

## 地下水降落漏斗的控制与恢复

都基众<sup>1,2</sup>,肖国强<sup>3</sup>(1. 东北大学资源与土工程学院,辽宁 沈阳 110004; 2. 沈阳地质矿产研究所,辽宁 沈阳 110033;  
3. 天津地质矿产研究所,天津 300170)

**摘 要:**过分担忧和强调地下水降落漏斗及其对区域地质环境的影响是不适当的。降落漏斗是地下水开采过程中产生的一种自然现象,分析和对比东北及华北地区的几个大的地下水降落漏斗可以看出,降落漏斗的产生与发展与区域水文地质条件、开采强度等因素有关。漏斗是可以控制和恢复的,只有在控制不当的情况下才会产生地质灾害。正确认识与掌握地下水降落漏斗的特点和变化规律,有助于人们合理开发地下水资源,避免不良环境地质问题的发生。

**关键词:**降落漏斗 地下水资源 环境地质

近年来,有关地下水降落漏斗的问题被越来越多地报道并受到关注,引起人们对地下水降落漏斗带来的一系列环境地质问题的担忧。作为水文地质工作者,我们很高兴地看到本学科受到广泛关注,但同时也认识到夸大降落漏斗对地质环境的影响使人们对它的认识产生了偏差,不利于水文地质环境地质专业的发展。本文就地下水降落漏斗问题发表一些个人的看法,以期与各位专家、同仁商榷。

#### 1 降落漏斗是地下水开采过程中产生的一种必然现象

众所周知,在生产井开采过程中由于井水被迅速排出,造成井壁内外地下水位产生差异,其影响半径范围内的地下水流场发生改变,地下水向滤水管处汇集,形成局部降落漏斗。随着抽水时间的延续,影响半径不断扩大,降落漏斗也将增大,直至汇水量与出水量达到平衡,降落漏斗呈现稳定状态。开采过程停止,地下水流场将逐渐恢复到其原有的状态,降落漏斗也将逐渐消失。

由以上过程可以看出,降落漏斗的形成是地下水开采过程中产生的一种必然现象。在地下水采补平衡的条件下,可形成稳定的漏斗范围与降深。如果生产井的开采量过大,特别是群井集中开采的条件下,地下水补给量小于开采量,此时地下水位将持续下降,降落漏斗范围不断扩大,形成大范围区域性的地下水降落漏斗。

#### 2 地下水降落漏斗的变化及产生的环境影响

地下水降落漏斗是伴随着地下水开采而形成的,特别是在地下水集中开采区(水源地),必然会形成降落漏斗。应根据漏

斗形成与发展的不同阶段及所产生的环境影响综合分析其利弊,将漏斗半径及地下水降深控制在合理的范围内。

界定地下水降落漏斗是否构成环境地质问题或者造成地质灾害应主要从以下几方面考虑:一是要看降落漏斗的最大降深是否超过了含水层的极限开采深度;二是要看漏斗规模是否稳定;三是要看区域地下水下降是否引发灾害性环境条件变化。其中含水层开采的极限深度可以通过以下简易方法确定:潜水含水层的开采极限深度是由地表到潜水含水层厚度的 $1/2$ 处的距离;承压水含水层的开采极限深度是由地表到承压含水层顶板之间的距离<sup>[1]</sup>。

黑龙江省齐齐哈尔市地处松嫩平原之上,由于地下潜水质不好,供水水源一直采用第四系中更新统浅层承压水。该含水层岩性主要是砂砾石、砾卵石,含水层厚度近 100 m,补给条件好,水量丰富<sup>①</sup>。至 2002 年底,齐齐哈尔市地下水降落漏斗面积 45 km<sup>2</sup>,漏斗中心地下水埋深 9.24 m,漏斗周边地下水埋深 4.94 m,实际最大降深 4.3 m<sup>②</sup>。像这样水文地质条件良好,地下水降深远小于含水层厚度的降落漏斗,是由于开采地下水引起的正常的水文地质现象,也不构成环境地质问题。

随着地下水开采量增大,降落漏斗逐步扩展,最终形成稳定的区域地下水降落漏斗,这种漏斗虽然还不会直接造成灾害,但会带来一些环境地质问题。如辽宁首山水源地经数十年开采,目前已形成一个面积 300~320 km<sup>2</sup>,最大地下水埋深 21m 左右,基本处于稳定状态的降落漏斗。该漏斗最明显的环境影响是由于地下水位大幅下降,地表农田灌溉定额明显提高,漏斗区稻田灌溉量是正常定额(40 m<sup>3</sup>/hm<sup>2</sup>)的 2~3 倍,同时由于灌溉用水和河流入渗量的加大,地下水水质已产生轻微变化<sup>③</sup>,另外漏斗

收稿日期 2004-09-15;修回日期 2004-12-30. 张哲编辑.

