

DOI: 10.13476/j.cnki.nsbqk.2022.0112

耿世达, 屈吉鸿. 天津市地下水生态系统服务价值演变[J]. 南水北调与水利科技(中英文), 2022, 20(6): 1139-1147. GENG S D, QU J H. Study on the evolution of service value of groundwater ecosystem in Tianjin[J]. South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology, 2022, 20(6): 1139-1147. (in Chinese)

天津市地下水生态系统服务价值演变

耿世达¹, 屈吉鸿²

(1. 水利部综合事业局, 北京 100053; 2. 华北水利水电大学, 郑州 450046)

摘要: 基于千年生态系统评估对生态系统服务的分类方法, 将天津市地下水生态系统服务功能划分为供给、调节、支持和文化 4 个方面, 以此为基础建立地下水生态系统服务价值评估指标体系, 采用价值量评估方法构建货币化的价值评估模型, 对地下水生态系统服务价值进行测算, 并重点分析南水北调中线工程通水前后天津市地下水生态系统服务价值演变特征。结果表明: 2008—2019 年, 天津市地下水生态系统年均总服务价值为 83.71 亿元, 其中, 南水北调中线工程通水前(2008—2014 年)为 69.81 亿元, 通水后(2015—2019 年)为 103.18 亿元; 通水后, 地下水调节服务价值、支持服务价值增大, 供给服务价值减小; 南水北调中线工程对地下水生态系统服务价值的贡献呈增大趋势, 由 2015 年 2.64 亿元增加至 2019 年 24.01 亿元。

关键词: 地下水生态系统; 千年生态系统评估; 服务价值; 价值评估; 南水北调中线工程

中图分类号: TV211.1 文献标志码: A 开放科学(资源服务)标识码(OSID):



自从 1974 年“生态系统服务”(ecosystem services, ES)概念首次提出以来, 国内外学者们针对生态系统服务开展较广泛的研究, 主要涉及生态系统服务的概念内涵^[1-2]、评估方法^[3-4]、变化特征^[5-6]、协同与权衡关系^[6-7]、驱动机制^[8-9]、生态系统服务流^[9-10]等方面。联合国千年生态系统评估(The Millennium Ecosystem Assessment, MA)^[11]认为, 生态系统服务本质上是生态系统提供给人类的惠益, 包括供给服务、调节服务、文化服务和支持服务。生态系统服务与人们生活质量息息相关, 定量评估生态系统服务价值有助于高效管理利用土地资源、保护水资源, 改善生态环境质量, 是人类合理利用和管理生态系统的重要手段。Costanza 等^[12]首次采用当量因子法对全球生态系统服务货币价值化后, 生态系统服务价值评估研究得到了迅速发展, 这为国内外学者^[13-15]深入剖析生态系统服务功能和价值提供了概念基础和理论支持。侯元兆出版的专著《中国森林

资源核算研究》^[16], 对森林生态价值进行了较为完整的核算, 是国内生态系统服务价值评估研究的开端。目前, 针对单个生态系统服务价值评价, 主要研究对象包括河流^[17]、湿地^[18]、森林^[19]、湖泊^[20]等生态系统。

地下水是维持经济社会发展的重要资源, 也是维系生态系统健康、地质环境稳定的重要因素, 具有重要的生态系统服务价值。根据生态系统服务价值的内涵^[11,21], 地下水生态系统服务价值可定义为对维持人类生存环境及生活质量有贡献的地下水生态系统与生态过程所产生的效益。现阶段, 关于地下水生态系统服务价值研究较少, 其评估指标体系、评估方法等尚处于探索阶段; 前人对地下水生态系统服务价值的研究多为静态评估, 缺乏对其动态演变的认识。

基于 MA 对生态系统服务的分类方法, 对天津市地下水生态系统服务进行分类, 建立地下水生态系统服务价值评估指标体系与货币化评估模型, 评

收稿日期: 2022-04-16 修回日期: 2022-11-19 网络出版时间: 2022-11-28

网络出版地址: <https://kns.cnki.net/kcms/detail/13.1430.TV.20221125.1827.002.html>

基金项目: 河南省重大科技专项(201300311400)

作者简介: 耿世达(1996—), 河北保定人, 助理工程师, 主要从事水利工程管理研究。E-mail: 1751484756@qq.com

估地下水生态系统服务价值,研究其动态演变特征,并分析南水北调中线工程对天津市地下水生态系统服务价值的影响,以期为天津市地下水生态系统的可持续性管理提供技术参考。

1 研究区概况

天津市地处华北平原北部,东临渤海,北依燕山,面积1.197万km²。截至2021年,全市常住人口1373万,实现地区生产总值1.57万亿元。天津市地处温带大陆性季风气候带,夏季高温多雨,冬季寒冷干燥。根据1956—2019年数据系列,多年平均降水量575.2mm,多年平均水资源总量15.66亿m³,其中地表水资源量10.66亿m³,地下水资源量5.89亿m³,地下水与地表水资源重复量为0.89亿m³。天津市是重度资源型缺水城市,地下水曾是城市最为可靠的供水水源之一。随着地下水保护力度不断加大,特别是2014年南水北调中线工程通水后,地下水超采趋势得到有效遏制,开采量持续下降。根据《天津市水资源公报》:2008—2014年天津市年均地下水资源量5.35亿m³,地下水供水量5.76亿m³,开发利用率107.66%;2015—2019年天津市年均地下水资源量5.60亿m³,地下水供水量4.51亿m³,开发利用率为80.54%。2014年前天津市地下水储量总体呈现波动下降趋势,年均储量5.18亿m³,2014年后地下水储量持续增加,年均储量8.74亿m³,变化过程见图1。

