

DOI:10.3969/j.issn.1003-5060.2026.01.020

安徽省淮北平原浅层地下水 时空演变特征及降水驱动分析

刘猛^{1,2}, 姚梅³, 黄蕾^{1,2}, 吴春艳³, 李娴⁴

(1. 安徽省水利部淮河水利委员会水利科学研究院, 安徽 合肥 230088; 2. 安徽省水科学与智慧水利重点实验室, 安徽 合肥 230088;
3. 安徽省水文局, 安徽 合肥 230022; 4. 合肥工业大学土木与水利工程学院, 安徽 合肥 230009)

摘要:气候变化及人类活动已引发全球范围内地下水系统的深刻改变,研究地下水时空变化规律及其影响因素对于地下水资源管理和保护具有重要意义。文章基于安徽省淮北平原165眼浅层地下水监测井1974—2020年水位埋深数据,采用线性倾向率、Sen斜率估计、M-K检验和克里金插值等方法分析地下水埋深时空变化特征,利用Kendall's秩相关法分析降水量与地下水埋深之间关系,使用地理探测器分析降水量变化对地下水埋深空间分布的影响程度。结果表明:在1974—2020年间,受降水量减少、开采量增加、下垫面改变等因素综合影响,研究区浅层地下水埋深总体呈增加趋势,每10年增加0.12 m;浅层地下水埋深变化趋势“有增有减”,呈现出显著的空间分异性,其中,埋深显著增加、不显著增加、基本不变、不显著减少和显著减少的面积分别占33.4%、35.1%、20.2%、5.6%、5.7%;浅层地下水埋深的空间分布特征是自淮北平原西北向东南方向逐渐减小;降水是影响研究区浅层地下水埋深时空变化的最主要驱动因素,对浅层地下水埋深的时空变化影响十分显著,二者呈负相关关系。该研究结果揭示了淮北平原浅层地下水埋深时空格局、演变趋势以及降水对其的影响程度,为区域地下水资源管理和保护提供了科学依据。

关键词:地下水埋深;动态特征;空间分异性;地理探测器;淮北平原

中图分类号:P641 **文献标志码:**A **文章编号:**1003-5060(2026)01-0139-06

Analysis of spatial and temporal evolution characteristics of shallow groundwater and precipitation-driven factor in Huaibei Plain, Anhui Province

LIU Meng^{1,2}, YAO Mei³, HUANG Lei^{1,2}, WU Chunyan³, LI Xian⁴

(1. Anhui and Huaihe River Institute of Hydraulic Research, Hefei 230088, China; 2. Anhui Provincial Key Laboratory of Water Science and Intelligent Water Conservancy, Hefei 230088, China; 3. Hydrology Bureau of Anhui Province, Hefei 230022, China; 4. School of Civil and Hydraulic Engineering, Hefei University of Technology, Hefei 230009, China)

Abstract: Climate change and human activities have caused profound changes in groundwater systems worldwide. Studying the spatiotemporal patterns and influencing factors of groundwater changes is of great significance for groundwater resource management and protection. Based on the water level depth data of 165 shallow groundwater monitoring wells in the Huaibei Plain of Anhui Province from 1974 to 2020, linear trend rate, Sen slope estimation, M-K test, and Kriging interpolation methods were used to analyze the spatiotemporal variation characteristics of groundwater depth. Kendall's rank correlation method was used to analyze the relationship between precipitation and groundwater depth, and GeoDetector was used to analyze the impact of precipitation changes on the spatial distribution of groundwater depth. The results show that from 1974 to 2020, the shallow groundwater depth

收稿日期:2025-06-19;修回日期:2025-10-16

基金项目:国家自然科学基金资助项目(42107082);安徽省自然科学基金资助项目(2208085US07)

作者简介:刘猛(1980—),男,满族,辽宁黑山人,安徽省水利部淮河水利委员会水利科学研究院高级工程师,通信作者,E-mail:abu9989@qq.com.

in the study area shows an overall increasing trend, with an increase of 0.12 m per decade, due to the combined effects of the reduction of precipitation, the increase of mining output, and the change of underlying surface. The trend of shallow groundwater depth changes shows significant spatial differentiation, with both increases and decreases. Specifically, significant increases, non-significant increases, basic stability, non-significant decreases, and significant decreases account for 33.4%, 35.1%, 20.2%, 5.6%, and 5.7% of the area, respectively. The spatial distribution characteristics of shallow groundwater depth gradually decrease from northwest to southeast in the Huaibei Plain. Precipitation is the main driving factor affecting the spatiotemporal variation of shallow groundwater depth in the study area, and has a significant impact on the spatiotemporal variation of shallow groundwater depth, with a negative correlation between the two. The study reveals the spatial and temporal patterns, evolution trends, and the impact of precipitation on the shallow groundwater depth in the Huaibei Plain, providing a scientific basis for regional groundwater resource management and protection.

