

地下水资源开发模式和降落漏斗问题

赵天石 王卫东

(辽宁水文地质工程地质勘察院)

摘 要: 地下水不仅是人类赖以生存的基本资源要素之一, 而且是人类赖以生存的基本环境要素之一。当人们在大力开发地下水资源的同时, 就应注意到并密切观察、跟踪和研究它对地质环境演化的影响。本文将重点探索和讨论同时符合资源开发和环境优化要求的比较科学合理的地下水开发模式, 还讨论了地下水开采降落漏斗问题。

关键词: 地下水资源 地质环境 开发模式 降落漏斗

地下水不仅是人类赖以生存的基本资源之一, 而且是人类赖以生存的基本环境要素之一, 人们在开发地下水资源的同时, 就应注意到并密切观察、跟踪和研究它对地质环境演化的有利影响和不利影响。在地质历史时期和人类历史时期, 地质环境在各种要素的作用下处在不断的变化之中, 而且地质环境要素本身也在不断变化之中, 不断有新的影响因素产生和加入, 而人类的出现和工程活动则是这种新增加的影响因素中最为重要、最为积极、影响力在急剧膨胀的因素。为了保护人类赖以生存的环境, 就必须研究人类作用下地质环境的演化方向和趋势, 而地下水作为资源在开发条件下的地质环境的演化则是最为优先的课题之一。

1. 地下水的资源意义和环境意义

地下水是地球水圈中除了两极冰盖和海水之外的主体, 因此人们早已认识到它的巨大的资源意义。虽然在很多地区和城市它是人类供水的主体, 但是由于地下水相对分散的特点, 在很多时候人们经常把目光投向规模宏伟的地表水工程, 而对遍布全球陆地的地下水资源经常缺少足够的关注。地球上水圈仅有 2.53% 为淡水, 在淡水总量中 30.06% 为地下水, 0.39% 为地表水; 这个基本事实表明, 地下水是地壳中淡水的主体, 它的开发利用有着十分广阔的空间, 资源意义也是十分巨大的。以辽宁省为例, 辽阳的首山水源、沈阳水源都应是世界级的特大型地下水源, 辽河油田的地下水资源 (分散为几处)、鞍山市、锦州市等也都以地下水作为主要的供水水源, 就连以调水工程著称的大连市目前地下水水源的供水能力也达到了该市用水量的 20% 左右, 并且还在积极探索地下水资源新的开发途径。

但是正如“21 世纪水资源研究”(国土资源部信息, 2001 年 10 月)一书所强调的那样“在 20 世纪, 人们未能充分认识水资源的生态意义和价值, 过分强调了水资源的开发利用, 忽视了水资源的生态功能”。因此在认识地下水的资源意义的同时, 还要充分认识和评价它的地质环境意义和生态意义。就某种意义上讲, 地下水的环境意义主要表现在浅层水上, 包括包气带中的地下水和浅层潜水, 正是它们与土壤、浅表地层 (包括含水层)、微生物、地表植被和

动物群等组成了地表生态系统，而这个生态系统中，最活跃的因素是不断变动之中的潜水位和包气带含水量，它影响着微生物和土壤类型、植被类型和分布发育、动物群落等，控制着湿地、沼泽、荒漠、盐渍化等生态环境类型和地貌景观的分布，就这种意义上讲，地质环境和生态环境的保护问题就是地下潜水位的控制和包气带含水量的控制，地下水监测系统的主要监测要素是地下水位和包气带含水量，其次是水温、水质和水量等，最近有的学者还提出了地下水位生态研究指标的概念^[1]。

地下水环境还包括含水层的保护和包气带的组成和特征上。浅层地下水的水质是受包气带保护的，我们曾试图对污染比较严重的鞍山地区包气带水质防护性能进行研究，我局还曾对沈阳市的土壤和包气带的防护能力进行过研究，基本的结论是包气带和土壤对地下水水质有一定的过滤和保护作用，在一米厚的深度内有些组分呈上升的趋势，有些呈下降的趋势，铜、铝、锌、镉等重金属成分不易被水溶滤和被微生物降解，积累于（0.4m 以内）土壤层内被农作物吸收而进入食物链。

近年来曾提出水资源承载能力的概况，实际水资源承载力应是一个涵盖比较广的概念，从地下水的资源意义和地质环境意义上讲，就可以引伸为地下水资源的承载能力和与地下水有关的地质环境的承载能力，还可以引伸为包气带和土壤对地下水的防护能力，需要对这种防护能力进行定性和定量的评价，包括宏观和微观相结合的评价，静态和动态相结合的评价。

