

DOI: 10.16030/j.cnki.issn.1000-3665.2016.02.06

中美地下水资源开发利用对比分析

李璇¹, 束龙仓¹, CHEN Xunhong²

- (1. 河海大学水文水资源与水利工程科学国家重点实验室, 江苏 南京 210098;
2. 美国内布拉斯加大学林肯分校自然资源学院, 内布拉斯加州 林肯 68583-0996)

摘要: 中国和美国分别作为发展中国家和发达国家的代表, 两国开发利用地下水较早, 在地下水开发利用过程中积累了丰富的经验。通过介绍两国地下水资源开发利用的现状, 揭示其多年地下水用水量的变化规律, 并进行对比分析。结果表明: 近年来, 两国地下水用水量仍超过 $1000 \times 10^8 \text{ m}^3/\text{a}$, 地下水用水量占总用水量的比例均为 20% 左右, 其中约有 60% 用于农业灌溉, 三个指标整体上均呈现减少趋势。在人口、人均 GDP 和有效灌溉面积三个影响因素中, 两国地下水用水量的首要影响因素均是有效灌溉面积。调水工程的兴建, 可缓解地下水开采压力, 有效地减少了地下水用水量。与美国相比, 中国的用水效率较低, 今后应进一步推广节水技术, 加强地下水资源管理。

关键词: 地下水资源; 开发利用; 中国; 美国

中图分类号: P641.8

文献标识码: A

文章编号: 1000-3665 (2016) 02-0037-07

Comparison and analysis of groundwater resources exploitation and utilization between China and USA

LI Xuan¹, SHU Longcang¹, CHEN Xunhong²

- (1. State Key Laboratory of Hydrology-Water Resources and Hydraulic Engineering, Hohai University, Nanjing, Jiangsu 210098, China; 2. School of Natural Resources, University of Nebraska-Lincoln, Lincoln, NE Nebraska 68583-0996, USA)

Abstract: China and USA are representatives of developing and developed countries respectively. Both of them exploited and utilized groundwater at a early time, and have accumulated abundant experiences in the process. This paper examines the status of exploiting and utilizing groundwater and reveals the law of groundwater use for many years in China and USA. The results show that the groundwater use is still over 100 billion m^3/a in recent years. The groundwater use accounts for about 20% of the total water use, and approximately 60% is used for agricultural irrigation. The overall trend of three indexes has declined. The primary factor of groundwater use is the effective irrigated land area among the influencing factors including the population, per capita GDP and the effective irrigated land area. With the establishment of the water diversion project, the stress from the groundwater exploitation is released and the groundwater use is reduced. The water utilization efficiency of China is low, compared with that of USA. More efforts are made to extend the water-saving technology and strengthen the management of groundwater resources in the future.

Keywords: groundwater resources; exploitation and utilization; China; USA

收稿日期: 2015-05-10; 修订日期: 2015-07-14

基金项目: 国家自然科学基金项目 (41172203、41201029、41301017)

第一作者: 李璇 (1992-), 女, 硕士研究生, 主要从事水文学及水资源研究。E-mail: michelle-00@163.com

通讯作者: 束龙仓 (1964-), 男, 教授, 博导, 主要从事地下水资源评价与管理研究。E-mail: lcsu@hhu.edu.cn

随着世界经济的发展、城市化进程的加快以及人口数量的不断增加,水资源需求量日益增长。地下水是水资源的重要组成部分,在全球的生产、生活和生态环境用水中发挥着重要作用。它因具有水质优,分布广,水量相对稳定,不易受污染,开发成本低等特点,被广泛地开发和利用^[1-2]。20 世纪 80 年代中期,全球地下水开采量约 $5\,500 \times 10^8 \text{ m}^3/\text{a}$,其中美国、中国、日本、澳大利亚分别为 $1\,135 \times 10^8 \text{ m}^3/\text{a}$ 、 $760 \times 10^8 \text{ m}^3/\text{a}$ 、 $138 \times 10^8 \text{ m}^3/\text{a}$ 和 $27 \times 10^8 \text{ m}^3/\text{a}$ 。到 20 世纪末,全球地下水开采量已经超过 $7\,500 \times 10^8 \text{ m}^3/\text{a}$,美国、中国和印度三个国家的开采量均超过 $1\,000 \times 10^8 \text{ m}^3/\text{a}$,占世界总开采量的 50% 以上^[3]。发达国家开发利用地下水的历史较长,其丰富的经验对发展中国家具有极其重要的参考价值,特别是对中国和印度。地下水不仅服务于人类,还服务于生态环境系统^[4-5],长期过量开采地下水,会引发一系列的环境地质问题。因此,合理开发利用地下水资源是世界各国需共同关注和重视的问题。中美两国同为水资源脆弱国家^[6],本文分别以它们作为发展中国家和发达国家的代表,通过介绍两国地下水资源开发利用的现状,揭示其多年来地下水用水量的变化规律并进行对比分析,总结两国开发利用地下水资源的经验,这对各国地下水的开发利用均有重要的借鉴和指导意义。