Key words: groundwater depth; dynamic features; spatial differentiation; GeoDetector; Huaibei Plain

近几十年来,在全球气候变化的大背景下,我国城镇化和工业化进程加快,人类活动对地下水系统的影响也日益加强,地下水循环过程不确定性增加,地下水资源管理和保护工作面临越来越大的挑战^[1-2]。变化环境下地下水时空变化特征及其影响因素已成为水文循环过程研究的热点和前沿领域。目前,在地下水水位动态变化特征及其影响因素研究方面,多采用基于时间序列的统计学方法进行定量分析。文献[3]采用 M-K 趋势检验、交叉小波分析、斯皮尔曼相关等多种方法,分析通辽市科尔沁区降水和开采对潜水位的影响;文献[4]通过线性回归分析法确定了莫索湾灌区地下水埋深的主要影响因素;文献[5]综合 M-K 趋势分析、相关性分析和贡献率分析方法,研究松辽平原地下水埋深变化特征,并识别出地下水埋深变化的关键影响因子;文献[6]采用灰色关联度方法对民勤绿洲地下水位影响因素按影响程度进行排序;文献[7]运用地理探测器定量分析了自然和社会经济因素对邯郸市地下水水位变化的影响。

地下水埋深变化可直观反映地下水资源的时空分布状况,也是判断和衡量地下水开发利用是否合理的重要指标。淮北平原浅层地下水埋藏较浅,直接接受大气降水和地表水体入渗补给,时空分布规律及动态过程复杂多变,前人对研究区地下水水位年际和年内变化规律研究较多^[8-9],但对地下水埋深长期演变趋势及其影响因素的空间统计关系深入研究较少,且多缺少定量分析。因此,本文以浅层地下水为研究对象,采用 Sen 斜率估计、M-K 检验和克里金插值等方法,分析 1974—2020 年间地下水埋深的时空变化特征、识别区域地下水埋深变化趋势,并运用 Kendall's 秩相关

法和地理探测器分析降水对地下水埋深变化的驱动影响,以加深对地下水时空分布及动态变化规律的理解,为地下水资源的科学评价、合理开发与保护提供新的研究视角。

1 研究区概况

淮北平原地处安徽省淮河以北,位于东经 $114^{\circ}55'$ ~ $118^{\circ}10'$ 和北纬 $32^{\circ}25'$ ~ $34^{\circ}35'$ 之间。全区总面积约 $3.77 \times 10^4 \text{ km}^2$ 。淮北平原属暖温带半湿润季风气候区,地处南北气候过渡带,多年平均降水量为 860 mm,降水年际变化大,降水年内分配不均,汛期(6—9 月)降水量占全年降水总量的 60%~70%。

淮北平原地表基本被第四系松散地层所覆盖,地层厚度由西向东变薄,主要岩性为河湖相沉积的黏土、亚黏土夹粉细砂层,地下水类型主要为松散岩类孔隙水。浅层地下水埋藏较浅,易于接受大气降水和地表水体入渗补给,消耗方式以潜水蒸发为主、人工开采为辅,其动态变化与水文气象关系密切,水位动态类型以“入渗-蒸发”型为主。由于浅层地下水临近地表,易受到地理条件、气候和人类活动的共同影响,时空分布规律及演变过程较为复杂,其演变规律及其影响驱动因素有待进一步研究揭示。

淮北平原城镇密布、人口众多,是我国重要的煤炭能源基地和商品粮生产基地,同时也是水资源严重短缺地区。为满足社会经济发展的用水需求,自 20 世纪 70 年代以来,当地开始大量开采地下水,2020 年地下水年开采总量达 $27 \times 10^9 \text{ m}^3$,占当地总供水量的 4 成左右。由于长期超采地下水,在阜阳、亳州等局部地区引发了地面沉降等一

