

区域地下水持续开发利用的风险分析研究

Alkaly Camara, 朱元牲, 束龙仓, 施鑫源

(河海大学水资源环境学院, 江苏 南京 210098)

摘要 根据区域水源情况由于各地区的地形、地质、水文地质等条件存在差异, 以及区域地下水资源开发利用规划管理特点不同, 决定了它存在一定程度的不确定性和不准确因素的情况, 探讨了区域地下水开发利用的可持续性理念, 以及造成不可持续的原因及其后果, 并提出了进行地下水不可持续的风险定量分析的可行方案。

关键词 地下水资源; 开发; 风险; 可持续性

中图分类号 :TV211.1+2

文献标识码 :A

文章编号 :1000-198X(2003)04-0389-06

自古以来, 地下水为人们生活和工农业生产用水提供了优良的供水水源。随着人口增长和社会经济的发展, 水的需求量日益增加, 而地下水的可开采量是有限的, 因此一些传统依靠地下水生产和生活的地区, 先后出现了需水量供不应求的矛盾。由于各地区的地下水自然条件各异, 可利用的地下水资源量不同, 而且各地经济发展、需水增长速度、地下水开发技术和程度等也都存在差异, 因此, 地下水利用的可持续性存在很大的差别, 必须认真对待并作具体分析。在地下水资源开发利用规划和管理工作中, 不仅有必要经常对当地可开采量做出评价和对未来的需水量做出预测, 还应完善监测和加强地下水开采的管理。估算出地下水源出现水量或水质不能满足需求的可能性及后果, 进行地下水持续开发风险定量分析, 以便决策人员及早采取保护和补救措施, 必要时应对地下水开发利用规划做出修订。

在地下水开发的规划设计和开采利用阶段, 如果所采取的措施不当或出现失误, 都有可能破坏地下水开发的可持续性。规划设计阶段主要的工作是对本地区的未来需水和供水情况做出评价, 而在评价的过程中, 由于资料和信息的缺乏或分析研究工作不够充分, 是无法做出精确无误的预测和估算的。在开采利用的管理方面, 为满足近期的用水需求而盲目开采, 使开采的实际情况偏离规划设计的要求, 这种偏差会影响今后相当长时期的供水水源的数量和质量, 有可能出现缺水或断水及水源污染的事故。因此在地下水资源规划和管理中, 需要充分考虑开发利用中存在的不确定性, 比如未来几年的降雨、蒸发情况, 污染物的排放情况等。地下水开发利用的失误, 其后果是严重的且有时是难以挽回的, 因此必须保证在各种可能出现的不利条件下, 不导致发生水量和水质事故。一旦发生事故时, 尤其要注意把事故所引发严重后果的风险降低到最低限度。因此引进风险的概念是非常必要的, 其对于改进和完善地下水资源规划和管理, 已经和必将产生深远的影响。

1 地下水资源开发利用的风险和风险分析

虽然人们在日常生活中已经习惯用“风险”说明受到某种不利事件威胁的严重程度, 然而在理论研究领域中, 迄今对“风险”却还缺少一个统一的定义, 各个学科研究的内容不同, 对风险的定义有一定的差异。但对风险的定义不外乎是回答 3 个问题^[1-2], 即在某项工程系统运行中会出现什么不利事件或事故? 发生不利事件或事故的可能性有多大? 如果事故发生了后果会怎么样?

在应用研究领域中, 系统的风险可以通过给出各类可能出现的不利事件 S_i 、每类事件的出现概率 L_i 及其危害损失量 X_i 这 3 项要素构成的三维体的全集 $\{S_i, L_i, X_i\}_c$ 来定量地定义风险 $R^{[3]}$:

$$R = \{S_i, L_i, X_i\}_c \quad (1)$$

地下水开发与利用系统运行中出现不利事件或事故,是由于多种原因造成地下水资源状况偏离了规划,开采的水量 and 水质不能满足用户的需求,造成经济上、生态环境中和社会上的严重后果. 这些不利事件或事故主要有工农业产值下降、区域环境恶化、区域地下水水位持续下降、地下水污染危及居民的饮用水安全、地面沉降(塌陷)造成建筑物损毁、泉水断流、海水入侵等.

