

滨海平原地下水库效益评估

王辉, 许学工

(北京大学 城市与环境学院, 地表过程分析与模拟教育部重点实验室, 北京 100871)

摘要: 王河地下水库是滨海平原有坝型地下水库, 具有防治海水入侵和供水的双重功效。为正确认识王河地下水库所提供的相关经济及生态效益, 合理评估其效益价值就显得尤为必要。采用相关价值评估方法, 分别评价了王河地下水库的征地节约、蒸发节约、水源涵养和调蓄洪水、防治海水入侵、提升地下水位、恢复湿地、供水以及粮食增产等效益价值。经过计算, 各项效益价值量从大到小依次为征地节约 > 防治海水入侵 > 涵养水源、调蓄洪水 > 粮食增产 > 供水 > 蒸发节约 > 恢复湿地 > 提升地下水位, 效益估值分别为 1.84 亿元、6619.59 万元、4648.97 万元、2647.23 万元、1269.29 万元、903.62 万元、819.9 万元和 646.36 万元。相比较淡水供给这一直接效益价值, 王河地下水库提供了更为丰富也更为庞大的间接效益价值, 为地下水库效益评估提供了有益的参考。

关键词: 水源涵养; 地下水库; 效益评估; 王河; 滨海平原

中图分类号: TV623

文献标识码: A

文章编号: 1672-643X(2015)05-0013-07

Evaluation of benefit of groundwater reservoir in coastal plain

WANG Hui, XU Xuegong

(College of Urban and Environmental Science, Key Laboratory for Earth Surface Process and Simulation of Ministry of Education, Peking University, Beijing 100871, China)

Abstract: Wanghe groundwater reservoir is a kind of coastal plain groundwater reservoir with underground dam and has double benefits of preventing seawater intrusion and providing fresh water. In order to correctly understand economic and ecological benefit, it is necessary to reasonably assess the benefit value of Wanghe groundwater reservoir. The paper used related evaluation methods to analyze the benefit values such as saving of land requisition and evaporation, water conservation, adjustment and storage of flood, prevention of seawater intrusion, enhancement of groundwater level, restoration of wet land, water supply and increase of grain yield. The result shows that the values of benefit from big to small in turn land are saving of land requisition > prevention of seawater intrusion > water conservation, adjustment and storage of flood > increase of grain yield > water supply > saving evaporation > restoration of wet land > enhancement of groundwater level, whose values are about 184, 66.2, 46.5, 26.47, 12.69, 9.04, 8.2 and 6.46 million yuan separately. Comparing direct benefit stemming from water supply, the Wanghe groundwater reservoir provided the greater and richer value of indirect benefit. This result can provide reference for benefit evaluation of similar groundwater reservoir.

Key words: water conservation; groundwater reservoir; benefits evaluation; Wanghe River; coastal plain

一般意义上, 地下水库是指充分利用地下天然储水空间开发建设的拦蓄、调节和利用地下水并兼有环境保护功能的地质工程。广义上的地下水库指代地下的天然储水空间^[1]。地下水库运行原理, 是在丰水期将多余的地表水储存在地下水库中, 干旱

缺水期再大量取用先前储存的地表水, 同时腾出地下库容, 为下一个丰水期继续储存地表水提供空间条件, 如此往复^[2-3]。根据地下坝的有无, 可将地下水库划分为有坝型地下水库和无坝型地下水库两种。日本采用的多为有坝型地下水库, 主要考虑的

收稿日期: 2015-05-17; 修回日期: 2015-06-12

基金项目: 国家自然科学基金项目(41271102)

作者简介: 王辉(1986-), 男, 山东泰安人, 博士研究生, 研究方向为资源管理与区域开发。

通讯作者: 许学工(1950-), 女, 山东济南人, 教授, 主要从事综合自然地理、资源管理与区域开发研究。

是防治海水入侵的需要;美国则多为无坝型地下水库,主要用于解决地下水过量开采引起的水资源枯竭和海水入侵等问题^[2]。然而无论是无坝型还是有坝型地下水库,都必须满足以下条件:①良好的地下储水空间以及边界隔水条件;②足够的用于回补地下的地表水源;③地表水与地下水水力联系畅通^[3-5]。在条件①方面,有坝型地下水库通过修建地下挡水坝使得地下水库的隔水边界完整起来,无坝型的地下水库自然边界条件本身即可满足地质圈闭结构条件。在条件③方面,当水力联系受阻,例如地表水与地下含水层间有粘土物质等组成的弱透水层存在时,可采取人工开挖渗井、渗渠的方式人工促渗,加强水力联系。此外,地下水库系统一般还会包括一些辅助设施,例如地表排污处理工程、监测系统^[4,6]。

