

闫腾, 贺华翔, 游进军, 等. 面向地下水压采的水源置换关系研究[J]. 水利水电技术(中英文), 2021, 52(4): 13-21.

YAN Teng, HE Huaxiang, YOU Jinjun, et al. Study on replacement relationship of water source allocation on groundwater pumping reduction[J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 2021, 52(4): 13-21.

面向地下水压采的水源置换关系研究

闫腾¹, 贺华翔¹, 游进军¹, 林鹏飞¹, 杨朝晖^{1,2}

(1. 中国水利水电科学研究院, 北京 100048; 2. 国家水安全与水科学协同创新中心, 江苏 南京 210098)

摘要: 针对华北地区地下水超采严重问题, 国家提出节水和多渠道增加水源补给的综合治理措施。考虑到区域地下水压采目标的空间不均衡性, 以及“节水、增供”等措施的可达性, 面向地下水压采目标, 引入节水贡献率和替代水源贡献率概念。提出基于方案对比的贡献率评价方法, 通过配置模型定量解析区域内不同方案下水量分配情况, 评价节水、增供与地下水压采量之间的水源置换关系(即贡献率), 为水量分配、水源置换等水资源管理工作提供参考。以南水北调中线工程重要受水区郑州市为例, 分析了2030规划水平年不同节水情景下的节水、增供与地下水压采量的水源置换关系, 进一步剖析了地表水、外调水、非常规水等“增供”措施对地下水压采的贡献率, 并结合区域水资源禀赋、工程规划、产业发展方向分析了结果的合理性。研究结果表明: (1) 在全市层面, 外调水贡献率高于节水、地表水和非常规水等置换方式, 说明郑州市实现地下水压采目标主要依靠外调水支撑; (2) 各县市的对比表明不同区域不同措施的贡献率存在明显差异, 中牟、荥阳节水贡献率较高, 与其农业节水潜力较大密切相关, 采取适宜节水措施能够对这两个县市的地下水压采工作起到促进作用; 航空港区节水贡献率较低, 主要原因在于现状年航空港区农业占比较大, 未来产业布局调整后以发展空港物流为主, 农业用水被其他用户用水替代, 因而存量节水潜力有限; 巩义市和登封市地表水贡献率较高, 说明地表水开发利用尚存潜力, 对地下水压采工作具有较好的促进作用; 中心城区、航空港区、中牟县非常规水可供的用户和需求相对较大, 增长空间较大, 因而其贡献率相对较高。

关键词: 地下水压采; 水资源配置; 水源置换; 节水贡献率; 替代水源贡献率; 水资源; 生态修复

doi: 10.13928/j.cnki.wrahe.2021.04.002

开放科学(资源服务)标志码(OSID):

中图分类号: TV214

文献标志码: A

文章编号: 1000-0860(2021)04-0013-09



与作者互动
请扫二维码

Study on replacement relationship of water source allocation on groundwater pumping reduction

YAN Teng¹, HE Huaxiang¹, YOU Jinjun¹, LIN Pengfei¹, YANG Zhaohui^{1,2}

(1. China Institute of Water Resources and Hydropower Research, Beijing 100048, China; 2. National Cooperative Innovation Center for Water Safety & Hydro-Science, Nanjing 210098, Jiangsu, China)

Abstract: In view of the serious problem of groundwater over-exploitation in north China, the state has put forward the comprehensive control measures of water-saving and multi-channel increasing water supply. Considering the disequilibrium of regional control targets of groundwater pumping and the accessibility of water-saving and water-increasing measures, the concepts of water-

收稿日期: 2020-09-28

基金项目: 国家重点研发计划(2017YFC0404405, 2018YFC0407705); 水利部财政项目水资源管理(02001904); 国家自然科学基金项目(51709274, 71774172)

作者简介: 闫腾(1993—), 男, 硕士研究生, 主要从事水文水资源方面研究。E-mail: 1812493737@qq.com

通信作者: 游进军(1977—), 男, 正高级工程师, 博士, 主要从事水文水资源方面研究。E-mail: youjj@iwhw.com

saving contribution rate and alternative water source contribution rate are introduced for groundwater pumping targets. The method of contribution rate calculation based on the comparison of schemes is proposed to evaluate the water source displacement relationship (contribution rate) between water saving, water increasing and reduction of groundwater pumping by analyzing the distribution of groundwater under different schemes in the region quantitatively with the allocation model. The results of the analysis provide reference for water resources management such as water distribution, water source replacement and so on. With Zhengzhou as an example, this paper analyzes the relationship between water saving, alternative water supply increasing and reduction of groundwater pumping under different scenarios in 2030, figures out the contribution rate of surface water, inter-basin water transfer and non-conventional water to reduction of groundwater pumping. In the analysis, characteristics of water resources in specific regions, regional development planning and schemes of hydraulic projects are taken into consideration in the scenarios. The results show that: (1) the contribution rate of inter-basin water transfer is higher than other measures in general, indicating that the inter-basin water transfer is the main support for the reduction of groundwater pumping in Zhengzhou; (2) the comparison among counties shows that there are significant differences in the contribution rates of different measures in different regions. The higher contribution rates of water conservation in Zhongmou and Xingyang are closely related to their agricultural water conservation potentials, thus taking appropriate water-saving measures can reduce groundwater pumping effectively there. Meanwhile, the contribution rate of water-saving is relatively low in the aviation port area, because agricultural user there is dominant in current but replaced mainly by non-agricultural sector and the potential of water saving is limited. The high contribution rate of surface water in Gongyi and Dengfeng shows that the development of surface water is still potential and effective to replace groundwater exploitation. The non-conventional water sources contribute more in central city, aviation port area and Zhongmu County due to higher development and exploitation with more potential users.

