

DOI: 10. 20040/j. cnki. 1000-7709. 2023. 20220695

北京市南部平原区地下水位及开采强度时空演变趋势分析

顾雪业¹, 李 晨¹, 马永浩², 张 宁¹, 尹世洋¹

(1. 华北电力大学水利与水电工程学院, 北京 102206; 2. 北京华水新源生态环境科技有限公司, 北京 102101)

摘要: 为了解南水北调水入京后对北京市南部平原区地下水位埋深的影响,以北京市大兴区为例,通过收集该区域2010~2020年的地下水位埋深监测数据及用水量数据,采用地统计方法对2010~2020年的地下水位埋深进行了时空变异性分析,并进一步采用主成分分析法评价了该时段的地下水开采强度。结果表明,南水北调入京后,区域地下水位埋深呈减小趋势,2015~2020年相比2010~2014年,地下水位平均埋深由19.13 m减至17.67 m,说明南水北调入京后,对区域地下水位的恢复具有明显的正向效应;基于地统计半变异函数模型计算南水北调入京前后地下水位埋深的块金效应值,发现2015~2020年与2010~2014年相比,地下水位埋深的块金效应值由55.92%减至39.05%,说明人为因素对地下水位埋深的影响处于减弱的状态;基于主成分分析法计算了2010~2020年对地下水开采强度的影响变化,表明区域用水对地下水开采强度的影响总体呈减小趋势,其中工业用水量、第三产业用水量及农业用水量对地下水开采强度的影响处于减小趋势,生活用水量对地下水开采强度的影响处于增大趋势。研究结果可为南水北调沿线区域的地下水资源管理提供理论和方法借鉴。

关键词: 南水北调; 地下水位埋深; 时空变异; 地统计方法; 主成分分析法

中图分类号: TV213 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-7709(2023)03-0048-05

1 概况

北京市位于华北平原最北端,由于该区域地表水缺乏,因此地下水一直作为该区域的主要供水来源。由于过去连年超采,引起地下水位持续下降^[1]、地表沉降^[2]、水质恶化^[3]等环境地质问题。为保证首都的用水安全,国家启动了南水北调工程,并于2014年12月南水北调正式通水入京,很大程度上缓解了用水紧张问题。根据《北京市水资源公报》,北京市2020年地下水供水占比与2014年相比减少了18.1%,地下水位平均埋深与2014年相比回升了3.63 m。南水北调入京后,对区域的水资源开发利用产生了很大的影响。为更好地将当地水与外调水相协调,一方面需最大程度利用外调水源,另一方面应尽量减小当地地下水的开采强度,使当地地下水环境得到有效改善。因此需分析南水北调入京前后区域的地下水水位时空变异特征和地下水开采强度的变化,

以实现地下水水资源的可持续利用。为此,本文选取北京市南部平原区典型区域大兴区为例,采用地统计方法^[4]和主成分分析法^[5]对该区域南水北调入京前后地下水位时空变异特征和地下水开采强度变化进行分析评价,以期在南水北调沿线区域的地下水资源管理提供方法借鉴。

2 数据来源与研究方法

2.1 数据来源

大兴区位于北京市南部,辖区内共14个乡镇,其中北部和中部各5个乡镇,南部4个乡镇(图1)。

本文收集了研究区2010~2020年32个地下水位监测点资料及区域总用水量和各部门用水量。用水量及相关统计数据主要来源于《大兴区水资源公报》(2010~2020年)、《大兴区国民经济和社会发展统计公报》(2010~2020年)和《北京市水务统计年鉴》(2010~2020年),工业产值、第

收稿日期: 2022-04-08, **修回日期:** 2022-06-12

基金项目: 中央高校基金项目(2019MS028)

