

基于单位脉冲 海水入侵响应矩阵的地下水管理模型及应用

王国利^{*1}, 梁国华¹, 聂相田²

(1.大连理工大学 土木工程系, 辽宁 大连 116024;

2.华北水利水电学院 水利系, 河南 郑州 470047)

摘要: 分析了目前我国地下水管理模型研究的现状, 针对我国沿海城市普遍存在的海水入侵问题, 提出了建立单位脉冲-海水入侵响应函数的思路和方法, 并以此为基础构筑大连市地下水系统管理模型, 针对现状开采井布局制定两个优化管理方案: 一个是在满足各约束条件下获取最大开采量; 另一个是保持天然径流的 10% 排泄入海时, 求取最优开采量. 该研究成果可为解决我国沿海城市地下水资源开发与海水入侵的矛盾提供参考.

关键词: 地下水; 海水入侵; 响应矩阵; 管理模型

中图分类号: P345 **文献标识码:** A

0 引言

对地下水资源的大量开发容易产生一系列地下水环境问题^[1]. 为更合理地开发地下水资源, 国外首先自 20 世纪 70 年代开始研究地下水资源系统的规划与管理问题^[2], 我国也自 80 年代中后期开始进行地下水系统管理的研究, 并取得了一批有价值的科研成果^[3-6].

迄今为止, 国内外的地下水系统管理模型通常为分布参数模型, 并在模拟模型的基础上, 对拟优化的开采单元(或水井)施加单位脉冲, 获得与之相应的主要约束地段的水位降深响应, 即通常所称的响应矩阵^[7], 并以此为基础, 耦合地下水流模拟模型与优化模型, 进而构造地下水资源优化管理模型.

海水入侵是沿海地区地下水资源开发中存在的一个普遍问题^[8], 控制并防止海水入侵往往是这类地区地下水资源管理的核心目标. 决策者不仅关心海水入侵发生的位置, 同时也关注模型对海水入侵的定量描述. 此时, 如果仍通过求取沿海边界水位对单位脉冲响应函数的方法来构造地

下水系统的优化管理模型, 决策者最关心的沿海边界地下水与海水的水量交换则得不到直接反映; 反之, 如能求取单位脉冲-沿海边界的海水入侵响应矩阵, 以此为基础构造的地下水管理模型不仅可以定量描述沿海边界的地下水与海水的水量交换, 而且可使以控制海水入侵为目标的优化管理模型具有更清晰的物理意义.

大连是一个沿海开放城市, 地下水资源在城市供水中起着重要作用. 几十年的地下水开发导致了严重的海水入侵, 在引碧流河水入连工程投入运行后, 保持大连市地下水的可持续开发, 解决城市供水与海水入侵之间的矛盾已是当务之急. 为此, 由欧共体资助的国际合作项目“Development of Methodologies for the Assessment and Management of Groundwater Resources and Risks in Coastal Zones”, 选择大连市的地下水资源管理问题为研究背景. 本文以该项目为工程背景, 在地下水系统模拟模型的基础上, 研究和建立大连市地下水系统单位脉冲-海水入侵响应矩阵, 以此为基础构造大连市地下水系统的管理模型, 并提出 2 个优化管理方案.

收稿日期: 2006-01-15; 修回日期: 2007-06-06.

基金项目: 欧盟-中国合作资助项目(ERBIC18CT96-0048).

作者简介: 王国利*(1964-), 男, 博士, 副教授.

