

马尚钰, 王富强, 王雪彦, 等. 南水北调中线工程河南省受水城市地下水生态系统服务价值评估[J]. 南水北调与水利科技(中英文), 2023, 21(6): 1204-1212. MA S J, WANG F Q, WANG X Y, et al. Evaluation of groundwater ecosystem service value in Henan Province under the Middle Route of South-to-North Water Transfers Project[J]. South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology, 2023, 21(6): 1204-1212. (in Chinese)

南水北调中线工程河南省受水城市地下水生态系统服务价值评估

马尚钰¹, 王富强², 王雪彦³, 马鑫¹

(1. 内蒙古自治区水利科学研究院, 呼和浩特 010052; 2. 华北水利水电大学水资源学院, 郑州 450046;
3. 宁夏水利水电勘测设计研究院有限公司, 银川 750003)

摘要: 选取南水北调中线工程河南省受水城市为典型研究区域, 综合运用市场价值法、替代工程法和等效替代法等对南水北调中线工程河南省受水城市 2008—2019 年地下水生态系统服务价值进行评估。结果表明: 河南省 11 个受水城市中, 地下水生态系统服务价值最高的是郑州市, 变化较为稳定的是平顶山市、漯河市和许昌市, 变化最剧烈的是鹤壁市。郑州市 2019 年地下水生态系统服务价值为 213.17 亿元, 其中, 调节服务价值最高, 支持服务和供给服务价值次之, 社会服务价值最低; 在各指标中水源涵养指标占总价值比例最高, 预防地面沉降指标次之, 科研教育指标占比最小。河南省受水城市 2008—2019 年多年平均生态系统服务价值为 1 030.37 亿元, 变化趋势为先下降后上升, 转折点出现在 2013 年, 原因是地下水压采、南水北调中线工程置换地下水、植树造林、水土保持等措施增加了地下水资源量。研究结果可为南水北调中线工程受水城市生态环境效益评价及地下水保护提供参考依据。

关键词: 南水北调中线工程; 地下水系统; 生态系统服务价值评估; 河南省受水城市

中图分类号: TV213.4 **文献标志码:** A **DOI:** 10.13476/j.cnki.nsbqk.2023.0119

地下水生态系统为人类提供了供水、气候调节、净化水质、涵养水源等服务, 是维持自然界生态系统平衡的重要支撑, 但人们大多重视其使用价值而忽略其生态价值, 造成地下水过度开发利用, 引发一系列生态环境问题^[1]。目前已有许多学者对地下水生态系统服务开展相关研究, 并对其价值进行评估。Yang 等^[2]和闫丹丹等^[3]以南水北调中线受水城市邯郸市为例, 建立赋存于地下水的生态系统评估体系, 并对地下水生态系统服务产生的经济价值进行估算和评价。耿世达等^[4]基于千年生态系统评估对生态系统服务的分类方法, 采用价值量评估方法测算天津市地下水生态系统服务价值, 并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。基于专家学者们的研究成果, 地下水生态系统在维持生态环境健康方面所起的作用日益凸显。

长期以来, 地下水资源过度开采造成地下水位急剧下降, 形成大面积地下水降落漏斗, 地下水资源的枯竭已经严重影响到区域水安全、粮食安全和经济社会的可持续发展^[5-6]。南水北调中线工程是缓解我国黄淮海平原水资源严重短缺、优化配置水资源的重大战略性基础设施^[7]。2014 年南水北调中线工程通水以来, 受水城市供水水源结构发生显著变化, 南水北调水正逐步替换本地水源, 地下水资源开采显著减少^[8-9]。随着南水北调中线工程通水运行和地下水压采工作的深入推进, 华北地区地下

收稿日期: 2023-09-20 修回日期: 2023-11-25 网络出版时间: 2023-12-04

网络出版地址: <https://link.cnki.net/urlid/13.1430.TV.20231130.1654.008>

基金项目: 国家自然科学基金项目(51879106); 中原科技创新领军人才计划项目(214200510001); 河南省高校科技创新团队支持计划项目(20IRTSTHN010); 郑州市软科学研究计划重点(重大)项目(2020RKXF0090)

作者简介: 马尚钰(1996—), 女, 内蒙古巴彦淖尔人, 主要从事水文学及水资源研究。E-mail: 1131990665@qq.com

通信作者: 王富强(1979—), 男, 河南济源人, 教授, 博士生导师, 主要从事水文学、水资源与环境生态等研究。E-mail: wangfuqiang@ncwu.edu.cn

水综合治理成效日益显著,河南省受水城市地下水生态系统服务价值也得到了较大提升。本文以南水北调中线工程河南省受水城市为研究区域,结合河南省受水城市特点,构建河南省受水城市地下水生态系统服务价值评估体系,确定各指标的评估方法,对河南省受水城市 2008—2019 年地下水生态系统服务价值进行定量评估和分析,反映出南水北调中线工程对地下水生态系统的调节作用及产生的生态环境效益。