作者简介: 顾雪业(1998-),女,硕士研究生,研究方向为水文与水资源, E-mail: 1035562322@qq.com

通讯作者: 尹世洋(1984-),男,博士、副教授、硕导,研究方向为水文与水资源, E-mail: yinshiyang@ncepu.edu.cn

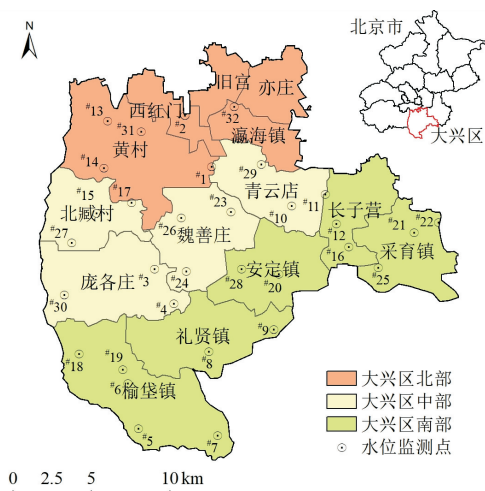


图 1 研究区域地理位置

Fig. 1 Geographical location of study area

三产业产值、农业产值、人口数据来源于《北京区域统计年鉴》(2010~2020年)。

2.2 研究方法

2.2.1 克里格插值法

本文通过 ArcGIS 克里格插值法^[6]对地下水位埋深进行空间分析。进行克里格插值的前提条件是数据服从正态分布。因此,采用 SPSS 中的 K-S 检验对地下水位埋深数据进行正态分布检验,当峰度、偏度接近于 0、K-S 检验值大于 0.05 时,则认为数据符合正态分布。克里格插值法的核心是半变异函数,其通式为:

$$\gamma(h) = \frac{1}{2N(h)} \sum_{m=1}^{N(h)} [Z(x_m) - Z(x_m + h)]^2 \quad (1)$$

式中, $\gamma(h)$ 为半变异函数; $N(h)$ 为样本点个数; h 为样本点空间距离; $Z(x_m)$ 为位置 x_i 处的变量值; $Z(x_m + h)$ 为与位置 x_m 偏离距离 h 处的变量值,其中 $m=1, 2, \dots, N(h)$ 。

半变异函数模型选取高斯函数模型,一般公式为:

$$\gamma(h) = \begin{cases} 0 & h = 0 \\ C_0 + C[1 - e^{-(h/a)^2}] & 0 < h < a \\ C_0 + C & h > a \end{cases} \quad (2)$$

式中, C_0 为块金值; C 为偏基台值; $C_0 + C$ 为基台值; a 为变程,高斯模型的有效变程为 $\sqrt{3}a$ 。

将块金值 C_0 与基台值($C_0 + C$)之比定义为块金效应 Nugget Effect(N_E),即:

$$N_E = C_0 / (C_0 + C) \quad (3)$$

块金效应反映区域化变量在空间上的相关性程度。一般认为当块金效应 $< 25\%$ 时,表示强空间相关性;当 $25\% < \text{块金效应} < 75\%$ 时,表示中

等空间相关性;当块金效应 $> 75\%$ 时,表示弱空间相关性^[7]。

2.2.2 主成分分析法

采用主成分分析法评价研究区各部门用水对地下水开采强度的影响。主成分分析法的主要步骤^[8]如下。

步骤 1 原始数据采用 Z-score 法标准化处理:

$$Z_{ij} = (x_{ij} - \bar{x}_j) / S_j \quad (4)$$

$$S_j^2 = \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (x_{ij} - \bar{x}_j)^2 \quad (5)$$

式中, Z_{ij} 为标准化后的评价指标; x_{ij} 为第 i 个样本中第 j 个指标; \bar{x}_j 为第 j 个指标样本均值; n 为样本数量; S_j 为第 j 个指标样本标准差,其中 $i, j=1, 2, \dots, p$, p 为每个样本的指标个数。

步骤 2 计算标准化处理后的变量指标相关系数矩阵 R :

$$R = \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & \dots & r_{1p} \\ r_{21} & r_{22} & \dots & r_{2p} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ r_{p1} & r_{p2} & \dots & r_{pp} \end{bmatrix} \quad (6)$$

式中, r_{ij} 为相关系数。

步骤 3 计算相关系数矩阵 R 的特征值 $\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_p$ 对应的特征向量,并求解主成分 Z_i 的贡献率,确定主成分个数:

$$c_i = (c_{1i} \quad c_{2i} \quad \dots \quad c_{pi})^T \quad (7)$$

$$g_i = \lambda_i / \sum_{j=1}^p \lambda_j \quad (8)$$

$$g = \sum_{i=1}^k g_i \quad (9)$$

式中, c_i 为特征值 λ_i 对应的特征向量; c_{pi} 为特征向量 c_p 的第 i 个分量; g_i 为主成分 Z_i 的贡献率; g 为累计贡献率; k 为当累计贡献率达到要求时主成分的个数。