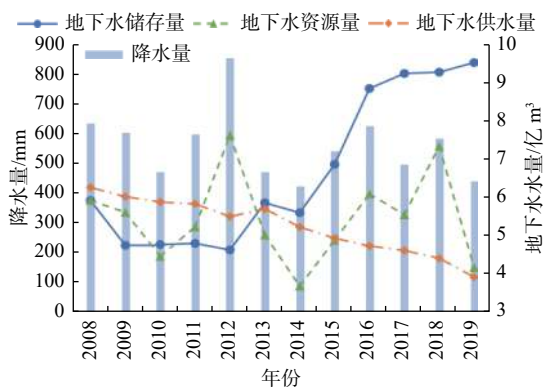


图1 天津市2008—2019年降水量、地下水储量、资源量、供水量变化过程

Fig. 1 The processes of changes in precipitation, groundwater storage, resources and water supply in Tianjin from 2008 to 2019

2 研究方法

2.1 地下水生态系统服务价值发挥路径

地下水生态系统服务价值发挥路径包括以下6

个方面:地下水向生活、工业和农业供水,产生经济效益,发挥供水服务价值;地下含水层通过土壤交换吸附作用、水稀释作用、生物化学作用净化污染物,发挥净化水质服务价值;地下水与CO₂反应生成碳酸钙沉淀,与植被、土壤一样,是一个巨大的碳库,发挥固碳服务价值;地下含水层储存的水资源通过补充和调节河川径流、湖泊和湿地,发挥涵养水源服务价值;地下水系统具有保持地质环境稳定的功能,过量开采地下水可引发降落漏斗、地面沉降等地质环境问题,通过控制地下水开采,增加地下水储量,可使地下水系统发挥预防地面沉降和控制降落漏斗的支持服务价值;地下水具有科学研究和教育的价值,通过科研教育能够使地下水系统产生文化服务价值。

2.2 服务价值评估指标体系及评估方法

根据地下水生态系统服务价值发挥路径和千年生态系统评估方法,其服务价值可分为供给服务、调节服务、支持服务和文化服务,其中,供给服务包括生活供水、农业供水、工业供水3个评估指标,调节服务包括净化水质、固碳、涵养水源3个评估指标,支持服务包括预防地面沉降、控制降落漏斗2个评估指标,文化服务包括科研教育1个评估指标。

2.2.1 供给服务价值评估

地下水为生活、农业、工业用水提供水源,供水服务价值采用市场价值法计算。

生活供水。供水服务价值计算公式为

$$A_1 = P_1 Q_1 \quad (1)$$

式中: A_1 为地下水生活供水服务价值,元; P_1 为生活用水的价格,元/m³; Q_1 为生活用水地下水供水量, m³。

农业供水。供水服务价值计算公式为

$$A_2 = M_2 [P_2 (Y_i - Y_d) - (C_i - C_d)] \quad (2)$$

式中: A_2 为地下水农业供水服务价值,元; M_2 为地下水灌区的农田面积, hm²; P_2 为农产品价格,元/kg; Y_i 、 Y_d 分别为地下水灌溉区、非灌溉区农产品单位面积产量, kg/hm²; C_i 、 C_d 分别为地下水灌溉区、非灌溉区年投入成本,元/hm²。

工业供水。供水服务价值计算公式为

$$A_3 = P_3 Q_3 \quad (3)$$

式中: A_3 为地下水工业供水服务价值,元; P_3 为工业用水价格,元/m³; Q_3 为工业用水地下水供水量, m³。

2.2.2 调节服务

净化水质。地下水净化水质服务价值可通过污水处理费用替代估算得到,计算公式为

$$B_1 = Q_w F_w C_w \quad (4)$$

式中: B_1 为地下水净化水质服务价值, 元; Q_w 为污水排放量, m^3 ; F_w 为管道渗漏率, %; C_w 为污水处理成本, 元/ m^3 。

固碳。地下水系统是一个巨大的碳库, 同时也意味着开采地下水等同于 CO_2 的释放。根据地下水中总碳平均含量, 估算求得每开采 1 亿 m^3 地下水, 其蒸发消耗产生的 CO_2 相当于燃烧 9 000 t 纯煤, 1 t 纯煤燃烧可释放 1.9 t CO_2 ^[22]。考虑到地下水资源的开发利用应以由大气降水与地表水补给形成、参与现代水循环且可以更新的地下水资源量和允许开采量为前提, 因此地下水固碳总量应以可更新储量为计算依据, 即以地下水补排差累积形成的、不同程度地参与现代水循环、赋存于潜水含水层或弱承压含水层中的水量。以 2007 年为基准年, 计算 2008—2019 年天津市地下水可更新储量, 并据此计算地下水固碳总量和固碳服务价值。地下水生态系统固碳服务价值可用替代工程法, 借助造林成本计算得到^[23-24], 其计算公式为

$$B_2 = Q_c C_c \quad (5)$$

式中: B_2 为地下水固碳服务价值, 元; Q_c 为区域地下水固碳总量, t; C_c 为 CO_2 造林成本, 取 1 320 元/t 碳。

涵养水源。地下含水层涵养水源能力大小取决于赋存于潜水面以下含水(层)系统中的地下水储量。以 2007 年为基准年, 计算 2008—2019 年天津市地下水储量, 采用替代工程法, 以水库蓄水成本作为地下水系统涵养水源服务价值, 计算公式为

