

倾斜平原区地下水的开发决策与管理^①

——以济宁地区为例

宋印胜

(山东省鲁南地质工程勘察院)

摘要 在多年监测资料的基础上,根据倾斜平原区的水文地质特征,建立地下水水位降速与大气降水、地下水开采量的回归方程,对不同大气降水、地下水开采量条件下的地下水水位降速进行了预测。在考虑了大气降水概率、保证率及不同降水时地下水开采量概率的条件下,对地下水水位降速进行了随机综合决策。依据不确定决策法中的乐观系数法,获得了不同大气降水前提下,地下水开采量的最佳对策,并提出了地下水开发管理的原则。

一、倾斜平原区地下水环境背景

倾斜平原区即山前冲洪积倾斜平原区,是地质历史上河流冲洪积形成的产物。地下水含水层岩性颗粒粗、单层厚度大,多由中粗砂及卵砾石组成。地下水主要靠接收大气降水的入渗补给,存在部分来自山区的侧向迳流补给,亦有微量地表水下渗及农灌水的回渗补给。地下水的流向与倾斜平原区的地形坡降一致,地下水水平迳流强烈,地下水水质优良,从山区向平原下游,地下水水质逐渐变差。倾斜平原的地下水有很强的调蓄能力,往往形成有集中供水意义的富水地段。我国多数城市座落于倾斜平原上,其城市工业及生活用水,主要依赖地下水水源地供水,这在我国北方城市表现得更为突出。

受地形的影响,倾斜平原区的地表水系多属季节性河流,除丰水期外,地表水产流量很小直至干涸,因而大量的工业、农业及生活用水主要靠开采地下水。地下水作为一种可再生资源,并非取之不尽,用之不竭,当开采量大于开采资源量时,地下水水位便会明显下降,反之则上升或基本稳定。我国多数山前倾斜平原区的地下水,均处于超采环境,地下水水位逐渐降低,地下水水位埋深大于潜水蒸发极限埋深,使人工开采成为地下水的主排途径,这种局面持续发展,势必会导致水质恶化,水源枯竭,水源地报废,农用机井吊泵,甚至局部出现不良环境地质等问题。因此,加强地下水开发利用的决策、控制与管理,更显得十分迫切和必要。

二、地下水水位降速条件分析

倾斜平原区大中小城市的供水水源地,集中在小范围内开采,开采强度较大,不少地

^① 本文1994年2月收到

段已形成开采漏斗;而大面积的农田灌溉开采,已使得区域地下水水位呈整体下降的趋势,多数供水地段已无潜水蒸发和向下游迳流排泄;使得地下水水位降速(简称水位降速,下同)直接受控于大气降水的多少与开采量的大小,且年内水位降速主要与当年大气降水量和地下水的开采量有关。根据本院监测资料(表1)^①,水位降速H、地下水开采量Q、大气降水量X三者间均存在线性相关关系。若把水位降速H看作为大气降水量X和地下水开采量Q的函数,其线性回归模型为:

表1 水位降速、开采量及降水量监测值表

项 目	年份 i							
	1	2	3	4	5	6	7	8
1983	1984	1985	1986	1987	1988	1989	1990	
水位降速 H^* (m/a)	-2.379	3.037	1.928	-5.501	-1.580	-4.130	-0.933	3.329
降水量 X (mm/a)	478.5	906.3	831.4	369.7	566.4	299.8	625.9	1005.3
地下水开采量 Q ($10^4 m^3/a \cdot km^2$)	74.01	27.15	53.34	174.605	73.523	170.79	96.095	39.553

注: $H^* = H_{i初} - H_{i末}$ ($H_{i初}$ 、 $H_{i末}$ —分别为 i 年初、末水位标高 cm)。

$$\hat{H} = a_0 + a_1 X + a_2 Q \quad (1)$$

式中 a_0 、 a_1 、 a_2 —为待定系数。按最小二乘法原理,监测值与回归值之差的平方和应为最小

$$\varepsilon = \sum_{i=1}^8 (H_i - \hat{H}_i)^2 = \sum_{i=1}^8 (H_i - a_0 - a_1 X_i - a_2 Q_i)^2$$

