

控制地面沉降条件下天津深层地下水资源持续利用

王家兵,王亚斌,张海涛

(天津市地质调查研究院,天津 300191)

摘要: 天津平原大强度开采深层地下水引发严重的地面沉降。根据地下水位和地面沉降监测结果分析,第四系中更新统和下更新统是深层地下水持续利用的最佳层位。当水位埋深控制在 35~40m,引发的地面沉降量小于 10mm/a,深层地下水开采资源为 $26\,755 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{a}$,平均资源模数为 $2.90 \times 10^4 \text{ m}^3/(\text{a} \cdot \text{km}^2)$ 。与 1991~2000 年平均开采量相比,资源量减少了 43.1%,而地面沉降量可以减少 68.3%。长期大强度开采深层地下水提高了粘性土的固结程度。保持历史开采层位,稳定开采量,使水位稳定在地面沉降临界水位附近,是深层地下水资源持续利用,控制地面沉降的有效措施。

关键词: 深层地下水;持续利用;控制地面沉降

中图分类号: P642.6;P641.8

文献标识码: A

文章编号: 1000-3665(2007)04-0074-05

在平原区或大型盆地地下水往往是重要的供水水源,大强度开采地下水,特别是深层地下水,产生大幅度水位下降,容易引发地面沉降,造成一系列地质灾害^[1]。如何正确处理地下水资源合理开发利用与控制地面沉降的关系成为重要的研究课题。本文以天津平原地面沉降条件下深层地下水资源组成为线索,认识深层地下水开采与地面沉降的关系,选择深层地下水最佳开采层位,分析地面沉降临界水位,计算深层地下水持续利用资源量。

1 深层地下水开采利用与地面沉降概况

天津平原新近系和第四系发育,是一套以河流相为主,夹海相层的砂、泥质松散、半松散沉积。以沉积物特征为基础,以水文地质条件为依据,以地下水资源合理开发利用为目的,将地下水开采深度内的松散层自上而下划分为 5 个含水层组。第 1 含水层组大致相当于第四系全新统和上更新统,底界埋深 60~80m;第 2 含水层组大致相当于第四系中更新统,底界埋深 176~191m;第 3 含水层组大致相当于第四系下更新统,底界埋深一般 250~280m;第 4 含水层组底界埋深一般 370~430m,在凹陷区大致相当于第四系下更新统,在隆起区为新近系明化镇组顶部;第 5 含水层组底界埋深一般在 550m 左右,属新近系明化镇组上段。由于受晚更新世和全新世海侵的影响,第四系上部赋存地

下咸水。深层地下水主要是指分布在第 2 含水层组及下各含水层组的地下淡水,是工农业生产和生活用水的重要水源。

自 1958 年以后,随着天津工农业生产的发展和城市建设规模的扩大,对地下水的开采量逐渐增加,1967 年达到 $7 \times 10^8 \text{ m}^3/\text{a}$,1981 年达到了天津市历史上开采地下水的高峰,为 $10.38 \times 10^8 \text{ m}^3/\text{a}$ 。1983 年 9 月“引滦入津”工程通水后,缓解了天津市工业和生活用水的紧张局面。1986 年开始在天津市区和塘沽城区压缩深层地下水开采量。1991 年以后,地下水开采量基本控制在 $7.12 \times 10^8 \text{ m}^3/\text{a}$ 左右。其中,深层地下水开采量为 $4.70 \times 10^8 \text{ m}^3/\text{a}$,平均开采强度为 $5.1 \times 10^4 \text{ m}^3/(\text{km}^2 \cdot \text{a})$ 。

随着深层地下水开采量的增加和水位下降,引发地面沉降。根据 1967 年以来区域水准测量资料统计,深层地下水开采区均有不同程度的地面沉降。累计沉降量超过 1000mm 的面积达 4087km²,占深层地下水分布面积的 44%。1959 年以后,沉降中心的累计沉降量天津市区为 2.882m,塘沽城区为 3.182m,汉沽城区为 2.98m;大港沉降区 1964 年以后累计沉降量为 1.01m。自 1986 年开始实施控制地面沉降计划,压缩地下水开采量。市区、塘沽城区的地面沉降已基本得到控制,而其它地区仍然比较严重。

2 控制地面沉降条件下深层地下水开采层位选择

2.1 深层地下水开采与地面沉降的关系

2004 年作者在研究天津平原开采条件下深层地下水资源组成时,认为深层地下水开采量主要由 4 部分组成,一是浅层第 1 含水层组地下水通过粘性土半

收稿日期: 2006-09-28; **修订日期:** 2006-12-12

基金项目: 中国地质调查局项目(200310400003)