本研究以莱州市王河地下水库为例,根据其发挥的主要功能和效益,采用市场价值法、影子工程法、替代成本法、成果参照法等相关方法评估了各项效益的价值。评估结果有助于合理认识地下水库的各项功能和价值,从而为维护其相关设施、保障其功能正常发挥服务。

1 王河地下水库概况

王河地下水库是为了防治海水入侵的目的而修建的,兼具了供水的功效。自1977年以来,莱州市先后出现了多次持续数年的严重干旱。期间,地表水资源枯竭,地下水成为主要水源,持续的超采造成滨海平原地下水位的严重下降,继而引发海水入侵灾害。从发现至今,莱州市海水入侵经历了初始、发展、恶化、缓解等多个阶段^[7]。为防治海水入侵,莱州市于1999年在王河下游地区开工建设地下水库工程。该工程于2003年完成主体工程,2004年竣工^[8-9],属滨海平原有坝型地下水库。库区总面积68.49 km²,最高运行水位-1.0 m,调节水位-4.87 m,死水位-9.0 m,总库容5 693万 m³,调节库容2 080万 m³,最大调节库容3 273万 m³^[1,8,10]。地下水库工程主要由地下防渗板墙、渗井渗渠、河道拦蓄工程以及供水工程等部分组成。

地下防渗板墙为王河地下水库主体工程,采用高喷灌浆和振动沉模工艺建成^[9],包括北坝、西坝和副坝3部分,总长13 593 m^[1],对外起到了阻挡海水入侵的作用^[9-10],属于海水入侵工程性实体帷幕治理措施^[11-14]。地下防渗板墙与周围的不透水边界组成了王河地下水库库区的范围。其中,东部边

界为太古-元古界胶东群民山组变质岩及燕山晚期侵入岩,透水性差,为二类隔水边界;西北部边界由燕山晚期花岗闪长岩组成,风化完全,属微透水层、相对隔水边界;北部边界为砾质粗砂、微含土砾质粗砂,为二类透水边界,地下防渗板墙北坝建成后,为二类隔水边界;西部边界由砾质粗砂、微含土砾质粗砂组成,属强透水层,为二类透水边界,地下防渗板墙西坝建成后,为二类隔水边界;南部边界为微含土砾质粗砂,属较强透水层,为二类透水边界,水库蓄水后一般在回水范围之外;东南边界为河床砾质粗砂及微含土砾质粗砂,属二类透水边界,水库蓄水后一般也在回水范围之外。王河地下水库库区基底由太古-元古界胶东群变质岩及燕山晚期侵入岩组成,属微透水层、相对隔水底板。库区储水层主要由砾质粗砂、微含土砾质粗砂、中细砂及砂壤土组成,是良好的储水空间^[15-17]。随着防渗板墙的建成,王河地下水库具备了良好的边界隔水条件和内部储水空间条件。

除此之外,王河地下水库工程还包括了人工补源及供水工程,其中人工补源工程包括地面拦蓄补源工程和地下回灌补源工程两部分^[9-10,15]。地面拦蓄补源工程包括拦河闸及橡胶坝等,扩大了河道的拦蓄水量,延长了地表水向地下水的转化时间,最终增加了地表水的入渗量。地下回灌补源工程则包括了王河河道内及过西引水渠内的人工渗井和渗渠等^[9-10,15],大大增加了地表水向地下水的转化效率。经估算,正常年份每年可增加回灌量1 180多万 m³^①。人工补源工程、供水工程与王河地下水库的地下储水空间一起又构成了一个滨海平原地区的ASR(aquifer storage and recovery,含水层回补与开采)系统^[18-20]。

