

# 泰安市地下水管理模型初探

邹国强 侯顺宝

(山东省地质矿产局第一地质队)

**提要** 十余年来,由于超量开采岩溶水资源,致使泰安市区出现了地面塌陷、地裂缝、岩溶水污染等一系列环境地质问题。本文介绍了以抑制该类问题发生、发展为约束条件的地下水管理模型的建立方法,通过运转管理模型,作出泰安市区岩溶水的最优开采量,并通过与开采现状的对比,说明目前岩溶水开采的极不合理性。

泰安市是一个新兴的旅游城市,十余年来,由于不合理开采岩溶水,致使市区出现诸如地面塌陷、地裂缝、地下水污染等一系列环境地质问题,在一定程度上阻碍了城市的建设,影响了社会的安定。因此,合理开发岩溶水资源,保护地质环境,防治地质灾害,已成为水资源工作者责无旁贷的任务。本文主要介绍了泰安市地下水管理模型建立方法,并且通过运转管理模型,求出了为保持良好的地质环境、以约束岩溶水动水位为条件的岩溶水最大可采量,进而说明目前岩溶水已处于严重超采状态,最终提出这种严重超采行为是诱发环境地质问题的根本所在。

## 一、概 况

### (一)自然、人文地理

泰安市地处泰莱向斜盆地的西部边缘,属泰山山前冲洪积平原。五岳独尊的泰山位居市区北侧,主峰玉皇顶海拔 1532m。区内多年平均降水量 697.6mm(1951—1989年),多年平均蒸发量 1648.7mm。大汶河距离市区约 10km,呈南西向西流经市区南部,多年平均径流量 6.22 亿  $m^3/a$ (1958—1989年)。

随着我国城乡建设、国民经济建设的发展,泰安市工业、旅游业和城市建设突飞猛进,现已建成融自然景观与文化景观为一体的旅游文化城市。泰山素有“东方文化宝库”之美称,1987年被联合国教科文组织正式列为“世界自然遗产”。泰安市区面积 16.5 $km^2$ ,人口 21万,工业产值 7.67亿元(1988年)。城市供水全部取自于岩溶水,岩溶水日采水量 9.61万  $m^3$ ,其中工业用水 6.35万  $m^3$ ,工业万元产值耗水量 302 $m^3$ 。据规划,2000年泰安市区人口将达 30万,工业产值 15亿元,届时城市日用水量将增至 15万  $m^3$ 。