风险分析是指依据所有可用的信息,定量估算出风险度 R 的大小.

$$R = LX^m$$

(2)

m 一般情况下可取值为 1.0,当事故造成的损害后果特别严重和深远时,取值应大于 1.0.

风险分析工作包括 3 个相互联系的部分,即风险辨识、风险估算和风险评价^[4-5]. 风险辨识即在特定的决策方案实现的条件下,系统可能发生什么类型的事故. 对地下水供水项目来说,就是分析在实现各个规划设计方案的条件下,供水工程在实际运行过程中所有可能出现的各类事故,即能够造成供水水量和水质不能满足用户需求的事件. 风险估算则着眼于定量地描述事故发生的概率,即计算出事故发生的可能性有多大. 风险评价的主要任务是分析事故对社会、经济和环境产生什么样的负效应,即对事故造成的后果进行评价. 通过风险分析对存在的各种风险进行风险识别、风险估计、风险评价,并在此基础上分析采取各种风险管理技术的必要性和可行性,对风险实施有效的控制,妥善处理可能造成的危害,期望以最少的成本获得最大的安全保障.

2 地下水开发利用事故原因及其后果的不确定性

进行风险分析首先需要分析各类事故原因及其后果的不确定性因素,辨识有关的风险因子,并研究各因子的分布特性.

在地下水资源开发利用过程中,虽然发生事故的时间和地点具有很大的偶然性,但是过量开采将与供水水量、水质事故的发生存在必然的联系. 造成地下水超采的原因可以有多种,而且是不确定的,需要逐一分析各个因子的分布特性. 一旦供水事故发生时,一般都会导致非常恶劣的负面后果,而各地各次事故后果的严重程度是不同的,对经济、生态环境和社会等各个方面的影响是不确定的,受众多因子影响,也需要逐一分析其分布特性. 长期以来,地下水资源规划工作中,忽略了事故原因和后果的各种不确定性因素,分析计算习惯采用确定性模型进行,未能正确反映地下水开发利用事故的风险.

地下水超采事故原因和后果的不确定性分析程序如图 1 所示.

2.1 事故原因的不确定性

过量开采将引发地下水供水水量和水质下降事故. 过量开采是指在一个相当长的时期里,实际开采量超过了允许开采量,造成地下水埋深超过允许值,甚至疏干以致无法继续向用户提供水源^[6]. 造成超采的原因可以有多种,而且是不确定的,可以通过建立“事故树”的方式进行深入分析(主要有以下 3 种).

2.1.1 水文和气象因素波动的不确定性

地下水资源的可开采量与产水区的水文气象因素等自然条件密切相关. 自然条件中的地貌、地形、水文、气候和植物对地下水的需求直接影响各地区地下水的储存量、开发类型和开发强度. 而其中地貌、地形以及水文地质构造等要素在地下水开采项目工作时期内是基本稳定不变的,客观上并不存在不确定性,但由于资料信息不足,分析研究不够深入,在主观认识上还是会存在一定的不确定性.

对区域地下水资源影响最大的是水文气象因素的变动,主要是指水源区的降水量、蒸发量及输入输出的地表径流量等的波动. 水文气象因素的波动变化是十分复杂的,迄今为止,受到科学发展水平和观测资料的限制,预见期超过 1 a 的超长期实时定量预报主要是通过时间序列分析途径进行的,预报产品的精度较低,还

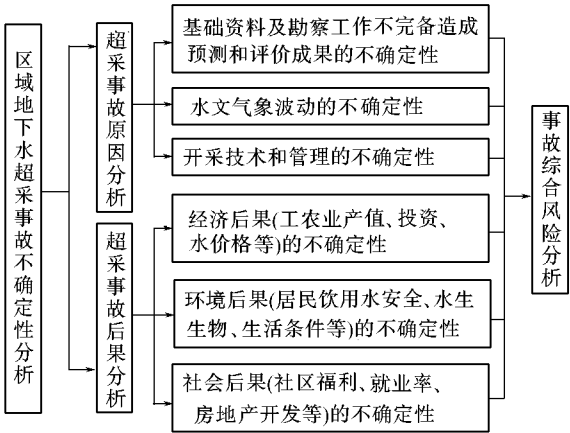


图 1 区域地下水超采事故原因及其后果的不确定性分析程序

Fig.1 Flow chart for indeterminateness analysis of causes and consequences of regional groundwater overexploitation-induced accidents