系列环境、地质问题,严重制约了当地社会经济和生态环境的可持续发展^[10-11]。

2 方法与数据

2.1 研究方法

2.1.1 时间序列分析方法

1) 线性倾向率法。线性倾向率一般用来解释水文、气象要素随时间变化的线性趋势强度,通过建立一元回归方程来拟合地下水埋深的时间序列数据,计算公式为:

$$X_t = \epsilon + \alpha t \quad (1)$$

其中: X_t 为地下水埋深时间序列; α 为回归系数(即倾向率),表示每 10 年地下水埋深随时间变化的线性倾向率, $\alpha > 0$ 表示呈增加趋势, $\alpha < 0$ 表示呈减少趋势; ϵ 为常数。 α 、 ϵ 均利用最小二乘法确定。

2) Sen 斜率估计及 M-K 检验法。Sen 斜率估计和 M-K 检验法均为非参数统计方法,2 种方法均具有不要求数据服从正态分布、对离群值不敏感的优点,两者相结合使用是研究时间序列趋势较成熟的方法,已在水文、气象等领域得到广泛使用^[12-15]。因此,本文将二者结合使用,先通过 Sen 斜率估计趋势的强度(速率),然后用 M-K 检验判断趋势的统计显著性。

Sen 斜率估计是通过计算所有时间点对斜率的中位数来估计趋势的,计算公式为:

$$\beta = \text{median}\left(\frac{X_j - X_i}{j - i}\right), \quad \forall i \leq j \quad (2)$$

其中:median 代表取中位数函数; X_i 和 X_j 为时间序列数据; β 为斜率,表示地下水埋深时间序列的平均变化率以及时间序列的趋势, $\beta > 0$ 表示呈增加趋势, $\beta < 0$ 表示呈减少趋势。

M-K 检验是通过比较每个数据点与其后续数据点的关系,通过计算统计量来判断趋势是否存在。对于需要分析的时间序列 $X_t (t=1, 2, 3, \dots, n)$ 而言,定义统计量 S ,计算公式为:

$$S = \sum_{i=1}^{n-1} \sum_{j=i+1}^n \text{sign}(X_j - X_i) \quad (3)$$

其中: X_i 、 X_j 为对应年份的埋深时间序列值($i < j$); n 为时间序列长度;sign 为符号函数,当 $X_j > X_i$ 时 sign 值为 1,当 $X_j < X_i$ 时 sign 值为 -1,当 $X_j = X_i$ 时 sign 值为 0。当 $n \geq 10$ 时,统计量 S 近似服从正态分布,其对应的方差为:

$$\text{Var}(S) = \frac{n(n+1)(2n+5)}{18} \quad (4)$$

标准化的检验统计量 Z :

$$Z = \begin{cases} \frac{S-1}{\sqrt{\text{Var}(S)}}, & S > 0; \\ 0, & S = 0; \\ \frac{S+1}{\sqrt{\text{Var}(S)}}, & S < 0 \end{cases} \quad (5)$$

其中:当 $Z > 0$ 表示埋深增加的变化趋势; $Z < 0$ 表示埋深减少的变化趋势。通过比较 $|Z|$ 与标准正态分布的临界值(如 1.96 对应 5% 显著性水平)判断趋势是否显著。

2.1.2 降水影响分析方法

1) Kendall's 秩相关法。Kendall's 秩相关法是一种非参数统计方法,用于衡量 2 个时间序列之间的单调相关性,具有对异常值稳健、不依赖数据分布的优点,在水文分析中得到广泛应用^[16-17]。本文利用 Kendall's 秩相关法分析地下水埋深与降水量之间的相关性,其计算公式为:

$$\tau = \frac{2S}{n(n-1)} \quad (6)$$

$$S = \sum_{i=1}^n \sum_{j=i+1}^{n-1} \text{sign}(X_j - X_i, Y_j - Y_i) \quad (7)$$

其中: S 为统计变量; n 为时间序列长度; X_i 、 Y_i 为时间序列;sign 为符号函数; τ 为秩相关系数,取值区间 $[-1, 1]$,当 τ 取值为 1 表示完全正相关, τ 取值为 -1 表示完全负相关,0 表示不相关。

