

DOI :10.3969/j.issn.1004-6933.2011.06.005

# 山东半岛地下水调蓄及其生态资源环境效应分析

孙安帅<sup>1</sup>, 庞清江<sup>1</sup>, 陈荣波<sup>2</sup>, 庞树森<sup>3</sup>, 宿立明<sup>1</sup>

(1. 山东农业大学水利土木工程学院, 山东 泰安 271018; 2. 河海大学水文水资源学院, 江苏 南京 210098; 3. 长江水利委员会长江科学院水资源综合利用研究所, 湖北 武汉 430010)

**摘要** 针对山东半岛区特殊水源水系及供水结构, 利用地下水资源调蓄研究理论, 全面分析了山东半岛地下水资源调蓄的生态资源环境效应。结果表明, 在山东半岛修建地下水库进行地下水资源调蓄, 不仅能有效阻滞海水入侵, 减少旱涝灾害, 还能增加区域地下水资源可开采利用量, 调节时空分布不均的水资源, 改善区域因地下水超采而引发的水文地质环境, 促进生态环境系统的平衡, 提高区域用水安全和工农业生产能力。

**关键词** 水资源; 地下水调蓄; 生态环境; 效应分析

中图分类号: P641.8      文献标识码: A      文章编号: 1004-6933(2011)06-0019-05

## Regulation and storage of groundwater and its ecological and environmental effects in Shandong Peninsula

SUN An-shuai<sup>1</sup>, PANG Qing-jiang<sup>1</sup>, CHEN Rong-bo<sup>2</sup>, PANG Shu-sen<sup>3</sup>, SU Li-ming<sup>1</sup>

(1. Water Conservancy and Civil Engineering College, Shandong Agricultural University; Taian 271018, China; 2. College of Hydrology and Water Resources, Hohai University, Nanjing 210098; China; 3. Institute of Water Resources Comprehensive Utilization, Yangtze River Scientific Research Institute, Yangtze River Water Resources Commission of Ministry of Water Resources, Wuhan 430010; China)

**Abstract** : With consideration of the singularity of the fountainhead and water supply system in Shandong Peninsula, the ecological and environmental effects of regulation and storage of groundwater in the peninsula were comprehensively analyzed based on groundwater regulation and storage theories. The study results indicate that reasonable regulation and storage of groundwater through construction of underground reservoirs can prevent salt water intrusion, reduce disasters due to drought and waterlogging increase the utilization of groundwater, adjust the variability of water resources spatiotemporally, improve the hydrogeological environment affected by groundwater overdraft, promote the balance of ecological and environmental system and enhance the safety of water use and agricultural and industrial productivity.

**Key words** : water resources; regulation and storage of groundwater; ecological environment; effect analysis

我国北方地区由于大规模持续超采地下水, 形成了区域降落漏斗, 甚至区域降落漏斗带。区域地下水水位的下降使平原或盆地的湿地萎缩或消失, 地表植被破坏, 生态环境退化, 地下水的自然恢复调蓄功能也大大减弱。有学者<sup>[1]</sup>认为, 地下水超采腾出较多的地下库容和可利用的地下储水空间, 形成

“地下水库”, 为实施地下水调蓄提供了重要机遇。

山东半岛是我国用水量较大的区域之一, 区内工农业生产用水、城镇建设用水、居民生活用水主要依靠地下水供水, 区域地下水开采程度较高, 使良好的区域生态环境较易受到人为因素的影响, 显示出较高的脆弱性<sup>[2]</sup>, 严重影响了区域经济、社会的可持

基金项目: 山东省教育厅重点项目(J06N05); 山东省环境保护重点项目([2006]J03-2); 泰安市大学生科技创新行动计划项目(2009D1012)

作者简介: 孙安帅(1985—)男, 山东临沂人, 硕士研究生, 从事地下水资源开发利用等方面的研究。E-mail: orangesas@163.com

通讯作者: 庞清江 教授。E-mail: pangqj@163.com

续发展及人民生活水平的提高。通过调蓄地下水资源,增加地下水资源可开采量,可逐步改善区域水生态环境,缓解水资源供需矛盾,实现水资源的优化配置和可持续利用。地下水调蓄对高效利用水资源和有效保护、改善生态环境具有重要意义,是保障供水安全、服务经济社会发展和人类安居的系统工程技术之一[13]。