笔者曾提出“地质环境要素的层次分析方法”^[2]，地下水位和包气带含水量、包气带和土壤的地下水自净能力、保护能力等就是重要的地质环境要素，大的方面应从前第四纪地质环境的演化、第四纪地质环境的演化、全新世地质环境的演化、人类活动时期地质环境的演化等四个层次进行分析，而且这种分析随应着人类活动的加剧而加密，例如：可以增加现代历史时期（二战后）的地质环境演化分析，在这个历史时期又可划分为若干小的历史阶段。比较好的实例是“华北平原地下水环境演化”^[3]一书的工作，如果把这种工作在区域上扩大，在研究程度上加深，使资料系列不断延伸，甚至进行社会发布，就应当成为今后研究工作的重要模式。

因此，在研究地下水资源开发方案的同时，必须研究地下水资源保护和地质环境保护的措施，总结实践经验，探索二者结合的理想模式。

2. 地下水开发中的问题和理想开发模式探讨

地下水开发中的问题是与开发方式联系在一起的，这是探索在同时地下水资源和保护地质环境两个条件下进行地下水开发模式探讨的基础。在现代条件下（以可持续发展和开发为目标）思考这个问题的前提是地下资源开发和地质环境保护并重，在地质环境保护的限制条件

下进行地下水开发，控制地下水开发，形成并建立新的水资源开发思路，形成比较完善的开发模式。

地下水开发方式很多并形成很多分类，如：集中开采、相对分散开采、零散开采；城市和工业开采、农业开采；连续性开采和阶段性开采；深层开采与浅层开采；孤立开采和联合式开采；不同类型地下水的综合开采等。如果将这些开采方式从历史发展的角度进行分类，大致应分为三种开采方式：①初期阶段的分散的小规模开采；②近代的大规模集中开采；③未来的科学开采，也可称“环保型”地下水开采方式。

科学开采应当是地质学家、水文地质学家、环境保护专家和生态学家所认可的一种开发模式，它应当基于这样一些基本原则：补给和开发平衡的原则；开采水位合理且可控制的原则；各类水资源转化和地下水量调蓄的原则；水质和生态环境保护的原则。

目前地下水资源开发中的问题，诸如开采降落漏斗的形成和含水层疏干、地下水污染和变异、地面沉降、海水入侵和咸水入侵，抽水引起的岩溶地面塌陷问题等等，都是在实际上违背这些原则的结果，这也是在地下水资源开发初期受经济和技术条件制约所不可避免的。但即使在地下水资源开发初期受经济技术条件制约较大的条件下，也出现了几种比较理想的模式，以辽宁地区为例。

2—1 首山水源模式。

首山水源在辽宁省的辽阳市，它是一座有近百年历史的巨型地下水源，日开采量 100—130 万吨左右，是鞍钢和鞍山市、辽阳市的主要供水水源，目前开采水位降深仅 30m 左右（开采漏斗中心）没有趋势性下降，且地下水水质较好，它的开采模式是：引水（通过河道输送的水库水）或开采地下水—灌溉稻田（第一次利用）—回渗地下补给地下水—抽取地下水供工业和城市利用（第二次利用）。这种地下水开发模式的主要优点是：

①水资源得到了两次利用（农业灌溉和工业城市开发），极大地提高了水的利用价值，符合经济的原则；

②充分发挥了首山水源地所在的太子河冲洪积扇的第四系地下水储水构造（地下水库）巨大库容的调蓄作用，符合地下水资源开发的调蓄原则；

③地下开采水位得到了控制（30m 左右），经过几十年的开发没有产生趋势性的下降，多年地下水位观测曲线就如一条标准的多周期（以年为单位）的正弦曲线；

④水质稳定良好，符合环保原则。

笔者和留美学者张国祥博士在地下水管理模型项目中曾认真地研究了这种地下水开发模式，并提出了试图使其更为完善的方案^[4]。

2—2 龙河水源模式。

龙河位于大连市旅顺口区，该水源是沿龙河河谷建设的一个小型滨海河谷地下水库型的地下水水源，日开采量 3500—7000 吨/日，这个水量对极为缺水的旅顺口区具有十分重要的意义。虽然从工程设计的内容上讲地下水库并没有完全完成，但地下坝工程仍显示了巨大的拦截地下水的优越性，这种开发模式的主要优点是：

①为辽东半岛、山东半岛等受海水入侵威胁的滨海地区河谷型储水构造的地下水资源开发提供了一种十分理想的模式，即在开发地下水资源的同时又能有效地防治海水入侵，解除了开发这种类型地下水资源的后顾之忧；