### (二)地质、水文地质条件

本文 1991年8月收到,1992年9月收回。

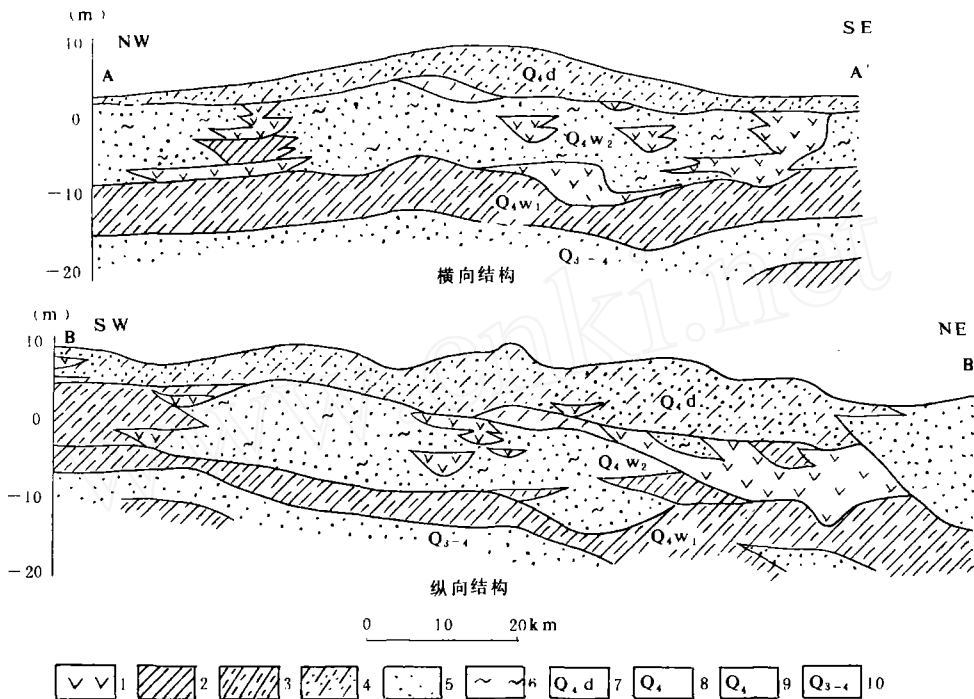


图2 黄河三角洲横、纵向结构剖面图

1. 软土; 2. 粘土; 3. 粉质粘土; 4. 粉土; 5. 粉砂土; 6. 淤泥质土; 7. 第四系全新统刁口组;  
8、9. 全新统五号桩组上部及下部; 10. 第四系全新统一上更新统

本区浅海及过渡相软土有滨海、泻湖、溺谷等各种沉积,溺谷沉积软土和泻湖沉积软土分别为海进时期和缓慢海退时期缓慢沉积的产物,分布范围较窄,剖面为透镜状,厚度较小。滨海沉积软土,为海进时由海浪岸流及潮汐的水动力作用在近岸的陆缘地区沉积了厚度较大、分布较广的浅灰、深灰色粉砂、粉土,含有淤泥质和贝壳碎片;远离海岸的地区,由于海水较深,沉积速度和能量显著减弱,水中细粒物质呈悬浮状态,在海洋动力作用下,在较大范围均匀的分散沉积下来,沉积物为含淤泥质粘性土或淤泥质粘性土(灰褐色粘土、粉质粘土),含有大量海生物,具有向海倾斜的斜层理,土体产状也向海倾斜,叠覆于陆缘海进沉积砂性土之上。滨海相软土的分布受古地形、古海岸线的控制,其分布地段在地貌上处于黄河三角洲和滨海的低地区及平原区,部分决口扇形地、泛流河道及黄河主流带的缓平岗坡区之边缘部位,这些地段为软土形成时的古海岸线以下地带,具有负向地形,有软土形成的环境条件和物质来源。该区滨海相软土是建筑地基主要持力层段,其分布广泛,在富国—义和以西和义和—新安以北的近海地段及利国—东营一线为大面积连续分布(见图3—5),仅个别地区无软土沉积。软土层厚度较大,连续分布,向海倾斜。软土的厚度、顶、底板埋深受沉积时的古地形和海水深度控制,敞海地区软土厚度

统的崮山组分布,为本区西部不透水边界;岱道庵断裂基本为一透水断裂,由于断裂作用,使泰莱盆地腹部发育的第三系不含水地层与寒武、奥陶系地层直接接触,形成了本区寒武、奥陶系含水系统呈靴状分布之特征。

### (三)岩溶水开采历史及环境地质问题

泰安市区供水水源地主要可分为城区及旧县两大水源地。由于过量开采岩溶水资源,两水源地均不同程度地被恶化了地质环境,产生了环境地质问题。

城区水源地的开发是从 50 年代末开始的。最初开采量仅为  $0.66 \text{ 万 m}^3/\text{d}$ ,70 年代初为  $2 \text{ 万 m}^3/\text{d}$ ,70 年代中期至今供水一直保持在  $5 \text{ 万 m}^3/\text{d}$  左右。由于过量开采,70 年代中期出现了大面积无压漏斗区,1977 年以后在京沪铁路与辛(店)湖(屯)铁路交汇的三角地带及城东郊訾灌庄采水区多次产生地面塌陷,截止 1986 年 10 月共产生地面塌陷 110 余处,其中铁路三角区 40 处,訾灌庄采水区 70 余处,至今訾灌庄采水区地面塌陷仍不断发生。结庄、三友新村、拖拉机厂等地多处产生地裂缝。另外,还形成了拖拉机厂至化肥厂一带  $1.3 \text{ km}^2$  的岩溶水六价铬严重污染区,六价铬含量超过国家饮用水标准数倍,最高达 10 倍。

旧县水源地 1982 年开发,开采量  $1.38-2.2 \text{ 万 m}^3/\text{d}$ ,随着城市发展对水的需求,为减轻城区水源地压力,1988 年下半年猛增至  $4.59 \text{ 万 m}^3/\text{d}$ ,此时岩溶水水位脱离灰岩含水层顶板,于 1990 年 5 月产生地面塌陷。

