

抽水井附近地下水流运动特征

高宗军

(山东科技大学 地球科学与工程学院, 山东 青岛 266590)

摘要:利用自主设计建造的三维抽水试验装置,完成了多项潜水及承压水的抽水试验,获得了大量观测数据。试验发现:无论潜水还是承压水状态,抽水井附近观测井的水位变化,均具有距抽水井愈远愈高、愈近愈低的漏斗状分布,围绕抽水井的地下水位降落漏斗是显著的;但同时也出现了新的情况,即每个观测井不同高度观测点的水位,均呈上高下低的特征,说明地下水具有由上到下的运动分量,地下水由周边的供水边界向抽水井聚集运移时,运动方向是下斜向的,潜水如此,承压水也如此。分析认为,这是水头压力与水体自身重力同时起作用的结果。由此推断,在抽水时,承压水含水层顶板靠近补给源具有强势水流通过。

关键词:三维抽水试验装置;抽水井;地下水流;运动特征

中图分类号:P641.69

文献标志码:A

文章编号:1672-3767(2014)03-0011-09

The Motion Features of Groundwater Flow Near Pumping Well

Gao Zongjun

(College of Earth Science and Engineering, Shandong University of Science and Technology, Qingdao, Shandong 266590, China)

Abstract: Using the 3D pumping test device, a number of pumping tests about phreatic and artesian water were made to obtain data. In the tests, for both phreatic and artesian water, the water head appeared in funnel distribution; this pattern was most obvious around the underground water pumping well. Besides, the water heads of different points at different heights of each observation well appeared in decreasing pattern from top to bottom, showing that the water contained the top-to-bottom motion component while groundwater had migration and accumulation from the surrounding water boundary to the pumping well, i. e. the water movement direction was characteristic of declivity. The same was true for artesian water. The study shows that head pressure and water gravity are working together to produce the result; when the water is pumped, the strong water flow passes near the top roof of the artesian aquifer with the supply source.

Key words: 3D pumping test device; pumping well; groundwater flow; motion features

近年来,地下水流系统理论不断发展,人们在重新思考地下水流动问题,并试图在接受地下水流系统理论的同时,找到或验证地下水流动驱动力的来源^[1-4],搞清影响地下水流系统形成、演化的主要因素^[5-6]。在自然界,由于受到观测手段、观测密度、观测点空间分布等诸多条件限制,实现上述目标尚有困难^[7]。研究人员利用相关软件,对地下水流在空间的实际分布做了模拟和预测,如凌敏华^[8]利用 modflow 的 UZFI 构建了地表水文过程与地下水动力过程相耦合的数值计算模型;刘立才^[9]利用 GMS 模拟朝阳市人工湖建成后,湖底不同渗透系数下地下水动力场的变化情况。但模拟结果往往与真实的情况存在一定差别。因此,为更直观地模拟现场抽水试验,便于教学,自主设计建造了三维抽水试验装置,开创了室内完成抽水试验过程以及主抽水井周围含水介质场三维水位动态观测的先例,对地下水流运动理论的发展和地下水科学的实践教学具有重要意义。

收稿日期:2013-11-05

作者简介:高宗军(1964—),男,山东泰安人,教授,博士,主要从事水文地质教学与研究. E-mail: gaozongjun@126.com

1 三维抽水试验装置

装置位于山东科技大学 S2 实验楼一层室内(图 1~2),混凝土结构,通高 3.8 m(图 3~4),其中,底座高 0.6 m,底盘厚 0.2 m,沙池高 2.0 m,上围栏高 1.0 m。水平面积(占地)约 90 m²,楼梯东西宽 3.7 m,装置平台东西长 6.6 m,南北长 8.66 m。观测平台高度 2.8 m,平台的東西两侧设有高 1 m 的围栏,南北靠墙连接。

沙池平面呈正方形,长度 5 m,四周 0.5 m 为钢筋混凝土墙(0.3 m)与供水仓(槽)(0.2 m),四角有水泥浇筑,围成内方 4 m 的正方形沙池,形成容积 32 m³ 的立体空间。沙池中心设抽水井,呈垂向,井径 100 mm,底部 5 cm 为实管,其余全部呈花管,外包纱网,内装数字化可视自动液压计探头,由导线连接至外墙的液压读数屏(俗称测压排),便于观测。