$$B_3 = Q_s C_x \quad (6)$$

式中: B_3 为地下水涵养水源的服务价值, 元; Q_s 为区域地下水储量, m^3 ; C_x 为蓄水成本, 元/ m^3 。

2.2.3 支持服务

预防地面沉降。天津市地面沉降的主要诱发因素是过量开采地下水^[25], 防治地面沉降的关键措施是控制地下水开采。地下水开采使得地下水储量减少, 即含水层中地下水储量的多少决定了地面沉降的演变过程, 因此, 地下水系统预防地面沉降的作用应以地下水储量为计算依据, 其服务价值可采用开采损失法进行评估, 计算公式为

$$C_1 = E_1 Q_s \quad (7)$$

式中: C_1 为地下水预防地面沉降服务价值, 元; E_1 为超采单方地下水引发地面沉降的经济损失, 元/ m^3 ; Q_s 为地下水储量, m^3 。

控制降落漏斗。过量开采地下水导致区域地下水降落漏斗发生, 地下水开采使得地下水储量减少, 即含水层中地下水储量的多少决定了区域降落漏斗的范围, 因此, 以地下水储量为依据, 地下水控制降落漏斗服务价值利用开采损失法进行计算, 计算公式为

$$C_2 = E_2 Q_s \quad (8)$$

式中: C_2 为地下水控制降落漏斗服务价值, 元; E_2 为超采单方地下水引发降落漏斗的经济损失, 元/ m^3 ; Q_s 为地下水储量, m^3 。

2.2.4 文化服务

地下水具有科学研究和教育的价值, 科研教育服务价值通过每年发表论文的总投入来计算, 采用等效替代法估算, 计算公式为

$$D_1 = Z C_k \quad (9)$$

式中: D_1 为地下水科研教育服务价值, 元; Z 为与地下水有关的科研论文数量, 通过检索国内外文献得到, 项; C_k 为每篇科研论文的年均投入值, 元/篇。

3 地下水生态系统服务价值演变分析

3.1 供给服务价值演变

采用市场价值法对供给服务价值进行计算。其中: 地下水生活供水量来源于《天津统计年鉴》和《天津市水资源公报》, 生活用水价格来源于《天津统计年鉴》; 工业用水价格采用当年非居民水价, 地下水工业供水量来源于《天津市水资源公报》; 农田面积来源于《天津统计年鉴》, 结合农田面积折算得出地下水灌溉面积。以冬小麦和夏玉米为典型农产品, 农产品价格数据参考金谷粮食网华北地区的报价, 根据小麦和玉米的产量及投入成本, 计算得到地下水灌溉夏玉米产生的价值为 2 379 元/ hm^2 , 冬小麦产生的价值为 1 919 元/ hm^2 , 合计单位农田面积经济价值为 4 298 元/ hm^2 。根据供给服务价值计算公式, 2008—2019 年天津市地下水生活供水、农业供水、工业供水服务价值见表 1 和图 2。

南水北调中线工程通水前(2008—2014 年)天津市年均地下水生活供水量、工业供水量、地下水灌溉面积分别为 1.38 亿 m^3 、0.60 亿 m^3 、13.558 万 hm^2 ; 而通水后(2015—2019 年)分别为 1.14 亿 m^3 、0.46 亿 m^3 、8.624 万 hm^2 。年均地下水生活供水、工业供水、农业供水服务价值分别由通水前的 5.74 亿元、4.28 亿元、5.83 亿元减少至通水后的 5.57 亿元、3.60 亿元、3.71 亿元。通水前, 天津市地下水生活供水服务价

值呈增大趋势,年均增长率为 7.33%,通水后逐步减小并趋于平稳,年均减少率为 1.37%;通水前地下水工业供水服务价值呈波动增大趋势,年均增长率为 9.13%,通水后逐步减小,年均减少率为 10.17%;通水前地下水农业供水服务价值呈减小趋势,年均减

少率为 5.79%,通水后继续呈减小趋势,年均减少率为 4.93%。南水北调中线工程通水后,天津市地下水供给服务价值减小的主要原因是该市供水结构发生了较大变化,用于生活、工业、农业用途的地下水供水量明显减少。

表 1 2008—2019 年天津市地下水生态系统服务价值
Tab. 1 Value of groundwater ecosystem services in Tianjin from 2008 to 2019

单位: 亿元

评估指标	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	
供给服务	生活供水	4.35	5.01	5.60	6.09	5.74	6.74	6.65	5.98	5.44	5.23	5.56	5.66
	工业供水	2.83	3.37	5.15	4.48	4.57	4.79	4.78	4.70	3.89	3.21	3.14	3.06
	农业供水	6.68	6.47	6.30	6.13	5.49	5.05	4.67	4.10	3.80	3.88	3.40	3.35
	小计	13.86	14.85	17.05	16.70	15.80	16.58	16.10	14.78	13.13	12.32	12.10	12.07
调节服务	净化水质	0.20	0.21	0.23	0.23	0.24	0.23	0.24	0.24	0.27	0.28	0.31	0.32
	固碳	1.33	1.07	1.07	1.08	1.04	1.32	1.26	1.28	1.28	1.26	1.27	1.28
	涵养水源	36.11	28.94	29.06	29.25	28.21	35.73	34.16	41.89	54.02	56.42	56.63	58.16
	小计	37.64	30.22	30.36	30.56	29.49	37.28	35.66	43.41	55.57	57.96	58.21	59.76
支持服务	预防地面沉降	21.39	17.15	17.22	17.33	16.71	21.17	20.24	24.82	32.00	33.43	33.55	34.46
	控制降落漏斗	2.42	1.94	1.95	1.96	1.89	2.40	2.29	2.81	3.62	3.79	3.80	3.90
	小计	23.81	19.09	19.17	19.29	18.60	23.57	22.53	27.63	35.62	37.22	37.35	38.36
文化服务	科研教育	0.05	0.05	0.07	0.05	0.06	0.07	0.09	0.07	0.09	0.09	0.08	0.07
合计	75.36	64.21	66.65	66.60	63.95	77.50	74.38	85.89	104.41	107.59	107.74	110.26	