研究表明,在客观实体已就的条件下,人为超采岩溶水是形成地面塌陷、地裂缝、岩溶水污染的重要诱导因素。由于超采岩溶水,水位大幅度下降,使岩溶水由承压状态转变为无压状态,促使第四系孔隙水向下伏岩溶含水层越流(先期污染的第四系孔隙水成为岩溶水污染源),激发并加速了地下水潜蚀作用,该作用带走了土体颗粒(土体压密形成不均匀地面沉降,导致地裂缝),形成隐伏土洞,进一步发展便产生了地面塌陷。

因此,保持岩溶水承压状态,减少上、下水头差,是保护地质环境、防治地质灾害的根本措施。

## 二、地下水管理模型

### (一)模拟模型(预报模型)

#### 1. 数学模型

根据本区地质、水文地质条件,考虑第四系含水层是岩溶水的直接补给层,因而将管理区地下水概化为双层结构准三维流系统,其数学模型为:

上部孔隙水含水层渗流方程:

$$\begin{cases} \frac{\partial}{\partial x}(\bar{T}' \frac{\partial H'}{\partial x}) + \frac{\partial}{\partial y}(\bar{T}' \frac{\partial H'}{\partial y}) + W_1 + W_2 = \mu \frac{\partial H'}{\partial t} \\ H'(x, y, 0) = h'_0(x, y) \\ H' \Big|_{\Gamma_1} = h'_1(x, y, t) \\ \bar{T}' \frac{\partial H'}{\partial n} \Big|_{\Gamma_2} = h'_2(x, y, t) \end{cases} \quad (1)$$

式中： $H'$ 为上层地下水水位； $\bar{T}'$ 为上层平均导水系数； $W_1$ 表示越流量，其表达式  $W_1 = T_k(H' - H)$ ， $T_k$ 为越流系数， $H$ 表示下层水位； $W_2$ 为降雨入渗量及蒸发量等。

下部岩溶水含水层的渗流方程：

$$\begin{cases} \frac{\partial}{\partial x}(\bar{T} \frac{\partial H}{\partial x}) + \frac{\partial}{\partial y}(\bar{T} \frac{\partial H}{\partial y}) + W_1 + W_2 = u \frac{\partial H}{\partial t} \\ H(x, y, 0) = h_0(x, y) \\ H|_{\Gamma_1} = h_1(x, y, t) \\ \bar{T} \frac{\partial H}{\partial n} |_{\Gamma_2} = h_2(x, y, t) \end{cases} \quad (2)$$

式中： $H$ 为下层地下水水位； $\bar{T}$ 为下层平均导水系数； $W_2$ 为人工开采量。

产生于两含水层之间的越流将两者耦合在一起。

## 2. 边界条件

### (1) 第四系孔隙水

管理区内东、南、西三面均有地表河流(芝田河、大汶河、庞河)，地表水、地下水关系密切，因而第四系孔隙水的东、南、西三边边界与三条河流基本一致，为随河水位变化的第一类边界。北部为泰山，接受泰山群变质岩风化壳裂隙水及残坡积孔隙水的侧向补给，定为第一类边界。边界圈定面积为  $149.3 \text{ km}^2$ 。

### (2) 寒武、奥陶系岩溶水

南部、东南部在其垂向上有大汶河流经。河床砂砾石孔隙水与岩溶水有直接水力联系，因而视为与河水水位同步变化的第一类边界。东北部边界由于岱道庵断裂作用，使第三系不透水岩层与岩溶含水层直接接触，处理为不透水边界。西部边界与庞河断裂一致，由于固山组的阻水作用，定为不透水边界。北部以泰山断裂为界，视为第二类边界。边界圈定面积为  $94.1 \text{ km}^2$ 。

两含水层采用三角形剖面，共剖分节点 300 个，三角形单元 285 个。

在确定了管理区地下水系统的数学模型和边界条件之后，考虑大气降水入渗、河水入渗、灌溉水入渗及地下水蒸发等诸多因素，通过人工调试水文地质参数(导水系数、给水度或释水系数)及水量转换参数(降水入渗系数、越流系数、河水入渗系数等)，使管理区内计算水位与实测水位达到了较好的拟合，至此地下水模拟模型建模成功。通过运转该模型，便可进行不同岩溶水开采方案的水位预报。