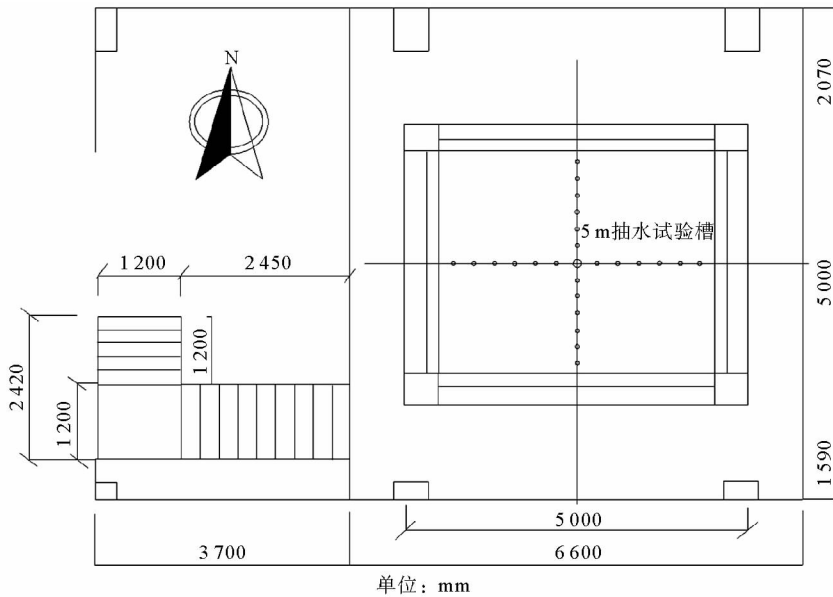


图 1 抽水试验装置平面布置图

Fig. 1 The arrangement of pumping test device

井的东南西北四个方向,垂直于供水槽,各均匀设置 6 个观测孔(图 1~2),分别按照相对于主井的方位,和距离抽水主井的距离由远及近,命名为南 1(N₁),南 2(N₂),……,东 1(D₁),东 2(D₂),……,西 1(X₁),西 2(X₂),……,北 1(B₁),北 2(B₂),……,数字越大,越靠近抽水主井,与抽水主井及其相互间的间隔为 30 cm,第 1 个观测孔与供水槽距离为 20 cm。每个观测孔高 2 m,由上到下以 20 cm 均匀间距设置水位观测点 10 个(图 3),分别冠以 1[#], 2[#], …… , 10[#]。以沙池底部为基点,则由下及上各观测点间隔 20 cm,分别位于沙池以上 10, 30, …… , 190 cm。各观测点用滤水沙网包裹以防止沙子进入,并暴露于沙池中;沙池孔隙水可以透过滤水纱网自由进入;孔隙水经过由观测孔内引出的导水管,运动至并排于整个装置的東西两个立面的测压排上(图 4);导水管排气并充满水后,测压排水柱的高度与各观测点处的水柱高度是相同的;由此便可以同时测得分布于沙池内三维空间的 240 个点的水位数据。由于数据量大,故建议在進行抽水试验时,各观测孔不同观测点的水位观测,通过视频(摄像)记录,然后进行分析、确定。

该装置的供排水系统如图 5 所示。在四个供水槽的底部中心位置获得供水,供水孔附近设有排水孔,与置于装置外侧四角的“升降平水漏斗”连接。由“升降平水漏斗”的升降,控制四个供水槽的水位。