根据数学分析中的极值原理,求 ε 对 a_0 、 a_1 、 a_2 的偏导数,并令 $\frac{\partial \varepsilon}{\partial a_0} = 0$, $\frac{\partial \varepsilon}{\partial a_1} = 0$, $\frac{\partial \varepsilon}{\partial a_2} = 0$, 经整理得方程组:

$$\begin{cases} na_0 + a_1 \sum_{i=1}^8 X_i + a_2 \sum_{i=1}^8 Q_i = \sum_{i=1}^8 H_i \\ a_0 \sum_{i=1}^8 X_i + a_1 \sum_{i=1}^8 X_i^2 + a_2 \sum_{i=1}^8 X_i Q_i = \sum_{i=1}^8 X_i H_i \\ a_0 \sum_{i=1}^8 Q_i + a_1 \sum_{i=1}^8 X_i Q_i + a_2 \sum_{i=1}^8 Q_i^2 = \sum_{i=1}^8 Q_i H_i \end{cases}$$

写成矩阵形式经计算得:

$$\begin{bmatrix} a_0 \\ a_1 \\ a_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} n & \sum_{i=1}^8 X_i & \sum_{i=1}^8 Q_i \\ \sum_{i=1}^8 X_i & \sum_{i=1}^8 X_i^2 & \sum_{i=1}^8 X_i Q_i \\ \sum_{i=1}^8 Q_i & \sum_{i=1}^8 X_i Q_i & \sum_{i=1}^8 Q_i^2 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \sum_{i=1}^8 H_i \\ \sum_{i=1}^8 X_i H_i \\ \sum_{i=1}^8 Q_i H_i \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -5.872 \\ 0.01 \\ -0.0135 \end{bmatrix}$$

复相关系数为:

$$r_{HXQ} = \sqrt{\frac{r_{HX}^2 + r_{HQ}^2 - 2r_{HX} \cdot r_{HQ} \cdot r_{XQ}}{1 - r_{XQ}^2}}$$

① 山东省鲁南地矿工程勘察院,1991年,山东省济宁市地下水均衡试验报告。

$$= \sqrt{\frac{0.9777^2 + (-0.9129)^2 - 2 \times 0.9777 \times (-0.9129) \times (-0.8808)}{1 - (0.8808)^2}} = 0.9838$$

其线性回归方程为:

$$\hat{H} = 0.01X - 0.0135Q - 5.872 \quad (2)$$

三、静态条件下水位降速预测

由于大气降水的大小是不可调控的,并在时空分布上有很大的随机性,而地下水的开采量,通过一定的技术、方法则可以减少。如果把降水量大小作为事件集,把开采量的大小作为对策集,某一事件与某一对策的二元组合为一个效果局势,局势的全体则为局面。若效果的目标确定,便可从局面中找到最佳局势和最佳对策。

在 1956—1990 年的降水资料中, $X \in (250, 1050)$, 近十年开采量资料 $Q \in (20, 180)$ 。把降水量离散为 8 个特征值: $X_i = [X_1, X_2, \dots, X_8]^T = [300, 400, 500, 600, 700, 800, 900, 1000]^T$; 把开采量离散为 9 个特征值: $Q_k = [Q_1, Q_2, \dots, Q_9] = [20, 40, 60, 80, 100, 120, 140, 160, 180]$ 。任一事件、对策形成的局势为 (X_i, Q_k) , 本文局势的映射也就是水位降速 H_{ik} , 所有事件 X_i 与所有对策 Q_k 的效果, 便形成水位降速的局面: $S = \{H_{ik}\}$, 也就是(2)式预测的结果。