步骤 4 计算主成分荷载,求解各主成分得分:

$$Y_i = c_{1i}Z_1 + c_{2i}Z_2 + \dots + c_{pi}Z_p \quad (10)$$

$$Y = g_1Y_1 + g_2Y_2 + \dots + g_iY_i \quad (11)$$

式中, Y_i 为第 i 主成分得分; Y 为综合主成分得分; Z_i 为标准化处理后的评价指标。

3 结果与分析

3.1 地下水位埋深时空变化分析

通过对 2010~2020 年地下水位埋深监测数据进行正态分布检验,确定偏度为 -0.032 、峰度为 -0.841 、K-S 检验值为 0.2,表明研究区的地下水位埋深监测数据符合正态分布。因此,可采

用普通克里格插值方法对其进行空间插值。利用高斯模型对 2010~2020 年研究区域内地下水位埋深进行空间插值,结果见图 2。

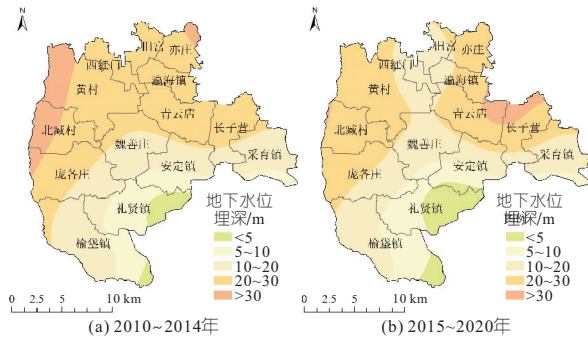


图 2 地下水位埋深空间分布

Fig. 2 Spatial distribution of groundwater depth

由图 2 可知,研究区 2015~2020 年地下水水位平均埋深为 17.67 m,与 2010~2014 年的 19.13 m 相比,地下水位埋深回升 1.46 m。其中,北部地区地下水位平均埋深由 24.16 m 回升至 20.12 m,回升明显的区域主要位于黄村、西红门、旧宫、瀛海一带;中部地区由 23.53 m 回升至 22.06 m,地下水位埋深回升 1.47 m;南部地区地下水位埋深变幅较小,由 13.90 m 回升至 13.48 m。由此可知,研究区地下水位埋深整体呈现回升的趋势。

北部区域地下水位回升明显,一方面因为南水北调入京后,取代了北部区域部分自备井。由于研究区北部区域接受南水北调水供给较大,造成北部区域地下水开采强度减小,引发北部区域水位持续回升。另一方面,也与该区域建设节水型社会有关。中部和南部区域水位埋深变化不大,可能是该区域用水类型仍以农业灌溉为主,因此地下水开采强度变化不大。

3.2 地下水位埋深时空变异性分析

根据式(1)~(3)计算地下水位埋深的块金效应(表 1)。由表 1 可知,2010~2014、2015~2020 年两个时段的块金效应均在 25%~75% 范围内,表明地下水位埋深同时受到人为因素和自然因素的影响。但 2015~2020 年相比 2010~2014 年块

表 1 地下水埋深半变异函数模型参数

Tab. 1 Semi-variogram function model parameters of groundwater depth

年份	函数模型	偏基台值	块金值	基台值	块金效应/%
2010~2014	高斯	24.33	30.89	55.24	55.92
2015~2020	高斯	47.47	30.41	77.88	39.05

金效应减小 16.87%,表明地下水位埋深的空间相关性有增强趋势,人为开采对地下水位埋深的影响呈减小趋势。一方面表明南水北调水引入后分担地下水供水压力,另一方面与地下水开采的限制及产业结构调整等因素有关。这与对研究区地下水位埋深的时空分析结果一致,2015~2020 年地下水水位平均埋深相比 2010~2014 年回升 1.46 m,进一步表明人为因素对地下水位埋深的影响在减小。