2 王河地下水库效益及效益价值评估方法

2.1 王河地下水库效益

地下水库具有不占地、蒸发损失小、调蓄洪水与涵养水源、防治海水入侵、提高地下水位、恢复湿地、粮食增产、供水等效益。

(1) 征地节约效益。地下水库利用地下储水空间拦蓄和储存水资源,无需像地表水库一样占用大量地表面积,因此王河地下水库相比较地表水库节

① 莱州市人民政府、山东省水利科学研究所、莱州市水生态系统保护与修复试点工作技术工作报告,2011。

约了征地费用。

(2)蒸发节约效益。地下水水库潜水面远离地面,例如王河地下水水库调节水位距离地面4.87 m,潜水蒸发大为减弱。特别是当地下水库水位较低时,地下水的蒸发就更为微弱,此时可以视为没有蒸发损耗。因此王河地下水水库相比较地表水库具有蒸发节约的效益。

(3)涵养水源与调蓄洪水效益。王河流域属于大陆性半湿润季风气候区,降水季节不均,年际变差大。年内降雨多集中在夏季,此时,叠加上王河源短流急的河道形态特征,致使汛期排水迅速,宝贵的地表水源得不到蓄滞,更无法补充地下水。王河地下水水库修建后,由于地表拦蓄工程及促渗工程的实施,夏季雨洪水停留在河道内的时间变长,向地下水转化的效率也提高,因此显著地增加了地表水的入渗量,提高了地下水的储蓄量。根据有关资料,王河地下水水库年可拦截储蓄地表洪水约3 273万 m^3 ^[9,21]。

(4)防治海水入侵效益。海水入侵会导致地下水水质咸化,从而逐步失去利用功能和价值。王河地下水水库修建后,由于地下防渗板墙的截渗效果,海水入侵得到控制,库区海水入侵面积由78.69 km^2 减少为25.36 km^2 ,减少比例高达68%^[9,21],海水入侵防治效果良好。海水入侵得到有效控制之后,库区内地下水水质状况逐步好转,从而取得地下水水质淡化的生态效果。

(5)提高地下水位效益。地下水水库的修建使得库区内地下水储量上升,水位提高,超采漏斗面积逐步缩小,地下水水资源状况好转。例如,王河地下水水库的修建使得库区地下水位比建库前最多抬高了4.44 m,平均抬高了3.31 m^[9,21]。由于地下水位的回升,库区内原先由于取不到水而废弃的取水井重新得以利用,从而使得抽水能耗、设备投资和运行费用等都相应减小。

(6)恢复湿地效益。作为王河地下水水库配套工程的西由拦河闸可于汛期向单山洼台田沟引水,恢复了333.33 hm^2 湿地面积^[9,21],改善了当地的生态环境,为动植物提供了良好的栖息之所。

(7)粮食增产效益。海水入侵导致地下水水质恶化,地下水含盐量上升,随人工抽取地下水灌溉而将盐分带到地表面,从而导致土壤盐渍化的发生。土壤盐渍化的发生会导致土壤物理性状变差,微生物活动受到抑制,养分含量下降,并最终导致土壤肥力下的降。姚春梅等^[22]研究认为,海水入侵区土壤中各种易溶盐离子含量明显高于非海水入侵区, Cl^-

含量是非海水入侵区的4~5倍,全盐量是非海水入侵区的2~3倍。韩美^[23]研究发现,海水入侵区养分水平明显低于非海水入侵区,有机质含量下降36%,速效氮下降21%,全氮下降50%,速效磷下降11.8%。土壤盐分含量的上升,有机质及氮、磷等营养元素含量的下降使得土壤质量下降,农田出现粮食减产、绝产的现象。龙口市相关数据表明,多数农田减产20%~40%,严重的达到50%~60%,个别达到80%甚至绝产^[22,24]。莱州市数据则表明,一般年景农田减产30%,干旱年份减产50%以上^[25-26]。

王河地下水水库修建后,库区及周围农田灌溉用水得到保障,逐渐淋洗掉土壤中因海水入侵累积的盐分,土壤养分含量及肥力也逐步得到恢复,使得减产的农田逐渐恢复高产,年增产粮食约1万 t ^[9,21]。

(8)供水效益。地下水水库建成后,改善了库区的地下水水质,地下水中 Cl^- 含量最大减少71.1%,平均减少50.6%^[9,21]。地下水质的改善以及地下水位的抬升增加了供水能力,使得人畜吃水困难得以解决,也保证了企业和矿山的生产生活用水。根据相关文献^[15-16],王河地下水水库库区年供水能力达到了1 952.75万 m^3/a ,供水效益明显。