1 研究区概况

以南水北调中线工程河南省受水城市为研究区域。河南省地处华北地区,面积 16.7 万 km²,多年平均降水量 768.5 mm,多年平均地表水资源量 289.3 亿 m³,多年平均地下水资源量 189.45 亿 m³,多年平均水资源总量 389.08 亿 m³。南水北调中线工程共向河南省 11 个地级市供水,其中,黄河以北有 5 个(安阳、焦作、濮阳、新乡、鹤壁),黄河以南有 6 个(许昌、郑州、漯河、周口、南阳、平顶山)。南水北调中线工程对地下水生态系统的影响主要通过限制开采地下水和置换超采地下水,从而有效遏制地下水位下降、地下水降落漏斗面积扩大、地面沉降幅度增加,使地下水位逐步回升。

2 地下水生态系统服务指标体系构建

2.1 地下水生态系统服务分类

地下水生态系统服务指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。它不仅为人类生存提供基础产品,还维持着地球生命赖以生存的环境条件^[4]。从地下水对生态系统的供给形式上,地下水生态系统可分为三大类型,即赋存在地下水中的生态系统、地下水溢出供养的生态系统、地下水位维持生态系统^[10]。参照千年生态系统评估对生态系统服务的分类方法,将地下水生态系统服务细分为供给、调节、支持、社会 4 个类型^[11-12]。本文主要分析赋存在地下水中的生态系统服务并核算其价值。

2.2 指标体系构建

构建合理的指标体系是准确评估地下水生态系统服务价值的基础。主要通过重点评估地下水生态系统中的水资源供给、地下水位提升、生态环境修复等各类具有实际市场价值且易以货币量化的生态系统服务价值,结合南水北调中线工程河南省受水城市实际情况,参考相关文献^[13-15],选取供给服务、调节服务、支持服务、社会服务 4 个方面、9 个指标构建指标体系计算南水北调中线工程河南省受水城市生态系统服务价值,指标体系见图 1。

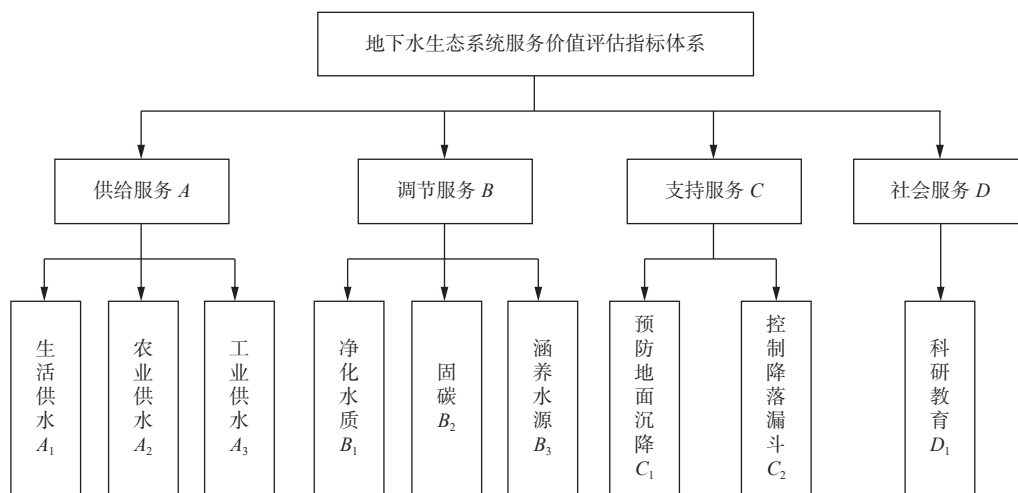


图 1 地下水生态系统服务价值评估指标体系

Fig. 1 Groundwater ecosystem service value evaluation index system

地下水生态系统的供给效益是指地下水生态系统直接向人类提供的各种产品和服务的价值总和,这些产品和服务的短缺会对人类福祉产生直接或间接的不利影响^[16]。根据南水北调中线工程特点,供给服务的指标包括:地下水所提供的生活供水、

农业供水、工业供水。调节服务主要是指地下水生态系统调节过程中人类从中获取的各种收益,结合南水北调中线工程河南省受水城市实际,调节服务价值评估的指标包括:净化水质、固碳、涵养水源。支持服务主要体现在预防地面沉降和控制降落漏

斗上。其中: 预防地面沉降指通过预防地表表面的下降, 从而减少因地表下沉引起的一系列损失; 控制降落漏斗是通过避免产生大规模的地下水降落漏斗, 从而避免一系列的地质灾害。社会服务是指南水北调中线工程满足社会需求、提升公众认知、保证公共安全、传承社会文化过程中所产生的价值。本文社会服务价值估算指标为科研教育。

2.3 地下水生态系统服务价值评估方法

生态系统服务价值评估方法一般分为替代市场

方法和模拟市场方法: 前者将生态服务的经济价值用“影子价格”和消费者剩余来表达, 主要有市场价值法、替代物品法、旅行费用法、机会成本法和替代工程法; 后者将生态服务的经济价值用支付意愿和净支付意愿来表达, 其多用条件价值法评价^[17-19]。通过地下水生态系统的固有特征和相关文献, 筛选出 9 项具有代表性的核算指标, 建立研究区评估指标体系。地下水生态系统服务价值评估方法详见表 1。