3.3 地下水开采强度分析

为进一步识别各主要用水部门对地下水开采强度的影响变化,通过收集研究区的用水量及相关统计资料,采用主成分分析法分析评价 2010~2020 年的总用水量及各部门用水量对地下水开采强度的影响。经分析提取出两个主成分,累积贡献率均大于 90%。其中,第一主成分的方差贡献率均达 70% 以上,是最重要的影响因子。第一主成分在第三产业用水、工业用水、生活用水指标上荷载量较大,第二主成分在农业用水指标上荷载较大。

3.3.1 各部门总用水量对地下水开采强度的综合影响分析

根据式(4)~(11)计算研究区 2010~2020 年总用水量开采强度值,见图 3(a)。由图 3(a)可知,整体上研究区地下水开采强度值呈减小趋势,由 2010 年的 0.33 减至 2020 年的 0.22,由此引起研究区地下水位埋深回升。从空间上看,北部区域对地下水开采强度的影响最大,这与北部综合发展水平较高有关;南部次之,中部较小。其中,中部和南部区域 2015~2020 年与 2010~2014 年相比,开采强度平均值分别减小 0.07,可

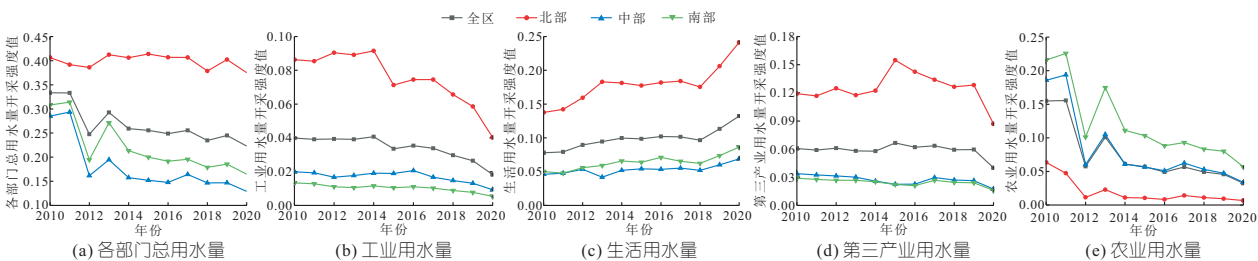


图 3 各部门总用水量、工业用水量、生活用水量、第三产业用水量及农业用水量对地下水开采强度的影响

Fig. 3 Influence of total water consumption of each department, industrial water consumption, domestic water consumption, water consumption of tertiary industry and agricultural water consumption on groundwater exploitation intensity

能与区域加快建设节水型社会,用水效率提升有关。根据《北京区域统计年鉴》(2010~2020年),研究区 2015~2020 年各部门年均生产总值与 2010~2014 年相比,增长了 399.89×10^8 元,其中北部区域各部门生产总值约占全区的 73.00%,说明北部区域用水量应呈增大趋势,但南水北调水引入后分担了部分地下水供水压力,造成北部区域开采强度平均值变化不大。区域为最大程度利用好南水北调水源,在调水及城市规划发展方面,严格遵循“先节水后调水,先治污后通水,先环保后用水”的原则。同时,区域发展坚持“以水定城、以水定地、以水定人、以水定产”的原则,将城市、产业发展规划与水资源承载能力结合起来。

3.3.2 工业用水量对地下水开采强度的影响分析

采用式(4)~(11)计算 2010~2020 年工业用水量开采强度值(图 3(b))。由图 3(b)可知,整体来说,研究区工业用水量开采强度值呈减小趋势,2015~2020 年开采强度平均值与 2010~2014 年相比减小 0.02。根据《北京区域统计年鉴》(2010~2020年),2015~2020 年工业年均产值相对于 2010~2014 年增加 379.96×10^8 元,但工业万元产值用水量由 2010~2014 年的 $2.7 \text{ m}^3/10^4$ 元减至 2015~2020 年的 $1.4 \text{ m}^3/10^4$ 元,说明南水北调入京后工业用水效率不断提升。从空间上看,北部区域工业用水量对地下水开采强度的影响最大,与北部工业产业聚集、工业发展速度较快有关;中部区域次之,南部最小。其中,北部区域开采强度平均值由 2010~2014 年的 0.09 减至 2015~2020 年的 0.06,可能与工业结构优化调整、工业用水重复利用率及废水再利用率提升有关。总体上看,一方面由于近年来区域内加快传统产业转型升级和产业结构优化,高能耗企业持续减少。另一方面,区域推动建设节水型企业,采取工业节水改造和节水技术引进等措施。