作者简介: 王家兵(1960-),男,教授级高级工程师,博士,主要从事水文地质、环境地质调查与研究。

E-mail: tjdd7115@sina.com

隔水层向深层地下水越流补给量;二是粘性土压密释水量;三是水位下降引起含水层弹性释水量;四是外围补给区或开采强度较小的地段向开采强度较大地段的侧向迳流补给量。并根据高精度地面水准测量和分层标观测地层变形资料,以及野外获得的大量水文地质参数资料,以1991~2000年10年为均衡期,对9218km²深层地下水分布区进行了水量均衡计算(表1),分析了各组分所占的比例^[2]。

表1 1991~2000年开采条件下深层地下水
水量均衡计算结果(单位:×10⁴m³/a)

Table 1 Calculation of deep groundwater resources by using
water balance method under the condition of
pumping during 1991-2000 (×10⁴m³/a)

含水层组	计算开采量组分				合计	实地调查 开采量	均衡差
	越流补 给量	粘性土 释水量	弹性 释水量	侧向 流入量			
2		5 775	495	2 142		17 158	
3		4 523	857	1 933		16 164	
4		3 719	509	1 351		6 800	
5及以深		5 917	842	1 741		6 889	
合计	18 404	19 934	2 703	7 167	48 208	47 011	1 197

由表1进一步分析还发现,各含水层组粘性土压密释水量占地下水开采量的比例存在很大的差异,第2含水层组为33.65%,第3含水层组为27.98%,第4含水层组为54.68%,第5及以深含水层组为85.89%,有由上而下明显变高的特点。虽然第2、3含水层组地下水开采量明显大于第4、5含水层组,但第2、3含水层组粘性土压密引起的地面沉降比第4、5及以深含水层组明显小。

2004年在市区西郊分层标C6号孔采集了550m以浅的粘性土样品进行了高压固结试验。试验选用材料试验机加压,BK-2型精密传感器指示应力,不锈钢材料参照常用固结装置制作样品容器。埋深300m以浅的样品,施加荷载应力等级为0.2、0.4、0.8、1.6、3.2、6.4、12.8MPa,以深样品增加25.0、38.0MPa等级。每个应力等级稳定24h或12h。试验结果绘制成e-logP曲线,用卡萨格兰德法求得粘性土的前期固结压力值 P_c (图1)。

图中近似斜直线为地层自重压力,曲线为粘性土的前期固结压力。埋深170m以浅,地下水几乎不开采,粘性土前期固结压力 P_c 值基本在地层自重压力线两侧附近摆动,表明粘性土属于正常固结状态;埋深170m以深,是地下水的主要开采层位,其中埋深170~

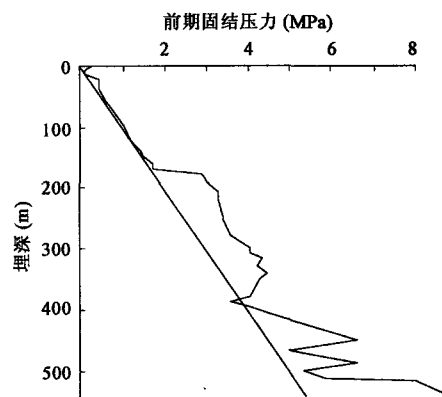


图1 C6孔粘性土前期固结压力曲线

Fig.1 Pre-consolidation pressure of the cohesive
clays in well C6

393m,粘性土前期固结压力 P_c 值普遍明显大于自重压力,表明粘性土属超固结状态;393m以深,粘性土前期固结压力 P_c 值波动较大,表明还存在多层微超固结或正常固结的粘性土。

由此可见,第四系第2、3含水层组埋藏较浅,地下水较容易接受浅层地下水的越流补给,地下水开采形成的水位降低较小,相应的引起的地层附加应力小;又由于第2、3含水层组地下水开采时间最长、强度最大、粘性土含砂量多、渗透性好,粘性土固结程度容易提高。因此,开采第2、3含水层组地下水比开采第4、5及以深含水层组地下水引起的地面沉降小。第四系第2、3含水层组是今后控制地面沉降条件下深层地下水开采的最佳层位。

2.2 第四系第2、3含水层组地面沉降临界水位

地面沉降临界水位是指不引起地面沉降或不引起明显地面沉降的最低地下水位值^[3]。理论上讲,对于超固结粘性土,当水位下降引起的粘性土附加荷载不超过前期超固结压力值,就不会引起明显的地面沉降。但由于粘性土结构和固结过程的复杂性,当水位下降引起的附加荷载小于粘性土前期超固结压力时,地下水开采还会引起较大的地面沉降。如西郊分层标2004年测试第2含水层组下部粘性土前期超固结压力为1.12~1.17MPa,相当于水位下降到-110m引起的附加荷载才接近粘性土前期超固结压力,实际2005年平均水位为-31.8m,引起的地面沉降量为6.15mm。因此,以下根据地下水位和地面沉降监测结果,了解第2、3含水层组地面沉降临界水位。