### 1 研究区域概况

山东半岛地处山东省东部,位于黄海、渤海之间,包括青岛、烟台、淄博、潍坊、威海、东营、日照 7 个地级市,年降水量 650 ~ 850 mm,其水系发源于中部山地,南北分流,独流入海,河床比降大,源短流急。山东半岛特殊的水源水系降低了本区水资源对经济可持续发展的支撑能力,导致地下水超采严重,引发海(咸)水入侵,出现超采漏斗、地下水污染、土地盐渍化、潜水埋藏水位下降、地面沉降、地方病[4]等问题,减少了地下水在枯水季节对流域的生态需水补给,相继出现了各种环境地质问题,构成区域发展的瓶颈。

地下水是山东半岛主要供水水源,地下水的取用开采量逐年增加。山东省地下水天然补给总量为 193.46 亿  $m^3/a$ ,可开采总量为 178.65 亿  $m^3/a$ ,其中 2001—2005 年平均开采地下水 122.08 亿  $m^3/a$ 。山东半岛各地市 1994—2003 年地下水供水量占年供水量比例如图 1 所示。由图 1 可以看出,淄博、潍坊、烟台和青岛 4 地市 50% 以上的供水来自地下水,威海、日照 30% 左右的供水来自地下水。

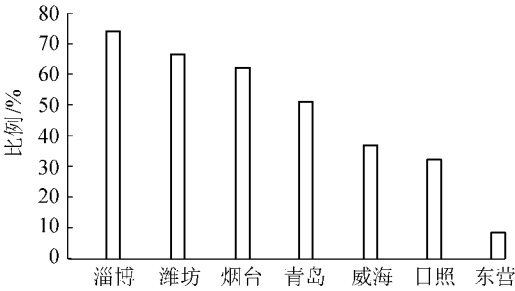
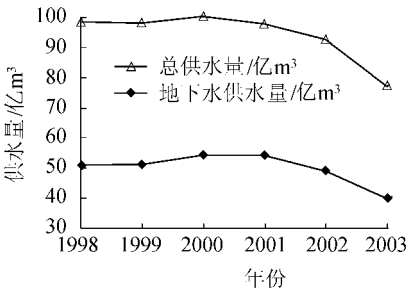


图 1 山东半岛各地市 1994—2003 年地下水供水量占年供水量比例

1998—2003 年,山东半岛 6 年年均供水量为 92.46 亿  $m^3$ ,其中地表水年均供水量为 42.49 亿  $m^3$ ,地下水年均供水量为 49.90 亿  $m^3$ ,分别占总供水量的 45.0% 和 52.9%。青岛、淄博、烟台、潍坊等市地下水的开采量都已经超过地表水供水量,见图 2。这也是山东半岛地下水漏斗区面积持续增加的主要原因。

山东半岛是我国北方水资源短缺的地区之一,



注 根据《山东省水资源公报》整理。

图 2 山东半岛 1998—2003 年总供水量、与地下水供水量情况

其城市缺水问题尤为严重。引黄济青工程、南水北调东线工程、西水东调工程[5]等跨流域调水工程虽然增加了山东半岛的客水量,但仍不能从根本上解决山东半岛供水需求问题。根据生态自然观的整体性、循环性、平衡性和多样性以及生态规律[6],研究山东半岛的生态环境问题,可以发现,由于近 30 年来山东半岛工农业生产用水量不断增加,水资源开发利用率逐年增高,但在地下水开采过程中缺乏对地下水与生态环境互动影响的预测规划[7],因而出现了一系列区域性地质环境、水环境和生态环境等方面的互动效应[8-9],致使该区生态环境平衡系统受到严重干扰和破坏,原生水环境状况趋于恶化。

山东半岛汛期的大量降水产生的地表径流由于无法完全储蓄在地表水库中,只能排泄入海,而汛期过后出现长时间的水资源短缺。例如,胶东半岛地区多年平均河川径流量为 74.23 亿  $m^3$ ,拦蓄量为 25.18 亿  $m^3$ ,拦蓄量仅为河川径流量的 33.92%,66.08% 的河川径流量白白流走[10]。这种情势迫切需要将地表径流弃水加以合理储蓄调用。利用山东半岛已建的地下水库和地下水超采形成的超采漏斗区漏斗填充式地下水库[11],丰水期将多余的地表水储存在地下含水层中,干旱缺水时在保证环境生态需水量、保证不会出现地面沉降等地质问题的前提下大量取用水资源,同时也腾出了地下库容,为下一次丰水期的储水提供空间。这样既调节了区域水资源供需的时空矛盾[1],也缓解了城市资源、环境压力,既解决了水资源短缺问题,也预防和控制了地质灾害。