Keywords: reduction of groundwater pumping; water resources allocation; water source replacement; water-saving contribution rate; alternative water source contribution rate; water resources; ecological restoration

0 引言

华北地区地下水超采问题积弊已久,目前地下水超采累计亏空 1 800 亿 m^3 左右。地下水超采引起地下水位的大幅下降,导致植被退化、河湖萎缩干涸、地面沉降等环境生态问题。为治理地下水超采问题,多部委联合印发《华北地区地下水超采综合治理行动方案》^[1](下文简称《行动方案》),通过采取“一减、一增”综合治理措施(即节水和多水源联合配置),以地下水采补平衡为目标逐步开展地下水超采治理。《行动方案》实施后,部分区域地下水连年下降的趋势得到遏制,但仍有部分区域地下水压采目标实现难度大,一方面是节水力度不足,另一方面是对替代水源的利用不充分不均衡。因此,定量分析“一减、一增”与地下水压采量的置换关系,充分认识不同区域节水和增供对地下水压采的潜力和置换效益尤为关键。

近年来,围绕节水或增供分析地下水压采的研究较为常见。很多学者立足于水资源系统整体,借助水资源配置模型等工具,建立节水或增供单一途径与地下水压采目标之间的联系,广泛应用于地下水开采量控制等地下水管理工作当中。冯宝平等^[2]采用两阶段优化配置模型调整了济南泉域补给区灌溉用水结构,有效减少了地下水利用量;桑学锋等^[3]以地下水控制量、ET 消耗控制量、国民经济用水控制量、

生态修复用水控制量等七大总量控制指标作为强制约束,在南水北调东线不通水的情况下进行天津市水资源合理配置,深层水开采量从现状年 4.14 亿 m^3 下降到 0.56 亿 m^3 ;裴源生等^[4]在分析南水北调对海河流域水生态环境影响时,使用地下水蓄变量来表征浅层地下水开采程度;张洪波等^[5]提出在地下水超采地区将地下水超采量纳入目标 ET 中进行水资源管理;甘泓等^[6]将地下水超采量纳入海河流域多维临界调控关键指标体系,在目标层对地下水超采量进行约束;吴鸣等^[7]采用新型的谐振子遗传算法求解地下水管理模型,与传统的遗传算法和模拟谐振子算法的求解结果相比,地下水超采量得到较大降低;CHENG 等^[8]结合三维非恒定流模拟模型和区域社会经济发展规划对疏勒河流域地下水资源配置进行了研究;ZHANG 等^[9]基于耦合的地表-地下水模型(SWMM-Modflow)模拟了集水区尺度上地下水与地表水之间的双向相互作用,从机理上对地下水的分配进行了优化。郭燕枝等^[10]、王学等^[11]定量分析了节水作物对于地下水压采的影响;张光辉等^[12]研究了暴雨洪水这一增量因素对超采区浅层地下水位不断下降趋势的缓解作用;王津津等^[13]基于多种地下水开采情景下的模拟,确定了人工回灌的适宜参数;贾玲等^[14]依据配置方案情景量化分析了南水北调东、中线一期工程海河流域受水区的水源置换关系,为海河

流域水资源的宏观调控指明了方向。

上述研究多侧重从节水或增供单一途径,分析地下水压采目标实现的可行性,这是因为一方面节水通常体现在配置的需水端,而地表水调蓄能力、地下水开采能力、再生水利用能力、引水工程分配指标等要素通常体现在配置的供给端,使得节水、增供的贡献率较难在同一水平下进行比较;另一方面节水以及多水源调控在行业间存在复杂的交互关系,仅从供水总量层面较难阐述清楚水源置换关系的复杂性。因此,本文面向地下水压采,讨论节水和增供两种途径共同实施与地下水压采之间的关系。通过对不同情景水资源配置方案的对比,反映节水和不同水源增供之间此消彼长的定量关系,并基于节水贡献率、替代水源贡献率分别评价节水和增供对地下水压采的效应。以郑州市为例分析不同区域各类措施的压采效果,为逐步实现地下水采补平衡提供决策参考。

1 水源置换关系定义及其表达形式

1.1 水源置换关系定义

实现地下水压采主要从供需两方面着手,需求端通过强化节水措施压减用水需求,供给端为地下水寻找替代水源,主要途径可概括为节水置换(即“一减”)和替代水源置换(即“一增”)。狭义的水源置换关系是指地下水开采量与本地地表水、非常规水、外调水之间的替代关系;广义的水源置换关系是指所有置换途径下能够替代这部分地下水的水量与地下水压采量之间的关系,包含了节水水量、本地地表水供水水量、非常规水供水水量、外调水供水水量等。本文主要考虑广义的水源置换关系范畴。

本研究基于效应叠加原理^[15],假设需求侧和供给侧相关要素同时发生变化产生的效应,等于单一要素发生变化产生的效应累加。故分别采用只有需求侧变化和只有供给侧变化的两两组合情景进行对比。通过对众多水资源配置方案进行筛选,最终确定下列六个水资源配置方案进行研究。这六个水资源配置方案是AA、BA、BB、BC、BD、BE方案。配置方案名称中的第一个字母代表需水方案。A代表一般节水方案、B代表强化节水方案。需水方案基于需水预测方法,结合研究区域社会经济发展实际情况分析制定。方案设置的第二个字母代表水利工程设置方案,A代表无新增工程、B代表同步新增所有替代水源工程(本地地表水、外调水、再生水)、C代表仅新增地表水调蓄工程、D代表仅新增外调水利用工程、E代表仅新增再生水利用工程。为保证研究方案的可操作

性,水源工程设置参考流域规划或工程规划设计,并在一定程度上考虑工程投入运行的现实性、工程之间运行的协调性以及在整个供水系统中工程和供水能力分布的合理性^[16]。方案设置情况如表1所列。

表1 方案设置情况
Table 1 Scenario setting

方案名称	需求侧	供水侧
AA	一般节水	无新增工程
BA	强化节水	无新增工程
BB	强化节水	新增地表水、再生水、外调水工程
BC	强化节水	仅新增地表水工程
BD	强化节水	仅新增外调水工程
BE	强化节水	仅新增再生水工程