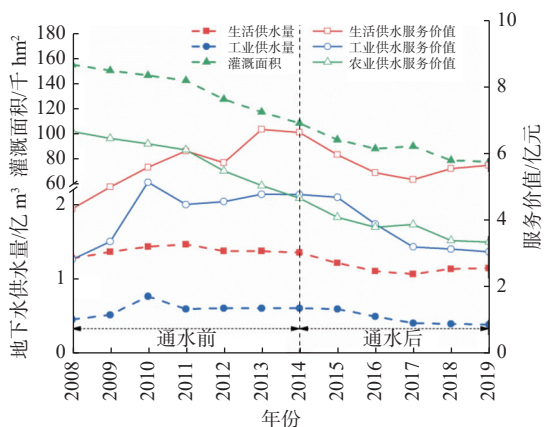


图 2 天津市 2008—2019 年地下水供给服务价值变化过程
Fig. 2 The process of change in the value of groundwater provisioning services in Tianjin from 2008 to 2019

3.2 调节服务价值演变

分别采用替代费用法和替代工程法对固碳和涵养水源服务价值进行计算。地下水储量根据《天津市水资源公报》、地下水位、地下水压采量数据和水文地质参数计算等得到;蓄水成本参考《森林生态系统服务功能评估规范》(GB/T 38582—2020),修建 1m³库容需要耗费的平均成本为 6.11 元。净化水质服务价值采用替代费用法,其中:污水排放

量数据来源于《天津市水资源公报》;管道渗漏率参考《给水排水管道工程施工及验收规范》(GB 50268—2008),取 4%;污水处理费参考文献 [26] 研究成果,取 1 元/m³。根据调节服务价值计算公式,计算得到 2008—2019 年天津市地下水净化水质、固碳、涵养水源服务价值,结果见表 1 和图 3。

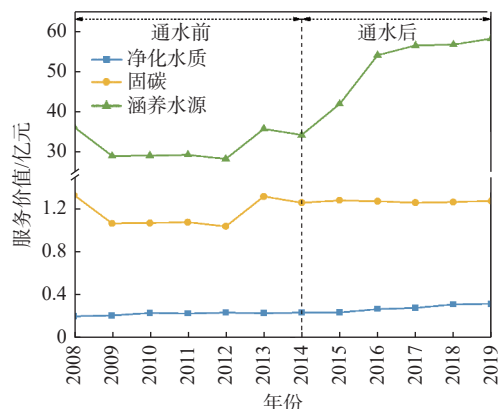


图 3 天津市 2008—2019 年地下水调节服务价值变化过程
Fig. 3 The process of change in the value of groundwater regulating services in Tianjin from 2008 to 2019

由图 3 可知:南水北调中线工程通水前,天津市地下水涵养水源和固碳年均服务价值分别为 31.64

亿元和 1.17 亿元,均呈先减小后增大的变化趋势;通水后,涵养水源年均服务价值为 53.42 亿元,呈增大趋势,年均增长率为 8.55%,固碳年均服务价值为 1.27 亿元,总体变化较为平缓。通水前与通水后,地下水净化水质服务价值总体变化较为平缓,年均服务价值分别为 0.23 亿元和 0.28 亿元。

3.3 支持服务价值演变

采用开采损失法对预防地面沉降和控制降落漏斗服务价值进行计算。其中超采单方地下水引发地面沉降、降落漏斗的经济损失参考文献 [27-28] 研究成果,分别取 3.62 元/m³、0.41 元/m³。根据支持服务价值计算公式,计算得到 2008—2019 年天津市地下水预防地面沉降、控制降落漏斗服务价值,结果见表 1 和图 4。

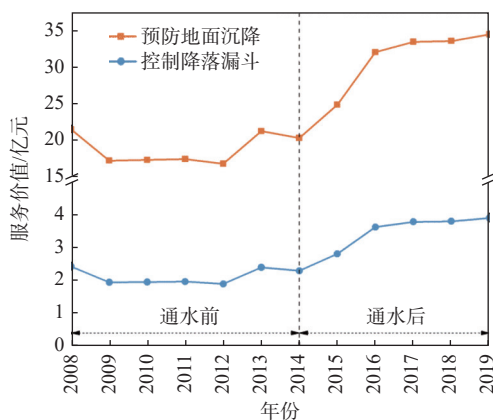


图 4 2008—2019 年天津市地下水支持服务价值变化过程
Fig. 4 The process of change in the value of groundwater supporting services in Tianjin from 2008 to 2019