1 响应矩阵的生成

研究区涵盖大连市市内四区及金州的部分地区。根据地质、水文地质条件分析,将研究区地下水系统概化为非均质各向同性,具有一类、二类混合边界和垂向补排关系的平面承压水流,可用数学模型 (1) 描述概化后的地下水系统。用有限差分法进行差分,依据 20 a 的研究区地下水动态资料对模拟模型进行识别和检验,模拟的地下水流场与实测流场拟合良好,使模型能够较为准确地刻画研究区地下水系统的特征,为进一步构筑地下水优化管理模型奠定了基础。

$$\begin{cases} \frac{\partial}{\partial x} \left(T \frac{\partial h}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(T \frac{\partial h}{\partial y} \right) + P(x, y, t) + X(x, y, t) = - * \frac{\partial h}{\partial t}; & (x, y) \in D, t > 0 \\ h(x, y, t)|_{t=0} = h_0(x, y); & (x, y) \in D \\ h(x, y, t)|_{\Gamma_1} = h_1(x, y, t); \geq 0, & (x, y) \in \Gamma_1 \\ T \frac{\partial h(x, y, t)}{\partial n} \Big|_{\Gamma_2} = q_1(x, y, t); \geq 0, & (x, y) \in \Gamma_2 \end{cases} \quad (1)$$

式中: x, y 为位置坐标; h 为水位; T 为导水系数; $- *$ 为贮水系数; X 为垂向补给、排泄强度; $P(x, y, t)$ 为 t 时刻位于 (x, y) 点的可控制脉冲量; h_0 为初始水位; h_1 为第一类边界 Γ_1 上的水位; q 为第二类边界 Γ_2 上的单宽流量; D 为计算域; n 为第二类边界 Γ_2 上的外法线方向。

建立单位脉冲—水位降深 (或海水入侵) 响应矩阵要求的系统必须为线性齐次系统,而模型 (1) 所描述的地下水系统不是线性齐次系统,不能直接应用叠加原理求取单位脉冲响应矩阵。为此,把定解问题 (1) 分解为下列两个定解问题:

$$\begin{cases} \frac{\partial}{\partial x} \left(T \frac{\partial H}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(T \frac{\partial H}{\partial y} \right) + X(x, y, t) = - * \frac{\partial H}{\partial t}; & (x, y) \in D, t > 0 \\ H(x, y, t)|_{t=0} = h_0(x, y); & (x, y) \in D \\ H(x, y, t)|_{\Gamma_1} = h_1(x, y, t); & (x, y) \in \Gamma_1 \\ T \frac{\partial H(x, y, t)}{\partial n} \Big|_{\Gamma_2} = q_1(x, y, t); & (x, y) \in \Gamma_2 \end{cases} \quad (2)$$

和

$$\begin{cases} \frac{\partial}{\partial x} \left(T \frac{\partial S}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(T \frac{\partial S}{\partial y} \right) + P(x, y, t) = - * \frac{\partial S}{\partial t}; & (x, y) \in D, t > 0 \\ S(x, y, t)|_{t=0} = 0; & (x, y) \in D \\ S(x, y, t)|_{\Gamma_1} = 0; & (x, y) \in \Gamma_1 \\ \frac{\partial S}{\partial n} \Big|_{\Gamma_2} = 0; & (x, y) \in \Gamma_2 \end{cases} \quad (3)$$

根据数理方程原理有

$$h = H + S \quad (4)$$

式中: h 为由定解问题 (1) 所确定的实际水位; H 则是由没有可控制脉冲量而仅由于初始流场、边界条件和补给、排泄形成的水位分布,即由式 (2) 确定的天然水位; S 是齐次初始条件,无不可控制脉冲影响,仅由可控脉冲形成的水位降深 (或海水入侵)。

定解问题 (3) 为线性齐次系统,满足叠加原理的适用条件。对于具有齐次初始条件的线性地下水系统,在给其中某些源或汇施加脉冲后,在系统中某二类边界节点产生的总海水入侵响应,可以由各源或汇单独施加脉冲对该点所产生的响应的代数和求得。

$$R_i(i, n) = R_0(i, n) + \sum_{j=1}^N \sum_{k=1}^n U(i, j, n - k + 1) Q(j, k) \quad (5)$$