1 中国地下水开发利用

1.1 地下水开发利用基本情况

我国是一个水资源严重缺乏的国家,人均水资源量只有世界平均水平的四分之一。20 世纪 80 年代以来,随着国民经济的快速发展,我国需水量急剧增加,水资源供需矛盾日益突出,地下水开采量持续增长。目前,全国有 400 多个城市开发利用地下水。北方大部分城市以地下水作为主要供水水源,华北、西北城市利用地下水比例分别高达 72% 和 66%,地下水开采以潜水为主。南方部分城市则因地表水污染较为严重,亦开采地下水作为饮用水水源^[7-8]。2012 年中国水资源公报显示,全国地下水资源量为 $8\,296.4 \times 10^8 \text{ m}^3$,约占水资源总量的 28.1%,地下水用水量为 $1\,133.8 \times 10^8 \text{ m}^3$,约占总用水量的 18.5%^[9]。

1.2 地下水供用水变化情况分析

1997—2012 年,我国用水量变化情况见图 1,用水量呈缓慢上升的趋势。地下水年用水量从 $1\,031.5$

$\times 10^8 \text{ m}^3$ 增长到 $1\,133.8 \times 10^8 \text{ m}^3$,增长了 9.9%。地下水用水量占总用水量的比例保持在约 18.7%。1997—2003 年,我国地下水用水量呈波动变化,年均变化幅度为 0.7%,变化较为稳定。其中,1999 年我国北方地区大旱,地下水用水量的增长率最大,为 4.5%;2003 年我国降水量比常年偏多,地下水用水量的降幅最大,为 4.6%。据统计,中国北方缺水地区,供水资源量的 80% 都用在农业上^[10],地下水用水量的差异主要是由不同年份农业用水量不同所致。2004—2012 年,随着人口的不断增加,社会经济的快速发展,我国地下水用水量持续增长。

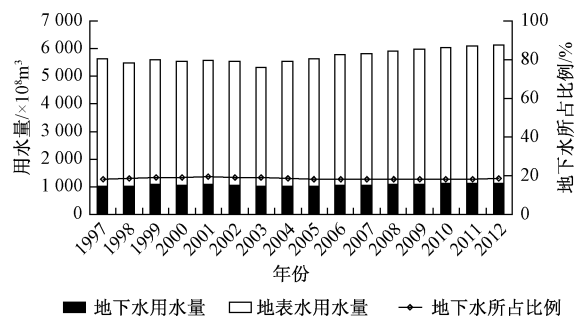


图 1 1997—2012 年中国用水量变化情况

Fig. 1 Changes in water use in China from 1997 to 2012

1.3 地下水用水量较大的地区

受气候、地理等自然条件的影响,我国南北方供水水源差异较大。南方地区,降水丰沛,地表水资源丰富,地表水供水量占其总供水量的 90%。北方地区,降水量时空分配不均,地表水资源的可开发程度有限且污染问题突出,地下水作为主要的供水水源,其供用水量占相当大的比例。2011 年我国地下水用水量较大地区的用水统计见图 2。地下水用水量前五的行政区均在北方,依次为河北、黑龙江、河南、新疆和内蒙古。五个地区的地下水用水量总和占全国地下水用水量的 56.5%,主要原因是农业灌溉用水量较大。河北、北京、河南、山西和内蒙古五个地区的地下水用水量占当地总用水量的 50% 以上。