### 2 地下水调蓄的生态资源环境效应

#### 2.1 宏观生态资源环境效应

山东省 1990 年在龙口市八里沙河下游修建了 1 处小型实验性地下水库,1995—2000 年又陆续修建了龙口黄水河、青岛大沽河和烟台夹河 3 处大中型地下水库,2004 年建成了莱州王河地下水库,见表 1。地下水库级别见表 2。

表 1 山东半岛区目前已建地下水库主要指标统计<sup>[9-13]</sup>

| 地下水库名称 | 含水层岩性 | 流域面积/<br>km <sup>2</sup> | 汇流面积/<br>km <sup>2</sup> | 含水层<br>厚度/m | 地下坝<br>长度/m | 总库容/<br>亿 m <sup>3</sup> | 级别 | 修建年份 |
|--------|-------|--------------------------|--------------------------|-------------|-------------|--------------------------|----|------|
| 龙口八里沙河 | 砂砾石   | 47.75                    | 14.70                    | 4~6         | 756         | 42.97                    | 小型 | 1990 |
| 龙口黄水河  | 砾质粗砂  | 1 034                    | 51.82                    | 2~5         | 5 996       | 5 359                    | 中型 | 1995 |
| 青岛大沽河  | 砂砾石   | 4 631                    | 421.70                   | 5~19        | 2 600       | 38 400                   | 大型 | 1998 |
| 烟台夹河   | 砂砾卵石  | 2 296                    | 65.00                    | 5~30        | 3 890       | 20 500                   | 大型 | 2000 |
| 莱州王河   | 砂砾石   | 326.8                    | 68.49                    | 6~36        | 13 500      | 5 693                    | 中型 | 2004 |

表 2 地下水库有效库容分级标准<sup>[12-13]</sup>

| 地下水库级别 | 总库容/亿 m <sup>3</sup> | 地下水库级别 | 总库容/亿 m <sup>3</sup> |
|--------|----------------------|--------|----------------------|
| 特大型    | > 10                 | 中型     | 0.1~1                |
| 大型     | 1~10                 | 小型     | < 0.1                |

山东半岛建成的地下水库能储蓄江河及水库弃水,增加地下水可开采量,改善区内生态环境质量,提高环境自我恢复能力,保障区内工农业生产和生活用水,使地下水发挥了巨大的资源环境效益。事实证明,地下水库是地下水资源调蓄的主要方式,具有供水和保护生态环境系统的双重效益。

a. 解决了区域水资源时空分配不均匀的问题,增加了可利用水资源量。通过将丰水季节自然排泄入海的洪水、过量的河水和水库多余的弃水等地表水引蓄到地下含水层,提高了地下水水位,增加了枯水期地下水资源的可开采量,从而提高了区内工农业生产和生活用水枯水季节的供水安全度,保障了经济社会稳定发展,带来良好的资源经济效益。

b. 促进了生态环境系统平衡,防止了因地下水过量开采引发的地质问题。区内地下水水位的提高减少了河道对地下水的渗漏补给,从而保障了河道的生态需水,有利于生态河道的形成和地下水源的涵养。

c. 提高了区域供水安全和水质安全。人工调蓄补充地下水能够将本来可能浪费的水资源储存起来,保证在取用水高峰期提供可靠的水量;同时,由于地下水经过含水层的过滤,细菌、杂物、漂浮物等较少,并且地下水不易被污染,水质较好,可为区域发展提供安全的水源。

d. 减少了沿海区域海水的入侵。通过地下水调蓄使得地下水水位升高,地下淡水与咸水之间的水力联系可以使得沿海区域海水入侵范围缩小,改善因海水入侵导致的地下水可开采区域减少、机井报废、耕地质量下降、粮食减产,以及可能引发的某些地方病等问题。

2.2 微观生态资源环境效应分析

2.2.1 八里沙河实验性地下水库

为了防治海水入侵,增加可供水量,“七五”期间山东省开始进行八里沙河地下水库调节地下水、防止海水入侵技术研究,采用高压喷射灌浆技术在八

里沙河建立了地下水库<sup>[14]</sup>。该地下水库的最大库容 42.97 万 m<sup>3</sup>,兴利库容 35.5 万 m<sup>3</sup>,年均拦蓄水量 60 万~62 万 m<sup>3</sup>,年复蓄指数在 1.8~2.0 之间。地下水库建成后,水库坝前方塘内水量增加非常明显,坝后地下水水位明显抬高(图 3),地下水可开采量增加,发挥了巨大的资源经济效益。

