

· 水文地质 ·

德州深层地下水降落漏斗 相关模型建立及其应用

王彦俊 刘桂仪

(山东地勘局第二水文地质工程地质大队)

提要 德州市深层地下水,由于长期大量开采,早已形成降落漏斗。作者从漏斗条件的实际出发,利用17年的地下水动态观测资料,在地下水资源均衡基础上,进行相关分析,建立了相关模型。利用相关模型直接进行不同开采条件下的地下水位预报和限定地下水位条件下的开采量计算。此外,还利用相关模型进行了含水层(组)弹性释水系数和漏斗补给量计算。

主题词 深层地下水 降落漏斗 相关模型 德州

0 引言

德州市开发利用深层地下水始于1965年,长期以来以开采200~500m深度地下水为主,因开采强度大、持续时间长,形成了深层地下水区域性大面积降落漏斗,即著名的德州深层地下水降落漏斗(以下简称德州漏斗)。

1 区域水文地质特征

德州漏斗地处于华北拗陷区内的黄骅-德州拗陷区,自新生代上新世以来,沉积了巨厚的上第三系明化镇组和第四系。

德州漏斗区800m深度内为松散岩层孔隙水。按地下水埋藏条件,可分为:浅层潜水(0~60m),中层承压咸水(60~200m),深层承压淡水(>200m)。依据地下水水化学特征和开采利用状况,可划分为6个含水层(组)。见表1。

德州漏斗开采层(组)就是第III、IV含水层(组)。含水砂层与弱透层交互呈层状、带状或透镜状分布。深层地下水含水层(组)严格受地层和古地理环境等影响和控制,天然水力坡度 $< 10^{-4}$,径流十分微弱。补给来源在开采条件下,主要是含水层(组)本身的弹性释放。人工开采是其主要排泄方式(图1)。

2 德州深层地下水降落漏斗特征

2.1 现状及发展变化

山东省地矿局第二水文地质工程地质大队,德州漏斗及德州市地面沉降观测研究报告,1994年。

· 山东省地矿局第二水文地质工程地质大队,德州市深层地下水降落漏斗观测阶段报告,1985年。

本文1997年7月收到,1998年1月改回,张天祯编辑。

表 1 德州漏斗区地下水含水层(组)划分表

Table 1 Water-bearing layers division in Dezhou funnel areas

含水层(组)	地下水分类	界面深度(m)	地层	含水砂层		单井出水量(m ³ /h)	注
				岩性	厚度(m)		
I	浅层潜水	0~ 60	全新统和更新统上部	粉砂 粉细砂	10~ 20	10~ 40	主要为农村生活和灌溉用水
II	中层承压咸水	60~ 200	更新统中、下部	粉细砂 细砂	20~ 30		基本未被开发利用
III	深层承压淡水	200~ 300	上第三系明化镇组	细砂 粉细砂	20~ 30	> 40	III、IV含水层(组)以混合开采为主,习惯上将III、IV含水层(组)作为统一含水层(组)对待,是其 主要开发利用层(组)
IV		300~ 420		细砂 中细砂	30~ 40	60±	
V		420~ 500		细砂 中细砂	20±	50±	是重要开发利用层(组)
VI		500~ 800				40~ 50	矿化度略高于上部

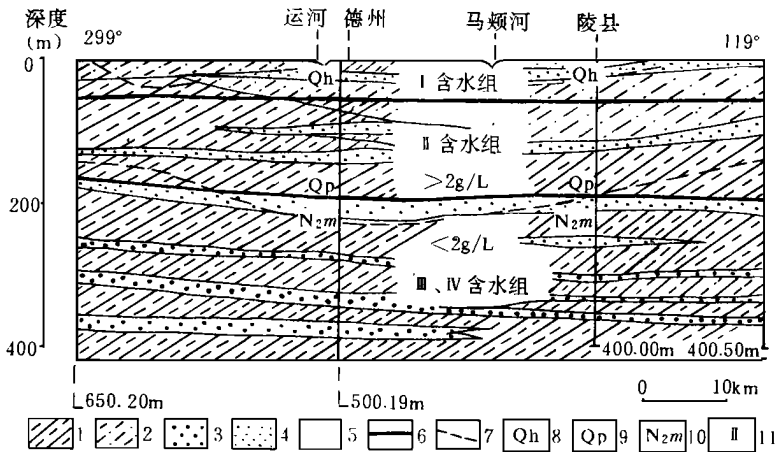


图 1 德州漏斗水文地质剖面略图

(据山东地勘局水文二队资料编绘)