构建上述以置换关系研究为导向的水资源配置方案后,选择配置方案进行对比以确定单一、复合要素所引起的效应。将需求侧和供给侧的各种变化组合划分为四个层次:第一层次为总的效应识别,即需求和供给两侧要素同时发生变化,方案组合为AA到BB,可以藉由方案对比得到地下水压采总效应;第二层为节水效应识别,即需求侧发生变化,需求侧要素变化的方案组合为AA到BA,可以藉由方案对比得到节水效应;第三层次为供水总效应识别,即供水侧各替代水源类别同时发生变化,其方案变化的组合为BA到BB;第四层次为供给侧要素效应的独立识别,变化的方案组合为BA到BC、BA到BD、BA到BE,可以藉由方案对比得到单一水源的增供效应。贡献率计算思路如图1所示。

1.2 贡献率表达式

节水与替代水源是地下水压采的两个重要途径,当区域不存在缺水情景下,节水贡献率与替代水源贡献率之和为1;当区域存在缺水,节水贡献率、替代水源贡献率、缺水贡献率之和为1。

$$\sum_{i=1}^n \varphi_i = 1 \quad (1)$$

式中, φ_i 为供需要素变化对地下水压采的贡献率,其中*i*=1为节水贡献率,*i*=2为地表水贡献率,*i*=3为外调水贡献率,*i*=4为再生水贡献率,*i*=5为缺水贡献率;*n*为供需要素变化的种类。

为简化分析,本文主要考虑 $\varphi_5 = 0$ 的情况,即可以通过地下水超采增加供水水量满足用水需求,不存在缺水。

1.2.1 节水贡献率

节水贡献率为节水带来的地下水压采效应与供需同步变化所引起的复合效应的比值,将节水贡献率的

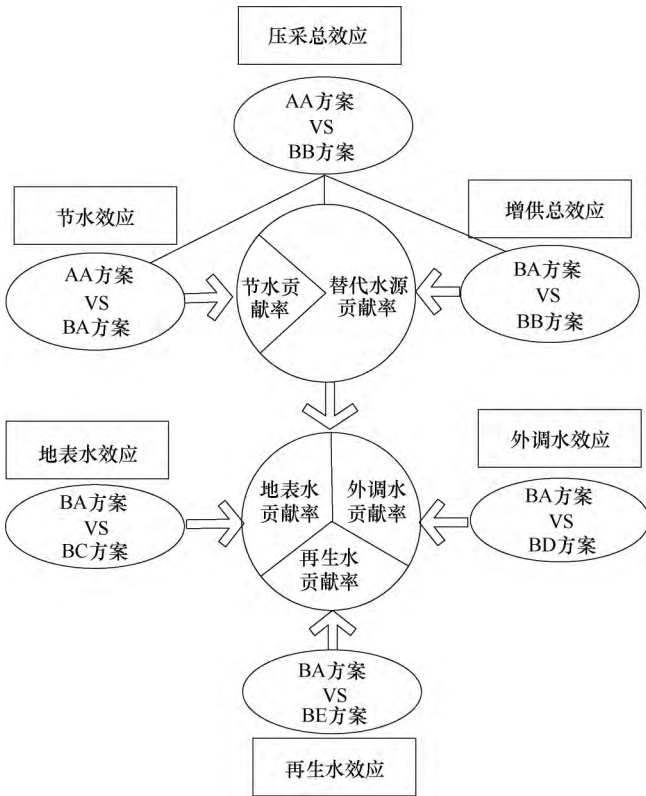


图1 地下水压采贡献率计算思路

Fig.1 Calculation flowchart of contribution rate of groundwater pumping reduction

公式确定为

$$\varphi_1 = \frac{g_{BA} - g_{AA}}{g_{BB} - g_{AA}} \quad (2)$$

式中, g_{BA} 为 BA 方案的地下水供水量; g_{AA} 为 AA 方案的地下水供水量; g_{BB} 为 BB 方案的地下水供水量。

1.2.2 替代水源贡献率

一般而言, 实施增供措施后, 区域的供水水源结构发生变化, 但变化过程不是线性的。本文假定由替代水源分摊节水之外的地下水压采贡献, 即替代水源的总压采效应为单一水源压采效应的线性累加。将替代水源贡献率确定为

$$\Phi'_{\text{增供}} = \frac{G_{\text{增供}} - G_{BA}}{g_{BB} - g_{BA}} \quad (3)$$

其中 $\Phi'_{\text{增供}} = [\varphi'_2, \varphi'_3, \varphi'_4]^T$

$$G_{\text{增供}} = [g_{BC}, g_{BD}, g_{BE}]^T$$

$$G_{BA} = [g_{BA}, g_{BA}, g_{BA}]^T$$

式中, φ'_2 、 φ'_3 、 φ'_4 分别为归一化前的地表水贡献率、外调水贡献率和再生水贡献率; g_{BC} 为 BC 方案的地下水供水量; g_{BD} 为 BD 方案的地下水供水量; g_{BE} 为 BE 方案的地下水供水量。

为确保节水贡献率、替代水源贡献率处于同一量

级进行比较, 采用数据归一化方法, 将式(3)所得的数据统一映射到 [0, 1] 区间上。将替代水源贡献率进一步确定为

$$\Phi_{\text{增供}} = \frac{\Phi'_{\text{增供}}}{\varphi'_2 + \varphi'_3 + \varphi'_4} (1 - \varphi_1) \quad (4)$$

其中 $\Phi_{\text{增供}} = [\varphi_2, \varphi_3, \varphi_4]^T$

1.2.3 总贡献率公式

把基于单元尺度的贡献率分析方法集总到整个计算区域之后, 可得到整个计算区域的贡献率公式。结合式(2), 整个计算区域的节水贡献率为

$$\varphi_{\text{总},1} = \frac{\sum_{j=1}^m g_{BA,j} - \sum_{j=1}^m g_{AA,j}}{\sum_{j=1}^m g_{BB,j} - \sum_{j=1}^m g_{AA,j}} \quad (5)$$

式中, $\varphi_{\text{总},1}$ 为整个计算区域的总节水贡献率; $g_{BA,j}$ 、 $g_{BB,j}$ 、 $g_{AA,j}$ 分别为 j 计算单元的 BA 方案地下水供水量、BB 方案地下水供水量、AA 方案地下水供水量。