2) 地理探测器法。地理探测器是一种基于空间分异性分析的统计方法,由中国学者王劲峰团队提出,主要用于探究地理现象的空间分布规律及其驱动因素^[18]。其核心思想为:如果某个自变量(驱动因子)对因变量有显著影响,那么自变量的空间分布应与因变量的空间分布具有相似性。地理探测器中的因子探测模块可以探测某个自变量对因变量的解释力。自变量对因变量空间分异性的解释力用 q 值表示,其表达式为:

$$q = 1 - \left(\sum_{h=1}^L N_h \sigma_h^2 \right) / (N \sigma^2) \quad (8)$$

其中: $h=1, 2, 3, \dots, L$ 为变量分层; N_h 、 N 分别为层 h 的单元数和总单元数; σ_h^2 、 σ^2 分别为层 h 方差和总方差; q 为自变量对因变量的解释力,取值区间 $[0, 1]$, q 值越大说明自变量对因变量影响越大,解释力也越强, $q=0$ 表示自变量对因变量完全无解释力, $q=1$ 则表示自变量与因变量完全相关。

2.2 数据来源及处理

长时间序列地下水水位数据可有效消除短期波动干扰,确保分析结果能真实反映区域地下水动态演变趋势。地下水埋深数据来自安徽省水文局布设于研究区的 165 眼浅层地下水监测井,监测

时段为 1974—2020 年;降水数据来自于欧洲中期天气预报中心(ECMWF)发布的全球高分辨率地表再分析(ERA5-Land)数据集,利用 ArcGIS 软件加工处理成县级行政区逐年降水量 shp 文件,原数据系列为 1950—2022 年的降水量,本文截取 1974—2020 年的降水量。

3 结果与分析

3.1 浅层地下水埋深动态特征分析

3.1.1 浅层地下水埋深年际变化特征

为反映研究区浅层地下水埋深长期变化趋势,以年为时间尺度,将 165 眼监测井年均水位埋深值的算术平均值作为区域年均水位埋深,采用线性倾向率法分析其变化过程如图 1 所示。

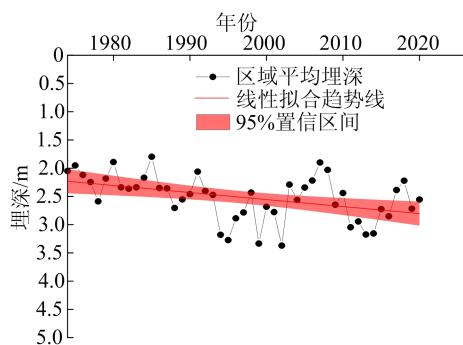


图 1 淮北平原浅层地下水区域平均埋深变化过程曲线

由图 1 可知:1974—2020 年浅层地下水区域年均埋深总体呈波动增加趋势,每 10 年增加 0.12 m;2002 年区域年均埋深最大,为 3.37 m,1985 年区域年均埋深最小,为 1.80 m;1974—2020 年多年平均区域埋深值为 2.52 m。

分析浅层地下水埋深呈增加趋势的原因,一方面是由于气候变化导致降水量减少使得地下水补给减少。经分析,1974—2020 年淮北平原降水总体呈下降趋势,第 10 年年均降水量下降速率为 0.049 m;另一方面,20 世纪 60—70 年代淮北平原农业灌溉面积不断增加、机电井灌溉能力逐步

提升,加大了农业对浅层地下水开发利用强度;此外,近几十年来下垫面条件的改变,城镇化、道路建设增加了不透水面积,同时减少了耕地、林地和地表水体等透水面积,导致地下水获得入渗补给有所减少,此外,农田排水设施排水能力提高加快了地下水向地表水体排泄,也会使地下水获得入渗补给量减少而导致地下水埋深增加。

3.1.2 浅层地下水埋深空间分布格局

本文选取 1975 年、1980 年、1990 年、2000 年、2010 年和 2020 年 6 个代表年份,从空间分布来看,6 个年份的浅层地下水埋深空间分布特征基本一致,均呈现由淮北平原西北向东南方向逐渐变小格局,全区浅层地下水埋深大部分在 1.00~5.00 m,西北部亳州市谯城区和宿州市砀山县地下水平均埋深 3.00~5.00 m;中部由临泉县、界首市、太和县向东直至灵璧县、泗县一带,水位埋深 2.00~3.00 m;南部沿淮的颍上县、凤台县、淮南市区、蚌埠市区和五河县一带,地下水埋深较小,大部分地区为 1.00~2.00 m。