Fig 1 Hydrogeologic profile of the funnels in Dezhou

- 1—粉质粘土; 2—粉土; 3—中细砂; 4—细砂; 5—粉砂; 6—含水组界线; 7—咸淡水界线; 8—全新统; 9—更新统; 10—上第三系明化镇组; 11—含水组编号(同表 1)

德州漏斗是一个以德城区市区为中心的区域性深层地下水降落漏斗。其范围包括德州市的德城区、武城、平原、陵县、宁津和河北省的吴桥、景县、故城诸县的部分地区。总面积 3000km²。目前整个漏斗中心地下水位埋深已降到 85.0m 以下,最低点水位埋深已达 92.0m (图 2)。

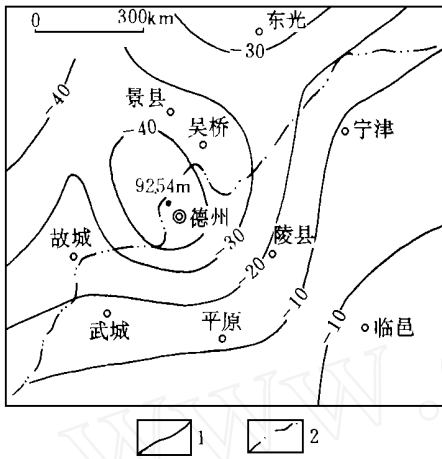


图2 德州漏斗现状图(1995)
(据山东地勘局水文二队资料编绘)

Fig. 2 Present View of Dezhou funnels
1—地下水等压线及标高(m); 2—省界;
92.54m 为漏斗中心最低水位

德州漏斗作为深层地下水降落漏斗, 开采以消耗不同形式的弹性储存量为主, 长期大量开采的结果, 使德州漏斗一直处于严重负均衡状态, 无论是漏斗中心区还是外围, 地下水下降远大于回升, 总体呈下降趋势。

2.2.2 地下水水质动态特征

自1978年始, 在德州市断续取样进行地下水水质观测的17年间, 按季度取样观测有6年。根据取样分析资料, 深层地下水水质, 无论是年动态还是多年动态基本稳定, 并没有明显地变化(图5)。

1965年前, 德州市深层地下水水位埋深为2.0m±。1970年前漏斗业已形成, 其后快速发展。近30年的时间, 水位降幅达90m(图3)。

德州漏斗地处衡水漏斗、沧州漏斗和临邑漏斗之间。德州漏斗、衡水漏斗和沧州漏斗形成早、规模大, 3个漏斗的规模和降速接近, 早在1980年就被0m等水压线所包围, 构成了大的区域降落漏斗。大的区域降落漏斗的最低封闭范围线, 到1995年已达-20m。

2.2 漏斗中心区地下水动态特征

2.2.1 地下水位动态特征

德州漏斗中心区地下水位动态类型属于连续开采消耗型, 地下水位动态主要受市区开采的影响, 年内地下水位回升的速率和幅度远小于下降的速率和幅度, 有些回升并不明显, 表现为: 每年3~7月为下降期, 8~11月为相对稳定期, 12月~翌年2月为回升期(图4)。

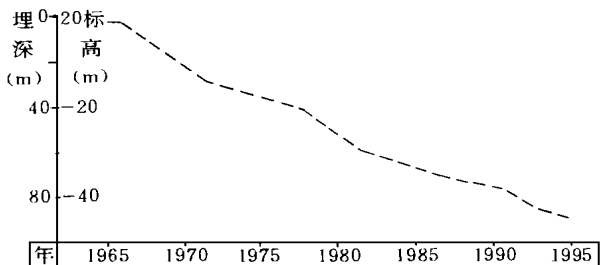


图3 德州III、IV含水层(组)地下水位动态变化曲线图
(据山东地勘局水文二队资料编绘)