表 1 地下水生态系统服务价值评估方法

Tab. 1 Assessment methods of groundwater ecosystem services

指标	评估方法	计算公式	参数	数据来源
生活供水 A_1	市场价值法	$A_1 = P_1 \times Q_1$	P_1 —生活用水价格 Q_1 —生活用水中地下水供水量	《统计年鉴》 《水资源公报》
农业供水 A_2	市场价值法	$A_2 = M_2 [P(Y_i - Y_d) - (C_i - C_d)]$	M_2 —农田面积 P —农产品价格 Y_i, Y_d —分别为灌溉区、旱地农产品单位面积产量 C_i, C_d —分别为灌溉区、旱地年投入成本	《统计年鉴》、《水资源公报》和金谷粮食网
工业供水 A_3	市场价值法	$A_3 = P_3 \times Q_3$	P_3 —工业用水价格 Q_3 —地下水工业供水量	《统计年鉴》 《水资源公报》
水质净化 B_1	替代费用法	$B_1 = Q_1 \times F_1 \times C_1$	Q_1 —污水排放量 F_1 —管道渗漏率 C_1 —污水处理成本	《给水排水管道工程施工及验收规范》《水资源公报》
固碳 B_2	替代费用法	$B_2 = Q_2 \times C_2$	Q_2 —地下水固碳总量 C_2 — CO_2 造林成本, 取 1 320 元/t	《水资源公报》
涵养水源 B_3	替代工程法	$B_3 = Q_3 \times P_3$	Q_3 —地下水储量 P_3 —蓄水成本	《水资源公报》《森林生态系统服务功能评估规范》
预防地面沉降 C_1	开采损失法	$C_1 = P_1 \times Q_s$	P_1 —超采单方地下水引发地面沉降的经济损失 Q_s —地下水蓄变量	《水资源公报》
控制降落漏斗 C_2	开采损失法	$C_2 = P_2 \times Q_s$	P_2 —超采单方地下水引发降落漏斗的经济损失 Q_s —地下水蓄变量	《水资源公报》
科研教育 D_1	等效替代法	$D_1 = Z \times C_1$	Z —与地下水有关的科研项目数量, 通过检索国内外文献得到 C_1 —每项科研项目投入平均值	中国知网中文索引、 Web of Science 英文索引

3 河南省受水城市地下水生态系统服务价值评估

3.1 各受水城市地下水生态系统服务价值评估

郑州市作为河南省省会城市, 在南水北调中线工程中的受水量最多, 因此将郑州市地下水生态系统服务价值单独列出进行分析。根据表 1 地下水生态系统服务价值评估方法中的参数选取和数据来源计算郑州市地下水生态系统服务价值, 郑州市 2008—2019 年地下水生态系统服务价值及变化见表 2 和图 2。

由表 2 可知, 郑州市地下水生态系统服务价值介于 100 亿~220 亿元, 2014 年前服务价值变化不大, 2015 年后服务价值浮动较大且 2015—2018 年地下水生态系统服务价值逐年迅速增长。在各指标中, 水源涵养指标生态系统服务价值最高, 2019 年约占总价值的 52.49%, 预防地面沉降指标次之, 科研教育指标最小, 最大值不超过 0.03 亿元。在 4 种不同类型的地下水生态系统服务价值中, 调节服务最高, 支持服务和供给服务次之, 社会服务最低。在供给服务中, 地下水生态系统服务价值由高到低的指标依次为工业供水、农业供水、生活供水, 表明地下水

产生的生态系统服务价值对工业带来的影响最大,对生活的影 响最小。在调节服务中,水源涵养指标值最大,水质净化和 水源涵养都较小,表明地下水对于水源涵养具有较为明显 的调节作用。在支持服务中,预防地面沉降指标值较大,控 制降落漏斗

指标值较小,说明地下水对于缓解地面沉降这种次生地质 灾害的作用较为显著。本文中社会服务仅体现在地下水研 究产生的科研价值上,2008—2019年社会服务价值在 0.01 亿~0.03 亿元。

表 2 郑州市 2008—2019 年地下水生态系统服务价值
Tab. 2 Groundwater ecosystem service value in Zhengzhou from 2008 to 2019

单位: 亿元

指标体系	指标代码	指标名称	年份											
			2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019
供给服务A	A ₁	生活供水	4.60	4.61	5.52	5.53	5.59	5.19	5.07	5.08	8.46	7.35	7.66	7.76
	A ₂	农业供水	7.65	7.96	7.84	8.06	7.80	7.54	7.51	7.45	7.48	7.79	8.79	8.94
	A ₃	工业供水	15.95	16.83	15.68	17.87	18.82	14.93	12.50	12.56	12.57	10.31	10.61	9.11
		总计	28.20	29.40	29.04	31.46	32.20	27.66	25.08	25.09	28.50	25.45	27.06	25.81
调节服务B	B ₁	水质净化	0.15	0.16	0.18	0.18	0.20	0.17	0.17	0.18	0.13	0.29	0.32	0.32
	B ₂	固碳	1.99	1.92	1.92	2.14	1.95	1.61	1.46	1.39	1.41	1.33	1.33	1.33
	B ₃	水源涵养	53.93	52.10	51.93	57.96	52.83	43.48	39.41	65.33	85.12	108.44	113.28	111.90
		总计	56.07	54.18	54.03	60.28	54.98	45.25	41.04	66.91	86.66	110.06	114.93	113.54
支持服务C	C ₁	预防地面沉降	31.95	30.87	30.77	34.34	31.30	25.76	23.35	38.71	50.43	64.25	67.12	66.30
	C ₂	控制降落漏斗	3.62	3.50	3.48	3.89	3.55	2.92	2.64	4.38	5.71	7.28	7.60	7.51
		总计	35.57	34.36	34.25	38.23	34.85	28.68	26.00	43.09	56.14	71.52	74.72	73.80
社会服务D	D ₁	科研教育	0.03	0.02	0.03	0.03	0.03	0.03	0.03	0.02	0.03	0.03	0.02	0.01
		总计	0.03	0.02	0.03	0.03	0.03	0.03	0.03	0.02	0.03	0.03	0.02	0.01
总服务价值			119.87	117.96	117.35	129.99	122.06	101.61	92.15	135.12	171.33	207.06	216.73	213.17