由图 4 可知:南水北调中线工程通水前,天津市预防地面沉降和控制降落漏斗年均服务价值分别为 18.74 亿元和 2.12 亿元,总体变化均较为平稳;通水后,由于水源置换和压采等管理措施实施,地下水储存量的增加(见图 1),预防地面沉降和控制降落漏斗年均服务价值分别为 31.65 亿元和 3.58 亿元,服务价值均逐步增大,年均增长率分别为 8.55% 和 8.54%。

3.4 文化服务价值演变

采用等效替代法对文化服务价值进行估算。其中,每项科研项目年均投入值参考文献 [29] 研究成果,取 11.92 万元,根据文化服务价值计算公式,计算得到 2008—2019 年天津市地下水文化服务价值,结果见表 1 和图 5。

南水北调中线工程通水前,文化服务价值波动增加,年均服务价值为 0.06 亿元;通水后文化服务

价值虽波动减少,但年均服务价值高于通水前,为 0.08 亿元。

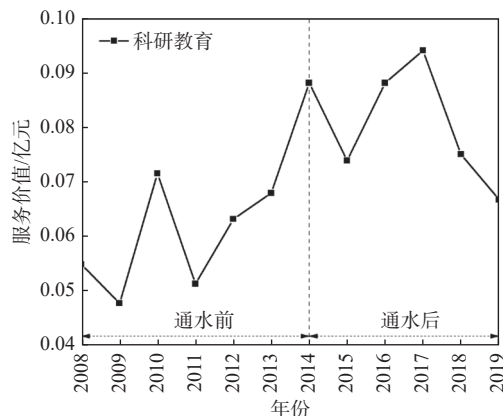


图 5 2008—2019 年天津市地下水文化服务价值变化过程
Fig. 5 The process of change in the value of groundwater cultural services in Tianjin from 2008 to 2019

3.5 总体服务价值演变

2008—2019 年天津市地下水生态系统各类服务价值及总和见表 1 和图 6。由表 1 数据可得,天津市地下水生态系统服务价值年均总服务价值为 83.71 亿元。南水北调中线工程通水前,天津市地下水生态系统总服务价值呈先减小后增大的变化趋势,2012 年降至最小值 63.95 亿元,年均总服务价值为 69.81 亿元;通水后,天津市地下水生态系统年均总服务价值为 103.18 亿元,总服务价值呈增大趋势,年均增长率为 6.44%。其中,调节服务价值和支持服务价值在通水后明显呈增大趋势,而供给服务价值呈减小趋势。

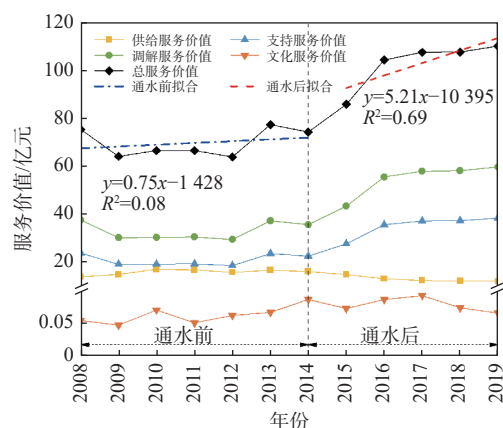


图 6 2008—2019 年天津市地下水生态系统服务价值总体变化过程
Fig. 6 The process of change in the value of groundwater ecosystem services in Tianjin from 2008 to 2019

3.6 南水北调中线工程对天津市地下水生态系统服务价值的贡献

南水北调中线工程建成后,有效增加了天津市

可利用水资源量,按照水资源管理要求逐步关停南水北调受水区地下水井,通过置换超采地下水、实施生态补水、限制地下水开采等综合措施,有效遏制了地下水水位下降、降落漏斗面积扩大、地面沉降幅度增加的趋势,使得地下水系统发挥了重要的生态服务价值。

为估算南水北调中线工程对天津市地下水生态系统服务价值的贡献。首先,根据图6中2008—2014年地下水生态系统服务价值总体变化过程,可拟合得出其年度变化曲线;然后,利用该变化曲线可得出,在无南水北调中线工程供水条件下,2015—2019年天津市地下水生态系统服务价值预测值。将前文计算得出的2015—2019年地下水生态系统实际服务价值与预测价值相减,可得到南水北调中线工程通水对地下水生态系统服务价值的贡献值。由表2和图7可知,南水北调中线工程对天津市地下水生态系统服务价值的贡献呈增大趋势,由2015年2.64亿元增加至2019年24.01亿元。

表2 南水北调中线工程对地下水生态系统服务价值的贡献

Tab. 2 Contribution of the MRP to the groundwater ecosystem services value 单位:亿元					
项目	2015年	2016年	2017年	2018年	2019年
预测价值	83.25	84.00	84.75	85.50	86.25
实际价值	85.89	104.41	107.59	107.74	110.26
贡献值	2.64	20.41	22.84	22.24	24.01

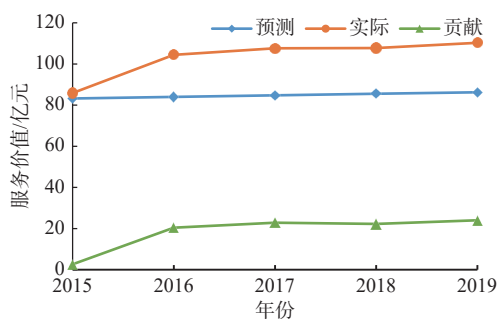


图7 天津市地下水生态系统服务净价值变化过程

Fig. 7 The process of change in the net value of groundwater ecosystem services in Tianjin