结合公式(3), 将归一化前的总替代水源贡献率公式确定为

$$\Phi'_{\text{总},\text{增供}} = \frac{G_{\text{总},\text{增供}} - G_{\text{总},BA}}{\sum_{j=1}^m g_{BB,j} - \sum_{j=1}^m g_{BA,j}} \quad (6)$$

其中 $\Phi'_{\text{总},\text{增供}} = [\varphi'_{\text{总},2}, \varphi'_{\text{总},3}, \varphi'_{\text{总},4}]^T$

$$G_{\text{总},\text{增供}} = \left[\sum_{j=1}^m g_{BC,j}, \sum_{j=1}^m g_{BD,j}, \sum_{j=1}^m g_{BE,j} \right]^T$$

$$G_{\text{总},BA} = \left[\sum_{j=1}^m g_{BA,j}, \sum_{j=1}^m g_{BA,j}, \sum_{j=1}^m g_{BA,j} \right]^T$$

式中, $\varphi'_{\text{总},2}$ 、 $\varphi'_{\text{总},3}$ 、 $\varphi'_{\text{总},4}$ 分别为归一化前的总地表水贡献率、总外调水贡献率和总再生水贡献率; $g_{BC,j}$ 、 $g_{BD,j}$ 、 $g_{BE,j}$ 分别为 j 计算单元的 BC 方案地下水供水量、BD 方案地下水供水量和 BE 方案地下水供水量。

结合式(4), 将总替代水源贡献率公式进一步确定为

$$\Phi_{\text{总},\text{增供}} = \frac{\Phi'_{\text{总},\text{增供}}}{\varphi'_{\text{总},2} + \varphi'_{\text{总},3} + \varphi'_{\text{总},4}} (1 - \varphi_{\text{总},1}) \quad (7)$$

其中 $\Phi_{\text{总},\text{增供}} = [\varphi_{\text{总},2}, \varphi_{\text{总},3}, \varphi_{\text{总},4}]^T$

式中, $\varphi_{\text{总},2}$ 、 $\varphi_{\text{总},3}$ 、 $\varphi_{\text{总},4}$ 为归一化后的总地表水贡献率、总外调水贡献率和总再生水贡献率。

水资源配置系统规模庞大、结构复杂, 不同区域、水源之间存在相互影响关系, 部分区域可能存在措施与压采的反向关系。因此, 贡献率公式不能简单适用于所有水资源配置场景, 相应的公式的应用需要与区域实际结合, 基于节水、增供、地下水压的实际效果分析计算。如区域地下水开采实际没有减少则不讨论其措施贡献率。没有节水潜力(一般节水方案

与强化节水方案需水相同) 则直接将节水贡献率归零。某些水源没有开发潜力甚至受区域间配置关系影响没有增供效应, 也不应讨论其贡献率。

2 数据梳理与征集

2.1 研究区概况

作为黄河下游的唯一国家中心城市, 郑州市是黄河流域高质量发展的领头羊, 发展潜力巨大, 具有极大的区域集聚效应。坚守水资源刚性约束, 是实现生态保护和高质量发展的必要前提, 但目前地下水是郑州市主要水源之一, 全市仍然存在较为严重的地下水超采问题, 影响了城市发展质量。根据《2017 年郑州市水资源公报》^[17], 2017 年郑州市总供水量为 20.17 亿 m³。其中, 浅层地下水 7.46 亿 m³, 占总供水量的 37%; 南水北调中线供水(引江) 5.23 亿 m³, 占总供水量的 26%; 引黄供水(含登封市从伊洛河引水) 3.17 亿 m³, 占总供水量的 16%; 本地地表水供水 2.32 亿 m³, 占总供水量的 11%; 其他供水量 1.99 亿 m³, 占总供水量的 10%。由于长期超采地下水, 郑州市大部分地区出现了地下水位持续下降、地下水漏斗逐年增大的现象, 严重影响了区域的经济活力、制约了工业化及城镇化进程。随着南水北调中线工程通水, 郑州市水资源危机得到一定缓解, 但由于南水北调调蓄工程建设滞后, 以及局部地区地下水亏空量较大, 使得郑州市地下水压采任务仍十分艰巨。郑州市超采区分布如图 2 所示^[18]。

按可开采量评估, 2017 年现状年郑州市地下水总超采量为 2.40 亿 m³, 除主城区、上街区、航空港

区之外, 其余市县均存在不同程度地下水超采, 平均超采率达到 57.3%。各行政区超采情况如表 2 所列。

表 2 郑州市地下水超采量

Table 2 Groundwater overdraft in Zhengzhou

行政区	总可采量 / 亿 m ³	2017 实际开采量 / 亿 m ³	超采量 / 亿 m ³	超采率 / %
主城区	0.98	0.65	—	—
上街区	0.03	0.02	—	—
航空港区	0.21	0.21	—	—
巩义市	0.60	0.81	0.21	35.0
新密市	0.53	0.98	0.45	84.9
新郑市	0.51	0.76	0.25	49.0
荥阳市	0.48	0.99	0.51	106.3
登封市	0.61	0.73	0.12	19.7
中牟县	1.46	2.32	0.86	58.9
超采区小计	4.19	6.59	2.40	57.3
合计	5.40	7.46	—	—

2.2 模型构建

2.2.1 模型基本框架

本文以 ROWAS 水资源配置模型为模拟工具, 采用规则控制进行水资源系统模拟, 通过建立水源转换、水量调度等一系列过程, 解决在多水源、多用户、多工程的水资源大系统中存在的水资源利用与分配等复杂的调节计算问题^[19]。结合两步补偿式外调水调配算法^[20], 对六种不同情景方案进行水资源合理配置模拟, 运用前文定义的贡献率公式评价节水和增供两种途径对地下水压采的效果。

水资源配置模型的基本输入信息主要包括:

- (一) 计算单元与用水户, 以主城区、上街区、荥阳市、新密市、新郑市、巩义市、登封市、中牟县、航空港区等 9 个行政区为基本计算单元, 每个计算单元包括城镇生活、农村生活、工业及三产、农业、河道外生态等 5 类用水户。
- (二) 重要控制性工程、节点及控制断面, 包括地表水蓄引提工程、外调水工程, 其中外调水工程、主要控制断面、中型水库和部分重点小型水库需要在配置中单独考虑。根据郑州市实际情况, 对行政区间水量分配的控制断面和重要生态断面予以单独考虑。本次配置计算系统考虑了控制节点共有 51 个, 其中水库工程 29 个, 流量控制断面 14 个, 出境断面 5 个, 重

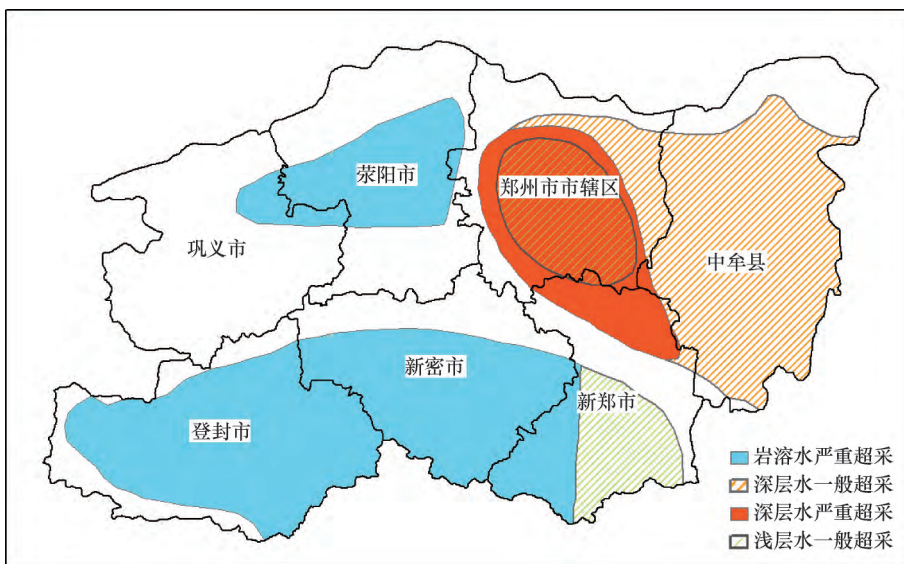


图 2 郑州市超采区分布

Fig. 2 Distribution of groundwater over pumping areas in Zhengzhou City

要引调水工程 3 处。(三) 水系及水力关系概化, 基本元素之间的水力联系, 主要包括地表水供水渠道 20 条、调水渠道 25 条、弃水渠道 14 条等。

2.2.2 情景设置

本文以 2030 年为规划水平年。多年平均来水频率下强化节水方案总需水量为 30.73 亿 m³, 一般节水方案的总需水量为 36.55 亿 m³。对应的各区域需水如表 3 所列。

表 3 需水方案 亿 m³
Table 3 Water requirement scenario 10⁸m³

行政区	需水预测					
	AA	BA	BB	BC	BD	BE
主城区	13.81	12.11	12.11	12.11	12.11	12.11
航空城	3.14	3.03	3.03	3.03	3.03	3.03
上街区	0.62	0.37	0.37	0.37	0.37	0.37
中牟县	3.99	3.8	3.8	3.8	3.8	3.8
巩义市	3.09	2.26	2.26	2.26	2.26	2.26
荥阳市	3.73	2.92	2.92	2.92	2.92	2.92
新密市	2.75	1.9	1.9	1.9	1.9	1.9
新郑市	2.88	2.47	2.47	2.47	2.47	2.47
登封市	2.55	1.87	1.87	1.87	1.87	1.87
合计	36.55	30.73	30.73	30.73	30.73	30.73

2.2.3 供需平衡结果

经计算, 不同情景方案下的郑州市供需平衡结果如表 4 所列。多年平均条件, AA 方案总供水量为 36.55 亿 m³, 其中本地地表水、地下水、非常规水、外调水供水分别占供水总量的 6.6%、44.2%、20.9%、28.3%; BA 方案通过节水降低需水 0.82 亿 m³, 总供水量为 30.73 亿 m³, 其中本地地表水、地下水、非常规水、外调水供水分别占供水总量的 6.6%、44.9%、19.8%、28.7%; BB 方案通过各类水源增供后, 地下水供水大幅下降, 本地地表水、地下水、非常规水、外调水供水分别占供水总量的 8.7%、17.7%、27.2%、46.4%, 地下水供水占比较 BA 方案降低 27.2%, 多水源联合供水效果明显; BC 方案本地地表水占供水总量的 9.0%, BD 方案非常规水供水占供水总量的 27.1%, BE 方案外调水供水占供水总量的 54.0%, 较之 BA 方案的供水量均对应有所增加。

3 贡献率计算

3.1 节水贡献率

基于上述供需平衡方案, 计算郑州市各计算单元节水贡献率, 如表 5 所列。从表中可知, 在九个计算单元中, 巩义市、新密市、荥阳市、新郑市的节水贡献率较大, 说明这些区域节水对于地下水压采具有较

表 4 不同情景下的郑州市供需平衡结果 亿 m³

Table 4 Results of supply and demand balance in Zhengzhou under different scenarios 10⁸m³

方案	需水量	供水量					缺水量
		地表水	地下水	非常规水	外调水	合计	
AA	36.550	2.400	16.180	7.630	10.340	36.550	0
BA	30.730	2.010	13.800	6.090	8.830	30.730	0
BB	30.730	2.670	5.459	8.350	14.251	30.730	0
BC	30.730	2.770	12.930	6.040	8.990	30.730	0
BD	30.730	2.030	11.480	8.320	8.900	30.730	0
BE	30.730	2.090	5.914	6.136	16.590	30.730	0

强的促进作用。换言之, 巩义市、新密市、荥阳市、新郑市是未来节水工作的重点区域。航空港区、上街区、中心城区的节水贡献率较低, 说明这些计算单元节水潜力相对较小, 节水对于地下水压采的作用不明显。