(1)市区第2、3含水层组地面沉降临界水位

自 1986 年天津市为了控制地面沉降,压缩深层地下水开采量,第 2、3 含水层组地下水位缓慢回升(图 2),地面沉降也逐渐减少。利用地面沉降监测分层标监测结果建立第 2、3 含水层组水位和地面沉降回归方程:

$$y = \beta_1 x_1 + \beta_2 x_2 + \beta_3 x_3 + \varepsilon$$

式中: y ——含水层组粘性土年压缩量(mm/a),压缩取“-”值,回弹取“+”;

x_1 ——含水层组年平均水位标高(m);

x_2 ——含水层组年平均水位上升值(m);

x_3 ——含水层组年水位波动值(m);

β_1 、 β_2 、 β_3 、 ε ——回归方程系数。

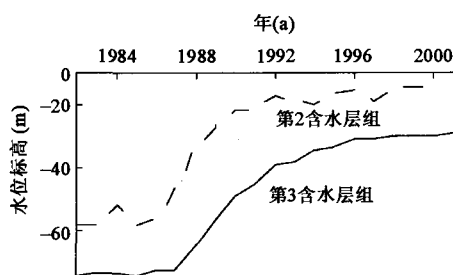


图 2 第 2、3 含水层组水位历时曲线

Fig.2 Curves of groundwater-level regime in the second and third aquifer groups

表 2 是回归方程的有关参数。方程的复相关系数 $R \geq 0.9$, 利用方程计算的沉降值与实测值变化趋势一

表 2 地下水位与地面沉降回归参数

Table 2 Value of the regression coefficient of land subsidence vs groundwater level

项目	含水层组	
	2	3
观测时间	1983 ~ 2001	1982 ~ 2001
数据		
观测组数	19	20
年平均水位上升值(m)	2.4	1.76
年平均水位波动值(m)	8.2	7.6
方程参数		
β_1	0.228 8	0.358 6
β_2	1.275 9	0.688
β_3	-0.487	0.076 1
ε	7.374 1	7.404 3
复相关系数 R	0.90	0.95
0 沉降时	-14.8	-20.6
3mm/a 沉降时	-27.9	-29
5mm/a 沉降时	-36.6	-34.6
10mm/a 沉降时	-58.5	-48.5

致(图 3、4),说明地面沉降与上述因素具有较好的相关关系。方程中年平均水位标高变量的系数 β_1 为正号,反映水位升高,地面沉降变缓;年平均水位上升值变量的系数 β_2 为正号,反映水位上升过程中砂层回弹,水位上升越大,回弹越大;第 2 含水层组水位波动值变量的系数 β_3 为负号且数值较大,反映夏季与冬季用水量的差异造成的水位波动引起一定量的地面沉降;第 3 含水层组水位波动值变量的系数 β_3 较小,反映目前的水位波动对地面沉降影响不大,正号应视为计算误差。假设年平均水位基本稳定,年水位波动为多年平均值,计算第 2 含水层组和第 3 含水层组分别引起地面沉降为 3mm/a 时的水位标高分别为 -27.9m 和 -29.0m,相当于水位埋深分别为 30m 和 41m 左右;引起的地面沉降值分别为 5mm/a 时的水位标高分别为 -36.6m 和 -34.6m,相当于埋深分别为 38.6m 和 36.6m。