多年来,河北省的地下水用水量和地下水用水量占总用水量的比例始终高居首位。它地处华北平原,地势平坦,人均耕地面积大,是我国的农业大省,70% 左右的用水量用于农业灌溉。但水资源短缺问题较为突出,人均水资源量仅 307 m^3 ,是全国平均水平的七分之一,远低于国际公认的极度缺水标准 500 m^3 。由于省内长期干旱,地表水资源匮乏且污染严重,导致大量开采地下水以满足用水需求。

2001—2011 年,河北省用水量变化情况见图 3,

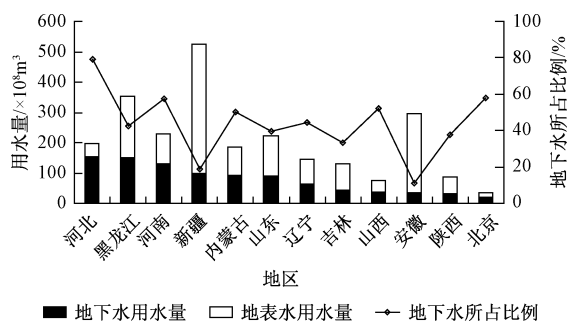


图2 2011年中国地下水用水量较大地区用水统计

Fig. 2 Statistics of large groundwater use regions in China in 2011

注：数据来源于中华人民共和国水利部《中国水资源公报2011》。

地下水年用水量在整体上呈现小幅下降的趋势，多年平均减少2.9%。2011年，河北省地下水用水量为 $154.9 \times 10^8 \text{ m}^3$ ，排名全国首位，地下水用水量占总用水量的比例高达79.0%，其主要原因是农业用水量较大^[11]。长期超采导致河北省地下水水位持续下降、地面沉降、海水入侵、水质污染等问题，给当地生态环境和社会经济的发展带来严重影响。近年来，随着水利工程的兴建、节水技术的推广、地下水库等技术的研究发展以及最严格水资源管理制度的实施，地下水的超采情况稍有缓解。

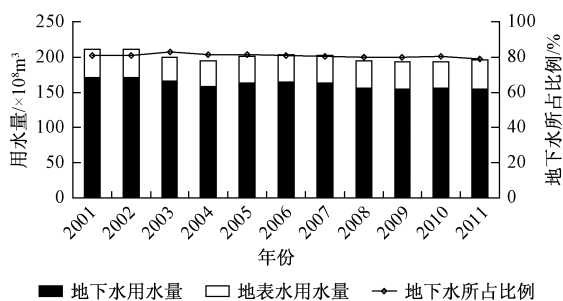


图3 2001—2011年河北省用水量变化情况

Fig. 3 Changes in water use in Hebei from 2001 to 2011

2 美国地下水开发利用

2.1 地下水开发利用基本情况

美国地下水开发利用历史较长，19世纪60年代后期，加利福尼亚州中央谷地、芝加哥、南达科他州等地已开采地下水。美国启动西部开发以后，农业和城市发展对地下水的需求不断增加。南方地区主要用于农业灌溉，北方则以其替代受污染的地表水作为生活用水。据美国用水评估报告，2010年地下水用水量为 $1\,095.5 \times 10^8 \text{ m}^3$ ，约占总用水量的22.3%^[12]。

2.2 地下水供用水变化情况分析

1950—2010年，美国用水量变化情况见图4，地下水年用水量从 $469.7 \times 10^8 \text{ m}^3$ 增长到 $1\,095.5 \times 10^8 \text{ m}^3$ ，增加了1.3倍，地下水用水量占总用水量的比例保持在19.7%左右，其中96%以上均为淡水。1950—1980年，美国总用水量及地下水用水量逐渐上升，主要是由工农业生产规模的扩大引起的。1977年，美国发生特大干旱，地表水严重匮乏，大部分用水来自于地下水，地下水用水量出现最大增长，1980年用水量达到高峰。美国政府意识到地下水资源的宝贵性，鼓励提高用水效率，开始采取措施保护地下水资源。为了保护和改善生态环境，对地下水资源进行合理开发及管理，美国启动了区域含水层系统分析项目（RASA），在随后几年中地下水用水量持续减少。1980—1985年，地下水用水量的降幅最大，为11.7%。1985—2005年，用水量保持小幅变化。2005—2010年，随着节水灌溉技术的推广及火电厂冷却系统的改进，总用水量减少了13.2%，减少的部分主要为地表水，这导致了地下水用水量所占比例达到有史以来的最高值22.3%。