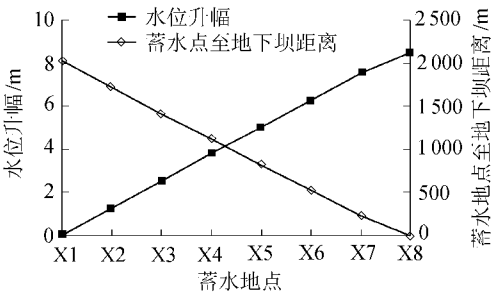


图 3 八里沙河地下水库水位升幅与蓄水点至地下坝距离情况

a. 拦蓄地下潜流。八里沙河地下挡水坝建成后,对其进行的渗漏检测结果及弱透水层拦蓄地下潜流效果进行计算<sup>[15]</sup>,计算结果见表 3。从表 3 可以看出,地下潜流的拦蓄率达 99.1% 以上,表明八里沙河地下挡水坝能够有效拦蓄地下潜流,增加地下水可开采量。

表 3 八里沙河地下挡水坝拦蓄地下潜流效果

| 弱透水段/m      | 建坝前地下<br>潜流量/万 m <sup>3</sup> | 建坝后地下<br>潜流量/万 m <sup>3</sup> | 地下潜流<br>拦蓄量/万 m <sup>3</sup> | 地下潜流<br>拦蓄率/% |
|-------------|-------------------------------|-------------------------------|------------------------------|---------------|
| 0+089~0+242 | 19.368 8                      | 0.144 0                       | 19.224 8                     | 99.3          |
| 0+320~0+384 | 3.256 5                       | 0.058 5                       | 3.198 0                      | 98.2          |
| 0+384~0+412 | 3.054 7                       | 0.027 6                       | 3.027 1                      | 99.1          |
| 合 计         | 25.680 0                      | 0.230 1                       | 25.449 9                     | 99.1          |

b. 提高灌溉用水保证率。灌区地下水的控制埋深关系到灌溉保证程度,埋深值小,保证率就低,反之,保证率就高。地下水水位控制埋深取 5.69 m 时,灌溉用水保证率可达 72.0%。充分利用地下库容调节丰、枯水期的水资源,可最大限度地利用地下水资源,增加水资源利用率,提高供水保证率。

2.2.2 莱州王河地下水库

莱州市水资源贫乏,年均超采地下水 6 100 万 m<sup>3</sup>,1997 年海水入侵面积 234.15 km<sup>2</sup>。该市 2010 年规划用水量为 61 830 万 m<sup>3</sup>,缺水达 40 103.4 万 m<sup>3</sup>,水资源短缺成为制约莱州市经济发展的瓶颈。在这种情况下,莱州市提出了兴建王河地下水库供水工

程 综合治理海水入侵的设想。

王河地下水库库区总面积 68.49 km<sup>2</sup> ,地下水库总库容 5 693 万 m<sup>3</sup> ,最大调节库容 3 273 万 m<sup>3</sup> 。2004 年 ,王河地下水库地下坝工程和部分回灌工程竣工 ,同年起地下水库开始发挥效益 ,库区内地下水水位明显回升 ,平均抬升 3.31 m ,见图 4。海水侵染面积大幅减小 ,由建库前的 78.69 km<sup>2</sup> 减为 2004 年的 25.36 km<sup>2</sup> ,减少了 68% ,建库后的地下水氯离子含量比建库前最大减少 71.1% ,平均减少 50.6% ,见图 5。王河地下水库的兴建改善了周边地区的生态环境 ,提高了社会效益和经济效益 ,为莱州市经济的发展发挥了巨大的作用。