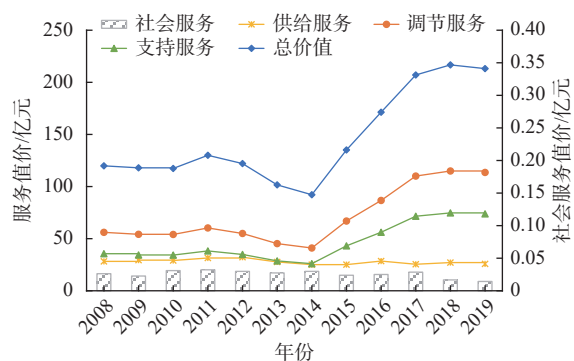


图 2 郑州市 2008—2019 年地下水生态系统服务价值及变化

Fig. 2 The service value of groundwater ecosystem in Zhengzhou

由图 2 可知,郑州市地下水生态系统服务总价值呈现出先下降后大幅上升的趋势,转折点发生在 2014 年。调节服务、支持服务变化趋势与总服务价值变化趋势相似,社会服务价值变化不大但在 2018 年和 2019 年出现明显下降。供给服务价值变化不大但总体呈下降趋势。分析可知:一方面是由于南水北调中线工程通水前(2008—2014 年)郑州市年

均地下水生活供水量、工业供水量、地下水灌溉面积分别为 2.15 亿 m³、3.09 亿 m³、16.86 万 hm²,通水后(2015—2019 年)分别为 1.87 亿 m³、1.96 亿 m³、17.57 万 hm²,通水后郑州市地下水供给生活用水和工业用水的水量都有所减少,而用于农业灌溉的水量有所增加,使地下水供水结构发生变化;另一方面郑州市通过地下水井封停和地下水源置换为南水北调水和地表水等手段有效补给地下水资源,促使地下水位回升,郑州市地下水供给量明显减少,供给服务价值呈下降趋势^[20]。

由图 3 可知,地下水生态系统服务价值较高的有南阳市、新乡市。南阳市地下水生态系统服务价值在 2018 年最高达到 139.38 亿元,新乡市在 2016 年最高达到 167.43 亿元;平顶山市、周口市、许昌市和安阳市次之,2008—2019 年地下水生态系统服务价值范围介于 70 亿~130 亿元,漯河市、焦作市、濮阳市介于 40 亿~100 亿元;鹤壁市最小且波动幅度最大,地下水生态系统服务价值介于 10 亿~40 亿元。