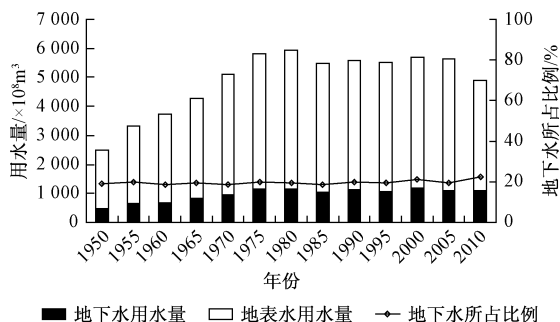


图4 1950—2010年美国用水量变化情况

Fig. 4 Changes in water use in USA from 1950 to 2010

2.3 地下水用水量较大的地区

美国水资源总量较为丰富，人均占有量较多，从总体来看，东多西少。美国西部地区的水资源供需矛盾尤为突出，尤其是从德克萨斯到南达科他的广大平原地区，地下水的开发利用程度较高。2010年美国地下水用水量较大地区用水统计见图5，地下水用水量排前五的州依次为加利福尼亚（以下简称加州）、阿肯色、德克萨斯、内布拉斯加和爱达荷，五个州地下水用水量的总和占全国地下水用水量的46.9%。以上地区农业较为发达，灌溉总面积占全国的53%，各州的地下水用水量超过一半用于农业灌溉。长期以来，这些地区大量的水资源用于农业灌溉，造成地表水耗竭和地下水过量开采^[13]。

据现有资料，自1950年以来，加州的地下水用

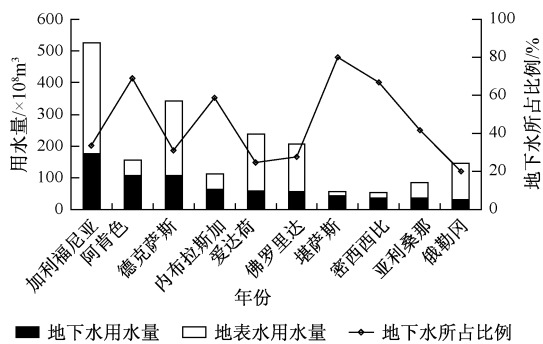


图5 2010年美国地下水用水量较大地区用水统计

Fig. 5 Statistics of large groundwater use states in USA in 2010

水量始终保持第一。加州位于美国西部,是美国第三大州,人口总数最多,经济规模最大,农业最为发达,农业用地占全州30%。2010年,其地下水用水量为 $175.5 \times 10^8 \text{ m}^3$,占全州总用水量的33.4%;地下水用水量中有68.7%用于农业灌溉,占全国灌溉所用地下水量的17.6%。2010年,加州各用水户的用水量统计见表1。农业灌溉用水中有37.6%为地下水。1980年,美国政府提出节水灌溉,全国大规模采用节水灌溉技术。与1980年相比,加州的耕地面积增加了7.2%,超过45.2%的耕地采用喷灌和微灌技术,用于灌溉的总用水量和地下水用水量分别减少45%和56.6%。节水意识的深化能带来技术的革新,从而提高地下水的利用效率。由于地下水水质较优,因而在自供生活用水中地下水所占比例极高,约为83.3%。20世纪以来,为促进经济发展,美国垦务局兴建了多个跨区域调水工程及蓄水工程,包括在加州境内规模最大的中央河谷工程。水利工程的建设有效地解决了加州地区的水资源供需矛盾。此外,管理部门制定法律法规限制地下水的开发和利用,以确保地下水长期处于平衡状态,为社会可持续发展提供了有力保障。

表1 2010年加州各用水户的用水量统计

Table 1 Statistics of water use by water-use categories in California in 2010

用水户	公共供水	自供生活	灌溉	牲畜	水产养殖	工业	采矿	火电
总用水量/ $\times 10^8 \text{ m}^3$	87.0	2.4	319.1	2.6	13.4	5.5	3.8	91.3
地下水用水量/ $\times 10^8 \text{ m}^3$	39.1	2.0	120.1	1.2	2.4	5.5	3.6	1.1
地下水所占比例/%	44.9	83.3	37.6	46.2	17.9	100.0	94.7	1.2