抽水井抽水量的大小,可由水量计量器或水表测得(另设);也可以通过在抽水井底部以放水的形式实现抽水的效果,放水量可由设于底部排水口外的水表测得。

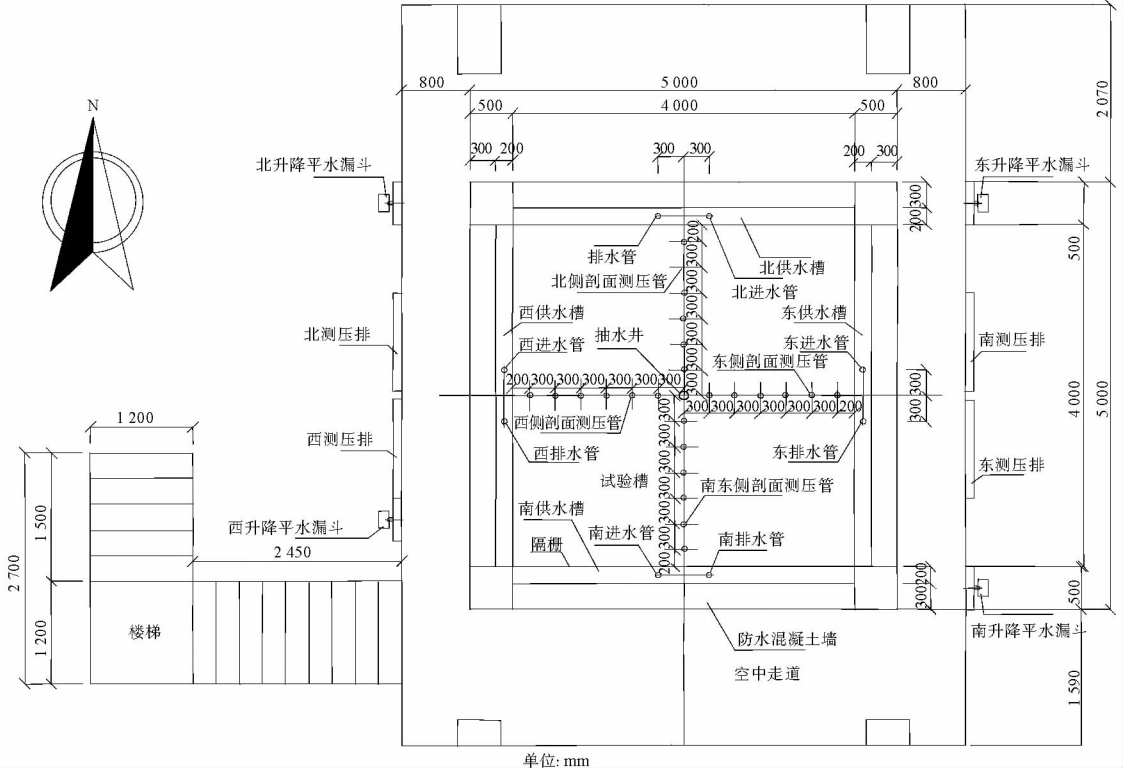


图 2 抽水试验装置功能平面图

Fig. 2 The process of pumping test device

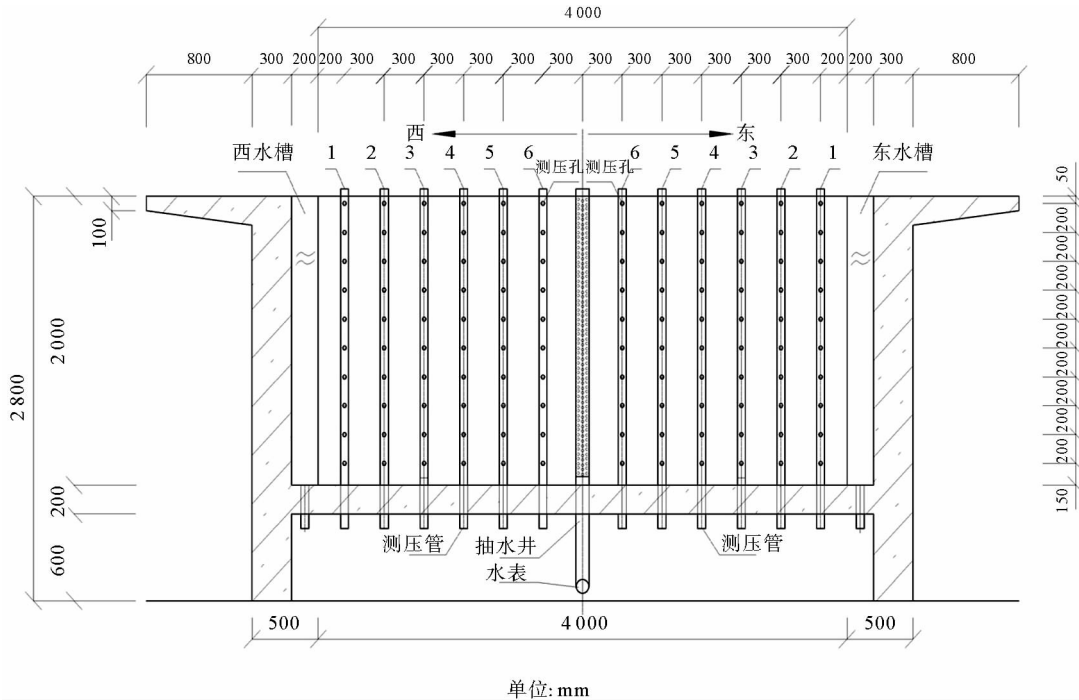


图 3 抽水试验装置轴向剖面图暨抽水井观测孔测压点剖面分布图

Fig. 3 Axial profile of pumping test device (pressure measuring point distribution profile of the pumping well)