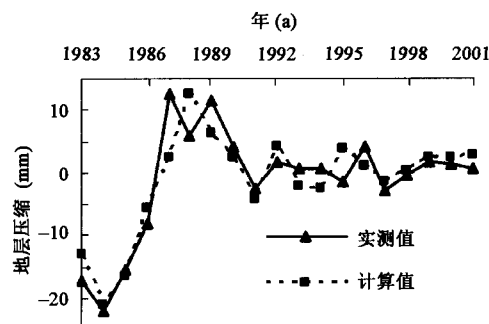


图 3 第 2 含水层组压缩计算值与实测值对比曲线

Fig.3 Simulating and monitoring condensation in the second aquifer groups

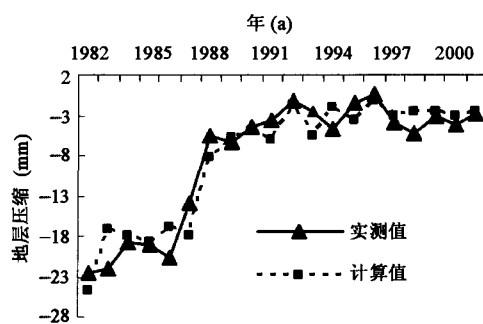


图 4 第 3 含水层组压缩计算值与实测值对比曲线

Fig.4 Simulating and monitoring condensation in the third aquifer groups

(2)其它地段第 2、3 含水层组地面沉降临界水位

天津东部沿海塘沽、大港、汉沽三个城区和塘沽与市区之间的海河下游工业区地面标高一般在2~3m,地面高程资源宝贵,都设有监测地面沉降的分层标。

塘沽城区自1987年开始逐渐压缩地下水开采量,水位波动性恢复,地面沉降逐渐减小。第2含水层组水位标高由-57m左右开始回升,到1991年水位恢复到-46m,基本上不引起地面沉降。1992年以后水位继续回升,到1997年水位恢复到-34m,6年平均引起的地面沉降量小于1mm。第3含水层组水位标高由-63m左右开始回升,到1995年水位恢复到-48m,基本上不引起地面沉降。到1999年水位恢复到-35m,1995~1999年5年平均引起的地面沉降量为1.5mm。

大港城区由于第2含水层组水质差,地下水开采量很少,第3及以下含水层组是地下水的主要开采层位。第3含水层组1998~2004年平均水位标高在-42m左右,引起的地面沉降量平均值为5.8mm/a。第4、5含水层组水位标高-85m左右,引起的地面沉降量为10.2mm/a。

海河下游工业区第2含水层组1997~2001年水位标高在-41~-47m之间,平均-44.8m,引起的地面沉降量为3.2mm/a。

根据上述分析和地面沉降监测可以看出,第2含水层组水位控制在埋深35~40m,引起的地面沉降一般在1~3mm/a;第3含水层组水位控制在埋深45m左右,引起的地面沉降一般在5mm/a左右。此外,由深部含水层组地下水开采引起第1含水层组水位下降而引起的地面沉降一般在1~2mm/a。也就是说,只要第2、3含水层组水位控制在上述深度,地面沉降一般不会大于10mm/a。

3 控制地面沉降条件下深层地下水资源量

3.1 深层地下水资源计算方法

天津平原在超量开采深层地下水时,深层地下水开采量主要由浅层对深层地下水的越流、粘土性压密释水量、含水层弹性释水量、侧向流入量4部分资源组成。在控制地下水水位相对稳定的情况下,含水层的弹性释水(或储水)量基本为零,深层地下水的资源主要由其它3部分组成。

侧向流入(出)量还是根据含水层厚度、岩性、抽水试验求得的渗透系数、控制水位等资料采用断面法用达西公式计算。

粘性土压密释水量用第2、3含水层组控制水位对应的地面沉降量代替。在市区、塘沽城区、汉沽城区不

开采或少量开采地下水,基本不引起地面沉降,粘性土压缩释水量为零。在其它地段,第2含水层组水位控制在35~40m,引起的地面沉降量为2mm/a左右,第3含水层组水位控制在45m左右,引起的地面沉降量为5mm/a左右,由第2、3含水层组地下水开采引起第1含水层组水位下降而引起的地面沉降一般在1.5mm/a左右。相当于开采第2、3含水层组地下水引起的粘性压密释水平均模数为 $0.85 \times 10^4 \text{ m}^3/(\text{a} \cdot \text{km}^2)$ 。

浅层地下水对深层地下水的越流补给量是深层地下水资源的主体,仍然使用越流模数法估算。越流模数的大小同第1含水层组与第2含水层组的水位之差有关。第1含水层组水位可以认为不变,第2含水层组在控制地面沉降小于2mm/a时的最低水位埋深与2004年均衡计算时相比,在市区西郊、武清、静海和汉沽都由50~60m上升到40m左右,其它地段变化较小。鉴于第2含水层组目前水位与控制水位变化不大,可以认为第1含水层组地下水向第2含水层组的越流量与水力梯度之间的关系为线性。因此控制水位的越流模数可以用下式计算:

$$\alpha_{\text{控}} = \frac{I_{\text{控}}}{I_{\text{均衡}}} \alpha_{\text{均衡}}$$

式中: $\alpha_{\text{控}}$ ——控制水位时第1、2含水层组之间的越流模数($\times 10^4 \text{ m}^3/(\text{a} \cdot \text{km}^2)$);

$I_{\text{控}}$ ——控制水位时第1、2含水层组之间的水力梯度;