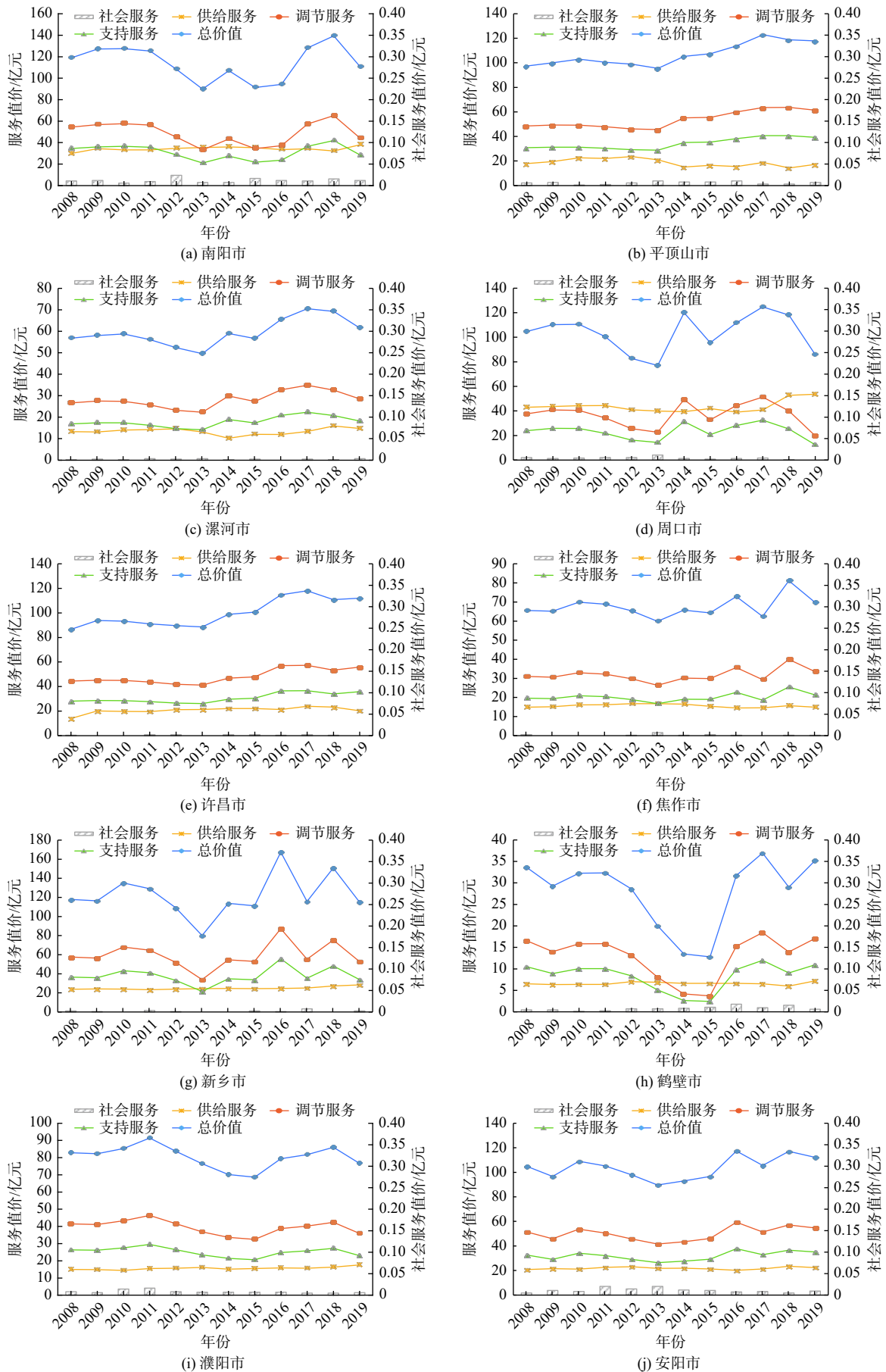


图 3 2008—2019 年河南省 10 个受水城市地下水生态系统服务价值

Fig. 3 Service value of groundwater ecosystem in ten water-receiving cities in Henan Province from 2008 to 2019

在 10 个城市中,南阳市最靠近南水北调中线工程水源地且受水量最大,因此南阳市地下水生态系统服务价值较高。2008—2019 年地下水生态系统服务价值变化较为稳定的是平顶山市、漯河市、许昌市和焦作市,且都在 2013 年后稳定上涨。周口市和新乡市变化剧烈且趋势相似,濮阳市和安阳市总体上为先下降后上升。鹤壁市变化趋势最为剧烈,

波动明显。

3.2 河南省地下水生态系统服务价值评估

3.2.1 地下水生态系统总服务价值分析

根据表 1 地下水生态系统服务价值评估方法计算研究区 11 个受水城市的地下水生态系统服务价值并求和,得到河南省受水城市地下水生态系统服务价值,见表 3 和图 4。

表 3 2008—2019 年南水北调中线工程河南省受水城市地下水生态系统服务价值

Tab. 3 Service value of groundwater ecosystem in the receiving area of Henan Province for the Middle Route of South-to-North Water Transfers Project from 2008 to 2019

分类	年份											
	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019
供给服务A	227.19	242.27	244.80	248.91	253.68	244.58	232.66	236.21	231.68	239.86	254.20	260.31
调节服务B	465.91	461.59	487.61	478.02	419.13	357.09	431.68	429.98	554.02	569.10	598.44	517.13
支持服务C	295.74	292.98	309.48	303.38	265.86	226.41	273.97	273.93	354.20	364.88	384.23	332.31
社会服务D	0.07	0.07	0.07	0.10	0.10	0.10	0.08	0.09	0.09	0.08	0.07	0.06
总计	988.91	996.90	1041.97	1030.41	938.77	828.19	938.39	940.21	1139.99	1173.93	1236.94	1109.81

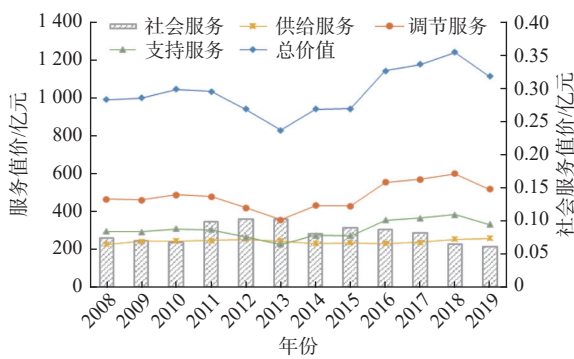


图 4 2008—2019 年南水北调中线工程河南省受水城市地下水生态系统服务价值

Fig. 4 Service value of groundwater ecosystem in the receiving area of Henan Province for the Middle Route of South-to-North Water Transfers Project from 2008 to 2019