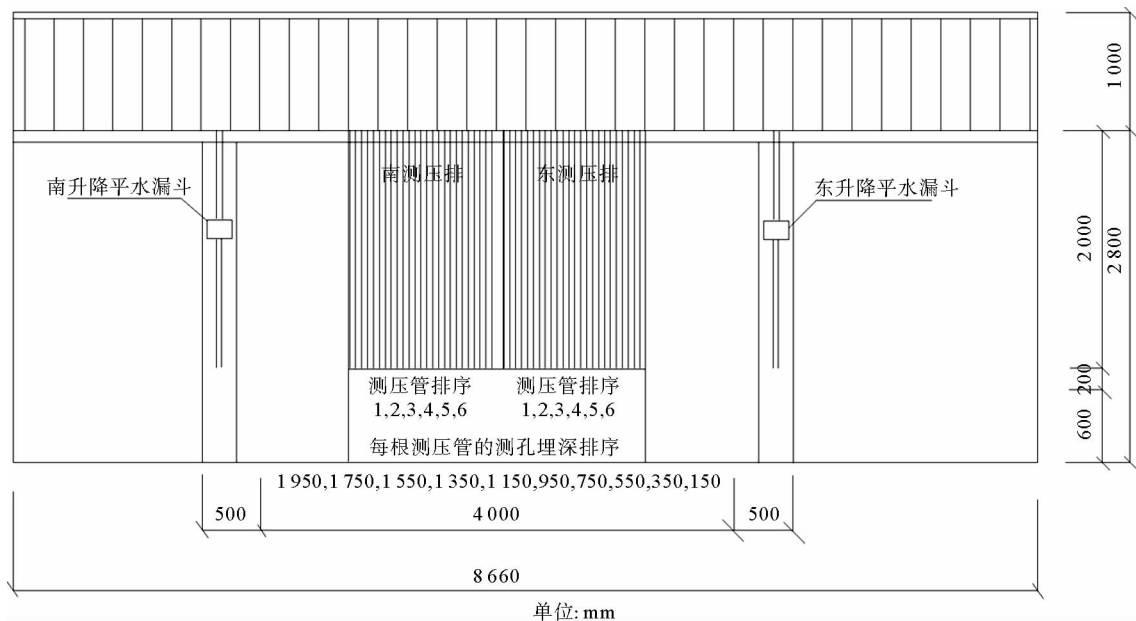


图 4 抽水试验装置东立面图

Fig. 4 East elevation of pumping test device

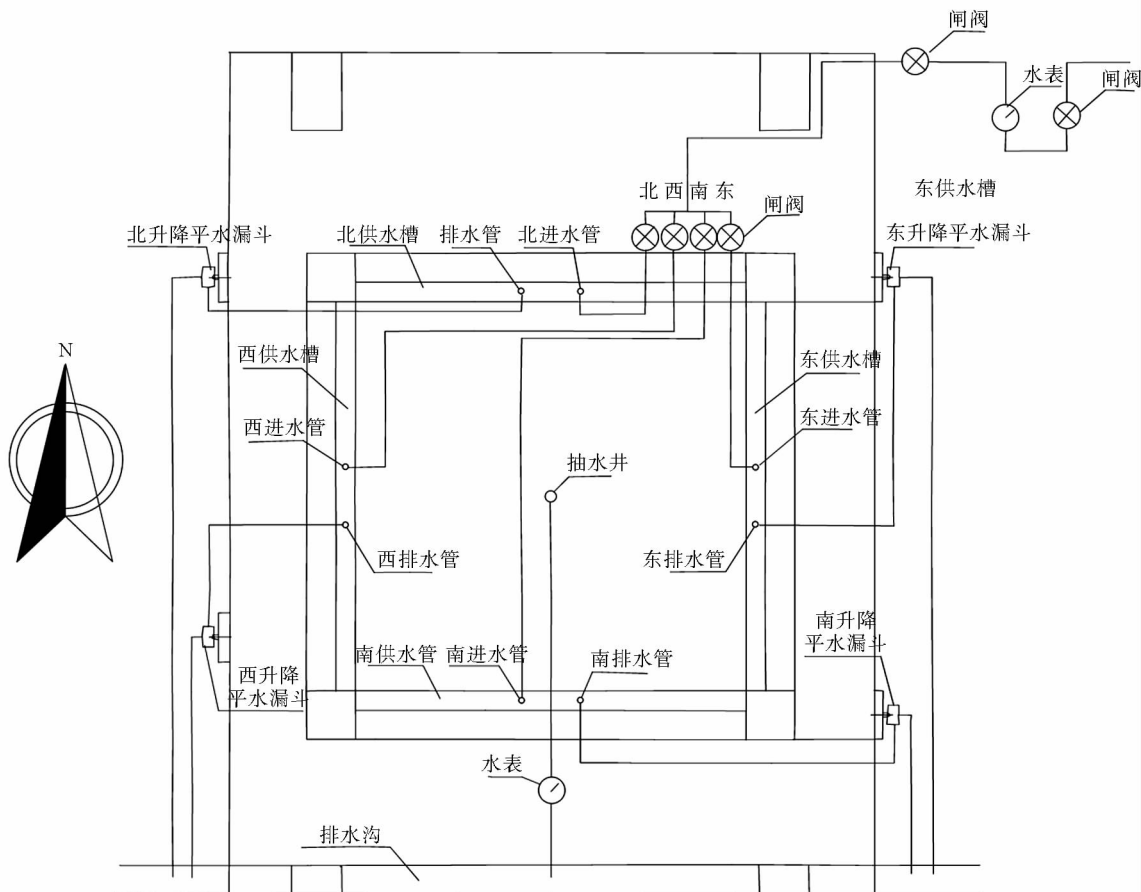


图 5 抽水试验装置供排水系统图

Fig. 5 Water supply and drainage system of pumping test device

沙池内充满含水介质,可以是沙,也可以是砂类土,可以是均质的,也可以设置为非均质的;可进行潜水状态的抽水试验,也可以进行承压水状态的抽水试验,视不同试验目的,可以对装置沙池内的含水介质进行调整、改造。