②由于地下水位的升高，改善了河谷地区的地质环境和生态环境，甚至由于地表积水而形成新的地貌景观和旅游景点；

③为滨河河谷整个水资源开发利用模式的建立提供了新的思路和模式，这种思路和模式是：在河谷地段的中上游（山区或丘陵）植树造林建设“绿色水库”，涵养水源；在中游合适地段建设“地表水库”；拦蓄河水在下游或河口地段通过修建地下帷幕坝建设“地下水库”，拦蓄地下水，使所谓的“三水”甚至“四水”资源得到比较充分的补给和利用。

这种在滨海短径流河谷区的“绿色水库”、“地表水库”、“地下水库”联合开发和建设的水资源开发模式是又一种十分理想水资源联合开发的科学的模式，这种模式正在被辽宁省、山东省等北方干旱地区所接受和实践，当然，在实践中还有很多需要改进和完善之处^[5]。

2—3 铁西水源模式。

鞍山市的供水除了首山水源之外还有鞍山市郊的铁西地下水源，这种模式的成功之处是孔隙水（杨柳河冲洪积扇）和隐伏岩溶水的联合调度和联合开发，由于两种含水层的迭置且有一定的水力联系，形成了所谓的含水层耦合结构^[6]，这为这种开发模式的建立创造了十分有利的条件，它的优点是不仅可以充分发挥相互迭置的两种含水层（两种类型的地下水库）的巨大调蓄作用，还可以同时充分发挥第四纪冲洪积扇孔隙水含水层面状垂直补给作用通畅和深层裂隙岩溶水含水层的区域补给作用。这些条件都为地下水资源的可持续发展创造了十分有利的条件，因此，这个水源为缓解鞍山市供水紧张状态发挥了历史的作用。

这几种模式通过适当的补充修正后将成为更为理想，即更为科学的地下水开发模式，甚至补充发展为比较理想的地表水流域水资源联合开发模式。

3. 降落漏斗的形成条件及其启示

3—1 开采条件下降落漏斗的形成是必然的

地下水作为含水介质中的渗流体与在空气中水的“自由运动”相比，渗流速度很慢，水

的渗透系数很小，加上井的结构阻力，因此补给速率与开采速率相比，后者一般均远远大于前者，造成地下水位不断下降，直至取得动平衡，是为单井地下水开采时降落漏斗的形成；当井群开采时，在一定的时期内单井开采时形成的水位下降，相互干扰并连接成一个不规则的曲面，即井群开采形成的降落漏斗；由一个或多个井群形成的开采降落漏斗即水源地开采降落漏斗。例如沈阳漏斗、辽阳首山漏斗、鞍山铁西漏斗等；水源漏斗的进一步发展就是大的区域漏斗，如华北平原深层水大的区域漏斗面积可达几千平方公里。因此，在开采条件下降落漏斗的形成是必然的，无论是单井漏斗、井群漏斗、水源漏斗还是一定条件下的区域大漏斗的形成都是如此，但是随着漏斗规模的扩大，制约漏斗形成的因素就不仅仅是地下水的补给速率，还要涉及开采与补给的均衡条件问题等因素，在一定的条件下降落漏斗趋于稳定是比较理想的。

3—2 影响降落漏斗形成的开采条件因素

影响降落漏斗形成的开采条件主要有：

3—2—1 井群密度

在水源建设中，目前井群密度设计的基本依据是开采的单井影响半径 R ，但理论与实践有一个基本的矛盾。水源管理单位希望开采井的间距小一些，即降低管理成本又减少征地，水文地质学家则希望开采井的间距大一些，尽量减少开采井间干扰，延长降落漏斗的形成时间，减小未来降落漏斗的影响范围。

3—2—2 开采方式和开采强度问题

开采方式和开采强度对降落漏斗的形成和发展影响也很大。所谓开采方式主要指间歇性和连续性开采问题，工业和城市供水一般为连续性开采，农业和其它方面一般都是间歇性开采，即有恢复期的开采，大的降落漏斗的形成发展都与连续性开采有关，降落漏斗的这种发展历史一般也都是连续的。开采强度问题包括三个方面的因素，即井群密度，开采时间和开采量控制，经常出现的问题是井群密度过大，开采时间连续，开采量过大，这为开采漏斗的形成创造了重要条件。

3—2—3 含水层的回灌和调蓄

含水层的回灌和调蓄是实现地下水开采采补平衡的根本措施，但在开采实践中一般并不考虑这种根本措施，多停留在设想理论研究和试验的阶段，像首山模式这种成功的实践较少。很多大的降落漏斗的形成和发展都忽视这方面的工作。当然为实现采补平衡，还可以减少开采量，这种措施只能在一定的条件下实现，一般是在工业产业结构调整期实现的，例如沈阳市就曾经出现过这种现象。但当漏斗区地下水位恢复时，会因为地下水位过高而出现另一类