①王逊,尹喜霖,等. 黑龙江省环境地质调查报告. 2001.

②水利部松辽委员会. 松辽流域水资源公报. 1999~2003.

③杨绍南,等. 下辽河平原含水层调蓄功能勘察. 1997.

区存在地面沉降的可能。

当地下水长期严重超采,地下水持续下降,则会带来一系列的地质灾害。华北平原地下水降落漏斗是目前我国最大的区域性地下水降落漏斗,漏斗区总面积 7278 km<sup>2</sup>,漏斗中心地下水埋深已达 105.3 m(德州市)<sup>①</sup>。巨大的地下水降落漏斗除了造成漏斗区地下水资源枯竭外,水质污染与咸水体入侵也很严重,特别是大范围的地面沉降对区域环境带来很大破坏。1989~1995 年河北平原地面沉降大于 200 mm 的面积达 42120 km<sup>2</sup>,大于 300 mm 的面积达 18718 km<sup>2</sup>,大于 500 mm 的面积达 6430 km<sup>2</sup>,沧州地区最大沉降量达 1680.90 mm<sup>②</sup>。区域地下水位下降还可能造成海水入侵、土地荒漠化等后果。

### 3 降落漏斗是可以控制和恢复的

地下水降落漏斗的形成与发展是与地下水开采强度、区域水文地质条件密切相关的。在一定的水文地质条件下,如果开采量小于最大允许开采量,地下水降落漏斗将在某一特定值达到稳定;当开采量大于最大允许开采量时,降落漏斗将不断扩大,但此时减少开采量至最大允许开采量以下,降落漏斗将缩小并最终稳定在一定范围内。

以沈阳地区为例,沈阳位于下辽河平原浑河北岸冲洪积扇,含水层为砂卵石、砾石层。地下水位埋藏浅,水量丰富,单井出水量可达 1000~5000 m<sup>3</sup>/d。沈阳是一个以地下水为主要供水水源的城市,地下水集中开采始于 1917 年,至今已有 80 多年的

历史。沈阳城区地下水降落漏斗变化情况如表 1 和图 1。开采初期地下水位较浅,至上世纪 60 年代初形成约 44.5 km<sup>2</sup> 的漏斗雏形。70~80 年代伴随着城区工业的发展和人口的急剧增长,需水量大增,漏斗面积不断扩大。至 1989 年城区地下水开采量

表 1 沈阳城区降落漏斗动态变化统计表

Table 1 Statistics of the groundwater depression changing in Shenyang City

年代	漏斗区面积/km <sup>2</sup>	漏斗中心地下水埋深/m
1962	44.5	
1975	126	
1980	200.25	27.33
1985	188.25	29.99
1990	225.79	29.31
1995	195.75	20.92
1997	172.00	22.96
1998	82.00	18.96
1999	89.00	18.74
2000	72.8	19.42
2001	80.00	20.44
2002	69.38	19.74
2003	33.25	15.21