2.2 王河地下水水库效益价值评估方法

对王河地下水水库效益的价值评估采用如下方法进行:

(1)市场价值法。市场价值法是对有市场价格的生态系统产品产出价值进行估算的方法,需要先确定出某种产品产出的物质量,再根据这些产品的市场价格来评估其经济价值。地表水库供水、养鱼、航运、发电等价值可用市场价值法进行直接估算^[27-28]。本研究中,地下水水库供水价值和粮食增产价值采用市场价值法进行评估。

(2)影子工程法。影子工程法又称替代工程法,是指人工建造一个工程来替代原来生态系统的功能或已经被破坏的生态系统的功能所需要的花费,这一花费为人工工程的建造成本,是成本替代法的特殊形式。一般情况下,水库或湿地等的蓄水功能价值可用人工建造一座相同库容的地表水库的造价作为影子工程价值来表示^[29-30]。地下水水库蒸发节约价值、涵养水源与调蓄洪水价值采用影子工程法进行评估。

(3)替代成本法。替代成本法用于无法直接求得某项功能或效益价值时以能够产生相同效益或功能的花费成本来间接估算其价值。水库或湿地的水质净化功能价值一般采用该方法进行估算^[30],此

时,成本替代法又可称为恢复费用法或治理费用法,用于环境破坏后将其恢复原状所需治理成本的估算^[31]。地下水库征地节约价值、防治海水入侵价值和提高地下水位价值采用替代成本法进行评估。

(4)成果参照法。成果参照法指参照已有的类似研究中针对该项生态服务功能价值的评估结果来估算研究区域相同服务功能价值的方法。地下水库恢复湿地价值采用成果参照法进行评估。

3 王河地下水水库效益价值评估结果

3.1 征地节约效益

地下水库征地节约效益采用替代成本法估算,以折算成地表水库的征地成本为地下水库的征地节约效益。征地以耕地考虑。公式如下:

$$R_1 = SP_1 \quad (1)$$

式中: R_1 为征地节约效益; S 为节约耕地面积; P_1 为耕地单位面积价值。

水库征地(旱地)平均补偿标准有以下几种: 71 340元/hm²(红水河龙滩水电站围堰区天峨县)、281 280元/hm²(南水北调中线一期工程丹江口水库)、204 000元/hm²(黄河积石峡水电站)、311 040元/hm²(金沙江鲁地拉水电站)、177 150元/hm²(四川大渡河瀑布沟水电站龙泉驿区)^[32]以及387 840元/hm²(小岩头水电站)^[33]等,皆为旱地补偿标准。考虑到东部沿海地区经济较为发达,土地单产高,单位面积价值产出较大,张蔚等^[34]认为补偿标准可以提高到72万元/hm²。综合以上看法,莱州市地表水库建设亩均征地成本即 P_1 值取为45万元/hm²。

节约耕地面积即为折算成地表水库的水面面积。王河地下水库最高水位-1m,死水位-9m^[1,8],因此平均蓄水深度为8m。以最大调节库容3 273万m³^[1,8,10]计算,假设同样体积的水由一个同样深度即平均蓄水深度为8m的地面水库承载,那么王河地下水库折算成地面水库的面积 S 为3273万m³ ÷ 8m = 409.125 hm²。

根据式(1),王河地下水库征地节约成本为45万元/hm² × 409.125 hm² ≈ 1.84亿元。

3.2 蒸发节约效益

地下水库节约水面蒸发的价值可以通过折算成的地表水库年水面蒸发量的价值来估算,这一价值可用建造与年水面蒸发量相同体积的水库建造成本来替代。依据影子工程法,估算公式^[35]如下:

$$R_2 = SkE_dP(1+x) \quad (2)$$

式中: R_2 为蒸发节约效益; k 为当地的水面蒸发量

与蒸发皿器测蒸发量之比,即水面蒸发折算系数; S 为折算成的地表水库面积; P 为1988-1991年全国水库单位蓄水成本,取0.67元/m³; x 为1988-1991年间的商品零售价格指数增长系数^[36],取1.12。