式中: N 表示有 N 口抽水井 (或注水井) 作用于地下水系统; $R_i(i, n)$ 表示实际海水入侵响应值; $R_0(i, n)$ 则表示仅由边值条件和天然补、径、排条件确定的海水入侵附加值; $U(i, j, n - k + 1)$ 为单位脉冲响应函数,表示由于在第 j 点脉冲的作用,在第 n 时段末第 i 点的海水入侵响应; $Q(j, k)$ 为第 k 时段第 j 点施加的脉冲量。

式 (5) 即为海水入侵响应函数。对研究区地下水系统施加单位脉冲,同时形成水位响应矩阵和海水入侵响应矩阵,并以此为基础建立管理模型。

2 管理模型的建立

根据大连市地下水资源开发现状和远景规划,确定管理亚区 (或开采井);对每个管理亚区 (或开采井) 施加单位脉冲值,在沿海节点形成海水入侵响应矩阵;在其他地区形成水位降深响应

矩阵。考虑研究区裂隙岩溶水系统实际状况和大连市社会经济状况及发展规划，在严格控制海水入侵条件下，优化各水源地的开采量，同时兼顾其他社会、技术、经济及可持续发展等效益，建立如下优化管理模型。

2.1 目标函数

在开发中满足各种约束条件的情况下，以最大限度地开发区域裂隙岩溶水资源为目标。

$$\max Z = \sum_{k=1}^L \sum_{i=1}^{M_i} Q_i \quad (6)$$

式中： L 为管理时段数； M_i 为优化水源地（或水井）总数； Q_i 为决策变量。

2.2 生态环境约束

为防止海水入侵，在正常开采条件下，保持沿海边界节点地下水向大海的排泄量不为负，即

$$q_j \geq 0$$

q_j 为沿海边界节点的地下水排泄量向量分量。

2.3 经济技术约束

为保证地下水资源的长期开发，防止由于水位过低引起的后果（如避免产生吊泵现象出现），部分主要地段的水位降深应受到约束，即

$$A^* Q \leq S_{\max}$$

式中： A 为单位脉冲水位响应矩阵； Q 为水量向量； S_{\max} 为控制点水位的最大允许降深向量。

2.4 生产及生活用水约束

保证开采量不超过现有开采井的供水能力，同时满足日常生产和生活用水对地下水资源的基基本需求，即

$$Q \leq [Q_{\max}]$$

$$\sum_{i=1}^{M_i} Q_i \geq Q_{\min}$$

$[Q_{\max}]$ 为开采井的最大供水能力； Q_{\min} 为对地下水资源的要求量。

2.5 水资源可持续开发约束

为研究区裂隙岩溶水资源的可持续开发，不能破坏研究区地下水系统的水均衡条件，地下水总开采量不超过本地区地下水的可开采量，即

$$\sum_{i=1}^{M_i} Q_i \leq Q_a$$

Q_a 为不破坏水均衡条件的最大允许开采量。

这是一个包含多种约束条件的求极值问题，由于目标函数和约束条件均是线性的，可用线性规划的单纯形法求解。

3 优化管理模型的运行

研究区现有各种用途的供水井 151 眼。随着第三期引碧入连工程的投入使用，对地下水资源开发的压力已有所缓解，在继续开发地下水的同时改善地下水环境就显得非常重要了。根据研究区裂隙岩溶水系统的开发现状及大连市的远景规划，提出两个优化管理方案。

A. 现有开采布局条件下优化地下水开采量，在满足上述约束的条件下，获取最大开采量；

B. 在现有开采布局条件下优化地下水开采量，同时保持研究区地下水总补给量的 10% 排泄入海。

因为现状地下水的开采量在年内分布比较均匀，因此以一个水文年为管理周期，对研究区裂隙岩溶水系统开发进行优化控制，得到两个方案的优化管理结果（表 1）。

表 1 优化管理模型的运行结果及与现有开采状况的对比

Tab. 1 Optimized results comparing with the current developing status $10^3 \text{ m}^3 / \text{d}$