Fig. 3 Dynamic variation curve of the underground water levels of III and IV water-bearing layers in Dezhou

3 德州深层地下水降落漏斗相关模型建立及应用

3.1 地下水资源均衡分析

德州漏斗地下水属于深层承压地下水, 对于深层承压地下水, 它来源于远处的含水层

水电部十三局, 德州市水文地质调查报告, 1973年。

· 山东地勘局第二水文地质工程地质大队, 德州漏斗及德州市地面沉降观测研究报告, 1994年。

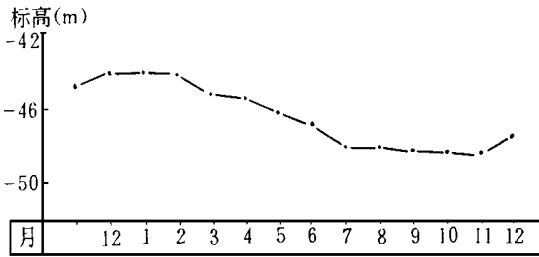


图 4 德州漏斗中心区地下水位年动态变化曲线图(1994~ 1995)
(据德观5. 1孔资料)

Fig 4 Annually dynamic variation curve of the underground water levels in Dezhou funnel central areas

此, 德州漏斗地下水资源均衡方程为:

$$Q_{开} = Q_{侧} + Q_{弹} + Q_{越} \dots \dots \dots (1)$$

根据地下水动态分析, 上部第 II 含水层(组)与德州漏斗开采含水层(组) (III、IV 组) 相比, 地下水位高 35m , 地下水矿化度高出十多倍, 但漏斗含水层(组) 多年地下水水质动态平稳, 并没有上升趋势, 说明没有明显地越流发生。下部第 V 含水层(组) 与德州漏斗开采含水层(组) (III、IV) 相比, 地下水位高出仅 15m ±, 各含水层间又有厚层的弱透层存在, 根据第 II 含水层(组) 动态分析, 第 V 含水层(组) 是否达到越流临界水头尚难确定, 但即使有越流存在, 其量也不会大。因此, 越流在德州漏斗地下水资源均衡中, 可以忽略不计。

为此, 德州漏斗地下水资源均衡方程(1) 式可以简化为:

$$Q_{开} = Q_{侧} + Q_{弹} \dots \dots \dots (2)$$

3.2 相关模型建立

德州漏斗是一个非稳定的开采降落漏斗, 是多种因素综合影响的结果。所以, 在进行相关分析时, 应综合考虑各种影响因素, 根据地下水资源均衡分析, 找出影响地下水动态的主要因素, 进而建立相关模型。

由地下水资源均衡方程(2) 式, 可以得到德州漏斗中心区(德城区市区), 在开采条件下, 在均衡时段($t_2 - t_1$) 内的地下水资源均衡方程式:

裸露区, 也有的来自一定地质历史时期形成的地下水等。总之, 补给和天然径流十分微弱, 其开采量($Q_{开}$) 主要是含水层(组) 本身的弹性释放。这个弹性释放, 对于德州漏斗可分为两部分: 其一是均衡区内含水层(组) 的弹性释放, 其二是均衡区外含水层(组) 的弹性释放, 以侧向径流方式进入均衡区, 称为侧向径流量。

其补给项有: 均衡区外的侧向径流量($Q_{侧}$)。均衡区内由于压力水头降低而产生的弹性释放量($Q_{弹}$)。上、下含水层(组) 越流补给量($Q_{越}$) (图 6)。因