4 结论

根据地下水生态系统服务发挥途径,参照千年生态系统评估方法,从供给服务、调节服务、支持服务、文化服务4个方面,建立起地下水生态系统服务价值评估指标体系。在此基础上,采用价值量评估方法,构建以货币量为计量标准的生态服务价值

评估模型,对2008—2019年天津市地下水生态系统服务价值演变特征进行分析,客观反映了南水北调中线工程对地下水生态系统服务价值的影响与作用。

分析结果表明,2008—2019年天津市地下水生态系统服务价值年均83.71亿元,其中,供给服务价值14.61亿元,调节服务价值年均42.18亿,支持服务价值年均26.85亿元,文化服务年均0.07亿元。南水北调中线工程通水后,天津市地下水生态系统总服务价值呈增大趋势,其中调节服务价值和支持服务价值增大趋势明显,供给服务价值相对减小。南水北调中线工程通过有效增加天津市可利用水资源量,对天津市地下水生态系统服务价值的提升起到了显著作用,其贡献值不断增加,由2015年2.64亿元逐步增长至2019年24.01亿元。

由于部分基础数据统计难度较大,本文在分析过程中对一些数据做了一定的假设与估算,后续研究过程中将进一步加强数据的收集与整理,不断提升研究结果的精确度。

参考文献(References):

- [1] 欧阳志云,朱春全,杨广斌,等.生态系统生产总值核算:概念、核算方法与案例研究[J].生态学报,2013,33(21):6747-6761. (OUYANG Z Y, ZHU C Q, YANG G B, et al. Gross ecosystem product: Concept, accounting framework and case study[J]. Acta Ecologica Sinica, 2013, 33(21): 6747-6761. (in Chinese)) DOI: 10.5846/stxb201310092428.
- [2] 傅伯杰,张立伟.土地利用变化与生态系统服务:概念、方法与进展[J].地理科学进展,2014,33(4):441-446. (FU B J, ZHANG L W. Land-use change and ecosystem services: Concepts, methods and progress[J]. Progress in Geography, 2014, 33(4): 441-446. (in Chinese)) DOI: 10.11820/dlkxjz.2014.04.001.
- [3] 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. (XIE G D, ZHEN L, LU C X, et al. Expert knowledge based valuation method of ecosystem services in China[J]. Journal of Natural Resources, 2008, 23(5): 911-919. (in Chinese))
- [4] 谢高地,张彩霞,张昌顺,等.中国生态系统服务的价值[J].资源科学,2015,37(9):1740-1746. (XIE G D, ZHANG C X, ZHANG C S, et al. The value of ecosystem services in China[J]. Resources Science, 2015, 37(9): 1740-1746. (in Chinese))
- [5] 黎佳君,廖秋林,沈守云,等.长株潭城市群绿心地区