## (二) 管理模型

如上所述，不合理地开采岩溶水是本区产生地面塌陷等环境地质问题的根本原因。目前，由于缺乏充沛的供水水源，缺乏合理的岩溶水开采方案，该区触目的环境地质问题并没有得到根本治理，因此，建立以抑制地面塌陷、地裂缝等地质灾害的发生与发展为前提条件，以实施岩溶水资源的科学管理、合理开采为目的的优化管理模型就显得非常迫切和重要了。

### 1. 建模方法——响应矩阵接力法

对于(2)式，由于不满足线性系统的迭加性和齐次性，因而属非线性系统，为此将其分解为二：

$$\begin{cases} \frac{\partial}{\partial x}(\bar{T} \frac{\partial h}{\partial x}) + \frac{\partial}{\partial y}(\bar{T} \frac{\partial h}{\partial y}) + W_1 = u \frac{\partial h}{\partial t} \\ h(x, y, 0) = h_0(x, y) \\ h|_{\Gamma_1} = h_1(x, y, t) \\ \bar{T} \frac{\partial h}{\partial n} |_{\Gamma_2} = h_2(x, y, t) \end{cases} \quad (3)$$

和

$$\begin{cases} \frac{\partial}{\partial x}(\bar{T} \frac{\partial s}{\partial x}) + \frac{\partial}{\partial y}(\bar{T} \frac{\partial s}{\partial y}) + W_2 = u \frac{\partial s}{\partial t} \\ s(x, y, 0) = 0 \\ s|_{\Gamma_1} = 0 \\ \bar{T} \frac{\partial s}{\partial n} |_{\Gamma_2} = 0 \end{cases} \quad (4)$$

(3)式表式在含有不可控因素(越流  $W_1$  边界条件等)作用下形成的岩溶水天然流场。越流项  $W_1$  作为不可控因素置于(3)式在另文<sup>[1]</sup>已有较详细论述。简言之,当约束点约束水位恒定且存在着无压状态时,这种简化处理是行之有效的。(4)式表示在人为作用下(抽、注水)的岩溶水降深分布,该式已满足了线性系统的迭加性和齐次性,对此系统,抽水量  $q$  与降深  $s$  呈线性关系,于是,对于多井抽水,在  $k$  点的降深为:

$$S(k) = \sum_{j=1}^m q(j) \beta(k, j) \quad (5)$$

式中:  $q(j)$  为第  $j$  口井的抽水量;  $\beta(k, j)$  表示第  $j$  口井抽水对  $k$  点的单位脉冲函数。

(5)式表达了由  $M$  口井抽水在  $k$  点引起的降深是每口井单独抽水引起的降深总和。

(3)式与(4)式之差即为(2)式的解:

$$H(k) = h(k) - s(k) \quad (6)$$

把需要约束的  $k$  点( $k=1, 2, \dots$ )组成如同(6)式的代数方程组,构成线性规划约束条件的一部分,连同其他约束条件一起,便可建立泰安市地下水系统的管理优化模型,其解法采用线性规划的单纯形法。

实施地下水系统的管理,是将规划期划分为多个时段逐步实现的。对于多个时段,首先利用管理优化模型求得第一时段的优化水量,将此水量代入预报模型中求时段末水位,以此水位作为下一时段的初始状态,对于下一时段进行同样的计算,求解优化水量,代入预报模型,所得时段末水位同样作为再一时段的初始水位,如此“接力”循环,直至规划期末,此即为响应矩阵接力法。通过该方法,便可得到整个规划期的最大抽水量的时空分布,并使地质环境处于良好状态。

## 2. 优化模型

每时段的优化模型可表示为:

目标函数:

<sup>[1]</sup> 邹国强.1990.双层含水系统地下水管理的响应矩阵接力法.山东省地矿局第二届青年地学论文竞赛获奖论文集.