3 对比分析

3.1 供用水统计

1997年起,中华人民共和国水利部每年发布一次《中国水资源公报》,现已发布了18个年度的水资源公报。美国从1950年开始,每五年编撰一次美国用水评估报告,由美国地质调查局(USGS)发布。截止2014年已发布的2010年全国用水评估报告,现已发布13份。

按供水水源分类,我国分为地表水、地下水和其他水源三类,地下水供水量按浅层淡水、深层承压水和微咸水分别统计。海水直接利用量需要另行统计,不计入总供水量。美国将供水水源分为地表水和地下水两类,再根据水质情况分为淡水和咸水。美国把溶解性总固体大于等于1 g/L的归为咸水,而我国水利部门以2 g/L作为咸淡水界限,地表水全部归入到淡水中^[14]。

按用水户分类,我国按生活用水、工业用水、农业用水和生态环境补水分四类。目前,我国水资源公报里只显示各用水户的总用水量,并未对来自不同水源的用水量进行区分。美国的用水户共分八类,分别为:公共供水、自供生活用水、灌溉、牲畜、水产养殖、工业、采矿和火电。美国用水评估报告对来自不同水源的用水量进行区分,便于进行计算分析。

3.2 地下水用水量的主要影响因素

影响地下水用水量的因素众多,本次分析认为其主要影响因素为:人口、人均GDP、有效灌溉面积。图6和图7分别为中美两国地下水用水量影响因素的增长率变化过程。利用统计分析软件SPSS对中国1997—2012年及美国1950—2010年的相关数据进行K-S检验,结果表明各变量均符合正态分布,各影响因素与地下水用水量均呈线性相关。在0.01显著水平下,将地下水用水量与各影响因素进行Pearson相关分析,发现地下水用水量与各影响因素都呈正相关。

在0.01显著水平下,我国人口、人均GDP、有效灌溉面积与地下水用水量的Pearson相关系数分别为0.646、0.756和0.768。由检验结果可知,1997—2012年,我国地下水用水量的首要影响因素是有效灌溉面积,其次是人均GDP和人口,它们与地下水用水量的相关性均较强。多年来我国农田灌溉面积持续增长,年均变化率约为1.2%,导致了地下水用水量的不断增加。农业灌溉是我国地下水的用水大户,20世纪80年代地下水开采量中约有88%用于农业灌溉,1997年逐步下降到54%,1999年约为62%。总

体来看,丰水年的地下水开采量较少,枯水年的较多。近年来,我国经济迅猛发展,人均GDP的年均增长率约为12.8%,其中2009年增长率的突降主要是受金融危机的影响。大量耗水工业的发展也加剧了地下水的开发利用。政府开始强化水资源管理,在地下水开采量较大及因地下水超采导致环境地质问题突出的地区制定了限采规划。“全国地下水保护行动”推进了地下水超采区的生态治理,加强了水资源的统一管理。

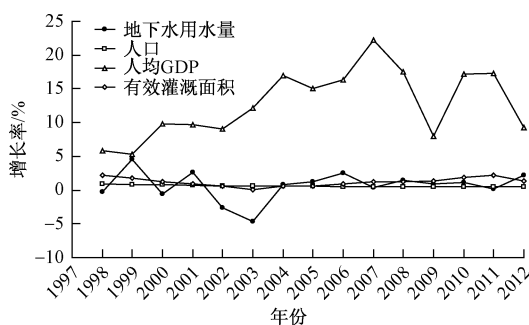


图6 1997—2012年中国地下水用水量及影响因素增长率

Fig. 6 Increase rate of groundwater use and its influencing factors in China from 1997 to 2012

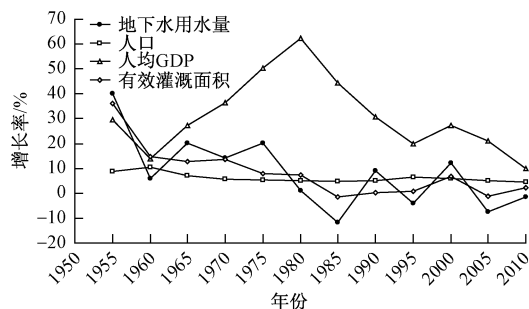


图7 1950—2010年美国地下水用水量及影响因素增长率

Fig. 7 Increase rate of groundwater use and its influencing factors in USA from 1950 to 2010