- 生态系统服务价值时空变化研究[J]. *中国园林*, 2022, 38(1): 100-105. (LI J J, LIAO Q L, SHEN S Y, et al. Study on the spatiotemporal changes of land use and ecosystem services value (ESV) of the green heart area in the Changsha-Zhuzhou-Xiangtan (CZT) city group[J]. *Chinese Landscape Architecture*, 2022, 38(1): 100-105. (in Chinese)) DOI: [10.19775/j.cla.2022.01.0100](https://doi.org/10.19775/j.cla.2022.01.0100).
- [6] 王猛, 提杨, 王家栋, 等. 不同土地利用情景下天津市生态系统服务及权衡与协同分析[J]. *北京林业大学学报*, 2022, 44(5): 77-85. (WANG M, TI Y, WANG J D, et al. D, et al. Ecosystem services, trade-offs and synergy analysis in Tianjin under different land use scenarios[J]. *Journal of Beijing Forestry University*, 2022, 44(5): 77-85. (in Chinese)) DOI: [10.12171/j.1000-1522.20210008](https://doi.org/10.12171/j.1000-1522.20210008).
- [7] 牛丽楠, 邵全琴, 宁佳, 等. 西部地区生态状况变化及生态系统服务权衡与协同[J]. *地理学报*, 2022, 77(1): 182-195. (NIU L N, SHAO Q Q, NING J, et al. Ecological changes and the tradeoff and synergy of ecosystem services in western China[J]. *Acta Geographica Sinica*, 2022, 77(1): 182-195. (in Chinese)) DOI: [10.11821/dlxb202201013](https://doi.org/10.11821/dlxb202201013).
- [8] 陈睿, 杨灿, 杨艳, 等. 洞庭湖生态经济区生态系统服务价值的时空演绎及其驱动因素[J]. *应用生态学报*, 2022, 33(1): 169-179. (CHEN R, YANG C, YANG Y, et al. Spatial-temporal evolution and drivers of ecosystem service value in the Dongting Lake Eco-economic Zone, China[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2022, 33(1): 169-179. (in Chinese)) DOI: [10.13287/j.1001-9332.202201.015](https://doi.org/10.13287/j.1001-9332.202201.015).
- [9] 胡昂, 吴俣思, 黄莹, 等. 高空间异质性区域生态系统服务供需与驱动力分析: 以四川省为例[J]. *长江流域资源与环境*, 2022, 31(5): 1062-1076. (HU A, WU Y S, HUANG Y, et al. Analysis of supplies, demands and driving forces of ecosystem services in regions with high spatial heterogeneity: A case study of sichuan province[J]. *Resources and Environment in the Yangtze Basin*, 2022, 31(5): 1062-1076. (in Chinese)) DOI: [10.11870/cjlyzyyhj202205011](https://doi.org/10.11870/cjlyzyyhj202205011).
- [10] 刘春芳, 王佳雪, 许晓雨. 基于生态系统服务流视角的生态补偿区域划分与标准核算: 以石羊河流域为例[J]. *中国人口·资源与环境*, 2021, 31(8): 157-165. (LIU CF, WANG J X, XU X Y. Regional division and standard accounting of ecological compensation from the perspective of ecosystem service flow: A case study of Shiyang River basin[J]. *China Population, Resources and Environment*, 2021, 31(8): 157-165. (in Chinese))
- [11] WALTER V R, HAROLD A, ANGELA C, et al. Millennium Ecosystem Assessment Synthesis Report[M]. New York: Island Press, 2005.
- [12] COSTANZA R, D'ARGE R, GROOT R D, et al. The value of the world's ecosystem services and natural capital[J]. *Nature: International Weekly Journal of Science*, 1997, 387(15): 253-260.
- [13] IRVINE K N, O'BRIEN L, RAVENSCROFT N, et al. Ecosystem services and the idea of shared values[J]. *Ecosystem Services*, 2016, 21(B): 184-193.
- [14] 欧阳志云, 王效科, 苗鸿. 中国陆地生态系统服务功能及其生态经济价值的初步研究[J]. *生态学报*, 1999(5): 19-25. (OUYANG Z Y, WANG X K, MIAO H. A primary study on Chinese terrestrial ecosystem services and their ecological-economic values[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 1999(5): 19-25. (in Chinese))
- [15] 谢高地, 甄霖, 鲁春霞, 等. 生态系统服务的供给、消费和价值化[J]. *资源科学*, 2008(1): 93-99. (XIE G D, ZHEN L, LU C X, et al. Supply, consumption and valuation of ecosystem services in China[J]. *Resources Science*, 2008(1): 93-99. (in Chinese))
- [16] 侯元兆, 张佩昌, 王琦. 中国森林资源核算研究[M]. 北京: 中国林业出版社, 1995. (HOU Y Z, ZHANG P C, WANG Q. Research on forest resource accounting in China [M]. Beijing: China Forestry Press, 1995.)
- [17] 刘念, 李天宏, 席浩郡. 长江中游荆江河段生态系统价值核算研究[J]. *应用基础与工程科学学报*, 2021, 29(6): 1335-1346. (LIU N, LI T H, XI H J. River ecosystem value changes on Jingjiang reach of the Yangtze River[J]. *Journal of Basic Science and Engineering*, 2021, 29(6): 1335-1346. (in Chinese)) DOI: [10.16058/j.issn.1005-0930.2021.06.002](https://doi.org/10.16058/j.issn.1005-0930.2021.06.002).
- [18] 王娇月, 邴龙飞, 尹岩, 等. 湿地生态系统服务功能及其价值核算: 以福州市为例[J]. *应用生态学报*, 2021, 32(11): 3824-3834. (WANG J Y, BING L F, YIN Y, et al. Wetland ecosystem service function and its value accounting: A case study of Fuzhou City, China[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2021, 32(11): 3824-3834. (in Chinese)) DOI: [10.13287/j.1001-9332.202111.017](https://doi.org/10.13287/j.1001-9332.202111.017).
- [19] 邬紫荆, 曾辉. 基于meta分析的中国森林生态系统服务价值评估[J]. *生态学报*, 2021, 41(14): 5533-5545. (WU Z J, ZENG H. Evaluation of forest ecosystem services value in China based on meta-