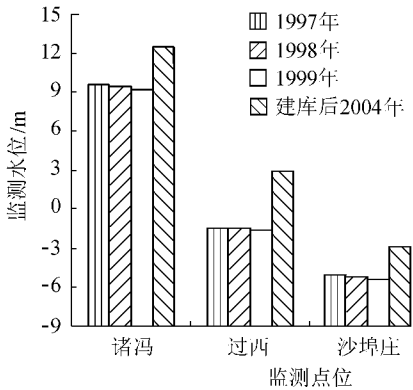


图 4 王河地下水库观测井水位变化趋势

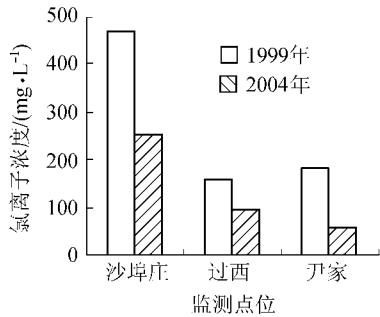


图 5 王河地下水库建库前后地下水氯离子含量变化情况

a. 防治了海水入侵。通过修建地下水坝阻止了海水透过含水层入侵淡水 ,从而减少海水入侵面积。

b. 增加了地下水源。在王河地下水库库区建设的过西供水水厂 ,日供水量达到 1.5 万 t ,为区域增加了可供地下水量 ,开辟了新的供水水源地。

c. 提高了生态环境自我修复能力 ,改善了区域环境的脆弱性。王河地下水库最大调节库容 0.3273 亿 m<sup>3</sup> ,通过丰水期蓄水或截蓄江河弃水可保证枯水期供水需求。由于地下水库具有多年水资源调节特性 ,所以能够抵御区域由于年际年内降雨不均而产生的洪旱灾害 ,并在汛期引蓄河水保育湿地 ,改善了区域环境的脆弱性 ,恢复湿地 330 hm<sup>2</sup>。

d. 提高了工农业生产能力 ,使供水能力及供水水质得到保证和提高。王河地下水库设计调节库容 2080 万 m<sup>3</sup> ,对工业及生活供水的保证率为 99.7% ,对农业灌溉供水的保证率为 75%<sup>[16]</sup> ,保障了莱州市人民饮用水安全 ,为工业生产提供了可靠的供水水源 ,为农业粮食产量的增加提供了保障(王河地下水库建成后 ,粮食增产 1 万 t ,年经济效益近 3 000 万元<sup>[17]</sup>)。实施地下水资源调蓄取得了巨大的宏观和微观效益 ,且目前的调蓄过程中并未出现较大的区域性负效应。建设地下水库的经验和技术值得在更大区域内推广和应用。

3 研究区地下水资源调蓄未来发展趋势

地下水库建设条件为 :①具有相对适宜的隔水边界或弱透水层及底板的储水空间 ;②良好的入渗补给条件 ,以保证地下水库达到最佳的经济效益 ;③足够的补给水源 ,以使地下水库在枯水期或枯水年有足够的水量 ;④良好的补给区建设规划 ,以提高地下水库的补给速度 ,节约成本 ;⑤地下水库开发利用经济、环境、生态等条件<sup>[9,13]</sup> ,以及地下水库有效库容分级标准。参考山东省地质状况 ,分析可知山东半岛可建地下水库 42 处(表 4)。采用含水层数学模型(公式(1))和含水层储水能力计算公式(2) ,对可建地下水库库容进行概算 ,可得山东半岛总调节水量为 39.01 亿 m<sup>3</sup>。

表 4 山东半岛可建地下水库及地下水调节量情况一览表

| 地区 | 宜建地下<br>水库数/处 | 地下水库<br>总面积/km <sup>2</sup> | 年总调节<br>水量/亿 m <sup>3</sup> | 年可增加的调<br>节开采量/亿 m <sup>3</sup> |
|----|---------------|-----------------------------|-----------------------------|---------------------------------|
| 烟台 | 20            | 1 511.60                    | 7.2269                      | 3.3039                          |
| 威海 | 6             | 195.09                      | 1.1509                      | 0.4321                          |
| 青岛 | 12            | 1 696.89                    | 6.6372                      | 2.5744                          |
| 日照 | 2             | 96.88                       | 0.3558                      | 0.1276                          |
| 潍坊 | 2             | 281.50                      | 1.1062                      | 0.4290                          |
| 合计 | 42            | 4 381.66                    | 16.4770                     | 6.8670                          |

$$\begin{cases} \frac{\partial}{\partial x} \left[ K(H - H_b) \frac{\partial H}{\partial x} \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[ K(H - H_b) \frac{\partial H}{\partial y} \right] + \sum_{i=1}^N Q_i \delta_i + W_b(x, y, t) = S \frac{\partial H}{\partial t} & t \geq t_0, (x, y) \in \Omega \\ H(x, y, t) = H_i(x, y) & (x, y) \in \Omega, t = t_0 \\ H(x, y, t)|_{\Gamma_1} = H_b(x, y, t) & t \geq t_0, (x, y) \in \Gamma_1 \\ K(H - H_b) \frac{\partial H}{\partial n} |_{\Gamma_2} = q(x, y, t) & t \geq t_0, (x, y) \in \Gamma_2 \end{cases} \quad (1)$$