据张瑛等(2001)、辽宁省水利厅(1999~2003)。

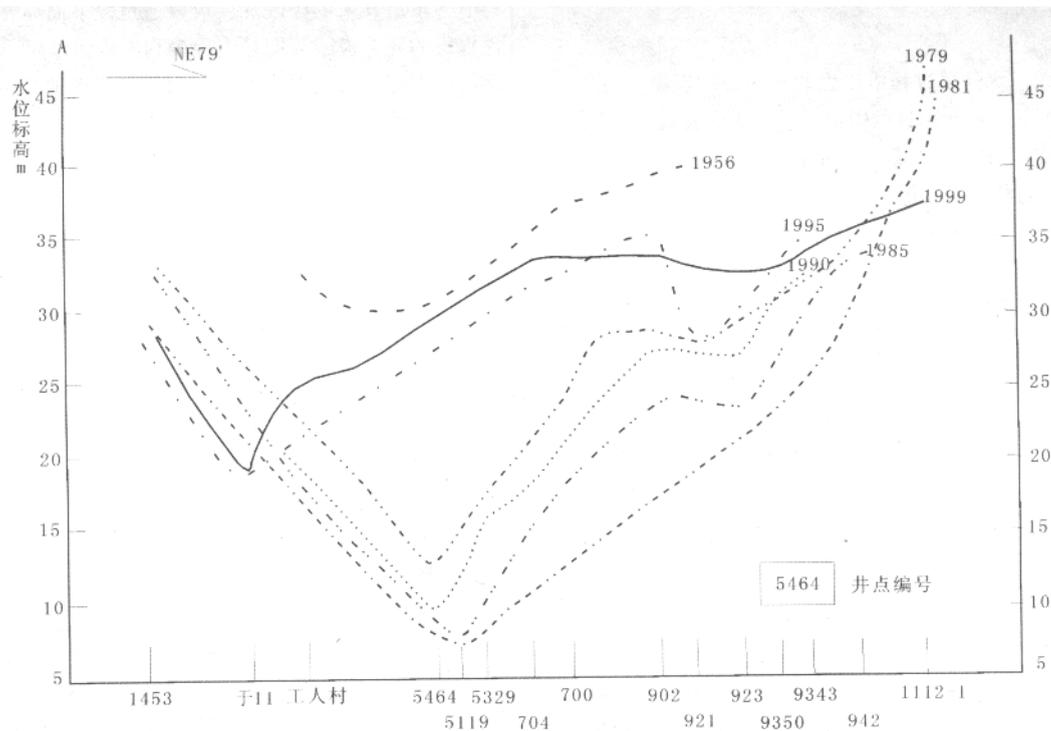


图 1 沈阳城区 1956~1999 年地下水漏斗变化剖面图

Fig. 1 Section map of groundwater depression in Shenyang City from 1956 to 1999

①李壮,等. 华北平原(山东部分)地下水资源调查评价报告. 2003.

②赵宗壮,等. 华北平原(河北部分)地下水资源调查评价报告. 2003.

达 5.87 亿  $\text{m}^3/\text{a}$ , 漏斗范围迅扩张到 225.79  $\text{km}^2$ 。1990 年以来, 由于加强了地下水开采的控制, 漏斗区面积逐渐缩小, 目前已经由一个大漏斗缩小为不相连的两上主要漏斗, 其中较大的铁西漏斗 2002 年和 2003 年枯水期面积分别为 69.38  $\text{km}^2$  和 33.25  $\text{km}^2$ 。

由于地下水位持续升高, 沈阳市已出现了新的环境地质问题。部分高层建筑及人防工程当初基础设计和施工均在地下水位以上, 地下水位升高使部分建筑地下室和人防工程受淹, 必需不停地排水。另一处典型的事例是在沈阳市长江街与东西快速干道交叉路口, 由于采用立体交通方式, 长江街南北向直行车道向下开挖近 5m, 自 2003 年, 地下水位抬升至使此处地下水溢出, 严冬时节造成低洼处路面结冰, 给交通安全造成威胁。

类似的情况也出现在德国首都柏林。1890 年至第二次世界大战末期, 由于城市建设及发展生产的需要, 柏林地下水开采强度加大, 地下水位持续下降, 并形成了区域性降落漏斗。二战结束后, 随着水资源消费的下降及建设项目减少, 一些地下水开采井陆续停采, 柏林地下水位逐步得到恢复, 部分建筑物地下室进水, 城市垃圾处理厂也受到了威胁(图 2)。因此, 从 2001 年底, 该市加大了两个水源地的开采量以降低区域地下水位<sup>[3]</sup>。

由以上事例子可以看出, 地下水降落漏斗的产生是一种正常的水文地质现象, 人们可以通过控制开采量来控制地下降落漏斗的深度与范围, 即使在已经产生较大地下水降落漏斗的地区, 通过调解地下水的开采量, 也可以使地下水位逐步恢复。