表 5 节水贡献率结果 亿 m³

Table 5 Results of water-saving contribution rate 10⁸m³

计算单元	地下水供水量			节水贡献率 /%
	AA	BA	BB	
中心城区	1.920	1.700	0.713	18.23
航空港区	1.960	1.650	0.100	16.67
上街区	0.880	0.760	0.010	13.79
中牟县	3.560	3.200	1.964	22.56
巩义市	1.490	1.230	0.559	27.93
荥阳市	1.560	1.260	0.559	29.97
新密市	1.510	1.270	0.645	27.75
新郑市	1.650	1.310	0.382	26.81
登封市	1.650	1.420	0.527	20.48

3.2 替代水源贡献率

基于上述供需平衡方案, 计算郑州市各区县的替代水源贡献率, 如表 6 所列。从表 6 中可知, 新郑市、中心城区、中牟县、航空港区、上街区地表水贡献率较低, 这些计算单元存在地表水资源禀赋条件差或地表水调蓄能力有限等问题, 若地表水利用尚有潜力, 未来应考虑增加地表水调蓄工程。除航空港区、中牟县、中心城区、新郑市以外, 其他计算单元的非常规水贡献率较低, 这说明中心城区、航空港区、中牟县、新郑市再生水总量和可供的用户较多, 利用和置换地下水的潜力较大, 其他计算单元非常规水利用水平潜力相对较低。为进一步推进地下水压采、改善供水水源结构, 需要在下一步工作中加大非常规水利用基础设施及配套设施建设。

总体上看, 九个计算单元的外调水贡献率全部高于其地表水贡献率和非常规水贡献率, 表明九个计算

表 6 替代水源贡献率结果

亿 m³

Table 6 Results of alternative water source contribution rate

10⁸m³

计算单元	地下水供水量				节水贡献率 1%	地表水贡献率 1%	非常规水贡献率 1%	外调水贡献率 1%
	BA	BC	BD	BE				
中心城区	1.700	1.630	1.370	0.730	18.23	4.18	19.70	57.90
航空港区	1.650	1.650	1.120	0.170	16.67	0.00	21.97	61.36
上街区	0.760	0.760	0.630	0.013	13.79	0.00	12.78	73.43
中牟县	3.200	3.120	2.570	2.001	22.56	3.25	25.56	48.64
巩义市	1.230	1.010	1.180	0.640	27.93	18.44	4.19	49.45
荥阳市	1.260	1.050	1.050	0.620	29.97	13.87	13.87	42.28
新密市	1.270	1.210	1.220	0.600	27.75	5.56	4.63	62.06
新郑市	1.310	1.310	0.950	0.540	26.81	0.00	23.32	49.87
登封市	1.420	1.190	1.390	0.600	20.48	16.93	2.21	60.38

单元在进行地下水压采时对于外调水有较强的依赖性。这说明,南水北调工程、西水东引工程、引黄工程不仅满足了郑州市新增的用水需求,也为郑州市实现地下水压采提供了良好的水源基础。