在0.01显著水平下,美国人口、人均GDP、有效灌溉面积与地下水用水量的Pearson相关系数分别为0.826, 0.655, 0.971。1950—2010年,美国地下水用水量的首要影响因素同样为有效灌溉面积,其次为人口,它们与地下水用水量的相关性极强,而人均GDP与其相关性较强。美国的地下水用水量中,农业灌溉所占比例最大,1980年约为67%,2010年约为62%,主要由于政府大力推行节水措施,增加喷灌和微灌系统,电厂大量使用循环冷却系统和干式冷却系统,提高了用水效率。

3.3 调水工程对地下水用水量的影响

中央亚利桑那工程是美国历史上规模最大的调水

工程,它将西部科罗拉多河中的水输送到东南部的图森。亚利桑那州位于美国中西部,是全美第六大州,境内沙漠广布,高温、干燥,用水紧张。随着经济的快速发展,为满足用水需求而大量开采地下水,地下水用水量占总用水量的比例不断增加。1950—1970年,亚利桑那的地下水用水量始终排名前五,1980年,亚利桑那颁布了《地下水管理法》,为地下水资源规划与管理提供保障。而后,亚利桑那地下水用水量排名逐渐下降,2010年排名第九。中央亚利桑那调水工程每年可以向18个城市供水约 $18.5 \times 10^8 \text{ m}^3$,受益人口约占全州的80%,受水面积约占该州的20%^[15-16]。工程兴建后,大大缓解了当地地下水的开采压力,超采区的地下水水位已经开始明显回升,有效保障了当地社会和经济的发展。

2003年起,我国开始修建迄今世界规模最大的南水北调工程。2004—2009年,山东省地下水用水量始终排名第四,2010年下滑至第五,2011—2012年排名第六。山东省人口众多,工农业较为发达,国民经济和社会发展的主要指标均居全国前列,需水量大。然而,当地水资源具有总量不足,人均占有量少,时空分布不均,对地下水资源与客水资源依赖程度较高等特点。地下水已在当地经济社会发展中举足轻重,多年来全省年均地下水用水量所占比例近50%,超采现象严重。2001—2012年,山东省地下水用水量由 $133.7 \times 10^8 \text{ m}^3$ 减少到 $89.3 \times 10^8 \text{ m}^3$,用水比例由52.9%降低至40.2%。其主要原因是政府从技术与管理两个方面加大了节水力度,用水效率大大提高。南水北调工程的建设必将更有效缓解地下水的超采现状,山东的受水区涉及14个市,覆盖面积占全省的73.3%。2013年,南水北调东线一期工程山东段正式通水运行,取水规模为 $500 \text{ m}^3/\text{s}$,输水到山东平均净增供水量 $13.53 \times 10^8 \text{ m}^3$,可有效减少地下水用水量,并通过人工回灌合理控制地下水水位,改善受水区的生态环境。

3.4 地下水开发利用对地质环境的影响

长期以来,由于地下水资源的开发缺乏统一的规划与管理,导致了地下水水位下降、地面沉降、地裂缝、岩溶塌陷、泉流量衰减、海水入侵等环境地质问题。

在美国,约有80%的地面沉降问题是由过量开发地下水资源引起。地下水水位大幅下降会导致土体的孔隙水压力减小,有效应力增加,达到一定程度后则发生地面沉降。亚利桑那州的地面沉降问题有着较

长的历史, 区域地面沉降的面积超过 $8\,000\text{ km}^2$ 。埃洛伊地区最为严重, 地面沉降面积达 $1\,750\text{ km}^2$, 1985 年其最大沉降量超过 4 m 。通过减少开采量, 人工回灌向含水层中注水, 有效减缓了地面沉降速率。20 世纪 80 年代, 美国开始实施 ASR 工程计划, 进行地下水人工补给和恢复。这不仅缓解了地面沉降、地裂缝和海水入侵等问题, 还实现了水资源的调节和水质的改善。

20 世纪 80 年代以来, 我国山东省莱州市多次发生干旱, 为满足用水需求大量开采地下水, 导致了地下水水位的大幅下降, 引发海水入侵。为了缓解环境地质问题, 解决水资源的供需矛盾, 1999 年, 王河地下水工程开始修建, 库区面积 68.5 km^2 , 总库容 $5\,693 \times 10^4\text{ m}^3$ 。王河地下水工程建成后, 地下水水位平均提高 3.3 m , 海水入侵面积减少了 68% , Cl^- 浓度减少了一半左右。地下水工程有效地提高了供水能力, 改善了水质及生态环境。