不能直接用于地下水资源规划、设计和管理工作中。

目前在地下水资源规划与管理中,一般是将水文气象因素的波动变化视为随机性的,可以直接根据观测资料系列通过频率分析推求其概率分布。

2.1.2 基础资料不完备造成预测和评价的不确定性

地下水资源规划和管理是建立在需水量预测和资源量评价的基础上,而预测和评价都是依据当地的基础资料做出,包括区域水文地质勘探资料、产水区水文气象资料、用户历年需水供水资料、当地地下水开采记录等,还需要进行大量的地下水研究和勘察工作。分析确定地下水的安全开采量(允许开采量)、补给量以及各用水户今后对水量和水质的要求,还需要进行合理布井,对各种取水建筑物的类型、结构及布局等各种方案进行经济比较,择优选用。

由于地下水勘察工作不周全,基础资料不完备,分析研究又不够深入细致,势必会造成预测和评价的误差,使成果具有一定程度的不确定性。为了解决这一问题,可以通过分析不同的勘察工作环节,以及各种基础资料的数量和质量对区域地下水资源预测和评价成果的影响,建立反映其不确定性的概率分布概型及其参数。

2.1.3 地下水开采工程技术和运行管理的不确定性

工程技术的不确定性与工程系统的安全保证性有关。工程技术或工艺技术水平的高低对地下水资源充分开发利用以及对抽水量、水质、成本等都有明显的影响。同时,供水事故也与工程和工艺技术水平有密切关系。含水层的水质在开采前一般是良好的,造成开采后水质恶化的原因多数是水井结构设计上的缺陷,或建井的施工质量问题,再或是其他无法预料的外力破坏,造成井管或隔水层损坏而使劣质水体进入。此外,如果管理不规范,还有可能引发其他类型人为的技术事故,影响供水安全。

运行管理的不确定性是泛指水源地运行管理过程中发生的一切不利事件或事故,使工程在当时或今后运行中实际所取得的效益达不到预期效益。为降低水资源管理工作中的事故风险,人的因素具有十分明显的作用,因为一切管理活动都要由人来操作运行。而对于水资源进行管理一般通过政府主管机构或半官方的机构进行,管理的目标是强调取得最丰厚的效益,但短期的经济效益和长远的供水安全往往是矛盾的,需要注意协调和解决。

在水资源管理中常遇到的不确定因素还有多种,如经济发展、人口增长等不确定性因素,还有不受一般规律控制的突发性事件影响,如社会动乱,包括发生骚乱和战争,以及由于自然界的反常变化如全球变暖引起海平面上升、大范围的连续特大干旱等。

2.2 事故后果的不确定性

各地各次地下水供水事故发生时,一般都造成了非常恶劣的负面后果,这些事故后果的严重程度与当时当地的经济、生态环境和社会等各个方面情况密切相关,有相当大的差异。因此,在评价事故后果时必须考虑经济发展、生态环境和社会发展等方面的不确定性。

2.2.1 经济后果的不确定性

合理开发利用地下水不仅可以用较少的取水工程得到较多的水量,还能将其长期有效地使用,从而产生巨大的社会、经济和环境效益。如果不合理开发地下水,会出现开发投资大、效益低的后果,甚至可能出现地区生态环境的恶化、使区域地下水位下降,导致土壤含水量减少、植被衰退、土壤沙化和农作物减产。由于地下水位大幅度下降,改变了地表水与地下水之间以及含水层之间的天然补排关系,使原有水利工程规划的效益降低(由于水位下降对开采地下水来说,要增加动力消耗、提高开采成本、加深机井以及更换抽水设备,造成经济损失)。例如山东省(淄博市)大武水源地是北方少有的特大型岩溶水源地,自 20 世纪 80 年代以来,随着地下水开采量的不断增大,由 1983 年开采 12 000 万 m^3 到 1993 年的年开采量高达 16 000 万 m^3 ,过量开采造成地下水位持续下降,区域地下水位下降高达 40 m,造成严重的经济损失^[7]。