器测蒸发量一般会比当地实际水面蒸发量大一些,因此需要通过折算系数换算成当地的实际水面蒸发量。蒸发折算系数 k 有0.622(全国平均)^[37]、0.91(E601型蒸发器,河北衡水)、0.64(20cm口径蒸发皿,河北衡水)^[38]和0.89(E601蒸发器,河北衡水)^[39]等,参考施成熙等^[40]报道的世界多地各种材质、尺寸、安装方法等蒸发器的折算系数最小值为0.68、最大值为0.95、基本介于0.75~0.83之间的基本情况,确定莱州市蒸发折算系数 k 取值为0.8。莱州市器测蒸发量 E_d 为1943.7mm/a。 S 含义及取值与式(1)相同。

根据式2,采用影子工程法计算王河地下水库水面年蒸发节约价值为:409.125万m² × 1943.7mm × 0.8 × 0.67元/m³ × (1+1.12) ≈ 903.62万元。

3.3 涵养水源和调蓄洪水效益

通过自然入渗和人工促渗,地下水水库库区可以将相当数量的地表雨(洪)水转化为地下水储存起来,一方面涵养了水源,另一方面也调节了洪水,减轻了洪水的危害程度。地下水水库涵养水源和调蓄洪水的价值可通过影子工程法来计算。计算公式^[35]为:

$$R_3 = VP(1+x) \quad (3)$$

式中: R_3 为地下水水库涵养水源和调蓄洪水的价值; V 为涵养水源、调蓄洪水的体积,取值为3 273万m³/a; P 含义及取值与式(2)相同。

根据式(3),王河地下水库年涵养水源、调蓄洪水价值为3 273万m³ × 0.67元/m³ × (1+1.12) ≈ 4 648.97万元。

3.4 防治海水入侵效益

地下水库修建完成后,由于地下坝的阻挡,加之库区内渗井、渗渠等增加了地表水的入渗能力,库区内的地下水水质状况不断好转,矿化度和Cl⁻含量不断下降,地下水水质得到淡化,海水入侵危害得到治理。王河地下水库修建后防治海水入侵、库区内地下水水质淡化效益采用替代成本法进行评估,公式如下:

$$R_4 = S_4 H C P_4 \quad (4)$$

式中: R_4 为防治海水入侵效益; S_4 为地下水库修建使得海水入侵减少的面积; H 为地下水库修建后水位上升程度; C 为库区给水度的算术平均值; P_4 为咸水淡化成本。

目前,国内海水淡化成本在5~7元/m³之

间^[41-44],平均6元^[45]。咸水淡化成本比海水淡化成本小,山东长岛咸水淡化成本在4.71~5.60元/m³之间^[46],河北省沧州石化公司(黄骅)地下咸水淡化成本为5元/m³^[47],杨涛^[48]曾经报道过沧化18000m³/d反渗透高浓度苦咸水淡化工程成本为3.69元/m³。综合以上各成本值,本研究取咸水淡化成本 P_4 为4元/m³。

平均给水度 C 可取0.065、0.089、0.106和0.115^[17]的均值0.09375。由前文可知, S_4 可取值53.33km², H 可取值3.31m,根据式(4),王河地下水水库防治海水入侵效益为:53.33km²×3.31m×0.09375×4元/m³=5.333×10⁷m²×3.31m×0.09375×4元/m³≈6619.59万元。值得注意的是,这只是一个保守估算值,只是估算了地下水位抬升导致的水量增加那部分水质淡化效益。

3.5 提高地下水位效益

王河地下水水库修建后地下水位提高的生态效益采用抽取地下水的节约成本来代替。公式^[31]为:

$$R_5 = H V_s P_5 \quad (5)$$

式中: R_5 为地下水位提高效益价值; H 为地下水水库修建后地下水位平均抬升程度,取3.31m; V_s 为王河地下水水库修建后每年的供水量,取1952.75万m³; P_5 为地下水位提升单位高度时抽取单位体积水体节约的抽水成本,取0.1元/m³^[31]。

依据式(5),王河地下水水库修建后地下水位提升效益价值为:3.31m×1952.75万m³×0.1元/m³≈646.36万元。

3.6 恢复湿地效益

恢复湿地效益采用成果参照法估算,公式如下:

$$R_6 = S_6 P_6 \quad (6)$$

式中: R_6 为恢复湿地效益; S_6 为恢复湿地面积,取333.33hm²^[9,21]; P_6 为湿地的单位面积价值。

根据谢高地等^[49]的研究,湿地年各项生态系统服务价值总和为24597.21元/hm²,因此由式6可知,王河地下水水库修建带来的恢复湿地效益为:333.33hm²×24597.21元/hm²≈819.9万元。