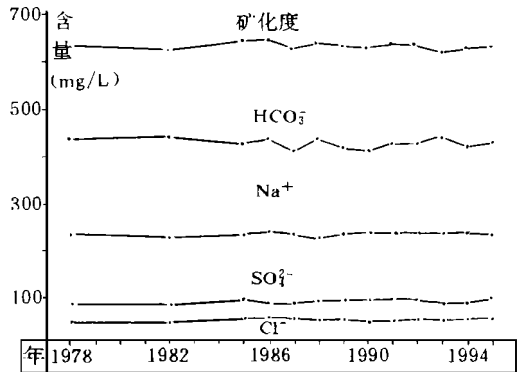


图 5 III、IV 含水层(组) 地下水水质动态曲线图
(据山东地勘局水文二队资料编绘)

Fig 5 Dynamic curve of the underground water quality in III、IV water-bearing layers

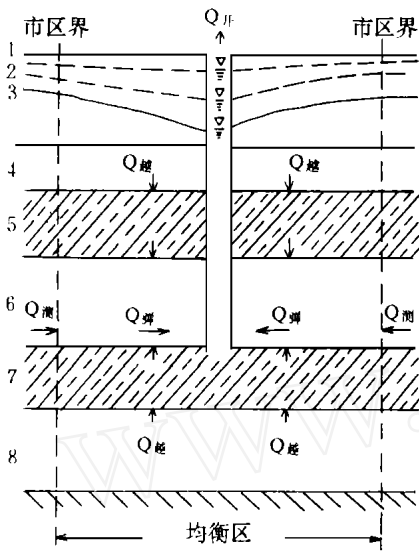


图6 德州漏斗均衡区深层地下水补排关系示意图

(据山东地勘局水文二队, 1994)

Fig 6 Recharge and discharge relations of deep underground water in the funnel equilibrium area in Dezhou

1—II 含水层地下水等压线; 2—V 含水层地下水等压线; 3—III、IV 含水层地下水等压线; 4—II 含水层; 5—弱透层; 6—III、IV 含水层; 7—弱透层; 8—V 含水层。含水层编号同表 1

均衡时段初始水位埋深(H_1)为自变量,以均衡时段末刻水位埋深(H_2)为因变量,建立在开采条件下德州漏斗中心区相关分析数学模型。根据实际资料分析试算,其模型为:

$$H_2 = a \cdot Q^b \cdot H_1^c \dots \dots \dots (5)$$

两边取对数: $\lg H_2 = \lg a + b \cdot \lg Q + C \cdot \lg H_1$, 令 $a = \lg a$, 则:

$$\lg H_2 = a + b \cdot \lg Q + C \cdot \lg H_1 \dots \dots \dots (6)$$

式中: a, b, c —待定系数。

选取 1978 年 12 月—1991 年 12 月的德州漏斗中心区地下水位动态资料,作为相关分析样品,并约定时段长度为 1 年,即 13 个相关分析样品,进行相关分析初算,计算数据见表 2。

经计算, (6) 式中: $a = -1.16238$; $b = 0.17778$; $c = 0.94599$ 。即:

$$\lg H_2 = -1.16238 + 0.17778 \lg Q + 0.94599 \lg H_1 \dots \dots \dots (7)$$

其中: 相关系数 $r = 0.9961$, 标准偏差 $\sigma_{\lg H_2} = 0.004488$, $\sigma_{H_2} = 1.01$ (m)。

$$Q_{开} = \int_1^2 K \cdot M \cdot B \cdot I \cdot dt + U_e \cdot F \cdot (H_2 - H_1) \dots \dots \dots (3)$$

式中: t —均衡时间; K —渗透系数; M —含水层砂层厚度; B —过水断面宽度; I —水力坡度; U_e —弹性释水系数; F —均衡水面积; H_1 —均衡时段初始水位埋深; H_2 —均衡时段末刻水位埋深。

在 (3) 式中, 含水层砂层厚度 (M)、过水断面宽度 (B) 和均衡区面积 (F) 为常量。在漏斗条件变化不剧烈地情况下, 渗透系数 (K) 和弹性释水系数 (U_e) 均要看作常数。则 (3) 式可以变为:

$$Q_{开} = K \cdot M \cdot B \int_1^2 I \cdot dt + U_e \cdot F \cdot (H_2 - H_1) \dots \dots \dots (4)$$