由表 3 可知,河南省受水城市地下水生态系统服务价值 2008—2019 年增加了 120.9 亿元,平均每年约增加 11 亿元,生态系统服务价值增加显著。在 4 种不同类型生态系统服务中,调节服务占比最高,2019 年为 517.13 亿元,约占当年总价值的 46.6%,供给服务和支持服务约占总价值的 23.5% 和 30%,社会服务价值最小,不足 0.1 亿元。供给服务价值来源于生活供水价值、工业供水价值和农业供水价值三者之和,前两个指标的计算主要取决于地下水供给生活用水和工业用水的水量,农业用水价值取决于灌溉后农田的产量,因此地下水供给服务价值与地下水供给水量呈正相关关系。调节服务价值难以直接量化,因此用替代法进行计算,水质净化

价值计算通过用污水处理费替代得到,固碳价值用造林成本计算替代得到,涵养水源价值用水库蓄水成本计算替代。支持服务包括预防地面沉降和控制降落漏斗,两者的地下水生态系统服务价值与地下水蓄变量呈正相关关系。社会服务价值较小,原因是价值难以量化,实际效益远远大于计算所得价值。

由图 4 可知,河南省受水城市 2008—2019 年地下水生态系统服务价值总体变化趋势为先下降后上升,转折点出现在 2013 年。2013 年前呈下降趋势但总体变化不大,2008—2013 年生态系统服务价值介于 800 亿~1 100 亿元;2013 年后,地下水生态系统服务价值逐年上涨,但在 2019 年又有所下降,2013—2019 年生态系统服务价值介于 800 亿~1 300 亿元,增加幅度较大。分析其原因:一方面是由于大力整治地下水超采,限制地下水不合理开采,鼓励使用中水、回用水等直接增加了地下水资源储量;另一方面是南水北调地表水置换深层地下饮用水和充分利用引黄水推进了地下水水源置换,以及植树造林、水土保持、建设湿地、恢复坑塘等措施间接增加地下水资源量。服务价值中占比较高的为调节服务和支持服务,其计算方法决定了价值量与地下水资源量呈正相关关系,因此 2013 年后地下水资源量的增加是地下水生态系统服务价值增加的主要原因。2010 年受水城市地下水生态系统服务总价值突然上升,这是由于受水城市 2010 年地下

水资源量较为丰富,涵养水源服务价值和固碳价值随之递增,调节价值起主导作用,故总价值上升。2019 年受水城市地下水生态系统服务总价值突然减小,原因是 2019 年降雨量减少,受水城市地下水资源量减少,总服务价值减少。

在 4 种不同类型生态系统服务价值中,调节服务的多年变化趋势与总服务价值变化趋势最相似,总体都表现为先下降后上升,这与调节服务价值在总服务价值中占比高有一定的关系;支持服务价值变化趋势与调节服务变化趋势基本相同,但占比较支持服务价值更低;供给服务价值呈现出缓慢上升的趋势且总体变化不大;社会服务价值表现为先上

升后下降,总体变化不大,其变化趋势主要取决于当年研究区地下水科学研究的热度。

3.2.2 地下水生态系统服务使用价值分析

供给服务和社会服务为生态系统服务直接使用价值,调节服务和支撑服务为间接使用价值。河南省受水城市地下水生态系统服务直接与间接使用价值结果见表 4。赋存于地下水中的多年平均生态系统服务价值为 1 030.37 亿元,直接使用价值(生活供水、农业供水、工业供水和科研教育)为 243.11 亿元,间接使用价值(净化水质、涵养水源、固碳、预防地面沉降、控制降落漏斗)为 787.26 亿元,间接价值是直接价值的 3.24 倍。

表 4 2008—2019 年南水北调中线工程河南省受水城市地下水生态系统服务直接与间接使用价值
Tab. 4 Direct and indirect use value of receiving area of the Middle Route of South-to-North Water Transfers Project in Henan Province from 2008 to 2019

单位:亿元

分类	年份												均值
	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	
直接使用价值	227.26	242.34	244.87	249.01	253.79	244.68	232.75	236.30	231.77	239.94	254.27	260.37	243.11
间接使用价值	761.65	754.56	797.10	781.40	684.99	583.50	705.65	703.91	908.22	933.98	982.67	849.44	787.26

河南省受水城市 2008—2019 年逐年的直接与间接使用价值变化过程见图 5,由图 5 可知,间接使用价值总体上呈现上升趋势,而直接使用价值处于稳定的趋势,且受水城市赋存于地下水生态系统服务的主导价值为间接使用价值,因此可认为地下水生态系统服务间接使用价值较大,应在全面认识地下水使用价值的基础上,合理开发利用地下水资源,使其服务价值最大化。

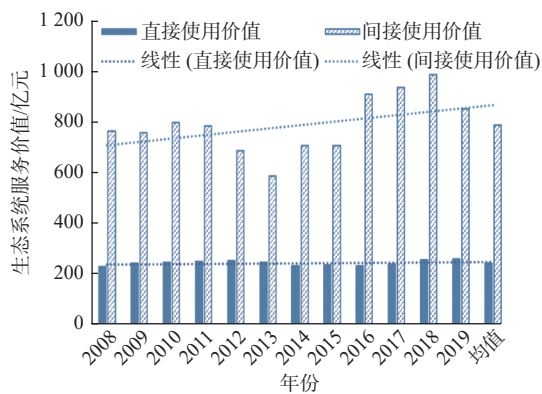


图 5 河南省受水城市 2008—2019 年逐年的直接与间接使用价值变化过程

Fig. 5 The changing process of groundwater ecosystem service use value in receiving area of Henan Province from 2008 to 2019