#### 4 科学控制并有效利用地下水降落漏斗

既然地下水降落漏斗是开采地下水的必然结果, 而且降落

漏斗是可控制的, 那么就可以利用它为人类服务, 提供更多的地下水资源。在含水层厚大, 地下水径流条件良好的地区, 通过加大开采量, 可以形成一定降深、一定范围的地下水降落漏斗。由于疏干了特定区域内的地下水, 增加了蓄水空间, 该降落漏斗可以更多地接受地表水入渗补给, 并可截取更多的地下水径流量, 从而增加地下水可开采量。

首山地下水降落漏斗是辽宁省内最大的地下水降落漏斗, 是由首山水源地长期开采形成的。首山水源地自 1919 年启用, 至今已有 80 余年的历史。目前该水源主要为鞍山市政、辽阳市政、鞍山钢铁公司、辽阳市各企业以及部分稻田灌溉提供水源。据 1996 年资料, 该水源地日供水量达  $105 \times 10^4 \text{ t}$ 。首山漏斗形成以来不断扩大, 至 1988 年漏斗面积 300  $\text{km}^2$ , 漏斗中心地下水埋深 20.00 m, 经 1994、1995 两个连续丰水年后, 1996 年漏斗面积 281  $\text{km}^2$ , 漏斗中心水位 19.65 m<sup>②</sup>。虽然严重干旱的 2000 年后, 漏斗面积扩大到 342  $\text{km}^2$ , 但近年来漏斗面积主要在 300 ~ 320  $\text{km}^2$  之间波动, 漏斗中心水位略有抬升, 漏斗总体趋于稳定(表 2)。

表 2 首山漏斗近年地下水埋深与漏斗面积

Table 2 Depth of water table and area of Shoushan depression in recent years

年份	1980	1988	1996	1999	2000	2001	2002	2003
漏斗中心地下水埋深/m	18.72	20.00	19.65	21.75	21.26	20.85	20.67	19.39
漏斗面积/ $\text{km}^2$	250	300	281	310	300	342.0	320	317.6

据杨绍南等(1997)、辽宁省水利厅(1999~2003)。



图 2 柏林市地下水位变化曲线

Fig. 2 The changing curve of groundwater in Berlin City

①张瑛, 王亮, 等. 辽宁省环境地质调查报告. 2001.

②杨绍南, 等. 下辽河平原含水层调蓄功能勘察. 1997.

首山漏斗地处下辽河平原下游,太子河穿过本区北部和东部,本区地下水径流自北向南,部分地下水在其下游不远处溢出地表,以地表水的形式排入渤海,2002年经下辽河平原入海的水量为 $27.35 \times 108 \text{ m}^3$ 。地下水降落漏斗提供了巨大的储水空间,截取了大量的地下径流水和地表渗入水,使本区地下水开采量与补给量基本平衡,同时也有效挖掘了地下水资源潜力。

利用地下水降落漏斗获取更多地下水资源量的作法受诸多条件的限制,其中最重要的当属区域水文地质条件和地下水补给来源,在此将首山漏斗与我国最大的地下水降落漏斗——华北平原地下水漏斗进行比较。首山水源地位于下辽河平原太子河冲洪积扇上,含水层主要岩性为砾卵石、砂砾石、中粗砂等,其中砾卵石层厚 $40 \sim 170 \text{ m}$ ,渗透系数 $50 \sim 155 \text{ m/d}$ ,单井涌水量 $5000 \sim 10000 \text{ m}^3/\text{d}$ ,分布面积占整个漏斗区面积的70%,是漏斗的主要影响区。在其周边分布着大面积含砾粗砂层,厚度 $30 \sim 60 \text{ m}$ ,渗透系数 $20 \sim 35 \text{ m/d}$ ,单井涌水量 $3000 \sim 5000 \text{ m}^3/\text{d}$ ,良好的水文地质条件决定了该漏斗区具有地下水资源丰富,地下水径流补给迅速的特点。此外,太子河从漏斗区东北部穿过,

漏斗区地表为农田,其中水田面积 $50 \text{ km}^2$ ,本区多年平均降雨量 $746.18 \text{ mm}$ ,这些都为漏斗区地下水提供了良好的垂向补给条件。

类似首山水源这样的地下水降深小于极限开采深度,没有出现明显环境地质影响的地下水降落漏斗,在加强地下水水位、水质及相应地质环境监测的前提下,可以维持正常的地下水开采。