水力坡度 (I) 是与漏斗边缘水位和中心水位有关的量, 特别是漏斗中心水位, 较边缘水位变化大, 是影响水力坡度的主要因素。而均衡时段初始水位埋深 (H_1) 和末刻水位埋深 (H_2), 是漏斗不同时刻的中心水位。

综上所述, 在所有影响德州漏斗中心地下水位动态的因素中, 其主要因素是: 均衡区开采量 ($Q_{开}$)、均衡时段初始水位埋深 (H_1) 和均衡时段末刻水位埋深 (H_2)。因此, 以德城区开采量 (Q) 和

表 2 德州漏斗中心区相关分析原始数据表

Table 2 Original data of correlation analysis from the central area of Dezhou funnel

序号	时段(年. 月—年. 月)	初始水位埋深(H_1) (m)	末刻水位埋深(H_2) (m)	地下水开采量(m^3)
1	1978 12~ 1979 12	42.34	47.86	20440000
2	1979 12~ 1980 12	47.86	52.79	20440000
3	1980 12~ 1981 12	52.79	57.68	18250000
4	1981 12~ 1982 12	57.68	60.00	15512500
5	1982 12~ 1983 12	60.00	62.45	15328349
6	1983 12~ 1984 12	62.45	63.91	14452630
7	1984 12~ 1985 12	63.91	66.89	14584379
8	1985 12~ 1986 12	66.89	69.75	15472725
9	1986 12~ 1987 12	69.75	71.35	15611929
10	1987 12~ 1988 12	71.35	73.56	14544967
11	1988 12~ 1989 12	73.56	74.54	14332936
12	1989 12~ 1990 12	74.54	76.53	14482856
13	1990 12~ 1991 12	76.53	79.26	14716584
14	1991 12~ 1992 12	79.26	84.22	17500000
15	1992 12~ 1993 12	84.22	86.89	16000000
16	1993 12~ 1994 12	86.89	87.86	14500000
17	1994 12~ 1995 12	87.86	92.54	17000000

利用 1991 年 12 月~ 1995 年 12 月 4 年的德州漏斗中心区地下水动态资料, 对模型 (7) 进行验证, 计算水位比实测水位略高, 误差 $1.0m \pm$, 平均误差率 0.8%。可见, 预测精度较高, 结果基本接近实际。(表 3)

表 3 德州漏斗中心区相关分析验证表

Table 3 Examination of the correlation analysis of the central areas in Dezhou funnels

序号	时间(年. 月)	时段开采量(m^3)	计算水位埋深(m)	实测水位埋深(m)	误差(m)	误差率(%)
1	1992 12	17500000	83.52	84.22	- 0.70	0.8
2	1993 12	16000000	86.37	86.89	- 0.52	0.6
3	1994 12	14500000	87.60	87.86	- 0.26	0.3
4	1995 12	17000000	91.34	92.54	- 1.20	1.3

因此, 再利用后 4 年地下水动态资料, 总共 17 个相关分析样品系列, 对模型 (7) 进行调整, 最终建立德州漏斗中心区地下水相关模型为:

$$\lg H_2 = -1.308 + 0.1956 \lg Q + 0.9556 \lg H_1 \dots \dots (8)$$

模型(8)经验证, 拟合良好, (图7)相关密切。相关系数 $\gamma = 0.9976$, 经显著性水平检验, $\gamma > 0.77$, 则 γ 在 $\alpha = 0.01$ 水平上显著, 可信度达 99%。标准偏差 $\sigma_{\lg H_2} = 0.0059$, $\sigma_{H_2} = 1.014(m)$ 。

3.3 相关模型应用

德州漏斗相关模型的直接应用是进行水位预测和开采量计算。预测在不同开采方案条件下的地下水动态变化, 计算限定地下水位条件下的开采量。进而为地下水资源规划和管理服务。德州漏斗相关模型始建于 1992 年, 即模型(7)。如上所述, 经实际资料验证, 4 年水位预测误差仅 1.2m, 因此, 模型基本反映了漏斗实际, 加之又经过后 4 年的补充调整, 可靠性更好, 具有很强的实用性。