3.3 合理性分析

结合 3.1 节、3.2 节的分析,郑州市各计算单元的贡献率雷达图如图 3 所示。根据各个计算单元的水资源禀赋、工程规划,对贡献率的结果进行合理性分析。

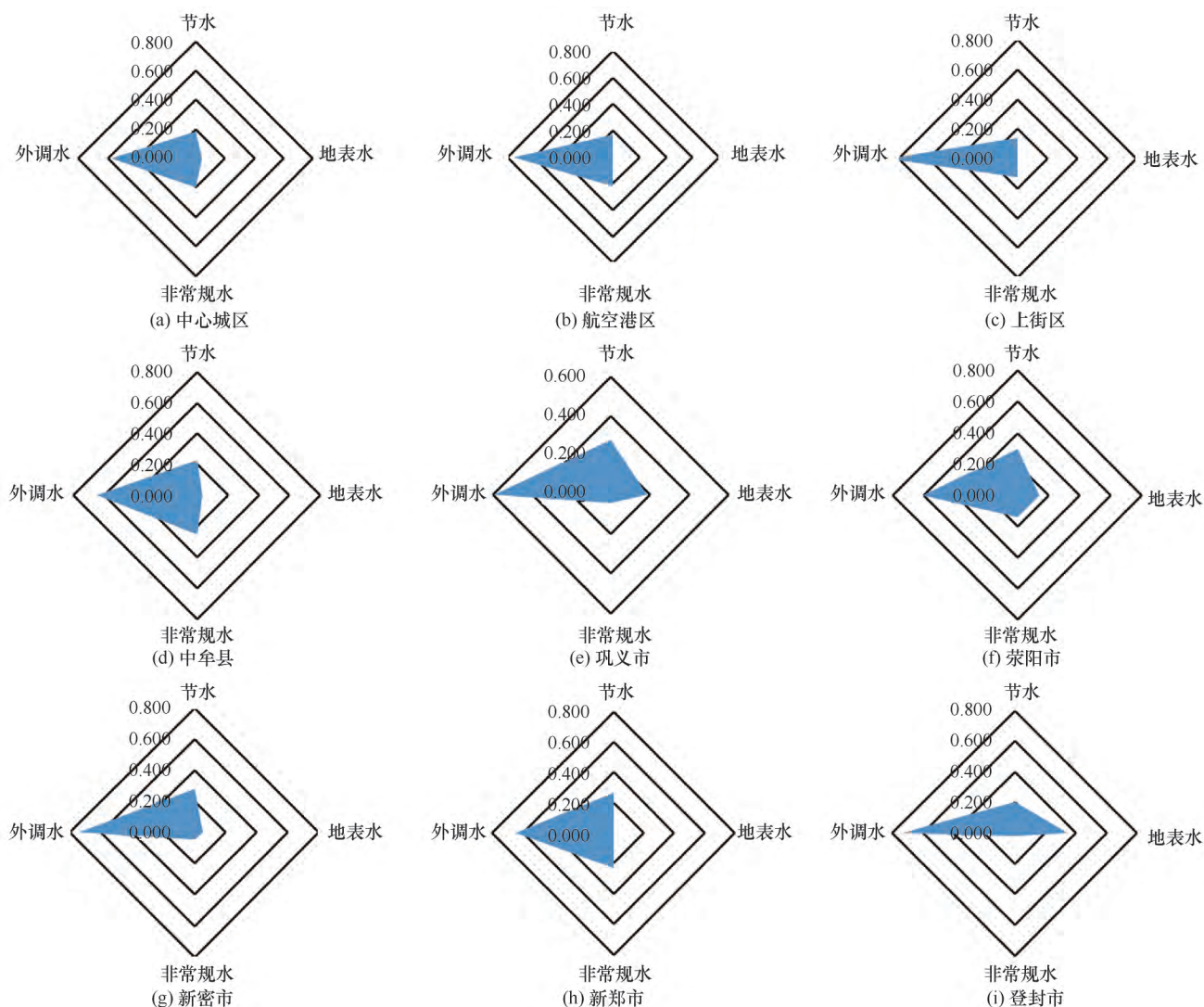


图 3 贡献率结果雷达图

Fig. 3 Radar chart of contribution rate results

中心城区、航空港区 2030 年工业需水预计比 2017 年分别提升 30%、71%，增加了再生水水源和潜在的用户，加强非常规水利用是减少两地区地下水供水压力的主要途径。

上街区当前地下水用水占总用水比重较低 (6%)，地下水压采压力较小。根据上街区水资源综合规划，上街区可从南水北调二期工程获得外调水量 1 200 万 m³，南水北调指标的增加是上街区推进地下水压采工作的关键。

中牟县、荥阳现状年农业用水比例分别为 75%、36%，根据郑州市“十三五”水务发展规划，两地区规划建设李村灌区等节水配套改造项目，农业节水将成为两地区推进地下水压采工作的重要途径。

巩义市、新密市、登封市处于群山丘陵区，存在工程性缺水现象，为改善水源调蓄能力，巩义市规划新建佛湾水库工程，新密市复建大潭嘴水库工程，登封市规划新建段村水库、水磨湾水库两座中型水库等。与其他地区相比，这三个区域地表水贡献率较高。未来调蓄工程建成后，地表水供水能力提升，对地下水压采目标实现具有促进作用。此外，三个县市在现有南水北调和引黄指标基础上，积极争取外调水指标，外调水的增加提升了这一区域的水源保障能力。

根据《新郑市城乡总体规划(2016—2035)》，工业将成为新郑市拉动全市经济增长的主要动力，2030 年工业需水预计比 2017 年提升 47%，提高工业的再生水利用量是减少区域地下水使用的重要方式。根据《新郑市水资源综合规划》，未来新郑市将缩减高耗水作物的种植面积，规划开展 50 强企业节水改造项目，节水项目的大量落地对地下水压采具有促进作用。

4 结 论

根据对郑州市的分析计算，地下水压采的节水和增供贡献率结果如下：

(1) 郑州市外调水贡献率高于节水、地表水和非常规水等置换方式。其中，外调水贡献率范围为 42.28%~73.43% 之间，地表水贡献率范围为 0.00%~18.44% 之间，非常规水贡献率范围为 2.21%~25.56% 之间，节水贡献率范围为 13.79%~29.97% 之间，外调水贡献率相比地表水、非常规水较高，说明郑州市实现地下水压采目标主要依靠外调水支撑。

(2) 中牟、荥阳、新郑市节水贡献率较高，分别为 22.56%、29.97%、26.81%，与其农业节水潜力

较大密切相关，采取适宜节水措施能够对这三个县市的地下水压采工作具有促进作用；航空港区节水贡献率最低，主要原因在于现状年航空港区农业用水占比比较大，未来产业布局调整后以发展空港物流为主，农业用水将被其他类别用户用水替代，考虑未来的工业和服务业用水均采用强化节水方案，区域的存量节水潜力十分有限。

(3) 巩义市和登封市地表水贡献率较高，分别为 18.44%、16.93%，说明地表水开发利用尚存潜力，对地下水压采工作具有促进作用。

(4) 中心城区、航空港区、中牟县非常规水贡献率较高，三个区县工业规模大幅增长，工业再生水利用量增加，非常规水成为置换地下水的重要水源。

地下水压采效果是多个因素共同作用的结果。本次研究通过水资源配置方案对节水、增供的水源置换效应进行对比计算，可以定量分析各类措施的效果，为制定地下水压采措施提供技术依据。考虑到水源开发利用之间的复杂关系，还需深入讨论不同水源替代效应的相互关联性和限制因素，进一步完善分析方法。

参考文献(References)：

- [1] 水利部. 华北地区地下水超采综合治理行动方案[R]. 北京: 水利部, 2019.
Ministry of Water Resources of the People's Republic of China. Action Plan for Comprehensive Control of Groundwater Overdraft in North China[R]. Beijing: Ministry of Water Resources of the People's Republic of China, 2019.
- [2] 冯宝平, 吴东, 张展羽, 等. 基于两阶段优化配置模型的济南泉域补给区灌溉水源置换研究[J]. 灌溉排水学报, 2017, 36(5): 109-116.
FENG Baoping, WU Dong, ZHANG Zhanyu, et al. Managing groundwater resources in spring recharge area of Jinan using the two-stage optimization allocation model [J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2017, 36(5): 109-116.
- [3] 桑学锋, 秦大庸, 周祖昊, 等. 基于广义 ET 的水资源与水环境综合规划研究 III: 应用[J]. 水利学报, 2009, 40(12): 1409-1415.
SANG Xuefeng, QIN Dayong, ZHOU Zuhao, et al. Comprehensive water resources and environment planning based on generalized evaporation-transpiration water consumption control III: Application [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2009, 40(12): 1409-1415.
- [4] 裴源生, 王建华, 罗琳. 南水北调对海河流域水生态环境影响分析[J]. 生态学报, 2004, 24(10): 2115-2123.
PEI Yuansheng, WANG Jianhua, LUO Lin. Analysis of effect of South-to-North Water Transfer Project on aquatic ecosystems of Haihe River Basin [J]. Acta Ecologica Sinica, 2004, 24(10): 2115-2123.

