chinese))

[3] TUNG Y K, YEN B C, MELCHING C S. Hydrosystems engineering reliability assessment and risk analysis[M]. New York : McGraw-Hill, 2006 : 145-352.

[4] TUNG Y K, YEN B C. Hydrosystems engineering uncertainty analysis[M]. New York : McGraw-Hill, 2006 : 1-100.

[5] 束龙仓, 朱元胜, 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(3) : 77-81. (SHU Long-cang, ZHU Yuan-sheng, SUN Qing-yi et al. Risk analysis of groundwater allowable withdrawal evaluation[J]. Journal of Hydraulic Engineering Xuebao, 2000(3) : 77-81. (in Chinese))

[6] 束龙仓, 朱元胜. 晋祠泉域地下水开采决策的风险分析[J]. 河海大学学报: 自然科学版, 2000, 28(6) : 90-93. (SHU Long-cang, ZHU Yuan-sheng. Analysis of risk decision making for groundwater exploitation within Jinci Spring Area, Shanxi Province[J]. Journal of Hohai University : Natural Sciences, 2000, 28(6) : 90-93. (in Chinese))

- [7] 李如忠,汪家权,钱家忠.地下水允许开采量的未确知风险分析[J].水利学报,2004(4):54-60.(LI Ru-zhong, WANG Jia-quan, QIAN Jia-zhong. Unascertained risk analysis of groundwater allowable withdrawal evaluation[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2004(4):54-60.(in Chinese))
- [8] 束龙仓,陶玉飞,刘佩贵.考虑水文地质参数不确定性的地下水补给量可靠度计算[J].水利学报,2008,39(3):346-350.(SHU Long-cang, TAO Yu-fei, LIU Pei-gui. Reliability calculation methods for groundwater recharge in consideration of uncertainty of hydrogeological parameters[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2008, 39(3):346-350.(in Chinese))
- [9] 麻荣永.土石坝风险分析方法及应用[M].北京:科学出版社,2004.
- [10] 刘佩贵.地下水开采的风险率估算模型及应用[D].南京:河海大学,2008.
- [11] 金光炎.地下水文学初步与地下水资源评价[M].南京:东南大学出版社,2009:15-81.
- [12] 雷志栋,杨诗秀,谢森传.土壤水动力学[M].北京:清华大学出版社,1998.

Reliability and sensitivity analysis of calculated results of allowable withdrawal coefficient of groundwater

JI Ye-fei¹, SHU Long-cang¹, WANG Zhen-long²

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

2. Key Laboratory of Water Conservancy and Water Resources of Anhui Province, Bengbu 233000, China)

Abstract : In order to analyze the reliability of the calculated results of the allowable withdrawal coefficient of groundwater and their sensitivity to model parameters, the reliability analysis of the allowable withdrawal coefficient of groundwater was performed based on the uncertainty of parameters by use of the Monte Carlo method. Through a case study, the influences of the uncertainty of 5 parameters on the calculated results of the allowable withdrawal coefficient of groundwater were quantitatively analyzed, including effective water efficiency of precipitation in aeration zone α_p , feed coefficient of precipitation infiltration α_g , effective water efficiency of evaporation from phreatic water by crops C , specific yield μ and regression coefficient of irrigation β . The variation rules of the allowable withdrawal coefficients (allowable withdrawal) under various reliabilities were discussed. The influences of different dispersion coefficients on the calculated results of the allowable withdrawal coefficient were investigated. The results indicate that when the parameters obey the normal distribution, the allowable withdrawal under the reliability of 50% is smaller than that under the average value. The calculated results of the allowable withdrawal coefficient of groundwater are sensitive to the parameters in the order of α_g , α_p , μ , β and C .

Key words : groundwater ; allowable withdrawal coefficient ; reliability ; sensitivity ; uncertainty