此外, 还可利用相关模型进行漏斗补给量 ($Q_{补}$) 和含水层(组)弹性释水系数 (U_e) 计算。

漏斗补给量 ($Q_{补}$) 计算可经过变换模型(8)得出 $\lg Q_{补} = (\lg H_2 - 0.9556 \lg H_1 + 1.308) / 0.1956$ 。当水位不变 ($H_2 = H_1$) 时, 开采量 (Q) 即为该水位条件下的漏斗补给量 ($Q_{补}$)。即:

$$\lg Q_{补} = 0.227 \lg H + 6.687 \dots \dots (9)$$

式中: H — 为水位不变时的地下水埋深。

经计算, 德州漏斗目前水位埋深条件 (92.54m) 下的补给量为 $13.59 Mm^3/a$ 。

含水层(组)弹性释水系数 (U_e) 计算:

$$U_e = \Delta Q / (\Delta H \cdot S) \dots \dots (10)$$

式中: ΔQ — 一年水量均衡差 $\Delta Q = Q - Q_{补}$; ΔH — 地下水位年降幅, $\Delta H = H_2 - H_1$; S — 计算区面积。

利用 1978 年 12 月~ 1995 年 12 月共 17 年的德州漏斗地下水动态资料和(10)式, 逐年求解, 取其平均值作为德州漏斗开采层(组) (III、IV组)弹性释水系数求解值, 其值为 0.00282。与《鲁北平原地下水资源综合评价报告》的计算值 0.00287 十分接近, 从而表明了计算方法的可行性。

4 结 语

德州漏斗含水层(组)砂层薄, 岩相变化大, 并且由于它所处的区域位置, 决定了其水文地质条件和边界条件的复杂性。同时, 德州漏斗虽然进行了长期观测工作, 但缺乏求参试验工作。因此, 给水文地质计算和资源评价造成了很大困难。作者从德州漏斗条件的实际出发, 在地下水资源均衡的基础上进行了相关分析, 所建立的相关模型, 依据充分, 简明

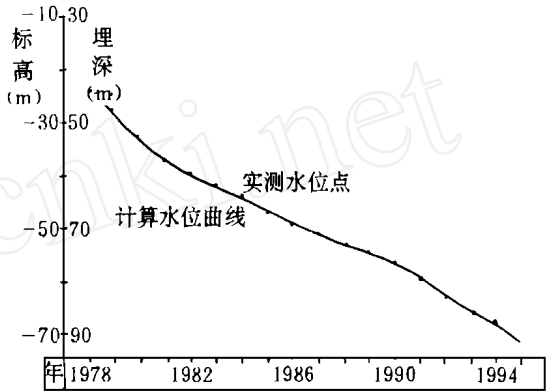


图7 德州漏斗相关分析拟合曲线图
Fig 7 Fitting curve of correlation analysis of Dezhou funnels

可靠, 可以作为德城区地下水资源管理和规划的依据, 也是城市老水源地地下水水文地质计算和资源评价的切实可行的方法。

参 考 文 献

(略)

CORRELATION MODEL'S ESTABLISHMENT AND ITS APPLICATION IN DEZHOU FUNNEL OF INTERNAL UNDERGROUND WATER

Wang Yanjun and Liu Guiyi

(Lubei Geological Engineering Institute)

Abstract

Due to long time over-development, a falling funnel has been formed in the internal underground water in Dezhou city, which is called Dezhou funnel. On the basis of underground water source equilibrium, correlation analysis has been carried out and the correlation model has been established by 17 year's dynamic monitoring data. Underground water levels under different developing conditions can be predicted, and the developing amount under a limited underground water level condition can be calculated. Besides, elastic storage coefficient of the water-bearing layers (formations) and recharge amount of the funnel can be also calculated by the model.

Key words: deep underground water, falling funnel, correlation model, Dezhou