沙池内的含水介质充满水达到饱水以后,即可以开展抽水试验的工作。

2 抽水试验及结果分析

本文只讨论两种特殊情况,即沙池四面供水槽保持等水头供水边界条件下的潜水和承压水定流量抽水试验,且只介绍最后稳定状态下的结果。

2.1 潜水抽水试验

沙池内充满沙子,四周供水槽内充满水,并在“升降平水漏斗”控制下保持等水头且稳定。从主孔内抽水,抽水量 0.67 L/s,主孔水位在 589 s 后趋于稳定,稳定水位 1 280 mm(本文所指水位,均以沙池底部为基点 0 mm,下同)。

所有 4 个测压排的实际观测结果表明,四周的对应观测孔和对应观测点的水位观测结果相同,具有以抽水井为中心的轴对称水位变化规律。故以下将以主井南侧 6 个观测孔的水位变化情况为例,说明四周直线定水头补给条件下的潜水抽水的水位空间变化情况。

随着抽水主井的水位降低,靠近抽水井的 6 号观测孔率先降低,然后逐次向外各孔水位出现降低。达到稳定时,围绕抽水主井的水位降落漏斗出现(表 1,图 6)。其中,图 6 中的横坐标是时间段而非时间,时间段与实际时间的对应关系见表 2。

表 1 潜水抽水试验开始至稳定期间各观测孔第 8 观测点水位动态

Tab. 1 The water level dynamics of eighth observation hole about observation points from beginning to steadily in phreatic

水位 时间/s	观测孔 m	N ₁	N ₂	N ₃	N ₄	N ₅	N ₆
0		1 810	1 810	1 810	1 810	1 810	1 810
1		1 810	1 810	1 810	1 810	1 810	1 795
2		1 810	1 810	1 810	1 810	1 810	1 790
3		1 810	1 810	1 810	1 810	1 810	1 780
4		1 810	1 810	1 810	1 810	1 810	1 770
5		1 810	1 810	1 810	1 810	1 810	1 765
6		1 810	1 810	1 810	1 810	1 800	1 765
8		1 810	1 810	1 810	1 810	1 795	1 740
10		1 810	1 810	1 810	1 805	1 790	1 730
12		1 810	1 810	1 810	1 800	1 780	1 720
15		1 810	1 810	1 810	1 795	1 770	1 705
18		1 810	1 810	1 805	1 790	1 760	1 690
21		1 810	1 810	1 800	1 780	1 755	1 680
24		1 810	1 810	1 795	1 780	1 750	1 670
29		1 810	1 805	1 790	1 770	1 740	1 660
34		1 810	1 805	1 790	1 770	1 735	1 655
44		1 810	1 800	1 785	1 760	1 725	1 640
54		1 810	1 800	1 780	1 760	1 720	1 635
64		1 810	1 800	1 780	1 755	1 720	1 630
94		1 810	1 795	1 775	1 750	1 710	1 620
124		1 810	1 795	1 775	1 745	1 710	1 620
154		1 805	1 790	1 770	1 740	1 705	1 615
214		1 805	1 790	1 770	1 740	1 700	1 610
274		1 800	1 785	1 765	1 740	1 695	1 610
394		1 800	1 785	1 760	1 730	1 690	1 605
589		1 800	1 780	1 760	1 730	1 685	1 605

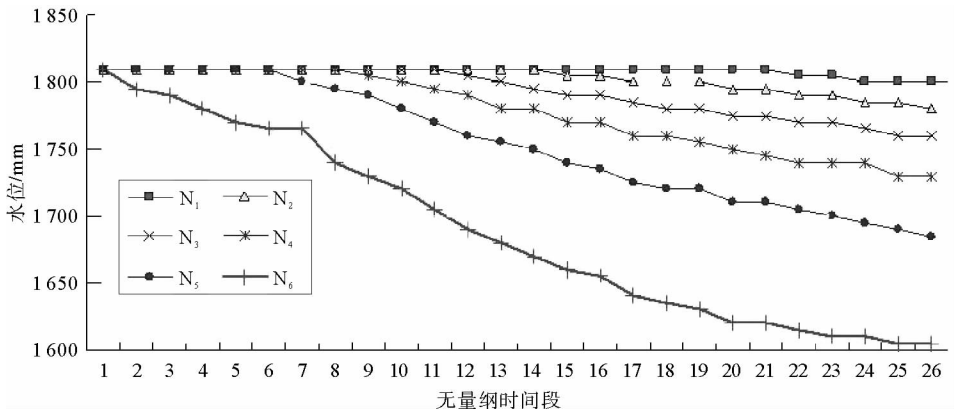


图 6 潜水抽水试验各观测孔第 8 观测点水位动态曲线图

Fig. 6 The water level dynamic curves of eighth observation holes about observation points from phreatic water pumping test beginning to stability