3.3.3 生活用水量对地下水开采强度的影响分析

采用式(4)~(11)计算 2010~2020 年生活用水量开采强度值(图 3(c))。由图 3(c)可知,总体上看生活用水量开采强度值呈增大趋势,2015~2020 年平均值与 2010~2014 年相比增大 0.02。根据《北京区域统计年鉴》(2010~2020年),研究区年均人口数由 2010~2014 年的 146.16×10^4 人增至 2015~2020 年的 178.77×10^4 人,增加 32.61×10^4 人,但年均人均生活用水量由 2010~2014 年的 $90.55 \text{ L}/(\text{人} \cdot \text{d})$ 减至 2015~2020 年的 $87.67 \text{ L}/(\text{人} \cdot \text{d})$,说明居民节水意识及用水

效率有所提升,但生活用水量仍呈增大趋势。从空间上看,北部区域生活用水量对地下水开采强度的影响最大,这是因为北部区域与城市中心城区接壤,人口更为密集;南部次之,中部最小。其中,北部区域 2015~2020 年开采强度平均值与 2010~2014 年相比增大 0.03,这与北部区域综合发展速度较快有关。从总体上看,随着生活水平提升和人口数量增加,生活用水需求随之增大。为控制对地下水开采强度的影响,一方面,区域内推广使用节水马桶、花洒等节水用具,建设节水型社区。另一方面,对部分城镇旧供水管网进行改造,减少漏损量,并对农村机井安装计量设施。

3.3.4 第三产业用水量对地下水开采强度的影响分析

采用式(4)~(11)计算 2010~2020 年第三产业用水量开采强度值(图 3(d))。由图 3(d)可知,整体上看,开采强度值呈减小趋势,2010~2014、2015~2020 年平均值均为 0.06。根据《北京区域统计年鉴》(2010~2020年),2015~2020 年第三产业平均产值相对于 2010~2014 年增加 227.20×10^8 元,但第三产业万元产值用水量由 2010~2014 年的 $16.01 \text{ m}^3/10^4$ 元减至 2015~2020 年的 $7.54 \text{ m}^3/10^4$ 元,减少了 52.91%,说明第三产业节水效率有所提升。从空间上看,北部区域第三产业用水量对地下水开采强度的影响较大,与北部区域作为功能核心区有关;中部和南部区域较小。其中,北部区域 2015~2020 年开采强度平均值与 2010~2014 年相比增大 0.01,中部和南部变化不大,可能与区域第三产业发展布局调整及用水节水规划有关。2015~2020 年大兴新城、亦庄新城及新航城的建设,带动了区域第三产业发展,需水量随之增加。

3.3.5 农业用水量对地下水开采强度的影响分析

采用式(4)~(11)计算 2010~2020 年农业用水量开采强度值(图 3(e))。由图 3(e)可知,研究区开采强度值总体呈减小趋势,2015~2020 年开采强度平均值相对于 2010~2014 年减小 0.06。根据《北京区域统计年鉴》(2010~2020年),2015~2020 年农业平均产值相对于 2010~2014 年减少 24.36×10^8 元,农业万元产值用水量由 2010~2014 年的 $829.34 \text{ m}^3/10^4$ 元减至 2015~2020 年的 $564.01 \text{ m}^3/10^4$ 元,说明区域农业用水效率有所提升。从空间上看,北部区域农业用水量对地下水开采强度的影响最小,这与北部区域主要是城镇用地有关;中部和南部区域影响较大。其中,中部和南部区域 2015~2020 年与 2010~

2014 年相比,开采强度平均值分别减小 0.07、0.08,这与结构调整及农业发展高效节水灌溉技术有关。一方面,农业遵循“量水发展”基本原则,发展现代种植业。另一方面,区域内采取低压管灌等节水灌溉措施,并对灌溉机井安装计量设施。