4 结论

本文构建了南水北调中线工程河南省受水城市

地下水生态系统服务价值的评估体系,从供给服务、调节服务、支持服务、社会服务 4 方面对 2008—2019 年河南省受水城市地下水生态系统服务价值进行了定量评估,并对各项指标的占比情况进行了分析,主要结论如下:

河南省 11 个受水城市中,地下水生态系统服务价值最高的是郑州市、南阳市、新乡市,变化较为稳定的是平顶山市、漯河市、许昌市和焦作市,周口市和新乡市地下水生态系统服务价值变化剧烈且趋势相似,濮阳市和安阳市也有一定的起伏变化但总体上为先下降后上升的趋势,鹤壁市变化趋势最为剧烈且波动明显。

郑州市 2019 年地下水生态系统服务价值为 213.17 亿元。在 4 种不同类型的地下水生态系统服务价值中,调节服务价值最高,支持服务价值和供给服务价值次之,社会服务价值最低。在各指标中水源涵养指标占总价值比例最高,预防地面沉降指标次之,科研教育指标占比最小。

河南省受水城市 2008—2019 年地下水生态系统服务价值总体变化趋势为先下降后上升,转折点出现在 2013 年,分析认为原因是地下水压采、南水北调中线工程置换地下水资源、植树造林、水土保持等措施增加了地下水资源量,从而使地下水生态

系统服务价值显著增加。

河南省受水城市赋存于地下水中的多年平均生态系统服务价值为 1 030.37 亿元,其中,间接使用价值为 787.26 亿元,直接使用价值为 243.11 亿元,间接价值是直接价值的 3.24 倍,可认为间接使用价值占主导地位。应在全面认识地下水使用价值的基础上,合理利用地下水资源。

参考文献:

- [1] NURLY G, LEE M L. Extreme rainfall characteristics for surface slope stability in the Malaysian Peninsular[J]. *Georisk Assessment and Management of Risk for Engineered Systems and Geohazards*, 2008, 2(2): 65-78. DOI: [10.1080/17499510802072991](https://doi.org/10.1080/17499510802072991).
- [2] YANG X, LIU J. Assessment and valuation of groundwater ecosystem services: A case study of Handan City, China[J]. *Water*, 2020, 12(5): 1455. DOI: [10.3390/w12051455](https://doi.org/10.3390/w12051455).
- [3] 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, 90.
- [4] 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. DOI: [10.13476/j.cnki.nsbdqk.2022.0112](https://doi.org/10.13476/j.cnki.nsbdqk.2022.0112).
- [5] 邹嘉文,刘飞,张靖坤.南水北调典型受水区浅层地下水水化学特征及成因[J]. *中国环境科学*, 2022, 42(5): 2260-2268. DOI: [10.19674/j.cnki.issn1000-6923.2022.0115](https://doi.org/10.19674/j.cnki.issn1000-6923.2022.0115).
- [6] 景兆凯,燕青,肖航,等.南水北调中线河南省受水区浅层地下水水位演化规律[J]. *煤田地质与勘探*, 2021, 49(6): 230-236. DOI: [10.3969/j.issn.1001-1986.2021.06.027](https://doi.org/10.3969/j.issn.1001-1986.2021.06.027).
- [7] 曹文庚,杨会峰,高媛媛,等.南水北调中线受水区保定平原地下水质量演变预测研究[J]. *水利学报*, 2020, 51(8): 924-935. DOI: [10.13243/j.cnki.slxb.20200035](https://doi.org/10.13243/j.cnki.slxb.20200035).
- [8] 张先起,聂永博.南水北调中线水源区生态系统服务价值评估[J]. *华北水利水电大学学报(自然科学版)*, 2022, 43(1): 89-95,102. DOI: [10.19760/j.ncwu.zk.2022012](https://doi.org/10.19760/j.ncwu.zk.2022012).
- [9] 田华,杨明华.河南省浅层地下水动态演变分析[J]. *人民黄河*, 2012, 34(3): 45-46, 51.
- [10] 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.
- [11] WALTER V R, HAROLD A, ANGELA C, et al. Millennium ecosystem assessment synthesis report[M]. New York: Island Press, 2005.
- [12] 赵士洞,张永民.生态系统与人类福祉:千年生态系统评估的成就、贡献和展望[J]. *地球科学进展*, 2006(9): 895-902. DOI: [10.3321/j.issn:1001-8166.2006.09.002](https://doi.org/10.3321/j.issn:1001-8166.2006.09.002).
- [13] 荣丽杉,束龙仓,刘佩贵,等.地下水生态系统服务功能价值评估:以鄂尔多斯沙漠高原生态系统为例[C]//河流开发、保护与水资源可持续利用:第六届中国水论坛论文集. 2008: 660-663.
- [14] COSTANZA R, D'ARGE R, GROOT R D, et al. The value of the world's ecosystem services and natural capital[J]. *Nature*, 1997, 387(15): 253-260. DOI: [10.1038/387253a0](https://doi.org/10.1038/387253a0).
- [15] 张先起,路晓斌.南水北调中线工程沿线水库生态系统服务价值演变解析[J]. *海河水利*, 2023(1): 43-47, 54.
- [16] 王乃亮,李雪丽,陶伟,等.生态系统服务功能价值评估研究进展[J]. *绿色科技*, 2022, 24(10): 44-49. DOI: [10.16663/j.cnki.lskj.2022.10.007](https://doi.org/10.16663/j.cnki.lskj.2022.10.007).
- [17] 殷楠,王帅,刘焱序.生态系统服务价值评估:研究进展与展望[J]. *生态学杂志*, 2021, 40(1): 233-244. DOI: [10.13292/j.1000-4890.202101.025](https://doi.org/10.13292/j.1000-4890.202101.025).
- [18] 周小平,冯宇晴,罗维,等.两种生态系统服务价值评估方法比较研究:以四川省金堂县三星镇土地整治工程为例[J]. *生态学报*, 2020, 40(5): 1799-1809.
- [19] 曾子悦,许继军,吴光东,等.南水北调中线一期工程生态效益评估:以北京市为例[J]. *南水北调与水利科技(中英文)*, 2022, 20(6): 1168-1178. DOI: [10.13476/j.cnki.nsbdqk.2022.0115](https://doi.org/10.13476/j.cnki.nsbdqk.2022.0115).
- [20] 田大永,张春艳,程艳红,等.南水北调中线工程通水后郑州市地下水埋深变化研究[J]. *人民黄河*, 2023, 45(5): 76-82, 102.