- analysis[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2021, 41(14): 5533-5545. (in Chinese)
- [20] 陈相标, 丁文荣. 滇中高原湖泊流域土地利用变化及生态系统服务功能[J]. *水土保持研究*, 2022, 29(3): 205-212. (CHEN X B, DING W R. Land use change and ecosystem service function in lake basin of certain Yunnan plateau[J]. *Research of Soil and Water Conservation*, 2022, 29(3): 205-212. (in Chinese)) DOI: 10.13869/j.cnki.rswc.2022.03.002.
- [21] 欧阳志云, 王如松, 赵景柱. 生态系统服务功能及其生态经济价值评价[J]. *应用生态学报*, 1999(5): 635-640. (OUYANG Z Y, WANG R S, ZHAO J Z. Ecosystem services and their economic valuation[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 1999(5): 635-640. (in Chinese)) DOI: 10.13287/j.1001-9332.1999.016.
- [22] 张宗祜, 施德鸿, 任福弘, 等. 论华北平原第四系地下水系统之演化[J]. *中国科学(D辑: 地球科学)*, 1997(2): 168-173. (ZHANG Z G, SHI D H, REN F H, et al. On the evolution of the quaternary groundwater system in the north China plain[J]. *Science in China(Series D)*, 1997(2): 168-173. (in Chinese))
- [23] 张宗祜, 施德鸿, 沈照理, 等. 人类活动影响下华北平原地下水环境的演化与发展[J]. *地球学报*, 1997(4): 2-9. (ZHANG Z G, SHI D H, SHEN Z L, et al. Evolution and development of groundwater environment in north China plain under human activities[J]. *Acta Geographica Sinica*, 1997(4): 2-9. (in Chinese))
- [24] 李文华. 生态系统服务功能价值评估的理论、方法与应用[M]. 北京: 中国人民大学出版社, 2008. (LI W H. Theory, methods and applications of ecosystem service value assessment[M]. Beijing: China Renmin University Press, 2008. (in Chinese))
- [25] 王威, 王森, 韦劲松, 等. 南水北调中线工程与天津地面沉降防治关系研究[J]. *南水北调与水利科技*, 2012, 10(3): 22-26. (WANG W, WANG M, WEI J S, et al. Relationship between the middle route of the South-to-North Water Diversion Project and land subsidence control in Tianjin city[J]. *South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology*, 2012, 10(3): 22-26. (in Chinese)) DOI: 10.3724/SP.J.1201.2012.03022.
- [26] 闫丹丹, 沙金霞, 刘彬, 等. 地下水生态系统服务价值评估[J]. *水电能源科学*, 2019, 37(2): 59-62. (YAN D D, SHA J X, LIU B, et al. Value assessment of groundwater ecosystem services[J]. *Water Resources and Power*, 2019, 37(2): 59-62. (in Chinese))
- [27] 杨爱民, 甘泓, 汪林, 等. 南水北调人工补给地下水含水层成本效益研究[J]. *中国水利*, 2013(23): 46-49. (YANG A M, GAN H, WANG L, et al. Research on cost-benefits of ground aquifers artificial recharge using water from South-to-North Water Diversion Project[J]. *China Water Resources*, 2013(23): 46-49. (in Chinese))
- [28] 杨丽, 朱启林, 孙静, 等. 北京市南水北调中线工程供水效益评估[J]. *人民长江*, 2017, 48(10): 44-46. (YANG L, ZHU Q L, SUN J, et al. Water supply benefit evaluation of middle route Project of South-to-North Water Diversion in Beijing City[J]. *Yangtze River*, 2017, 48(10): 44-46. (in Chinese)) DOI: 10.16232/j.cnki.1001-4179.2017.10.010.
- [29] 王其翔. 黄海海洋生态系统服务评估[D]. 青岛: 中国海洋大学, 2009. (WANG Q X. Assessment of Yellow Sea ecosystem services[D]. Qingdao: Ocean University of China, 2009.)

Study on the evolution of service value of groundwater ecosystem in Tianjin

GENG Shida¹, QU Jihong²

(1. Bureau of Comprehensive Development, Ministry of Water Resources, Beijing 100053, China;

2. North China University of Water Resources and Electric Power, Zhengzhou 450046, China)

Abstract: Groundwater is an important water source for maintaining the health of the ecosystem, and it has an essential service value for ecosystem. There are more studies on the service value assessment of ecosystems such as rivers, wetlands and forests, while the study on service value assessment of groundwater ecosystems is not systematic. The service value of groundwater ecosystem in Tianjin is assessed with a view to providing a technical reference for the sustainable management of groundwater ecosystem.

In essence, ecosystem service is the benefit for human beings which is provided by ecosystem. Quantitative assessment of the value of ecosystem service could be beneficial to utilizing land resources, protecting water

resources and improving the quality of the ecological environment efficiently, meanwhile, it could be an important tool for the human beings to manage the ecosystem rationally. The service value of groundwater ecosystem could be defined as the benefits generated by groundwater ecosystem and ecological processes that contribute to the environment and quality of life for human beings. At present, there are few studies on the service value of groundwater ecosystem, and its assessment index system and assessment methods are still in the exploration stage; previous studies are mostly focused on static assessments. Based on the classification method of the Millennium Ecosystem Assessment for ecosystem service, the groundwater ecosystem service in Tianjin is classified as four aspects: provisioning service, regulating service, supporting service and cultural service. The roles of the service value of groundwater ecosystem could be defined as six aspects: ① the groundwater could supply water resource to life, industry and agriculture, and it could play as the service value of water supply, ② the groundwater could play as the service value of purifying water quality, ③ the groundwater could react with CO_2 to generate calcium carbonate, so it could play as the service value of carbon sequestration, ④ the groundwater could play as the service value of water conservation by supplementing and regulating the rivers, lakes and wetlands, ⑤ the groundwater has the function of keeping the geological environment stable, and it could play as the supporting service value, ⑥ the groundwater also has the service value of scientific research and education. Based on this, a index system of service value assessment of groundwater ecosystem is established. Then, a monetized value assessment model is constructed by the value evaluation method. According to this model, the groundwater ecosystem service value in Tianjin is measured, and the evolution characteristics of groundwater ecosystem service value before and after the water supply of the middle route of South-to-North Water Transfer Project(MRP) are analyzed.

The result shows that, during 2008 to 2019, the average annual service value of the groundwater ecosystem in Tianjin is 8.371 billion yuan, including 6.981 billion yuan between 2008 to 2014, and 10.318 billion yuan between 2015 to 2019. After the water supply, the value of groundwater regulating service and supporting service are increased, and the value of provisioning service is decreased. The contribution for the groundwater ecosystem service value via MRP is increasing from 0.264 billion yuan in 2015 to 2.401 billion yuan in 2019.

The MRP has effectively increased the amount of available water resources in Tianjin, and effectively curbed the trend of declining of the groundwater, expanding of the groundwater depression cone and increasing of the ground subsidence. As some basic data is difficult to obtain, the methods of data assumptions estimation are used in the process of analysis. The data collection will be strengthened in further research, in order to make the results be more and more accurate.

Key words: groundwater ecosystem; Millennium Ecosystem Assessment; service value; value assessment; middle route of South-to-North Water Transfer Project