地质环境问题，例如地下室淹没等。

3—3 正确认识地下水降落漏斗及其防治措施

3—3—1 地下水由于渗流速度较慢，因此开采降落漏斗是由于地下水的补给速率大大小于开采速率的结果，人们不可能改变这种条件，因此从这种意义上讲开采降落漏斗的形成和发展是不可避免的自然规律，人们只能适应而不可违背。

3—3—2 影响降落漏斗的开采条件因素有井群密度、开采强度、开采方式、采补平衡的控制等，井群密度、开采强度、开采方式等很多技术要素的确定经常是一种两难的选择，为避免钻进牛角尖儿，可以跳出来另辟蹊径，调整战略思路。

变集中高强度连续开采为分散的低强度间歇性开采，为此必要时也可以改变供水方向，让适应这种供水方式的产业和地区使用地下水，或者逐步将集中高强度连续开采方式调整为低强度间歇性开采方式，这实际上涉及到水资源开发利用的战略调整，例如城市供水以地表水为主，农业用水以地下水为主。

在水源地建设和运行时，必须实施采补平衡措施和环境优化措施，这是在地下水开采高级阶段必须要达到的目标，因为现在不仅有这方面的科学技术水平，而且有与此相适应的经济实力。

3—3—3 地下水资源开发与地质环境保护优化是联系在一起的，这是可持续发展战略的要求。地下水位并非越高越好，沈阳市在长期形成的开采漏斗区更是如此，由于工业产业结构调整，地下水位上升所产生的另一类地质环境问题表明，地下水位产生的地质环境问题是双向的，过低或过高都会对人类的生存、建设发展造成危害。不可失之偏颇。地下水位对地质环境的影响不仅是巨大的，而且是最活跃的，最敏感的，也是最易捕捉到的，因此也就成为与资源环境密切相关的关键要素。

4. 小结

对地下水的开发必顾及到它的资源意义和环境意义的两个方面，因此应当根据不同类型和不同地质环境下的地下水资源，从理论和实践的两个层面上总结和探索合理的地下水开发模式，科学认识和正确对待地下水开采降落漏斗问题，合理地对待和评价地下水位的高低。

参考文献

- [1] 张长春、邵勃、李兹君、崔亚莉, 地下水位生态环境效应及生态环境指标, 水文地质工程地质, Vol. 30 Feb 191:7—10
- [2] 赵天石, 地质环境要素的层次分析方法[J], 资源调查与环境, 2003 • 24(1):1—5
- [3] 张宗洁, 沈照理, 薛禹群等, 华北平原地下水环境演化[M]北京:地质出版社, 2000
- [4] 赵天石, 张国祥, 辽宁省下辽河平原东部地下水管理模型研究[J], 水文地质工程地质, 1991, 18(3)
- [5] 赵天石, 关于地下水库几个问题的探讨[J], 水文地质工程地质, 2002, 5
- [6] 赵天石, 一个双层渗流系统藕和结构地下水资源评价有限差分计算实例, 1985, 1

The Exploitation Patterns of Underground Water and Subsidence Cone Problem

ZHAO Tian-shi, WANG Wei-dong

(Liaoning Hydrological-Engineering-Geological Prospecting Academy, Dalian, 116037)

Abstract: Underground water resources have both resource meaning and great environmental importance. The ideal exploitation patterns of underground water must be considered both in pumping water and environmental problem simultaneously. Over pumping the underground water and don't pay more attention to recharge will naturally form the subsidence cone. Three ideal developing patterns of underground water are suggested according to the study in Liaoning region. 1) Shoushan water resource pattern: using river and reservoir water to irrigate (the first using), and the water ooze into the ground and recharge the water-bearing layer, then pump the underground water to supply industry and city (the second using). 2) Longhe water resource pattern: Plant trees to build "green reservoir" in the up and middle parts of the river to collect water, and build surface reservoir in the middle part of the river to store up the water, and construct the underground curtain dam to build underground reservoir. 3) Tiexi water resource pattern: pore water and buried karst water are combined to exploit and attempt, because of the both water-bearing layers have a water connection, and form a water coupling structure.

Keywords: Underground water resource pattern; geological environment; exploitation pattern; subsidence cone

① 作者简介:

赵天石:男, 1942年9月生 教授级高级工程师 长期从事水文地质工程地质环境地质的实际和研究工作, 参加“环渤海地区地下水资源和地质环境调查评价”项目工作。