式中:  $W_k(x, y, t)$  为地下水水流模型中的随机误差项, 包括实际地下水系统概化成模型引起的误差和边界条件概化、初始条件概化引起的误差等项;  $H(x, y, t)$  为渗流域中任意时刻的地下水头分布值,  $m$ ;  $H$  为地下水位标高,  $m$ ;  $H_b$  为含水层底板标高,  $m$ ;  $(H - H_b)$  为含水层厚度,  $m$ ;  $K$  为含水层的渗透系数,  $m/d$ ;  $S$  为含水层的贮水系数(无量纲);  $H_0(x, y)$  为渗流域中初始水头分布或地下水流系统的初始状态,  $m$ ;  $H_b(x, y, t)$  为渗流域中已知边界水头分布值,  $m$ ;  $Q_i$  为渗流域中  $i$  节点上源汇项,  $\Omega$  为渗流域;  $\Gamma_1$  为渗流域中已知水头(第一类)边界;  $\Gamma_2$  为渗流域中已知流量(第二类)边界;  $\frac{\partial H}{\partial n}$  为第二类边界水头的外法向导数;  $q(x, y, t)$  为第二类边界在  $t$  时刻的单宽流量,  $m^2/d$ 。

按照以上模型所建的水文地质模型、数学模型及水文地质参数, 经正确识别和验证, 能正确反映区域水文地质条件以及地下水运动特征。

$$V = \sum \Delta h_i \mu_i A_i \quad (2)$$

式中:  $V$  为地下水库库容,  $m^3$ ;  $\Delta h_i$  为各类蓄水体在全库区范围内的平均厚度,  $m$ ;  $\mu_i$  为各类蓄水体的给水度;  $A_i$  为库区内各类蓄水体的面积,  $m^2$ 。

山东半岛春旱秋涝, 春天开采地下水, 腾出地下库容, 为夏秋季降水入渗创造条件。依据山东省地矿局 801 水文地质工程地质大队完成的山东省全省 1:25 万区域水文地质环境地质报告和山东省地质图, 在烟台市圈定 3 处宜建地下水库的地区, 进行地下水调蓄: 龙口市界河、蓬莱市平山河、平畅河等河流下游均为地下水较富的水区, 地下水调蓄能力强, 宜建地下水库<sup>[18]</sup>。这些地区地下水开采强度较大, 不同程度地存在海水入侵问题, 修建地下水库可以增加其地下水补给量和开采量, 有效控制海水入侵, 改善当地的生态环境, 进而缓解胶东沿海地区供水紧张的局面。

这些地下水库的建成将在山东半岛产生巨大的水资源、区域环境、生态系统、经济社会等综合效益, 极大地改善地下水超采的状况, 填平超采漏斗, 防治海水入侵, 增加生态可用水量, 恢复湿地功能, 并对区域小气候产生有益的影响。

## 4 结 语

地下水调蓄受到水文地质条件、社会经济发展状况、水源、生态环境水位、库容及地下水库管理等因素制约, 因此对周围环境的互动效应不可忽略, 应当做好调蓄区地下水脆弱性评价。在保证区域供水的同时, 要避免因蓄水引起潜水位大幅上升而导致

的大规模盐渍化问题或土地质量变化问题, 同时也要防止地下水库被过度疏干而影响区域生态需水, 引发水文地质、环境地质问题。

山东半岛兴建地下水库的实践经验表明, 利用地下水库调蓄地下水资源, 可取得巨大的资源环境良性效应, 山东半岛兴建地下水库积累的经验和技術值得在水文地质条件相似的地区推广应用。值得注意的是, 应把区域地下水与全国性地下水的可持续利用结合起来, 保证区域长期水资源管理决策的正确性<sup>[19]</sup>。