4 结论

(1) 近年来, 中美两国地下水用水量仍超过 $1\,000 \times 10^8\text{ m}^3/\text{a}$, 地下水用水量占总用水量的比例约为 20% , 其中有 60% 左右用于农业灌溉, 三个指标整体上均呈现减少趋势。通过分析地下水用水量的三个主要影响因素: 人口、人均 GDP 和有效灌溉面积, 发现两国地下水用水量的首要影响因素均为有效灌溉面积, 中国的次要影响因素是人均 GDP, 美国的则是人口。

(2) 中美两国通过使用节水设备, 推广节水工艺, 特别是革新灌溉技术, 极大地提高了用水效率。调水工程的建设优化了水资源配置, 有效减少了地下水开采量。美国的 ASR 技术和中国的地下水工程加强了水资源的调节, 解决了水资源时空分配不均等问题。相比较而言, 美国对地下水环境保护更为重视, 通过提高用水成本, 规范管理制度等政策控制了地下水资源的开发利用。

(3) 与以美国为代表的发达国家相比, 中国等发展中国家用水效率较低。今后, 我国在开发利用地下水资源的过程中, 应注重优化开采布局, 进一步加强水资源优化配置, 可将质量较优的地下水首先用作生活饮用水。通过人工回灌等方式控制地下水水位下降, 缓解地面沉降和地裂缝等环境地质问题的发展。应加强地下水资源管理, 全面建设地下水动态监测站网, 完善相关的法律法规。

参考文献:

- [1] 束龙仓, 陶月赞. 地下水水文学 [M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2009. [SHU L C, TAO Y Z. Groundwater hydrology [M]. Beijing: China Water & Power Press, 2009. (in Chinese)]
- [2] Alley W M, Healy R W, LaBaugh J W, *et al.* Flow and storage in groundwater systems [J]. Science, 2002, 296: 1985 - 1990.
- [3] 水利部水资源司, 南京水利科学研究院. 21 世纪初期中国地下水资源开发利用 [M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2004. [Water Resources Department of Ministry of Water Resources, Nanjing Hydraulic Research Institute. Groundwater development and efficient utilization in China in the early 21st century [M]. Beijing: China Water & Power Press, 2004. (in Chinese)]
- [4] 杜朝阳, 钟华平, 于静洁. 可持续水资源系统机制研究 [J]. 水科学进展, 2013, 24 (4): 581 - 588. [DU C Y, ZHONG H P, YU J J. Mechanism of sustainable water resources system [J]. Advances in Water Science, 2013, 24 (4): 581 - 588. (in Chinese)]
- [5] 温忠辉, 王彬彬, 鲁程鹏, 等. 南京市地下水资源开发利用分区 [J]. 吉林大学学报 (地球科学版), 2009, 39 (1): 107 - 113. [WEN Z H, WANG B B, LU C P, *et al.* Development and utilization division of groundwater resources in Nanjing city [J]. Journal of Jilin University (Earth Science Edition), 2009, 39 (1): 107 - 113. (in Chinese)]
- [6] 潘理中, 金懋高. 中国水资源与世界各国水资源统计指标的比较 [J]. 水科学进展, 1996, 7 (4): 375 - 380. [PAN L Z, JIN M G. Comparison on water resources statistical index between China and other countries [J]. Advances in Water Science, 1996, 7 (4): 375 - 380. (in Chinese)]
- [7] 林学钰. “地下水科学与工程”学科形成的历史沿革及其发展前景 [J]. 吉林大学学报 (地球科学版), 2007, 37 (2): 209 - 215. [LIN X Y. Historical change and prospect of discipline development of “groundwater science and engineering” [J]. Journal of Jilin University (Earth Science Edition), 2007, 37 (2): 209 - 215. (in Chinese)]
- [8] 张宗祜, 李烈荣. 中国地下水资源 (综合卷) [M]. 北京: 中国地图出版社, 2004. [ZHANG Z H, LI L R. Groundwater resources of China