表 2 图 6 中的时间段与实际抽水试验历时对应表

Tab. 2 Periods corresponding with the actual pumping test in Fig. 6

时间段	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
抽水时间/s	0	1	2	3	4	5	6	8	10	12	15	18	21
时间段	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26
抽水时间/s	24	29	34	44	54	64	94	124	154	214	274	394	589

由于沙池规模较小,且沙池四周分布有定水头水槽。故抽水进行一定时间后,各点水位趋于稳定。稳定后各观测孔的水位情况参见表 3 所示。

表 3 潜水抽水试验达到稳定后各观测孔各观测点水位

Tab. 3 Water levels of observation points after the phreatic water pumping test reaching stability

mm

观测点 观测孔	2#	3#	4#	5#	6#	7#	8#	9#	10#
N ₁	1 800	1 800	1 800	1 800	1 800	1 800	1 800	1 800	1 800
N ₂	1 780	1 785	1 780	1 780	1 780	1 780	1 780	1 785	1 780
N ₃	1 770	1 765	1 765	1 760	1 760	1 770	1 760	1 760	1 760
N ₄	1 750	1 745	1 740	1 740	1 730	1 730	1 730	1 730	1 730
N ₅	1 720	1 710	1 705	1 695	1 685	1 685	1 685	1 690	1 685
N ₆	1 715	1 665	1 630	1 605	1 595	1 600	1 605	1 605	1 620

为便于直观地了解情况,将表 3 的数据进行做图(图 7~8)。

综合以上信息,可以看出:

1)从抽水井至直线供水边界的轴向剖面上(图 7),靠近抽水井的观测孔中的水位先出现降低,之后向外朝供水边界方向逐次出现水位降低,直至最后达到稳定。说明开始的水位变动情况,符合非稳定流抽水情况(更进一步的情况,如水位变化速率等也与泰斯公式所揭示的情况相近或相同)。

2)在每个观测孔上,不同的观测点处的水位是不相等的,通常是位置越高,其水位越高。由此判定,在充满水的沙池内的水位分布,空间上是不同的。任何一点的水的质点,都同时具有向井、向下两个方向的运动,

即水运动是斜下方向的。但也有例外,即最底部靠近抽水主井的几个观测孔的观测点(上述第 8 点,第 9 点和第 10 点),其水位出现了比最低水位点(上数第 7 点)要高的情况。分析认为,可能是由于主井底部 5 cm 的实管部位,影响了水流的正常运行,而出现了滞流、聚能,进而产生向上的局部上升力造成的。

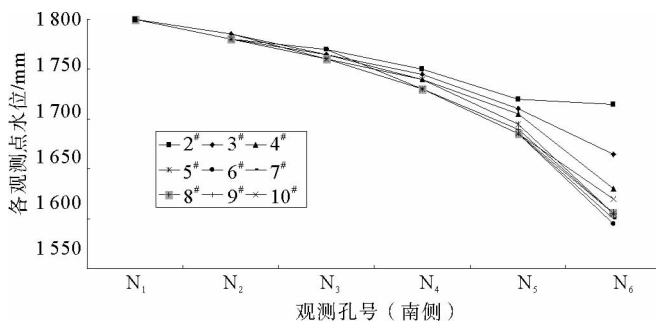


图 7 潜水抽水试验达到稳定后各观测孔各观测点水位(主井水位 1 280 mm)

Fig. 7 Water levels of observation points after phreatic water pumping test reaching stability (main well water level is 1 280 mm)