经济后果不确定性就是指在工程运行过程中,由于外部经济因素的变化或经营者的错误判断,或管理失误导致经济损失的变化。

投资的不确定性是指在特定环境下和特定期限内客观存在的投资的变动性,而投资的变动有可能导致经济损失。投资的不确定性主要有 3 个方面:投资金额的控制、投资能否及时到位和资金源的保障。

水价是地下水开发利用项目经济评价的基础,合理的水价是提高水资源管理水平、促进合理消费、节约

用水的重要经济手段. 采用的水价偏低会使得开发投入的比较成本偏高 ;反过来 ,水价偏高会影响工农业产品价格和农民的利益 ,因此水价的选用对地下水开发利用经济评价的影响非常巨大. 而水价的确定涉及方方面面 ,目前中国尚无完善的定价机制 ,在经济损失评价工作中是一项重要的不确定因素.

2.2.2 生态环境后果的不确定性

地下水开发与环境之间的关系非常复杂 ,存在众多不确定性因子. 由于地下水资源的适度和过量开采对生态、环境和社会产生正或负的效应 ,同时生态、环境和社会的变化又会引起地下水资源量和质的改变 ,两者互为因果. 适度的开发利用地下水对生态、环境和社会有利 ,并可形成良性循环. 但是 ,过量开发利用地下水 ,则会带来一系列严重的生态、环境和社会问题(地下水位下降、地面沉降、海水入侵) ,导致生态、文化、美感等方面自然和文化资源特性的变化(危及野生动物的生存繁衍)^[8~10].

此外 ,由于大量的地下水开发利用与大量的工农业废水、生活污水排入土壤和河湖之中 ,造成水体严重污染 ,影响人民生活和健康 ,制约了社会经济的持续发展和环境质量.

2.2.3 社会后果的不确定性

所谓社会后果的不确定性 ,是指某项目的实施与当时当地各种社会因素的适应性和社会不同阶层或利益集团的满意程度之间的不确定性. 地下水开发利用对多数人及社会的发展是有利的 ,如干旱地区的年降雨量少和地表水无法满足工农业生产的需要 ,合理开发和利用地下水可以提高工农业产值 ,提高草场的承载能力 ,发展畜牧业生产 ,提供优良的饮用水 ,使社会稳定和发展. 但也不能排除在个别地区由于地下水开发项目的实施 ,会使当地的工农业生产、人畜饮用水安全受到不利影响. 这两种情况会导致人们对地下水开发项目的评价高低截然不同. 而不同社区对地下水开发项目的敏感程度、评价的尺度存在较大差异 ,与当地的发展水平、教育程度、居住条件等众多因素有关. 因此 ,在进行风险分析时 ,还必须充分考虑这部分不确定性因素.

3 地下水事故的风险分析

地下水事故的风险分析可分为事故概率分析和事故后果分析两部分. 前者通过各种事故原因的不确定性分析 ,由各个风险因子的概率分布推求地下水资源量和开采量的概率 ,进而推求超采事故的概率 ;后者先分别建立正常开采和超常开采条件下正负两方面后果的工作函数 ,再计算各种后果的概率分布.

3.1 区域地下水超采事故概率分析

区域地下水超采事故概率可表述为下式 :

$$P_{\text{事故}} = P\{Q_{\text{开采}} \geq Q_{\text{允许}}\} = P(Q_{\text{开采}} - Q_{\text{允许}} \geq 0) \tag{3}$$

各地不同时期的地下水实际开采量和允许开采量是变动的 ,而且受到众多不确定的风险因子($X_1, Y_1, Z_1, \dots, X_2, Y_2, Z_2, \dots$)的影响.

3.1.1 水文和气象因素波动的不确定性

$$Q_{\text{允许}} = Q(X_1, X_2, \dots) \tag{4}$$

$$P(Q_{\text{开采}} - Q_{\text{允许}} \geq 0) = P(X_1, X_2, \dots) \tag{5}$$

式中 : X_1, X_2 ——随机变量 ; $Q(X_i), P(X_i)$ ——分布函数.