4 结论

a. 南水北调水源引入后,研究区 2015~2020 年与 2010~2014 年相比地下水位平均埋深呈回升趋势、块金效应呈减小趋势,表明人为因素对地下水位埋深影响减小。

b. 研究区 2015~2020 年总用水量对地下水开采强度的影响与 2010~2014 年相比呈减小趋势,其中第三产业、工业及农业用水量开采强度值呈减小趋势,生活用水量开采强度值呈增大趋势。一方面由于南水北调水源引入后分担供水压力,另一方面可能与各部门用水效率提升有关。

c. 南水北调水源引入后可在一定程度上改善区域地下水环境、缓解地下水开采强度。因此,对于南水北调沿线供水区域,一方面应加强辖区内节水管理,另一方面应优先使用外调水,以遏制地下水环境的持续恶化。

d. 本文仅考虑了南水北调水源引入后地下水位和开采强度的变化,建议在今后研究中应考虑地下水水位下降或回升过程中引起的水质安全等问题。

Analysis of Spatial and Temporal Evolution Trend of Groundwater Depth and Exploitation Intensity in Southern Plain Area of Beijing City

GU Xue-ye¹, LI Chen¹, MA Yong-hao², ZHANG Ning¹, YIN Shi-yang¹

(1. School of Water Resources and Hydropower Engineering, North China Electric Power University, Beijing 102206, China; 2. Beijing Huashuixinyuan Ecological Environment Technology Co., Ltd., Beijing 102101, China)

Abstract: In order to understand how the South-to-North Water Diversion Project has influenced the groundwater depth across the southern plains area of Beijing, this study collected the groundwater depth and water consumption measurements over the period of 2010-2020 in Daxing District. The geostatistical methods was carried out to analyze the spatial-temporal variability of the groundwater depth, and a principal component analysis (PCA) was used to evaluate the groundwater exploitation intensity over the period. The results show that the water diversion project has been putting the groundwater depth on a decline, reducing the average from 19.13 m over 2010-2014 to 17.67 m in 2015-2020, indicating a significantly constructive influence toward the groundwater depth recovery in the region. The nugget effect values of the groundwater depth, as calculated using the geostatistical semi-variogram model, dropped from 55.92% in 2010-2014 to 39.05% in 2015-2020. This decline indicates the weakening influence of human factors toward the groundwater depth. The PCA calculations show that the effect of regional water consumption on groundwater extraction intensity decreased from 2010 to 2020. Water consumption in industries, tertiary industries, and agriculture contributed to this tendency, while domestic water consumption stimulated groundwater extraction intensity. The findings turn out to be reliable theoretical and methodological references for groundwater resource management toward the regions along the water diversion routes.

Key words: South-to-North Water Diversion; groundwater depth; spatial-temporal variability; geostatistical methods; principal component analysis

参考文献:

- [1] ZHANG X, WU X, ZHAO R, et al. Identifying the facts and driving factors of deceleration of groundwater table decline in Beijing during 1999-2018 [J]. Journal of hydrology, 2022, 607: 127475.
- [2] 晏霞, 刘媛媛, 赵振宇. 利用时序 InSAR 技术监测南水进京后北京平原地区的地面沉降 [J]. 地球物理学进展, 2021, 36(6): 2351-2361.
- [3] 秦景, 牛文龙. 北京西南部山前平原区地下水水质评价及其影响因素 [J]. 中国水利水电科学研究院学报, 2020, 18(3): 161-169.
- [4] HASAN K, PAUL S, CHY T J, et al. Analysis of groundwater table variability and trend using ordinary kriging: the case study of Sylhet, Bangladesh [J]. Applied water science, 2021, 11(7): 1-12.
- [5] 张旭, 刘新华, 张桂林, 等. 新疆阿克苏河流域水资源承载力变化分析 [J]. 水电能源科学, 2020, 38(9): 44-47.
- [6] 张文鸽, 侯胜玲, 殷会娟. 内蒙古河套灌区地下水埋深时空变化及其驱动因素 [J]. 节水灌溉, 2020 (7): 36-40, 45.
- [7] 姚玲, 杨洋, 孙贯芳, 等. 基于地统计分析的河套灌区地下水埋深与矿化度时空变异规律研究 [J]. 灌溉排水学报, 2020, 39(8): 111-121.
- [8] 袁宏川, 彭勃, 李新哲. 基于 DPSIR 模型的长江流域中部地区水环境治理绩效评价 [J]. 水电能源科学, 2021, 39(5): 61-65.