$$S = \begin{bmatrix} -3.142 & -3.412 & -3.682 & -3.952 & -4.222 & -4.492 & -4.762 & -5.032 & -5.302 \\ -2.142 & -2.412 & -2.682 & -2.952 & -3.222 & -3.492 & -3.762 & -4.032 & -4.302 \\ -1.142 & -1.412 & -1.682 & -1.952 & -2.222 & -2.492 & -2.762 & -3.032 & -3.302 \\ -0.142 & -0.412 & -0.682 & -0.952 & -1.222 & -1.492 & -1.762 & -2.032 & -2.302 \\ 0.858 & 0.588 & 0.318 & 0.048 & -0.222 & -0.492 & -0.762 & -1.032 & -1.302 \\ 1.858 & 1.588 & 1.318 & 1.048 & 0.778 & 0.508 & 0.238 & -0.032 & 0.302 \\ 2.858 & 2.588 & 2.318 & 2.048 & 1.778 & 1.508 & 1.238 & 0.968 & 0.698 \\ 3.858 & 3.588 & 3.318 & 3.048 & 2.778 & 2.508 & 2.238 & 1.968 & 1.698 \end{bmatrix}$$

S 代表了理想条件下的水位降速的局面,它尚未反映大气降水的概率、保证率及开采量实际大小与降水量的关系,故对 S 不作决策。

四、随机条件下开采量决策

(一)在 35 年的大气降水监测中,各降水量大小区间值出现的概率不尽一致,只有把各降水量大小出现的概率考虑进去,才能反映随机降水条件下的水位降速局面。降水量区间出现的概率见表 2。不同降水量概率条件下的水位局面为:

表 2 不同降水量区间出现的概率

降水量特征值 (mm/a)	300	400	500	600	700	800	900	1000
降水量区间值 (mm/a)	250—350	350—450	450—550	550—650	650—750	750—850	850—950	950—1050
概率 P_j	0.0286	0.0857	0.1429	0.1143	0.2000	0.3143	0.0286	0.0857

$$A_{jk}^{(1)} = P_j^T H_{jk} \quad (3)$$

式中 $\sum_{i=1}^8 P^T = 1$

大气降水除考虑降水量概率外,还应考虑不同大气降水量的大小保证程度,也代表了对地下水的渗入补给的保证率。降水量越大,而出现的概率很小,对地下水的保证程度也就越小;相反降水量很小的区间,往往一般年份都能满足,因而降水量小的区间保证程度高。根据35年系列的降水资料,由大到小进行排列,各位次的保证率为 $n/(35+1)$, n 为在排列中的位次,把特征值(降水量)对应位次的保证率即视为该降水量的保证率 L_j , $L_j = [0.9732, 0.9444, 0.8056, 0.6667, 0.5556, 0.2222, 0.1111, 0.0556]^T$ 。其降水量保证率条件下的水位降速局面为:

$$A_{jk}^{(2)} = L_j H_{jk} \quad (4)$$

(二)地下水开采量与降水量成反比关系,降水量大的年份,地下水开采量甚小,越是枯水年份,越必须大量开采地下水来保证工农业生产的需要。只有把开采量的差异与降水量的关系这部分信息考虑进去,才能反映出降水条件下,地下水开采量大小对地下水水位的影响。依据近十多年地下水开采量的资料,其各特征降水量所对应的地下水开采量大小的经验概率为 g_{jk} , 且 $\sum_{k=1}^9 g_{jk} = 1$ 。不同降水量、不同地下水开采概率条件下,水位降速的局面为 $A_{jk}^{(3)}$:

$$g_{jk} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0.01 & 0.04 & 0.01 & 0.40 & 0.45 \\ 0 & 0 & 0 & 0.02 & 0.08 & 0.20 & 0.40 & 0.25 & 0.05 \\ 0 & 0 & 0.15 & 0.45 & 0.25 & 0.10 & 0.04 & 0.01 & 0 \\ 0 & 0.05 & 0.10 & 0.50 & 0.25 & 0.08 & 0.02 & 0 & 0 \\ 0.05 & 0.10 & 0.35 & 0.40 & 0.08 & 0.02 & 0 & 0 & 0 \\ 0.10 & 0.30 & 0.45 & 0.10 & 0.05 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0.25 & 0.50 & 0.15 & 0.10 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0.45 & 0.40 & 0.15 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

$$A_{jk}^{(3)} = \{(Hg)_{jk} | j=1, 2, \dots, 8; k=1, 2, \dots, 9; \} \quad (5)$$