## 参考文献:

- [1] 费宇红, 崔广柏. 地下水人工调蓄研究进展与问题[J]. 水文, 2006, 26(4): 10-14.
- [2] 迟宝明, 易树平, 李治军, 等. 大连沿海中小流域地下水人工调控研究[J]. 水资源保护, 2005, 21(6): 34-36.
- [3] 孙蓉琳, 梁杏. 利用地下水库调蓄水资源的若干措施[J]. 中国农村水利水电, 2005(8): 33-35.
- [4] 贺可强, 卢耀如, 李关宾, 等. 山东半岛城市群地区地质资源与环境及其承载力综合分析与评价[M]. 济南: 山东大学出版社, 2009.
- [5] 徐建国, 武善文, 卫证润, 等. 山东半岛西水东调受水区地下水库工程论证[J]. 勘察科学技术, 2004(5): 50-54.
- [6] 教育部社会科学研究与思想政治工作司. 自然辩证法[M]. 北京: 高等教育出版社, 2009.
- [7] BABA A, HOWARD K W F, GUNDUZ O. Groundwater and ecosystem[M]. The Netherlands: Springer in cooperation with NATO Public Diplomacy Division, 2006.
- [8] 张宗祜, 沈照理, 薛禹群. 华北平原地下水环境演化[M]. 北京: 地质出版社, 2000.
- [9] 王开章, 孔凡亮, 王令文. 山东省地下水资源开发与环境问题[M]. 郑州: 黄河出版社, 2002.
- [10] 徐建国, 卫政润, 张涛, 等. 环渤海山东地区地下水库建设条件分析[J]. 地质调查与研究, 2004, 27(3): 197-202.
- [11] 王津津, 王开章, 李晓. 超采漏斗区漏斗填充式地下水库的可行性研究[J]. 工程勘察, 2009(3): 36-41.
- [12] 李旺林, 束龙仓, 殷宗泽. 地下水库的概念和设计理论[J]. 水利学报, 2006, 37(5): 613-618.
- [13] 李砚阁, 束龙仓. 地下水库建设研究[M]. 北京: 中国环境科学出版社, 2007.
- [14] 马承新. 山东省地下水人工回灌补源模式研究[D]. 武汉: 武汉大学, 2005.
- [15] 李呈义, 李道真, 刘培民, 等. 八里沙河地下水库拦蓄调节地下水技术试验研究[J]. 山东水利科技, 1995(2): 1-5.
- [16] 李旺林, 束龙仓, 殷宗泽. 地下水库设计理论初探[C]. // 中国水利学会第二届青年科技论坛论文集. 郑州: 黄河水利出版社, 2005: 358-362.

(下转第 27 页)

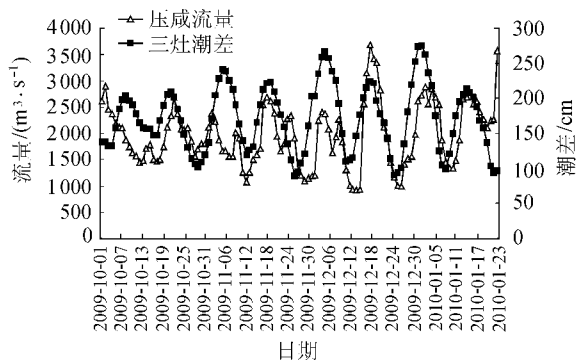


图4 压咸流量与三灶潮差对比

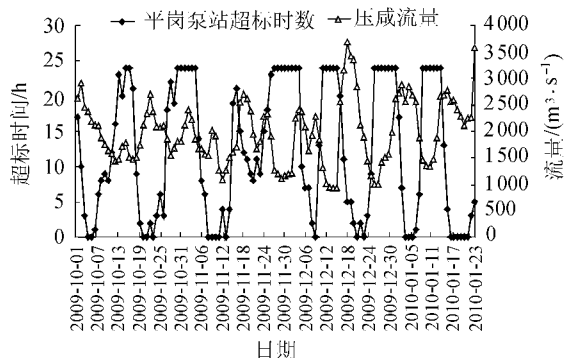


图5 压咸流量与平岗泵站超标时间对比

### 3 结论与讨论

提出了“最早取淡日”和“最后取淡日”的概念，利用 2005—2010 年枯季咸潮数据进行分析，探讨了取淡时机规律。研究显示：农历八月至正月，相对于最大潮差日，最早取淡日呈逐月向后推移的趋势，建议压咸流量应在潮周期最早取淡日之前 1 d 到达思贤滬，农历十月至腊月弱潮周期应在最大潮差日前 2 d 开始压咸；最后取淡日与最小潮差日关系较复杂，建议根据不同月份最后取淡日与最小潮差日的关系以及气象条件，调整压咸时机，压咸流量应在潮周期最后取淡日之前 2~3 d 到达思贤滬，持续 2 d 左右。咸潮强度与径流、潮汐、风、波浪、河道地形、海平面、拦门沙等影响因子有关，磨刀门水道咸潮上溯机理复杂。由于咸情监测数据还比较缺乏，笔者只是在有限的统计时间段内，尽量收集更多的有效样本对咸潮影响区水资源的取淡时机做尝试性探索，以期对珠江流域枯水期的水量调度及澳门、珠海、中山等地区的供水安全保障提供参考。