3.1.2 基础资料不完备造成预测和评价的不确定性

$$Q_{\text{开采}} = Q(Y_1, Y_2, \dots)$$

$$Q_{\text{允许}} = Q(Y_1, Y_2, \dots)$$

$$P(Q_{\text{开采}} - Q_{\text{允许}} \geq 0) = P(Y_1, Y_2, \dots)$$

式中 : Y_1, Y_2 ——随机变量 ; $Q(Y_i), P(Y_i)$ ——分布函数.

3.1.3 地下水开采工程技术和运行管理的不确定性

$$Q_{\text{开采}} = Q(Z_1, Z_2, \dots)$$

$$Q_{\text{允许}} = Q(Z_1, Z_2, \dots)$$

$$P(Q_{\text{开采}} - Q_{\text{允许}} \geq 0) = P(Z_1, Z_2, \dots)$$

式中 : Z_1, Z_2 ——随机变量 ; $Q(Z_i), P(Z_i)$ ——分布的函数.

3.2 地下水供水事故的期望效益和风险损失后果分析

通过对实际情况的调查和统计分析 ,充分考虑经济、环境和社会后果 3 方面的不确定性 ,分别估算出在正常供水条件下的期望效益和在发生事故的非常条件下的风险损失 ,即 (a)经济方面的期望效益 B_J 和风险损失 L_J (b)生态环境方面的期望效益 B_H 和风险损失 L_H (c)社会方面的期望效益 B_S 和风险损失 L_S .

4 区域地下水开采方案的风险评价

区域地下水开采可以有多种不同方案 $F_i (i = 1, 2, 3, \dots)$,需要根据各方案的期望效益和风险损失进行综合评价 ,选定满意的方案 .评价程序如图 2 所示 .

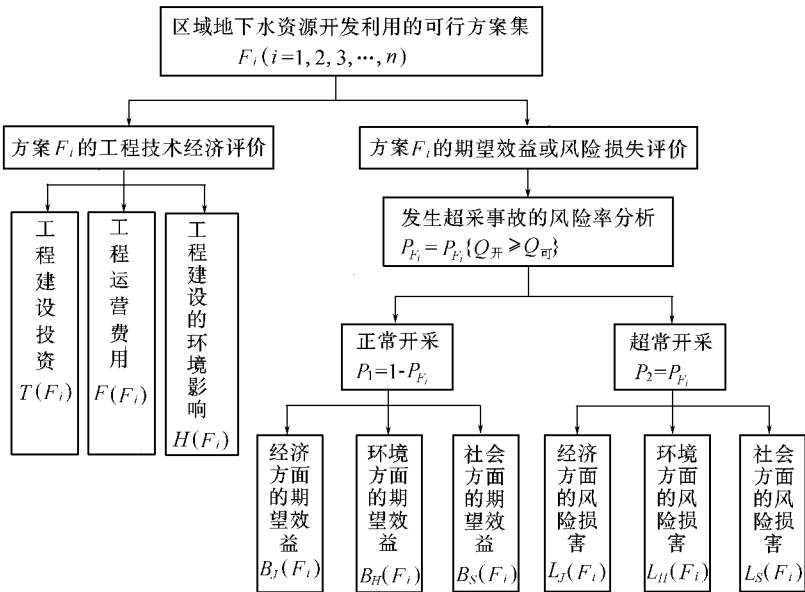


图 2 区域地下水开采方案的风险评价程序示意框图

Fig.2 Block diagram of risk analysis procedure for regional groundwater exploitation scheme

在地下水开发方案的综合评价工作中 ,根据各方案的决策变量 T ,可确定其期望效益和风险损失 ,要使决策方案的供水效益最大 ,同时还要使事故损害和系统建设及运行费用最小 .分析应分别从社会、经济和环境 3 个方面进行 ,根据区域实际情况 ,按各不利事件和事故发生的概率来计算期望收益或损失 .