(三)综合考虑上述三个影响水位降速的客观条件,其综合后的水位降速局面为:

$$B_{jk} = \frac{1}{u} \sum_{u=1}^3 A_{jk}^{(u)} \quad (6)$$

$$B_{jk} = \begin{bmatrix} -0.2650 & -0.2878 & -0.3105 & -0.3333 & -0.3700 & -0.4387 & -0.5603 & -1.0953 & -1.2424 \\ -0.2168 & -0.2441 & -0.2714 & -0.3184 & -0.4120 & -0.5862 & -0.8823 & -0.7440 & -0.5071 \\ -0.1252 & -0.1548 & -0.2659 & -0.5069 & -0.4287 & -0.3562 & -0.3396 & -0.3424 & -0.3619 \\ -0.0127 & -0.0437 & -0.0837 & -0.2438 & -0.2111 & -0.1732 & -0.1693 & -0.1817 & -0.2058 \\ 0.1082 & 0.0839 & 0.0719 & 0.0117 & -0.0302 & -0.0571 & -0.0834 & -0.1129 & -0.1424 \\ 0.2883 & 0.3523 & 0.3583 & 0.1627 & 0.1081 & 0.0619 & 0.0290 & -0.0039 & -0.0368 \\ 0.2898 & 0.4781 & 0.1578 & 0.1053 & 0.0321 & 0.0272 & 0.0224 & 0.0175 & 0.0126 \\ 0.7054 & 0.5962 & 0.2745 & 0.1001 & 0.0912 & 0.0823 & 0.0735 & 0.0646 & 0.0557 \end{bmatrix}$$

在 B_k 中内选出每一降水事件中的最大($r^{\max}B_j$)与最小($r^{\min}B_j$)值,即 $r^{\max}B_j = \{-0.2650, -0.2168, -0.1252, -0.0127, -0.1082, 0.3583, 0.4781, 0.7054\}^T$; $r^{\min}B_j = \{-1.2424, -0.8823, -0.5067, -0.2438, -0.1424, -0.0368, 0.0126, 0.0557\}^T$ 。 r^{\max} 、 r^{\min} 分别为 k 序列中的极大值、极小值。

(四)倾斜平原区多为井灌区,机井密度大,为使地下水水位不致持续下降,避免出现不良水文地质现象。本文采用折衷值决策法,取乐观系数 $\alpha=0.7$,其决策值为:

$$C_j = \alpha r^{\max}B_j + (1-\alpha)r^{\min}B_j \\ = \{-0.5582, -0.4165, -0.2397, -0.0820, 0.0330, 0.2398, 0.3385, 0.5505\}^T$$

在各降水事件中,求出 C_j 与 B_k 中元素的绝对最小距离 D_j 。

$$D_j = \{r^{\min} |C_j - B_k|\} \quad (8)$$

绝对距离最小者的降水事件与开采量的组合,为最佳决策局势 H_k^* ,最佳决策局势中的开采量即为最佳对策 Q^* ,最佳决策局势集为:

$$H_k^* = \{H_{17}, H_{25}, H_{33}, H_{43}, H_{55}, H_{61}, H_{71}, H_{82}\}^T \\ = \{(X_1, Q_7^*), (X_2, Q_5^*), (X_3, Q_3^*), (X_4, Q_3^*), (X_5, Q_5^*), (X_6, Q_1^*), (X_7, Q_1^*), (X_8, Q_2^*)\}^T \\ = \{(300, 140^*), (400, 100^*), (500, 60^*), (600, 60^*), (700, 100^*), (800, 20^*), (900, 20^*), (1000, 40^*)\}^T$$

从水位降速与降水量的线性关系中可知: $\hat{H}=0.0125X-8.7269$,当水位降速 $\hat{H}=0$ 时, $X=698.2\text{mm}$,这表明降水量小于 698.2mm 时,地下水水位会有所下降。从(2)式便知,年降水量为 700mm ,只有开采量在 $84 \times 10^4 \text{m}^3/\text{a} \cdot \text{km}^2$ 左右时,水位才处于稳定状态,这与长系列降水随机条件下开采量综合最佳决策的局势 $H_{55}^* = (X_5, Q_5^*) = (700, 100^*)$ 基本一致。存在微小差异的主要原因是:当年的地下水开采量与水位降速,除决定于当年降水量外,与上一年的降水量大小也存在一定的联系。