- [5] 张洪波, 兰甜, 王斌, 等. 基于 ET 控制的平原区县域水资源管理研究[J]. 水利学报, 2016, 47(2): 127-138.
ZHANG Hongbo, LAN Tian, WANG Bin, et al. Regional water resources allocation oriented to ET control in plain area[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2016, 47(2): 127-138.
- [6] 甘泓, 汪林, 曹寅白, 等. 海河流域水循环多维整体调控模式与阈值[J]. 科学通报, 2013, 58(12): 1085-1100.
GAN Hong, WANG Lin, CAO Yinbai, et al. Multi-dimensional overall regulatory modes and threshold values for water cycle of the Haihe River Basin[J]. Chinese Science Bulletin, 2013, 58(12): 1085-1100.
- [7] 吴鸣, 吴剑锋, 施小清, 等. 基于谐振子遗传算法的高效地下水优化管理模型[J]. 吉林大学学报(地球科学版), 2015, 45(5): 1485-1492.
WU Ming, WU Jianfeng, SHI Xiaoqing, et al. New harmonic oscillator genetic algorithm for efficient groundwater optimization and management[J]. Journal of Jilin University(Earth Science Edition), 2015, 45(5): 1485-1492.
- [8] CHENG Xuxue, JIN Xiaolin, LIU Weipo. Study on functions and rational allocation of Shule River Basin groundwater resources [J]. Journal of Groundwater Science and Engineering, 2017, 5(2): 140-151.
- [9] ZHANG K, CHUI T F M. Assessing the impact of spatial allocation of bioretention cells on shallow groundwater—An integrated surface-sub-surface catchment-scale analysis with SWMM-MODFLOW [J]. Journal of Hydrology, 2020, 586: 124910. DOI: 10.1016/j. jhydrol. 2020. 124910.
- [10] 郭燕枝, 王小虎, 孙君茂. 华北平原地下水漏斗区马铃薯替代小麦种植及由此节省的水资源量估算[J]. 中国农业科技导报, 2014, 16(6): 159-163.
GUO Yanzhi, WANG Xiaohu, SUN Junmao. The estimation of saving water resources because of substitute plantig of potato instead wheat in the funnel area of the North China Plain [J]. Journal of Agricultural Science and Technology, 2014, 16(6): 159-163.
- [11] 王学, 李秀彬, 辛良杰, 等. 华北地下水超采区冬小麦退耕的生态补偿问题探讨[J]. 地理学报, 2016, 71(5): 829-839.
WANG xue, LI Xiubin, XIN Liangjie, et al. Ecological compensation for winter wheat abandonment in groundwater over-exploited areas in the North China Plain [J]. Acta Geographica Sinica, 2016, 71(5): 829-839.
- [12] 张光辉, 费宇红, 田言亮, 等. 暴雨洪水对地下水超采缓解特征与资源增量[J]. 水利学报, 2015, 46(5): 594-601.
ZHANG Guanghui, FEI Yuhong, TIAN Yanliang, et al. Characteristic of alleviating the over-exploitation and its recharge on the rain-storm flood to the shallow groundwater in the southern plain of Haihe river basin [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2015, 46(5): 594-601.
- [13] 王津津, 王开章, 李晓. 济宁-汶上超采漏斗区水资源人工调蓄方案研究[J]. 中国农村水利水电, 2009(10): 19-21.
WANG Jinjin, WANG Kaizhang, LI xiao. The artificial regulation groundwater excess exploited funnel between Jining and Wenshang [J]. China Rural Water and Hydropower, 2009(10): 19-21.
- [14] 贾玲, 游进军, 汪林, 等. 南水北调东、中线一期工程水源置换效应情景分析[J]. 南水北调与水利科技, 2014, 12(1): 16-20.
JIA Ling, YOU Jinjun, WANG Lin, et al. Scenario analysis on water source replacement effects of the 1st stage of South-to-North Water Transfer Project [J]. South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology, 2014, 12(1): 16-20.
- [15] 郭相平, 甄博, 陆红飞. 水稻旱涝交替胁迫叠加效应研究进展[J]. 水利水电科技进展, 2013, 33(2): 83-86.
GUO Xiangping, ZHEN Bo, LU Hongfei. Research advances in pile-up effects of drought and waterlogging alternative stress on rice [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2013, 33(2): 83-86.
- [16] 李令跃, 甘泓. 试论水资源合理配置和承载能力概念与可持续发展之间的关系[J]. 水科学进展, 2000(3): 307-313.
LI Lingyue, GAN Hong. Remark on the relationship between water resources rational allocation, carrying capacity and sustainable development [J]. Advances in Water Science, 2000(3): 307-313.
- [17] 郑州市水利局. 郑州市水资源公报(2017) [R]. 郑州: 郑州市水利局, 2018.
Zhengzhou Water Authority. Zhengzhou Water Bulletin(2017) [R]. Zhengzhou: Zhengzhou Water Authority, 2018.
- [18] 河南省水利厅. 河南省地下水超采区治理规划 [R]. 郑州: 河南省水利厅, 2018.
Henan Water Authority. Treatment planning of groundwater overdraft area in Henan Province [R]. Zhengzhou: Henan Water Authority, 2018.
- [19] 游进军, 甘泓, 王浩, 等. 基于规则的水资源系统模拟[J]. 水利学报, 2005, 36(9): 1043-1049.
YOU Jinjun, GAN Hong, WANG Hao, et al. Simulation of water resources system based on rules [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2005, 36(9): 1043-1049.
- [20] 游进军, 王忠静, 甘泓, 等. 两阶段补偿式跨流域调水配置算法及应用[J]. 水利学报, 2008, 39(7): 870-876.
YOU Jinjun, WANG Zhongjing, GAN Hong, et al. Stepwise compensatory allocation of inter-basin water diversion [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2008, 39(7): 870-876.

(责任编辑 王海锋)