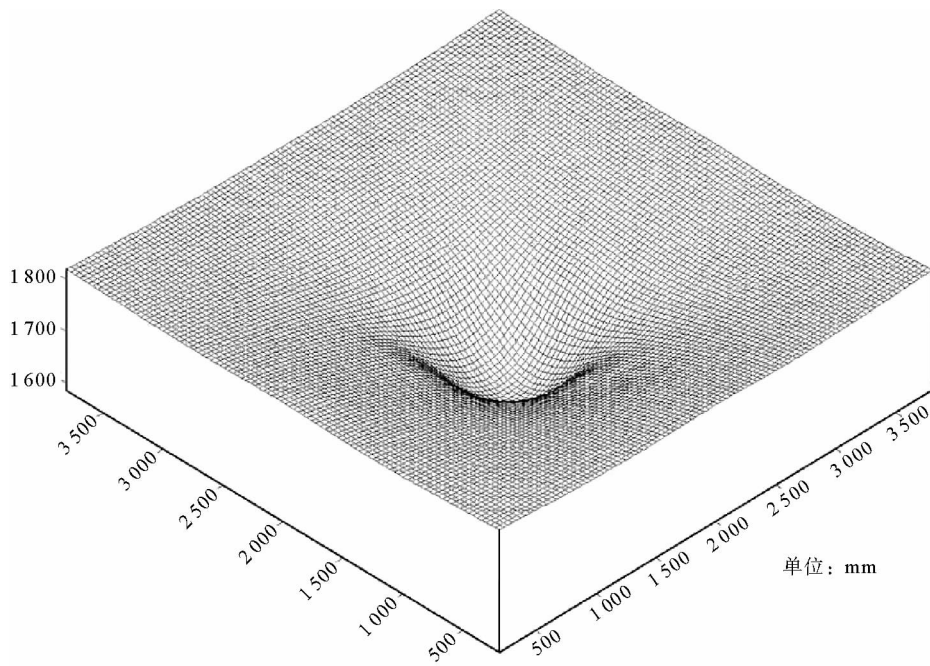


图 8 潜水抽水稳定时的地下水流三维分布图

Fig. 8 3D distribution of groundwater flow after phreatic water pumping test reaching stability

2.2 承压水抽水试验

同样利用这个装置,把上面的沙子挖掉,露出第 5 个观测点探头(但仍没在沙中),在该观测点之上的沙面上,铺设隔水薄膜(由于压力差较小,利用塑料纸即可),并将薄膜之上的主井包扎、封闭。本次试验,采用薄膜之上先覆以少量砂土,再由底部注水,将薄膜与沙面之间由于下部充水而产生的空气由下到上排出沙池,直至将水充满整个试验装置。根据承压含水层定义,此时第 5 个观测点之下的沙层处于承压饱水状态,属于承压含水层。之后开始进行抽水试验,并观测各个观测点的水位。

同样地,在进行了一段时间抽水以后,抽水量、主井的水位、各个观测点水位会出现稳定的情况(表 4)。

可以发现,隔水薄膜之上的 1[#], 2[#], 3[#] 和 4[#] 观测点的水位均保持了固定不变的状态(因为是充满水状态,其水位与周边 4 个供水槽是直接连通的自由水体),而隔水薄膜之下的 6 个观测点的水位,出现了有规律的变化(图 9)。

表 4 承压水抽水试验稳定时的各观测孔各观测点的水位

Tab. 4 Water levels of observation points after confined water pumping test reaching stability

水位 观测点	观测孔 m	D ₁ 孔	D ₂ 孔	D ₃ 孔	D ₄ 孔	D ₅ 孔	D ₆ 孔	主井水位
1 [#]		197.0	197.0	197.0	197.0	197.0	197.0	
2 [#]		197.0	197.0	197.0	197.0	197.0	197.0	
3 [#]		197.0	197.0	197.0	197.0	197.0	197.0	
4 [#]		197.0	197.0	197.0	197.0	197.0	197.0	
5 [#]		197.0	197.0	196.5	195.2	194.8	192.0	137.3
6 [#]		196.9	196.2	195.0	193.2	190.5	182.0	
7 [#]		196.8	195.9	194.2	192.0	188.5	177.5	
8 [#]		196.7	195.5	193.8	191.0	186.0	175.0	
9 [#]		196.6	195.5	193.5	190.0	185.0	173.0	
10 [#]		196.5	195.2	193.0	189.5	184.0	173.5	

根据同一水平不同观测孔的观测点所测水头值,绘制抽水试验中沙槽内地下水流的三维空间分布特征图(图 10)。

与潜水抽水时的情况一样,在抽水井周围出现了以抽水主井为中心的水位降落漏斗;同一观测点水平上的水位,越靠近抽水主井,水位越低,反之亦然。

按照一般的理论,此时地下水流应该是沿水平方向朝主井方向运动;然而情况与潜水时的一样,在每个观测孔上,由上到下,不同观测点的水位通常是由高到低的,指示在承压水状态下,地下水的运动依然是斜下的,即重力仍然起着重要的作用。

与潜水时的差异主要表现在一点,即只有靠近抽水主井的第 6 观测孔,出现了与上述由上至下水位逐渐递减相反的情况,即第 6 观测孔最下部的第 10 观测点的水位比第 9 观测点的水位稍高,其余各观测孔的各观测点的水位,均遵循上高下低的趋势。

上述现象产生的原因有以下几点:

- 1) 重力的作用不容忽视,地下水运动时,向下的作用力时刻起着作用;
- 2) 在承压水含水层顶板处,在靠近补给边界一侧,应该具有比其他位置更加快速的强势水流,其方向是指向抽水井。
- 3) 抽水井底部 5 cm 的实管,在承压水抽水时,依然能够反映出其阻滞、抬升周围附近水流的作用。

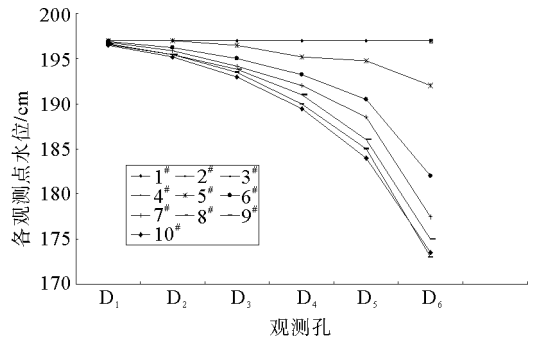


图 9 承压水抽水试验稳定时的各观测孔各观测点的水位(主井水位 137.3 cm)