五、地下水开发管理的原则

山前倾斜平原区,一般工农业都比较发达,地下水开发利用程度很高,而地下水的补给来源主要是大气降水。在目前普遍略为超采的背景下,应适量减少地下水的开采量。从水位降速、降水量及开采量三者的客观实际分析,越是降水量小的年份,工农业对地下水的的需求量越大,而我们主观决策越希望尽量减少地下水的开采,防止地下水水位持续下降;愈是降水量大的年份,农业上对地下水的开采大幅度减小,地下水获得了大量入渗补给,我们愈希望适当开采地下水,特别是倾斜平原区的下游,地下水水位埋深浅,可能导致土壤盐渍化。从保护地质环境和促进地下水的良性循环角度,地下水水位过高或过低都潜在环境地质问题,这也是本文决策、管理的基本思路所在。

为合理开发和保护地下水资源,更好地发挥倾斜平原区地下水资源的经济、社会和环境效益,倾斜平原区的地下水,开发管理应遵循以下原则:

(一)科学用水原则。农业灌溉是倾斜平原区的开采大户(约占地下水开采总量的

70—80%)，农作物需水有生理和生态需水两部分组成，用于作物生长环节的生理需水量甚微，必须保障，大量的生态需水，主要消耗于蒸发、蒸腾，下渗和其它方式散失，这部分水节约的潜力很大。通过对灌溉方式、方法的改进，减少生态需水量，这对北方山前倾斜平原区有举足轻重的借鉴价值。工业上对耗水大户进行节水技术改造，推广应用先进的节水设备、节水工艺与方法，降低万元产值耗水指标，发展节水型工业，这也是缓解城市供水矛盾的一条途径。

(二)污水资源化原则。对工业废水经过分级处理，可用于环境、卫生用水。矿区供水采用双线供水，生活用水开采优质地下水，工业及环境卫生用水，采用矿坑排水。这不但避免二次污染，还可使污水成为城市用水的重要补充部分。

(三)引、渗相结合的原则。在有条件的地方可适当调引客水，补充局部地下水资源不足；对季节性河流，可建造拦河坝(闸)，拦蓄地表水，设立回灌工程，可增大地表水的利用量，且增加对地下水的回渗补给量，从环境意义上，兴建地下水库，比设置地表水库更优越，这不但地表占地面积小，而且可减少大量的水面蒸发。

(四)适度超采原则。浅层地下水贫乏时，可开采深层承压水，因承压水补给困难，应防止严重超采。开采浅层地下水，适度的超采，可减小潜水蒸发，增加降雨入渗补给量，减少地表迳流量，提高水资源的利用系数。如山东某井灌区地下水水位埋深较大，1986年日降水量186mm，没有产生迳流和涝灾，几乎全部降水量被土壤吸收，这说明浅层水适度超采，更有利于水土环境的良性循环。

主要参考文献

- (1)邓聚龙著，1988年，《灰色预测与决策》，华中理工大学出版社，第2版。
- (2)王永初编著，1986年，《预测学及其应用》，科学技术文献出版社重庆分社，第1版。

A Strategic Decision and Management for the exploitation of Groundwater in the Inclinet Plain Area ——Citing Jining Area as an Example

Song Yinsheng

(The Southm—Shandong Institute of Geological Enaineering and Prospecting)

Abstract

Based on the data of many year's monitoring, and auording to the hgdrogeological features of the slanting plain area, a regrsion equation describing the relationship of the falling rate of groundwater lereel with the atmospheric precipitation and the extraction rate of gnoundwater has feen set up; and the falling rate of groundwater level at various conclitions of the extraction rate and the atmospheric precipitation has feen porecastecl. Ln consideration of the condition of the protatinlity and guaranteed rate of the atmosphenic precipitation and the protatility of the extnaition rate of groumlwuter at diffenen precipitation, the falling rate of groundwater leuel has teen strategically decided in a random and comprehensively way. Aaorling to the optimistic coefficient in the unccertain dosision — making , the fest scheme of the extraction quantity of ground — water at different atmospheric precipitation has teen made, and the principles of groundwater exploitation and management are proposed.