地下水开采风险决策的主要目标 ,可用综合损失最低或效益最大表示如下 :

$$\begin{aligned} Z(T) &= \min(\max [S(X), K(X), H(X)]) \\ \text{s.t. } & \alpha(T) = (\geq, \leq) 0 \\ T_j &\geq 0 \quad (j = 1, 2, 3, \dots, n) \end{aligned}$$

式中 : T —— n 维向量的决策变量 ; G ——约束条件表示资源环境的承载能力 ; T_j ——决策向量的非负条件 .

5 结 语

本文针对区域地下水资源持续开发利用进行风险分析 ,综合评价地下水开发利用项目事故概率和事故后果 .提出了供水水量和水质事故原因的不确定性(包括水文和气象因素波动的不确定性、基础资料不完备造成预测和评价的不确定性和地下水开采工程技术及运行管理的不确定性等)和事故后果的不确定性(包括经济后果的不确定性、生态环境后果的不确定性及社会后果的不确定性等) .

地下水资源开发工程项目的规划管理 ,需要认真地考虑风险问题 .随着现代需水量的不断增加 ,水安全问题日益引起全世界人们的重视 .地下水的持续开发利用涉及许多不确定性因素 ,因此很难避免发生事故的风险 .为了合理地开发利用和保护地下水资源 ,必须进行地下水资源规划和科学管理 ,否则会造成重大损失和带来长远的危害 .

参考文献:

- [1] 朱元生, 韩国宏. 风险定量评估的通用理论[M]. 南京: 河海大学出版社, 1985. 1—97.
- [2] HAIMES Y Y. Risk analysis systems analysis and Covey's seven habits[J]. Risk Analysis, 2001, 21(2): 16—20.
- [3] 束龙仓. 城市地下水开采可持续性的风险分析[D]. 南京: 河海大学, 1998.
- [4] 郭仲伟. 风险分析与决策[M]. 北京: 机械工业出版社, 1987. 1—30.
- [5] 王丽萍, 傅湘. 洪灾风险及经济分析[M]. 北京: 水利电力出版社, 1999. 1—10.
- [6] 薛凤海, 武桂梅, 李砚阁, 等. 太原市地下水合理利用与调控[M]. 郑州: 黄河水利出版社, 1998. 67—81.
- [7] 刘兆昌, 李广贺, 朱琨. 供水水文地质[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 1998. 256—274.
- [8] 张元禧, 施鑫源. 地下水水文学[M]. 北京: 中国水利电力出版社, 1998. 121—151.
- [9] 袁开先. 水文地质学[M]. 北京: 水利电力出版社, 1987. 296—297.
- [10] 刘桂仪. 鲁北平原深层地下水开发与环境问题[J]. 水文地质工程地质, 2001(3): 43—77.

Risk analysis for sustainable development and utilization of regional groundwater

Alkaly Camara, ZHU Yuan-sheng, SHU Long-cang, SHI Xin-yuan

(College of Water Resources and Environment, Hohai Univ., Nanjing 210098, China)

Abstract Owing to different geomorphological, geological, and hydrological conditions of different regions and different characteristics of planning, management, development, and utilization of regional groundwater resources, the regional water source has certain indeterminateness. Based on the fact, a discussion is made on the concept of sustainable development of regional groundwater and some affecting factors and their consequences, and schemes for quantitative risk analysis of unsustainable development of groundwater are proposed.

Key words groundwater resources; development; risk; sustainability

中国科技核心期刊 中国学术期刊综合评价数据库来源期刊
全国水利系统优秀科技期刊 华东地区优秀期刊 江苏省优秀期刊

水利水电科技进展

新颖 实用 快捷



双月刊 A4 开本 彩色封面 64 页 2004 年全年定价 30.00 元 全国各地邮局均可订阅

国际标准连续出版物号:

ISSN 1006-7647

国内统一连续出版物号:

CN 32-1439/TV

国外发行代号: DK 32003

(中国出版对外贸易总公司)

国内邮发代号: 28-244

编辑部地址: 210098 南京市西康路 1 号

联系电话: (025) 3786335

传真: (025) 3787381

电子信箱: jz@hhu.edu.cn

网 址: kkb.hhu.edu.cn

银行账号: 南京工行宁海路分理处

4301011409001024513

(也可直接汇款至编辑部订阅,
另加 6.00 元邮寄费)