$$\text{MAX } Z = \sum_{j=1}^M q(j) \quad (7-1)$$

约束条件:

$$\begin{cases} H(k) = h(k) - \sum_{j=1}^M q(j)\beta(k, j) & (7-2) \\ H(k) \geq H \min(k) & (7-3) \\ q(j) \leq q \max(j) & (7-4) \\ q(j) \geq 0 & (7-5) \end{cases}$$

$$j = 1, 2, \dots, M; \quad k = 1, 2, \dots, L$$

式中:  $q \max(j)$  为第  $j$  井的最大开采能力;  $H \min(k)$  为第  $k$  点岩溶水动水位下限值。

目标函数(7-1)式表示该时段  $M$  口井的岩溶水开采量总和最大; 约束条件(7-2)式为岩溶水系统所服从的响应方程, (7-3)式表示为  $k$  点的动水位不得小于下限值, (7-4)式表明第  $j$  口井的开采量不得大于设备最大抽水能力, (7-5)式为决策变量非负约束。

该优化模型表示在保持良好的环境地质条件下(通过约束动水位而实现), 最大限度地开采岩溶水资源。

### (三)一种优化方案及结果分析

众所周知, 本地区所存在的环境地质问题是因不合理超采岩溶水资源所致。何以说不合理开采? 在现有供水条件下, 如何最大限度地开采岩溶水, 其时空分布如何, 才不致恶化地质环境? 该问题可归纳为: 以限定岩溶水的动水位为约束条件, 保持城市供水井的分布现状为前提, 求岩溶水的最大可采量。

通过运转管理模型得其最优解, 见表 1, 为对比如见, 表 1 中还列入了特枯年份 1989 年一、二季度城市供水井实际开采量。

表 1 水源地优化结果及与实际开采量对比表

典型年	季 度	旧县水源地 (万 m <sup>3</sup> /d)		城区水源地 (万 m <sup>3</sup> /d)		备 注
		季开采	年平均	季开采	年平均	
平水年 (P=50%)	一	2.685	3.249	2.150	2.637	优化解
	二	2.495		1.515		
	三	4.400		4.157		
	四	3.415		2.726		
特枯年 (P=95%)	一	2.251	2.675	1.205	1.566	
	二	1.517		1.124		
	三	3.810		2.327		
	四	3.125		1.608		
1989年 (P=95%)	一		4.590		5.02	实际开采
	二					

由表 1 可见,无论是城区水源地还是旧县水源地,岩溶水均处于严重超采状态,因而引起了两水源地的地面塌陷,地裂缝等环境地质问题。城区水源地开采量由 70 年代初的  $2 \text{ 万 m}^3/\text{d}$  增至中期的  $5 \text{ 万 m}^3/\text{d}$ ,岩溶水水位相应由  $116\text{m}$  以上降至  $110\text{m}$  以下(指位于城区水源地的铁路三角区),脱离了第四系底板,1977 年以后产生了地面塌陷(图 2),根据优化结果,限定优化水位为  $116\text{m}$  时,城区水源地平水年仅可开采年平均  $2.637 \text{ 万 m}^3/\text{d}$ 。