Evaluation of groundwater ecosystem service value in Henan Province under the Middle Route of South-to-North Water Transfers Project

MA Shangyu¹, WANG Fuqiang², WANG Xueyan³, MA Xin¹

(1. Inner Mongolia Water Conservancy Research Institute, Hohhot 010052, China; 2. College of Water Resources, North China University of Water Resources and Electric Power, Zhengzhou 450046, China; 3. Ningxia Water Resources and Hydropower Survey, Design and Research Institute Co., Ltd, Yinchuan 750003, China)

Abstract: As a national major strategic foundation project, the Middle Route of South-to-North Water Transfers Project not only plays a significant social and economic benefits, but also plays a huge ecological and environmental benefits. Although the economic and social benefits of the Middle Route of South-to-North Water Transfers Project are obvious, there is still a lack of systematic understanding and objective and accurate quantitative evaluation of its ecological and environmental benefits and its added value. Since the Middle Route of South-to-North Water Transfers Project was opened, the water source structure of the water-receiving cities has changed significantly, the exploitation of groundwater resources has decreased significantly, and the groundwater level has risen, which has significantly changed the ecosystem services of groundwater. In this context, it is of great significance to accurately and quantitatively assess the change of groundwater ecosystem service value in the water-receiving area before and after the Middle Route of South-to-North Water Transfers Project and to correctly understand the ecological and environmental benefits brought by the project and promote the rational and scientific utilization of the water resources of the project. The service value of groundwater ecosystem refers to the value that groundwater ecosystem provides material, energy and service to human society through various ways. According to the role of ecosystem in human survival and social and economic development, the value of ecosystem services is divided into four categories: product supply, support, regulation and cultural services. At home and abroad, the quantitative evaluation of ecosystem services mainly adopts three methods, namely, the quality evaluation method, the value evaluation method and the energy evaluation method. Based on the characteristics of the Middle Route of South-to-North Water Transfers Project and the water-receiving cities, the value assessment methods, including market value method, alternative cost method and mining loss method are adopted. The water-receiving cities in Henan Province under the Middle Route of South-to-North Water Transfers Project were selected as the typical research area, and the market value method, alternative engineering method and equivalent substitution method were used to evaluate the groundwater ecosystem service value of the cities in Henan Province from 2008 to 2019. The results showed that: (1) Among the 11 water-receiving cities in Henan Province, the highest value of groundwater ecosystem service was found in Zhengzhou City, the most stable changes were found in Pingdingshan City, Luohe City and Xuchang City, and the most drastic changes were found in Hebi City. (2) In 2019, the value of groundwater ecosystem services in Zhengzhou was 21.317 billion yuan, with the highest value of regulation services, followed by support services and supply services, and the lowest social services. Water conservation index accounted for the highest proportion of total value, followed by prevention of land subsidence index, and scientific research and education index accounted for the smallest proportion. (3) The annual average ecosystem service value of water-receiving cities in Henan Province from 2008 to 2019 was 103.037 billion yuan, and the change trend was first decreasing and then increasing. The turning point appeared in 2013, due to the increase of groundwater resources by underground water pressure extraction, groundwater replacement by the Middle Route of South-to-North Water Transfers Project, afforestation and soil and water conservation measures. The research results can provide a reference for the evaluation of eco-environmental benefits and groundwater protection of the Middle Route of South-to-North Water Transfers Project.

Key words: Middle Route of South-to-North Water Transfers Project; groundwater system; ecosystem service value assessment; water-receiving cities in Henan Province