从整个研究区看,浅层地下水流场接近天然状态,并未形成明显的区域性水位降落漏斗,这与其补给条件良好恢复迅速、开采布局分散对地下水扰动小有关。

3.1.3 浅层地下水埋深格局演变趋势

为进一步明确区域浅层地下水埋深随时间变化的空间差异性,将 Sen 斜率估计与 M-K 趋势显著性检验相结合,分析 1974—2020 年地下水埋深变化趋势。根据 Sen 斜率估计结果,按 β 取值将地下水埋深变化分别划分为增加、减少和基本不变 3 种情况。根据 M-K 检验结果,按变化趋势的显著性水平(显著性水平 α 取 0.05)分为显著和不显著 2 种情况。将 Sen 斜率分级结果与 M-K 检验显著性分级结果进行叠加,将地下水埋深的变化趋势划分为显著增加、不显著增加、基本不变、不显著减少和显著减少 5 类,具体划分见表 1 所列。

表 1 淮北平原浅层地下水埋深变化和空间变化趋势等级划分结果

Sen 斜率	M-K 检验	趋势等级划分	地区	面积占比/%
$\beta > 0.05$	$ Z > 1.96$	显著增加	淮上区、怀远县、潘集区	33.4
	$ Z \leq 1.96$	不显著增加	凤台县、颍上县	35.1
$-0.05 \leq \beta \leq 0.05$		基本不变	界首市、五河县、固镇县	20.2
$\beta < -0.05$	$ Z \leq 1.96$	不显著减少	利辛县、蒙城县、颍泉区、颍东区、太和县、临泉县、灵璧县、砀山县、萧县	5.6
	$ Z > 1.96$	显著减少	谯城区、涡阳县、颍州区、阜南县、相山区、杜集区、烈山区、埇桥区、泗县、濉溪县	5.7

在 1974—2020 年间淮北平原浅层地下水埋深总体呈增加趋势(此处结论验证了 3.1.1 节结论),同时地下水埋深变化“有增有减”,呈现出显著的空间差异性(空间分异)。其中,埋深显著增加面积 12 203 km²,占 33.4%,主要分布在西北部谯城区、涡阳县、濉溪县、埇桥区一带,及西南部阜南县、东部泗县等;埋深不显著增加面积 12 816 km²,占 35.1%;埋深基本不变的面积 7 380 km²,占 20.2%;埋深不显著减少面积 7 419 km²,占 5.6%;埋深显著减少面积 2 079 km²,占 5.7%,主要分布在东南部沿淮河的潘集区、怀远县、蚌埠市区一带。

3.2 降水对浅层地下水埋深变化的驱动分析

3.2.1 降水与浅层地下水埋深的相关性

根据文献[19-20]可知,淮北平原松散层垂向渗透性强、直接接受大气降水补给,大气降水对地下水位埋深的时空变化起到决定性作用。因此,本文采用 Kendall's τ 秩相关法分析各监测井年均地下水埋深和年均降水量的相关性,经分析,监测井相关系数 τ 的取值范围在 $-0.532 \sim -0.039$,区域整体的相关系数平均值为 -0.237 ,其中 61.2% 的监测井通过了显著性检验($\alpha=0.05$),表明年均地下水埋深与年降水量之前呈负相关关系,即从年时间尺度看,随着年降水量减小地下水年均埋深增加,随着年降水量增大地下水年均埋深减少。

为反映浅层地下水年均埋深与年降水量相关性的空间分布特征,采用克里金插值法对相关系数值 τ 进行空间插值,得到相关系数的空间分布见表 2 所列。

从表 2 可以看出,浅层地下水年均埋深与年降水量的相关性存在一定的空间差异:强负相关($-0.4 \sim -0.3$)区域主要分布于淮北平原中部临泉县、阜南县、阜阳市区、利辛县、涡阳县一带,以及埇桥区、灵璧县至泗县一带,面积占 29.1%;弱负相关($-0.1 \sim 0$)区域仅分布于北部萧垌地区,面积占 5.7%。

分析造成这种空间分异的原因,主要是由于

包气带厚度、土壤质地、地形地貌等因素通过影响降水入渗过程而影响地下水埋深变化。萧垌地区属黄泛区,地下水埋藏较深,包气带厚度也比中部和南部大,土壤以砂质土为主,虽然渗透性好,但持水能力弱,降水入渗首先被用于湿润干燥的土壤、填充土壤颗粒间的孔隙,无效损耗量大,延迟和削弱了降水对地下水的实际补给,因此地下水埋深与降水之间的相关性弱。