	现有开采状况	优化方案一	优化方案二	备注
开采量	60.75	52.4	47.1	方案一和方案二中的优化开采井分布相同
开采井数	151	31	31	
海水入侵	非常严重	无	排泄入海 5.3	

4 结 语

分析两个优化开采方案可知，现状条件下的海水入侵已得到根治，但地下水开采总量有所减

少，从另一个侧面说明了现状开采处于超量开采的状态；从最大限度地开发地下水资源的角度出发，优化方案一较方案二更多地开采了地下水资源，方案二虽开采总量有所减少，但仍保持着一定

量的地下水排泄入海;开采由现状分布的 151 眼井优化分配到其中的 31 眼井上,并且两个优化方案的开采井布局是相同的,说明该布局是符合本地区水文地质条件的,同时进一步证明现状开采井布局的不合理性,因此,大连市地下水开发现状的调整势在必行. 分析两个优化方案,如果进一步减少开采量,海水入侵的趋势肯定会得到更好的控制. 本文研究的管理模型不仅优化了研究区的地下水开采量,同时优化了开采井的布局,为研究区地下水的进一步开发提供了依据.

本文建立了单位脉冲—海水入侵响应函数,并说明了响应矩阵的求取方法,可以为其他沿海地区地下水资源优化开发管理提供一定参考.

参考文献:

- [1] 许涓铭, 易云华. 地下水资源管理模型研究综述与展望 [C] // 我国水资源危机与出路. 北京: 兵器工业出版社, 1991
- [2] MADDOCK T. Algebraic technological function from a simulation model [J]. *Water Resour Res*, 1972, 8(3): 129-130
- [3] 谢新民. 新疆喀什市地下水系统管理模型研究 [J]. 河海大学学报, 1991, 19(5): 1-8
- [4] 王国利. 复杂地下水系统模糊集分析理论与应用研究 [D]. 大连: 大连理工大学, 1998
- [5] 王国利, 周惠成. 大连市地下水资源优化管理模型 [J]. 大连理工大学学报, 2001, 41(1): 112-115 (WANG Guo-li, ZHOU Hui-cheng. Research on optimum management model for Dalian groundwater resource system [J]. *J Dalian Univ Technol*, 2001, 41(1): 112-115)
- [6] 陈守煜, 王国利, 朱文彬, 等. 大连市水资源环境与经济协调可持续发展研究 [J]. 水科学进展, 2001, 12(4): 504-508
- [7] 王国利, 张文国. 济南泉域裂隙岩溶水系统管理模型 [J]. 大连理工大学学报, 1999, 39(5): 1-8 (WANG Guo-li, ZHANG Wen-guo. Research on management model for Jinan fissure-karst water system [J]. *J Dalian Univ Technol*, 1999, 39(5): 1-8)
- [8] SPINK A E F, WILSON E E M. Groundwater resource management in coastal aquifers [C] // *Groundwater Monitoring and Management (Proceedings of the Dresden Symposium)*. London: IAHS Publ, 1990

Research on groundwater management model and its application based on unit pulse saline intrusion response matrix

WANG Guo li^{* 1}, LIANG Guo hua¹, NIE Xiang tian²

(1. Dept. of Civil Eng., Dalian Univ. of Technol., Dalian 116024, China;

2. Dept. of Hydraul., Hydraul. and Hydropower College of Northern China, Zhengzhou 470047, China)

Abstract By summarizing the current research in the field of groundwater management, the saline intrusion in the coastal zones was analyzed. The way forming pulse-saline intrusion coefficients is discussed. Then a groundwater management model for Dalian was developed based on the coefficients and two optimal schemes were provided. Both schemes are based on current wells distribution. One is to maximize groundwater pumping quantity under related constrains. The other is the same except keeping 10% natural groundwater disputing to sea. The results may be used for the groundwater management in other coastal zones.

Key words groundwater; saline intrusion; response matrix; management model