华北平原山前冲洪积扇部位由于地下水集中开采,也形成了石家庄漏斗、北京市漏斗等浅层地下水水位下降漏斗。这些漏斗的特点与首山漏斗相似,含水层岩性颗粒大,渗透性能强,地表入渗条件好,非常适合地下水的快速补充。

石家庄漏斗最初形成于1965年,自1965年到2001年,漏斗中心水位埋深由 $7.57 \text{ m}$ 下降到 $43.89 \text{ m}$ ,平均每年下降 $1.2 \text{ m}$ 。1995年漏斗中心水位埋深 $43.47 \text{ m}$ ,1996年河北平原的大洪水使漏斗迅速恢复,1997年地下水水位上升到 $35.94 \text{ m}$ ,漏斗面积从 $371 \text{ km}^2$ 缩小到 $296 \text{ km}^2$ 。一次洪水补充的地下水直到2000年地下水水位才又下降到 $42.28 \text{ m}$ ,依然高于1995年的水位<sup>①</sup>(表3)。

表3 石家庄漏斗地下水埋深与漏斗面积

Table 3 Depth of water table and area of Shijiazhuang depression

年份	1965	1970	1975	1980	1985	1990	1995	1997	2000
漏斗面积/ $\text{km}^2$	58	154	187	189	259	338	371	296	340
地下水埋深/ $\text{m}$	7.57	10.37	15.29	20.39	31.32	37.22	43.47	35.94	42.28

华北平原深层地下水水位下降漏斗则是另一种情况。由于含水层岩性为粉细砂、中细砂及中粗砂<sup>[2]</sup>,地下水径流条件不好,更主要的是地下水处于相对封闭的环境,补给困难,因此在长期超采的情况下,地下水水位呈持续下降状态。2001年沧州漏斗中心水位埋深达到 $98.66 \text{ m}$ (如图3),由于地下水得不到有效补充,导致弱透土层压密,造成地面沉降,累计地面沉降量达到 $2000 \text{ mm}$ 以上。

类似华北平原这种地下水降深超过极限开采深度,已产生明显环境地质影响的地下水降落漏斗,必须采取严格的措施控制地下水的开采,防止地质环境进一步恶化,同时可采用人工回灌等技术加速区域地质环境的恢复。

通过比较可以看出,有效地控制和利用地下水降落漏斗,应该首先考虑以下两个条件:一是要有良好的水文地质条件,包括含水层厚度大、颗粒粗,地下水径流条件好;二是要有充足的补给水源,包括地表水入渗补给和地下水的侧向径流补给。

区域地下水水位下降可能引起地面沉降,在含水层颗粒细的地区表现尤为明显,因此,漏斗区应避开城市和建筑物集中区。另外漏斗区地下水的补给量增加,可能造成不良水体的侵入,应重视水质预测与监控。

充分考虑了以上几方面因素,就可以较好地控制与利用区

域地下水降落漏斗,最大限度地获取地下水资源,又不会产生严重的环境地质问题。

## 5 结语

地下水资源是一种可持续开采、可再生的资源,地下水降落漏斗本身并不是地质灾害,而是地下水开采过程中产生的一种水文地质现象。比较沈阳、首山和华北平原地下水降落漏斗可以看出,漏斗是可以控制和恢复的,只有在控制不当的情况下才会引发一系列地质环境问题。科学合理的控制地下水开采强度,可以保证在不产生明显环境影响的条件下,获取理想的地下水资源量,使资源开发与环境保护相协调。

## 参与文献:

- [1]林学钰,陈梦熊,等. 松嫩盆地地下水资源与可持续发展研究[M]. 北京:地震出版社,2000.
- [2]徐军祥,康凤新,等. 山东省地下水资源可持续开发利用研究[M]. 北京:海洋出版社,2001.
- [3]Berlin Department of Urban Development. Depth to groundwater[EB/OL]. Urban and Environmental Information System (UEIS). <http://www.stadtentwicklung.berlin.de>

①赵宗壮,等. 华北平原(河北部分)地下水资源调查评价报告. 2003.