Fig. 9 Water level of observation points after confined water pumping test reaching stability(main well water level is 137.3 cm)

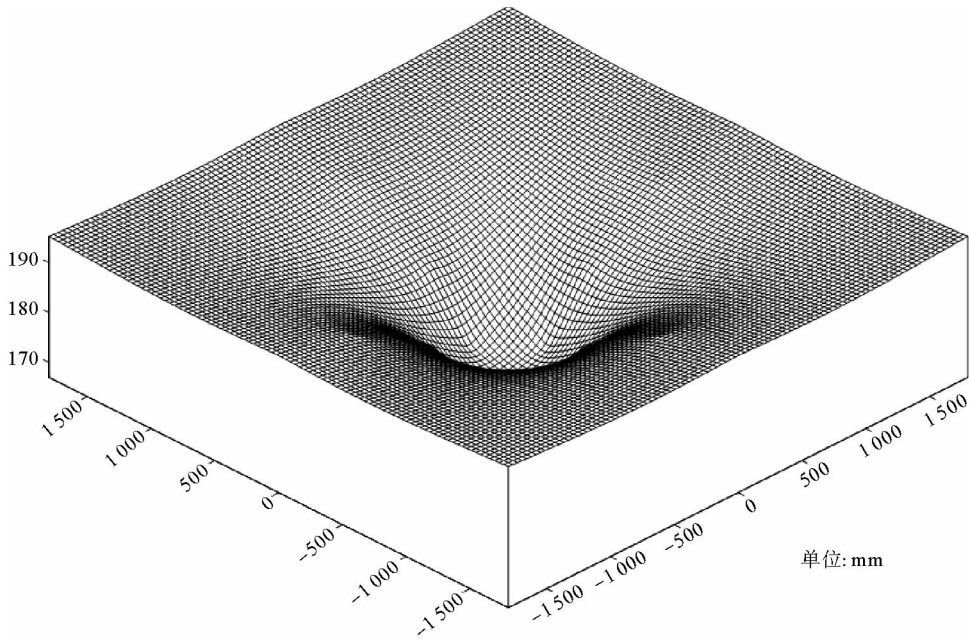


图 10 承压抽水稳定时的地下水流三维分布图

Fig. 10 Three-dimensional distribution of groundwater flow after confined water pumping test reaching stability

3 结论

通过三维抽水试验装置的运行实践可以发现,该装置可以实现对抽水主井附近的饱水介质的三维水位动态观测,并通过试验发现地下水流运动的空间(三维)特征,即地下水在重力与压力的共同作用下,呈斜下方向的运动特征,这种情况不仅出现在潜水状态,在承压水状态下也同样存在。由此推断,抽水时承压水含水层顶板附件具有强势水流通过,越靠近补给源,这种强势水流越大。

参考文献:

- [1] 李晓,张年学,廖秋林,等. 库水位涨落与降雨联合作用下滑坡地下水动力场分析[J]. 岩石力学与工程学报,2004,23(21): 3714-3720.
Li Xiao,Zhang Nianxue,Liao Qiulin, et al. Analysis on hydrodynamic field influenced by combination of rainfall and reservoir level fluctuation[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering,2004,23(21):3714-3720.
- [2] 许文峰,王现国,刘记成,等. 洛阳盆地地下水动力场环境演化研究[J]. 人民黄河,2007,29(2):54-55.
Xu Wenfeng,Wang Xianguo,Liu Jicheng, et al. Study on hydrodynamic field evolution of basin in Luoyang[J]. Yellow River,2007,29(2):54-55.
- [3] 王锦国,周云,黄勇. 三峡库区猴子石滑坡地下水动力场分析[J]. 岩石力学与工程学报,2006,25(S1):2757-2762.
Wang Jinguo,Zhou Yun,Huang Yong. Groundwater analyses of Houzishi landslide in the three gorges reservoir[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering,2006,25(S1):2757-2762.
- [4] 马振民,段琪庆,刘赠夕. 泰安岩溶水系统地下水动力环境演化规律研究[J]. 济南大学学报:自然科学版,2003,17(1):5-7, 82.
Ma Zhenmin,Duan Qiqing,Liu Zengxi. Study on evolutionary regulation of groundwater dynamic condition of karst water system in Tai'an[J]. Journal of University of Jinan: Science and Technology 2003,17(1):5-7,82.
- [5] 高宗军,地下水流系统分异的试验演示及其意义[J]. 山东科技大学学报:自然科学版,2013,32(2):17-24.
Gao Zongjun. The experimental demonstration and significance of groundwater flow system differentiation[J]. Journal of Shandong University of Science and Technology:Natural Science,2013,32(2):17-24.