### 参考文献：

[1] CHEN X, ZONG Y. Major impacts of sea level rise on agriculture in the Yangtze delta area around Shanghai[J]. Applied Geography, 1999, 19(1): 69-81.

[2] 沈焕庭, 茅志昌, 朱建荣. 长江河口盐水入侵[M]. 北京: 海洋出版社, 2003.

[3] 茅志昌, 沈焕庭, 徐彭令. 长江河口咸潮入侵规律及淡水资源利用[J]. 地理学报, 2005, 55(2): 243-250.

[4] 陈水森, 方立刚, 李宏丽, 等. 珠江口咸潮入侵分析与经验模型: 以磨刀门水道为例[J]. 水科学进展, 2007, 18(5): 751-755.

[5] 朱三华, 沈汉, 林焕新, 等. 珠江三角洲咸潮活动规律研究[J]. 珠江现代建设, 2007(6): 1-7.

[6] 吴继伟, 刘新成, 潘丽红. 长江口北支咸潮倒灌控制工程水动力数值模拟[J]. 水利水电科技进展, 2006, 26(4): 43-45.

[7] 王津, 陈南, 姚泊. 珠江三角洲咸潮影响因子及综合防治综述[J]. 广东水利水电, 2006(4): 4-8.

[8] 刘俊勇, 张云, 崔树彬. 一维潮流与含氯度耦合数学模型及其应用[J]. 水资源保护, 2006, 23(3): 6-10.

[9] 彭静, 王浩, 徐天宝. 珠江三角洲的经济发展与水文环境变迁[J]. 水利经济, 2005, 23(6): 5-7.

[10] 闻平. 珠江三角洲咸潮入侵机理研究[D]. 广州: 中山大学, 2006.

[11] 刘德地, 陈晓宏. 基偏最小乘回归与支持向量机耦合的咸潮预报模型[J]. 中山大学学报: 自然科学版, 2007, 46(4): 89-92.

[12] 吴小明, 邓家泉, 吴天胜, 等. 珠江河口大型潮汐整体物理模型设计与应用[J]. 人民珠江, 2007(6): 14-16.

[13] 闻平, 陈晓宏, 刘斌, 等. 磨刀门水道咸潮入侵及其变异分析[J]. 水文, 2007, 27(3): 65-67.

[14] 刘斌, 翁士创, 闻平, 等. 咸潮分析评价方法与预测预报技术的探索与应用[J]. 人民珠江, 2007(6): 14-15.

[15] 尹小玲, 张红武, 方红卫. 枯季磨刀门水道咸潮活动与压咸控制分析[J]. 水动力学研究与进展: A 辑, 2008, 23(5): 554-559.

[16] 刘志敏, 黄国如, 高时友. 珠江河口压咸补淡枯季调水的物理模型研究[J]. 人民珠江, 2009(2): 27-28.

[17] 刘雪峰, 魏晓宇, 蔡兵, 等. 2009 年秋季珠江口咸潮与风场变化的关系[J]. 广东气象, 2010, 33(2): 11-13.

[18] 谢志强, 孙波. 2009—2010 年珠江枯水期的水量调度[J]. 中国防汛抗旱, 2010, 20(2): 13-16.

(收稿日期 2011-02-20 编辑 徐娟)

(上接第 23 页)

[17] 郝足青. 莱州市王河地下水库效益分析[R]. 北京: 中国水利水电科学研究院水资源研究所, 2004.

[18] 李文明. 山东水文调查有重要发现, 烟台三处宜建地下水库[EB/OL]. [2010-02-10]. [http://www.shm.com.cn/newscenter/2010-02/10/content\\_2839886.htm](http://www.shm.com.cn/newscenter/2010-02/10/content_2839886.htm).

[19] Committee on USGS Water Resources Research, Water Science and Technology Board, National Research Council. Investigating groundwater systems on regional and national scales[M]. Washington D C: National Academy Press, 2000.

(收稿日期 2010-07-28 编辑 彭桃英)