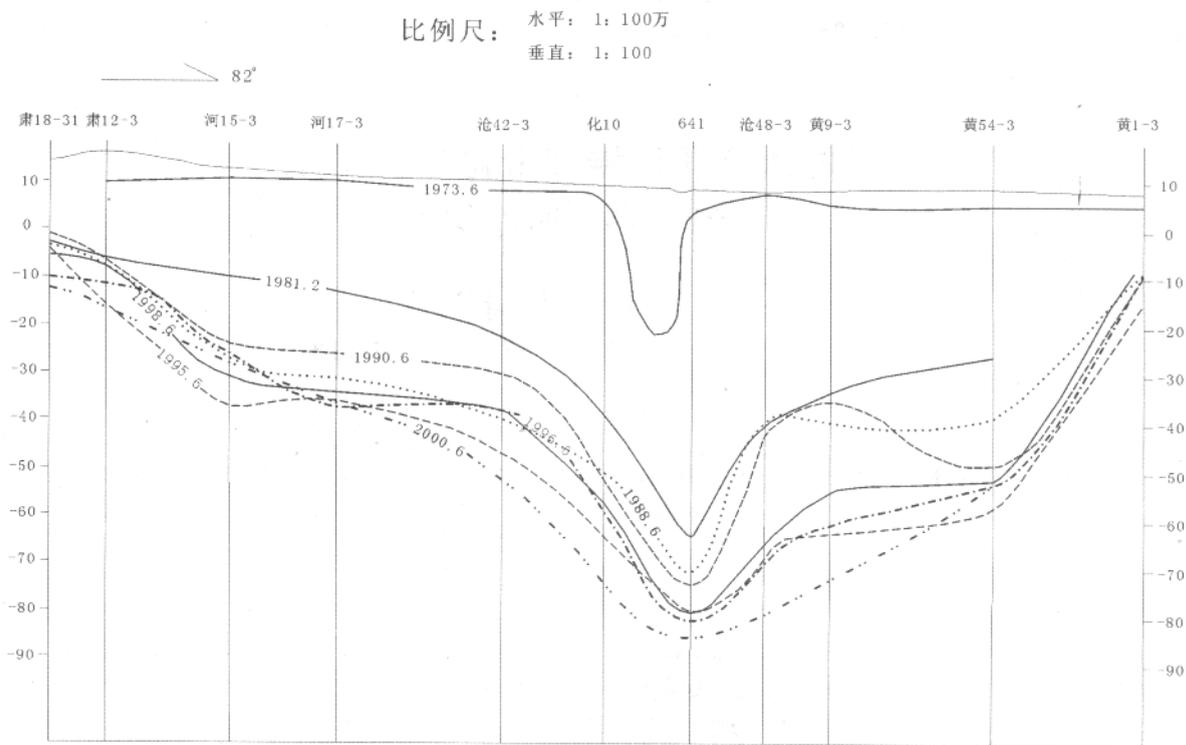


图 3 沧州漏斗地下水位变化剖面图

Fig. 3 Section map of Cangzhou groundwater depression from 1973 to 2000

## CONTROL AND RECOVERY OF GROUNDWATER DEPRESSION

DU Ji-zhong<sup>1, 2</sup>, XIAO Guo-qiang<sup>3</sup>

(1. Institute of Resources and Civil Engineering, Northeastern University, Shenyang 110004, China; 2. Shenyang Institute of Geology and Mineral Resources, Shenyang 110033, China; 3. Tianjin Institute of Geology and Mineral Resources, Tianjin 300170, China)

**Abstract:** The affection of groundwater depression to local environment has been unnecessarily overemphasized and exaggerated. Groundwater depression is a natural phenomena while groundwater is pumped out. By analyzing and comparing several groundwater depressions in Northeast and North China, it can be found that regional hydrogeological condition and pumping intensity affect their forming and developing. The groundwater depressions can be controlled and restored as well. It may be developed to geo-disaster only when it is out of control. The correct understanding to the characteristics and changes of depressions will be helpful to the exploration for groundwater resource and avoidance of geo-environmental problems.

**Key words:** groundwater depression; groundwater resource; geo-environment

作者简介: 都基众(1965—),男,教授级高级工程师,1987年毕业于同济大学水文地质与工程地质专业,现为东北大学在读博士研究生,主要从事水文地质、环境地质调查评价及研究工作,通讯地址 沈阳市北陵大街25号 邮政编码 110033 E-mail//sydjizhong@sina.com