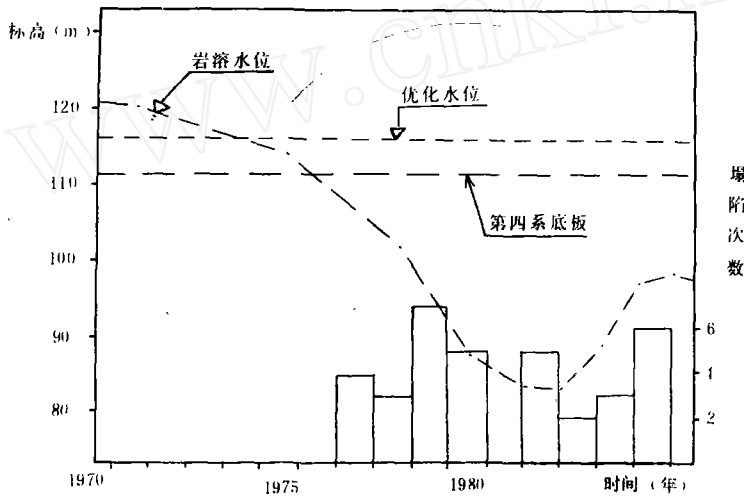


图 2 铁路三角区地面塌陷与岩溶水动水位关系示意图

旧县水源地在 1988 年以前供水一直在  $2 \text{ 万 m}^3/\text{d}$  左右,于 1988 年底激增至  $4.59 \text{ 万 m}^3/\text{d}$ ,岩溶水水位相应由  $109\text{m}$  以上降至  $104\text{m}$  以下,岩溶水水位脱离了第四系底板(图 3),处于无压状态,经一年半的孕育之后,1990 年 5 月产生了地面塌陷,此后地裂缝连年不断,根据优化结果,保持优化水位在  $108\text{m}$  时,旧县水源地平水年仅可取水年平均  $3.249 \text{ 万 m}^3/\text{d}$ 。

通过城区、旧县两水源地十余年及几十年的开采实践表明,岩溶水开采量由小变大,岩溶水水位由高变低、由浅变深,泰安市区地质环境则经历了由好变坏逐渐恶化的转化过程。本优化方案如实反映了该区地质环境好与坏转折点的岩溶水开采状况。当开采量大于优化水量时,地面塌陷、地裂缝等灾害隐患将时时存在,这一点,由图 2,图 3 均可看出。令人担忧的是,至今,泰安市区的岩溶水仍处于超采状态,因此,地面塌陷、地裂缝等仍时有发生,为尽快防治、治理这类灾害问题,限制、压缩岩溶水开采量,寻找新的供水源地已成为当务之急。

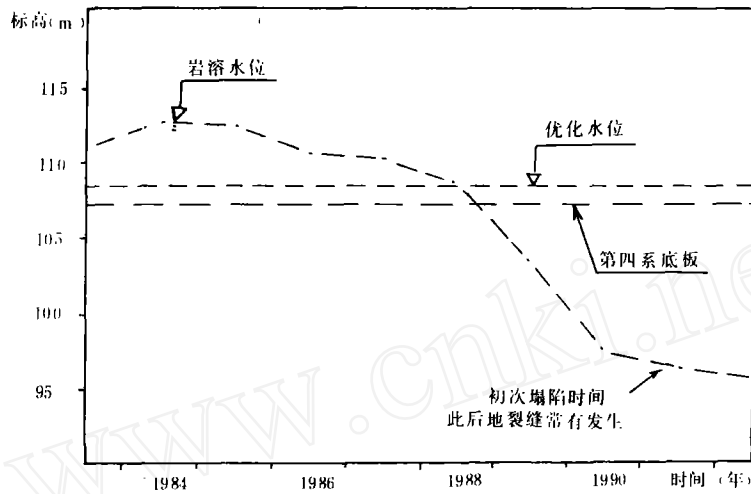


图3 旧县地面塌陷与岩溶水动水位关系示意图

#### 四、结束语

合理开发利用地下水资源,科学制定水资源规划,地下水管理模型作为不可缺少的有力工具毋庸置疑。随着社会的发展,科技的进步,地下水管理模型将被逐步应用到生产实践中去。准三维流系统的地下水管理模型还在探索之中,应该说,建立较为简单易行、易于操作并能与生产实践相结合又不失真的管理模型至关重要。采用响应矩阵接力法建立的泰安双层结构准三维流地下水管理模型简单易行,可操作性强,并经受了开采历史的初步验证。作为研究成果,希望能被有关部门所采纳,早日应用到实践中去,为泰安市地下水资源合理开发利用与科学管理发挥应有的作用,也可供其他条件类似的城市借鉴参考。

由于笔者水平有限,不足之处,敬请斧正。

## PRELIMINARY STUDY ON THE MANAGEMENT MODEL OF GROUND WATER IN TAIAN CITY

Zou Guoqiang and Hou Shunbao

*(The First Geological Brigade, Shandong Bureau of Geology and Mineral Resources)*

### Abstract

Overexploitation of karst water over the past ten years has caused a series of environmental geological problems, such as land collapse, surface cracking and karst water pollution in Taian City proper. In the paper, the method for establishing underground water management model with constraints to prevent such problems from occurring and developing was explained. The optimum exploitable yield of groundwater from the city Proper was obtained by running the management model and, finally, the extreme irrationality in exploiting the karst water resource at present is demonstrated by comparing the current exploitation yield with the optimum exploitable yield.