- [M]. Beijing: Sino Maps Press, 2004. (in Chinese)]
- [9] 中华人民共和国水利部. 中国水资源公报: 2012 [R]. 北京: 中国水利水电出版社, 2013. [Ministry of Water Resources of the People's Republic of China. China water resources bulletin: 2012 [R]. Beijing: China Water & Power Press, 2013. (in Chinese)]
- [10] 张寿全, 黄巍. 中国水资源的可持续利用研究 [J]. 中国人口·资源与环境, 1999, 9 (2): 21 - 25. [ZHANG S Q, HUANG W. Some issues on model of sustainable utilization of water resources in China [J]. China Population, Resources and Environment, 1999, 9 (2): 21 - 25. (in Chinese)]
- [11] 张人权. 地下水资源特性及其合理开发利用 [J]. 水文地质工程地质, 2003, 30 (6): 1 - 5. [ZHANG R Q. Characteristics of groundwater resources and their reasonable development [J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2003, 30 (6): 1 - 5. (in Chinese)]
- [12] Maupin M A, Kenny J F, Hutson S S, *et al.* Estimated use of water in the United States in 2010 [R]. Reston, Virginia: U. S. Department of the Interior, U. S. Geological Survey, 2014.
- [13] 林学钰. 美国地下水资源管理概况 [J]. 水文地质工程地质, 1983 (2): 52 - 57. [LIN X Y. General situation of groundwater resources management in America [J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 1983 (2): 52 - 57. (in Chinese)]
- [14] 钟华平. 美国供用水情况介绍 [J]. 南水北调与水利科技, 2011, 9 (2): 137 - 139. [ZHONG H P. Water withdrawal and water use in America [J]. South to North Water Transfers and Water Science & Technology, 2011, 9 (2): 137 - 139. (in Chinese)]
- [15] 李运辉. 美国中央亚利桑那调水工程 [J]. 水利发展研究, 2003 (3): 55 - 58. [LI Y H. Central arizona project in America [J]. Water Resources Development Research, 2003 (3): 55 - 58. (in Chinese)]
- [16] Jesús R G, Chuck C. Application of the Colorado River simulation system model to evaluate water shortage conditions in the Central Arizona Project [J]. Water Resources Management, 2013, 27 (7): 2369 - 2389.

责任编辑: 张若琳

(上接第36页)

- [12] 马玉蕾, 王德, 刘俊民, 等. 地下水与植被关系的研究进展 [J]. 水资源与工程学报, 2013, 24 (5): 36 - 40. [MA Y L, WANG D, LIU J M, *et al.* Research progress on relation between groundwater and vegetation [J]. Journal of Water Resources & Water Engineering, 2013, 24 (5): 36 - 40. (in Chinese)]
- [13] 郭玉川, 何英, 李霞. 基于 MODIS 的干旱区植被覆盖度反演及植被指数优选 [J]. 国土资源遥感, 2011, 89 (2): 115 - 118. [GUO Y C, HE Y, LI X. Remote sensing inversion of vegetation coverage and optimization of vegetation index based on MODIS data in arid area [J]. Remote Sensing For Land & Resources, 2011, 89 (2): 115 - 118. (in Chinese)]
- [14] 杨宏兵, 董雯红, 陈建清, 等. 植被覆盖度模型研究进展 [J]. 安徽农业科学, 2012, 40 (12): 7580 - 7585. [YANG H B, DONG J H, CHEN J Q, *et al.* Research progress of vegetation coverage model [J]. Journal of Anhui Agricultural Science, 2012, 40 (12): 7580 - 7585. (in Chinese)]
- [15] 韦振锋, 王德光, 张翀, 等. 1999—2010 年中国西北地区植被覆盖对气候变化和人类活动的影响 [J]. 中国沙漠, 2014, 34 (6): 1665 - 1670. [WEI Z F, WANG D G, ZHANG C, *et al.* Response of vegetation cover to climate change and human activities in Northwest China during 1999 - 2010 [J]. Journal of Desert Research, 2014, 34 (6): 1665 - 1670. (in Chinese)]
- [16] ZENG B, YANG T B. Natural vegetation responses to warming climates in Qaidam Basin 1982 - 2003 [J]. International Journal of Remote Sensing, 2009, 30 (21): 5685 - 5701.
- [17] ROBINSON D A, CAMPBELL C S, HOPMANS J W, *et al.* Soil moisture measurement for ecological and hydrological watershed-scale observatories: A review [J]. Vadose Zone Journal, 2008 (7): 358 - 389.

责任编辑: 张若琳