$I_{\text{均衡}}$ ——1990~2000年深层地下水开采量均衡计算时第1、2含水层组之间的水力梯度;

$\alpha_{\text{均衡}}$ ——1990~2000年深层地下水开采量均衡计算时第1、2含水层组之间的越流模数($\times 10^4 \text{ m}^3/(\text{a} \cdot \text{km}^2)$)。

3.2 深层地下水资源量

最终计算,在海岸带、市区不开采或少量开采深层地下水基本不引起地面沉降,在其它地段引起的地面沉降小于10mm/a时,第2、3含水层组地下水的总开采资源为 $26755 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{a}$,平均资源模数为 $2.9 \times 10^4 \text{ m}^3/(\text{a} \cdot \text{km}^2)$ 。与1991~2000年深层地下水实地开采量相比(表3),总资源量减少了43.1%。其中,浅层地下水对深层地下水的越流补给量基本不变;水位稳定,含水层弹性释水为零;侧向迳流量西部由原来的流入变为流出,资源量减少;最主要的是占总资源量比例较大的粘性土压密释水量减少了68.5%,相当于地面沉降减少了68.5%。

表 3 深层地下水控制水位前后资源组成

对比表(单位: $\times 10^4 \text{ m}^3/\text{a}$)Table 3 Contrast of deep groundwater resources between before and after a controlling water level ($\times 10^4 \text{ m}^3/\text{a}$)

项目	越流 补给量	粘性土 释水量	侧向 流入量	弹性 释水量	合计
1991~2000 年开采资源量	18 404	19 934	7 167	2 703	48 208
控制水位后资源量	18 664	6 284	1 950	0	26 755
控制水位资源减少量	-260	13 650	5 217	2 703	20 257
减少量占控制前的比例(%)	-1.4	68.5	72.8	100	43.1
备注	计算 1991~2000 年资源组分之和为 48 $208 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{a}$ 比实际开采量 47 012 \times $10^4 \text{ m}^3/\text{a}$ 少 1 197 $\times 10^4 \text{ m}^3/\text{a}$, 应视为计算 误差。				

4 结论

(1)天津平原长期大强度开采第 2、3 含水层组地下水,提高了粘性土固结程度。保持历史开采层位,稳定开采量,使地下水水位控制在地面沉降临界水位附

近,是深层地下水资源持续利用,控制地面沉降的有效措施。

(2)在天津市区、海岸带不开采或少量开采深层地下水基本不引起地面沉降,在其它地段开采地下水引起的地面沉降小于 10mm/a 时,深层地下水的总开采资源为 $26\,755 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{a}$,平均资源模数为 $2.9 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{a} \cdot \text{km}^2$,与 1999~2000 年平均开采量相比,总资源量减少了 43.1%,地面沉降量可以减少 68.3%。

参考文献:

- [1] 陈梦熊.中国水文地质环境地质问题研究[M].北京:地震出版社,1998:332-334.
- [2] 王家兵,李平.天津平原地面沉降条件下的深层地下水资源组成[J].水文地质工程地质,2004,31(5):35-37.
- [3] 吴铁钧,崔小东,牛修俊,等.天津市地面沉降研究及综合治理[J].水文地质工程地质,1998,25(5):17-20.

Sustainable development of the deep groundwater resources under the condition of controlling land subsidence in Tianjin

WANG Jia-bing, WANG Ya-bin, ZHANG Hai-tao

(Tianjin Geological Survey Insititue, Tianjin 300191, China)

Abstract: Severe land subsidence has happened in the Tianjin plain owing to intensive exploitation of deep groundwater in the deep aquifers. On the basis of the monitoring results of groundwater levels and land subsidence, aquifers of the Middle and Lower Pleistocene Series are the best layers for exploitation of the deep groundwater. While water levels are controlled at the depth of 35 to 40 m, the rate of the consequent total land subsidence will be below 10 mm/a. The total exploitable resources of groundwater in the deep-buried aquifers is $26\,755 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{a}$ and average resources modulus is $2.9 \times 10^4 \text{ m}^3/(\text{a} \cdot \text{km}^2)$. Compared with the yield from the deep-buried aquifers during the years 1991-2000, the total groundwater resources will reduce to the proportion of 44.5%, while land subsidence will reduce by 68.3%. The consolidation rate of cohesive clays will rise after a long intensive pumping. The effective measures to keep groundwater pumping sustainable and to control land subsidence include pumping with a stable rate in historical exploitation layers and keeping water levels around the land subsidence critical level.

Key words: deep groundwater; sustainable development; control of land subsidence

编辑:吴霞芬