3.7 粮食增产效益

采用市场价值法估算粮食增产效益。公式为:

$$R_7 = V_7 P_7 \quad (7)$$

式中: R_7 为粮食增产效益; V_7 为王河地下水水库修建后每年的粮食增产量,取1万t^[9,21]; P_7 为粮食单价。

2013年莱州市粮食作物总产值172648万元,总产量652184t,因此 P_7 取值为2647.23元/t。

依据式(7),王河地下水水库修建后每年的粮食

增产效益为:2647.23元/t×1万t=2647.23万元。

3.8 供水效益

采用市场价值法估算供水效益价值。公式为:

$$R_8 = V_8 P_8 \quad (8)$$

式中: R_8 为供水效益价值; V_8 为王河地下水水库修建后每年的供水量,取1952.75万m³; P_8 为地下水取水单价,根据有关报道,山东省地下水水资源费为0.65元/m³^[50],因此 P_8 取值为0.65元/m³。

依据式(8),王河地下水水库修建后每年供水效益价值为:1952.75万t×0.65元/m³≈1269.29万元。

3.9 王河地下水水库总效益

表1为王河地下水水库各项效益价值量及其比例。

表1 王河地下水水库效益价值评估结果

价值	价值量/	比例/	子效益价值类型	价值量/	比例/
	万元	%		万元	%
直接 价值	1269.29	3.53	供水	1269.29	3.53
			征地节约	18400.00	51.18
间 接 价 值	34685.67	96.47	蒸发节约	903.62	2.51
			水源涵养和调蓄洪水	4648.97	12.93
			防治海水入侵	6619.59	18.41
			提升地下水位	646.36	1.80
			恢复湿地	819.90	2.28
			粮食增产	2647.23	7.36

由表1可知,王河地下水水库提供的直接效益为1269.29万元,占总效益价值的3.53%;间接效益为34685.67万元,比重为96.47%,间接效益价值远远大于直接效益价值。各项子效益价值量从大到小依次为征地节约>防治海水入侵>涵养水源、调蓄洪水>粮食增产>供水>蒸发节约>恢复湿地>提升地下水位,效益估值分别为1.84亿、6619.59万、4648.97万、2647.23万、1269.29万、903.62万、819.9万和646.36万元。

4 结 语

借助于相关方法,评估了王河地下水水库的海水入侵防治、供水、征地节约、蒸发节约等相关效益价值。评估结果表明王河地下水水库提供的总的效益价值高达35954.96万元,其中,间接效益价值远大于直接效益价值,表明王河地下水水库具有巨大的生态环境维护价值和征地节约等成本节约价值。评估结果有助于人们正确认识王河地下水水库的各项功能和效益,从而促使人们维护好王河地下水水库相关设施的安全运行,保障其各项功能的正常发挥。本研究

为地下水库经济效益及生态环境效益的合理评估提供了有益的参考。未来寻求更为有效的价值量评估公式及相关参数取值将是地下水库效益评估研究可以深入开展的领域。地下水库所具有的其他功能和效益例如缓解地方病危害程度等也应该得到正确认识和合理评估。

参考文献:

- [1] 吉孟瑞,康凤新. 胶东半岛地下水库水资源调蓄研究[J]. 山东国土资源,2010,26(3):12-17+21.
- [2] 杜新强,廖资生,李砚阁,等. 地下水库调蓄水资源的研究现状与展望[J]. 科技进步与对策,2005(2):178-180.
- [3] 关延东. 地下水库在滨海地区水资源可持续利用中的应用分析[J]. 西部探矿工程,2009(12):114-116.
- [4] 董伟科,栾琦,刘阳. 对地下水库基本概念的一点认识[J]. 科技视界,2012(34):93-94.
- [5] 王文,张鹭,杨云. 沿海地区常规水资源开发利用方法与策略[J]. 水利经济,2014,32(4):35-38+43.
- [6] 刘溱蕃,孟凡海,张树荣. 龙口市滨海地下水库系统工程[J]. 勘察科学技术,2003(6):47-52.
- [7] 苗青,陈广泉,刘文全,等. 莱州湾地区海水入侵灾害演化过程及成因[J]. 海岸工程,2013,32(2):69-78.
- [8] 张志阔. 莱州市王河下游地区海水入侵治理研究[D]. 青岛:中国海洋大学,2004.
- [9] 郝竹青,王卫山,滕尚军. 山东省莱州市王河地下水库效益分析[J]. 水利发展研究,2005(4):44-45.
- [10] 刘典鹏,季曙光,周小丽. 莱州市海水入侵的防治措施及效果分析[J]. 山东水利,2011(1):34-35.
- [11] 杨建华. 帷幕防治海水入侵的数值模拟研究[D]. 天津:天津大学,2005.
- [12] Luyun J R, Momii K, Nakagawa K. Laboratory - scale saltwater behavior due to subsurface cutoff wall[J]. Journal of Hydrology, 2009, 377(3): 227-236.
- [13] Luyun J R, Momii K, Nakagawa K. Effects of recharge wells and flow barriers on seawater intrusion[J]. Groundwater, 2011, 49(2): 239-249.
- [14] Kaleris V K, Ziogas A I. The effect of cutoff walls on saltwater intrusion and groundwater extraction in coastal aquifers[J]. Journal of Hydrology, 2013, 476(1): 370-383.
- [15] 张志阔,刘本华. 王河地下水库调蓄能力分析[J]. 水利规划与设计,2007(2):21-24.
- [16] 张志阔,刘本华,廖若芙. 王河地下水库地下水动态分析及预报[J]. 水利水电科技进展,2004,24(3):47-50.
- [17] 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.
- [18] Pyne R D G. Aquifer storage recovery: an ASR solution to saltwater intrusion at Hilton Head Island, South Carolina, USA. [J]. Environmental Earth Sciences,2015,73(12):7851-7859.
- [19] Sheng Zhuping. An aquifer storage and recovery system with reclaimed wastewater to preserve native groundwater resources in El Paso, Texas[J]. Journal of Environmental Management, 2005, 75(4): 367-377.
- [20] Rahman M A, Wiegand B A, Badruzzaman A B M, et al. Hydrogeological analysis of the upper Dupi Tila Aquifer, to wards the implementation of a managed aquifer-recharge project in Dhaka City, Bangladesh [J]. Hydrogeology Journal, 2013,21(5):1071-1089.
- [21] 王开章,李斌,于全发,等. 山东半岛区地下水库建设及其资源环境的良性效应[J]. 自然资源学报,2008,23(4):575-580.
- [22] 姚春梅,颜景生,范庆祥,等. 龙口市海水入侵灾害及防治对策[J]. 山东地质,2000,16(4):45-49.
- [23] 韩美. 山东省莱州湾地区海水入侵对社会与经济的影响[J]. 自然灾害学报,1997,6(1):82-87.
- [24] 林少伟,徐梁,赵鸿旭. 龙口市防治海水入侵措施与对策[J]. 山东水利,2010(8):58-59+61.
- [25] 王潘平,李天科,王兵,等. 莱州湾海水入侵原因分析与防治措施[J]. 山东农业大学学报(自然科学版),2008,40(1):93-97.
- [26] 王兵,刘竹梅,姜可荣. 莱州市沿海海水入侵的分析及治理对策[J]. 地下水,2008,30(4):74-75+79.
- [27] 肖建红,施国庆,毛春梅,等. 河流生态系统服务功能经济价值评价[J]. 水利经济,2008,26(1):9-11+25.
- [28] 肖建红,施国庆,毛春梅,等. 水利工程对河流生态系统服务功能影响经济价值评价[J]. 水利经济,2008,26(6):29-33.
- [29] 周祖光. 海南岛水生态系统服务功能价值评价[J]. 水利经济,2005,23(5):11-13.
- [30] 樊旭,孟灵芳,刘翠,等. 高邮湖生态服务功能价值评估[J]. 水利经济,2015,33(1):14-17.
- [31] 李传奇,张保祥,孟凡海. 滨海地下水库功能的价值评估[J]. 人民黄河,2012,34(2):47-48+51.
- [32] 刘灵辉. 水库移民共享安置区土地资源补偿问题研究[J]. 水利发展研究,2012(12):44-48+56.
- [33] 王以礼. 小岩头水电站建设征地上附着物的赔偿处理与启示[J]. 云南水力发电,2011,27(5):117-122.
- [34] 张蔚,王文奇. 水利水电工程建设征地移民安置中的集体土地补偿问题分析与建议[J]. 中国水能及电气化,2011(11):33-36.
- [35] 李景保,代勇,殷日新,等. 三峡水库蓄水对洞庭湖湿地生态系统服务价值的影响[J]. 应用生态学报,2013,24(3):809-817.
- [36] 张绪良,叶思源,印萍,等. 莱州湾南岸滨海湿地的生态系统服务价值及变化[J]. 生态学杂志,2008,27

- (12):2195-2202.
- [37] 盛琼,申双和,顾泽. 小型蒸发器的水面蒸发量折算系数[J]. 南京气象学院学报,2007,30(4):561-565.
- [38] 王永亮,张学知,乔光建. 河北省平原区 20m² 水面蒸发池与不同型号蒸发器折算系数分析[J]. 水文,2012,32(4):58-62.
- [39] 吴景峰,王永亮,徐佳. 20m² 蒸发池水面蒸发研究[J]. 南水北调与水利科技,2009,7(5):66-69.
- [40] 施成熙,牛克源,陈天珠,等. 水面蒸发器折算系数研究[J]. 地理科学,1986,6(4):305-313.
- [41] 邓国群. 海水淡化技术经济比较[J]. 广西电力技术,2001(2):53-55+64.
- [42] 陈坤. 解决华北水危机可选方案成本探讨[J]. 社会科学,2004(12):5-12.
- [43] 高波,郭菊娥,孟庆才. 海水淡化产业外部成本经济性分析及实证研究[J]. 中国海洋大学学报(社会科学版),2012(4):33-37.
- [44] 高玉屏. 我国现有技术条件下海水淡化成本构成分析[J]. 水利技术监督,2013(1):36-38.
- [45] 尹娜. 制约海水淡化产业的5个瓶颈[J]. 中国投资,2009(1):88-89.
- [46] 付兆堂,刘玉录,赵亭月. 地下苦咸水淡化技术在海岛的推广应用[J]. 地下水,2001,23(2):97+99.
- [47] 许树国. 地下咸水淡化-开源节流的新途径[J]. 天津经济,2001(8):21-24.
- [48] 杨涛. 沧化18000吨/日反渗透高浓度苦咸水淡化工程[J]. 水处理技术,2002,28(1):38-41.
- [49] 谢高地,甄霖,鲁春霞,等. 一个基于专家知识的生态系统服务价值化方法[J]. 自然资源学报,2008,23(5):911-919.
- [50] 南焱. 南水北调东线遭遇高水价难题[J]. 中国经济周刊,2014(2):30-33.

(上接第12页)

降水量增加趋势显著。四个季节气温均出现升高趋势,只有夏季气温为非显著性升高趋势。夏、冬季节水面蒸发呈显著性减少趋势,春季具有非显著增加,秋季水面蒸发为非显著性减少趋势。

(3)年径流量的演变趋势与降水量的演变特征一致,春、夏、秋三季径流量均呈非显著增加趋势,冬季径流量呈现显著增加趋势,降水是径流量变化的主要驱动因素。

参考文献:

- [1] IPCC. Climate change 2013: the physical science basis [R]. Cambridge. Cambridge University Press,2013.
- [2] 张建云,王国庆. 气候变化对水文水资源影响研究[M]. 北京:科学出版社,2007.
- [3] 张建云,王国庆. 河川径流变化及归因定量识别[M]. 北京:科学出版社,2014.
- [4] 唐国利,任国玉. 近百年中国地表气温变化趋势的再分析[J]. 气候与环境研究,2005,10(4):791-798.
- [5] 王英,曹明奎,陶波,等. 全球气候变化背景下中国降水量空间格局的变化特征[J]. 地理研究,2006,25(6):1031-1041.
- [6] 卢爱刚,庞德谦,康世昌,等. 中国半个世纪以来夏季降水量变化总趋势[J]. 生态环境,2008,17(1):169-172.
- [7] 李琼芳,刘轶,王鸿杰,等. 气象变化趋势对蒸发皿蒸发的影响分析[J]. 水电能源科学,2008,26(5):1-3.
- [8] 张建云,王国庆,贺瑞敏,等. 黄河中游水文变化趋势及其对气候变化的响应[J]. 水科学进展,2009,20(2):153-158.
- [9] 《第二次气候变化国家评估报告》编写委员会. 第二次气候变化国家评估报告[R]. 北京:科学出版社,2011.