而南部沿淮地区地势低洼,土壤以黏性土为主,地下水埋深浅、包气带厚度薄,一方面由于毛细作用使得降水前期包气带含水量较高而不利于降水入渗转化为地下水,另一方面潜水蒸发强烈也会减少地下水入渗量,因此地下水埋深与降水之间相关性较弱。

淮北平原中部地区地下水埋深和包气带厚度介于前两者之间,降水相对更利于形成对地下水的有效补给,因此地下水埋深与降水之间相关性强。

表 2 淮北平原浅层地下水埋深与降水量相关系数空间分布

相关系数	地区
$-0.4 \sim -0.3$	颍州区、颍泉区、颍东区、临泉县、阜南县、利辛县、涡阳县、埇桥区、灵璧县
$-0.3 \sim -0.2$	界首市、太和县、蒙城县、濉溪县、相山区、烈山区、杜集区、颍上县、固镇县、泗县
$-0.2 \sim -0.1$	谯城区、凤台县、潘集区、怀远县、淮上区、五河县
$-0.1 \sim 0$	砀山县、萧县

3.2.2 降水对浅层地下水埋深变化的影响分析

以 1974—2020 年浅层地下水埋深变化为因变量,以同期降水量变化为自变量,将降水量变化作为驱动因子,利用地理探测器探测对地下水埋深变化空间分异的解释力,即降水量变化能在多大程度上解释地下水埋深变化的空间分异。

本文将研究区划分为 $10 \text{ km} \times 10 \text{ km}$ 的网格,共生成 769 个格点作为采样点,通过空间插值及重采样操作,得到各采样点降水量变化的 Sen 斜率值,通过自然断点法将其划分为 5 级,具体见表 3 所列。

表 3 降水量变化对地下水埋深变化影响分级

影响程度分级	影响微弱	影响较小	影响中等	影响较大	影响显著
每 10 年降水量变化/m	0.022~0.029	0.029~0.038	0.038~0.046	0.046~0.059	0.059~0.079
影响分级赋分	1	2	3	4	5

最后将分级结果输入地理探测器中进行计

算,通过计算可知,研究区降水量变化对浅层地下

水埋深的解释力 q 为 0.317。当驱动因子的 q 大于 0.2 时,可认为该因子是解释因变量空间分异性的主导因素。由此可知,降水量变化对淮北平原浅层地下水埋深变化的空间分布具有较高的解释力,说明大气降水对浅层地下水影响十分显著,降水量的空间变化对浅层地下水埋深空间分布起到关键作用。

4 结 论

本文基于安徽省淮北平原 165 眼地下水监测井 1974—2020 年水位埋深数据,利用线性倾向率、Sen 斜率估计、M-K 检验等方法,从年时间尺度上识别了研究区浅层地下水埋深动态变化特征和时空演变趋势,并利用 Kendall's τ 秩相关法和地理探测器分析了降水对浅层地下水埋深的影响程度。主要结论如下:

1) 从时间趋势上看,1974—2020 年间研究区浅层地下水埋深整体呈波动增加趋势,每 10 年增加 0.12 m;区域多年平均埋深值为 2.52 m,年均埋深最大值为 3.37 m,年均埋深最小值为 1.80 m。

2) 从空间分布上看,区域浅层地下水埋深呈现由西北向东南逐渐变小的分布格局;1974—2020 年间地下水埋深变化“有增有减”,呈现出显著的空间差异性,其中,埋深显著增加、不显著增加、基本不变、不显著减少和显著减少的面积占比分别为 33.4%、35.1%、20.2%、5.6%、5.7%。

3) 研究区浅层地下水年均埋深与年降水量时间序列整体上呈负相关关系,降水量变化对浅层地下水埋深变化的空间分布差异性具有较高的解释力。以上分析说明降水是淮北平原浅层地下水埋深变化的最主要影响因素。

[参 考 文 献]

[1] 陈飞,徐翔宇,羊艳,等.中国地下水资源演变趋势及影响因素分析[J].水科学进展,2020,31(6):811-819.
 [2] 杜新强,何立滢,任思睿,等.中国北方地区水资源演变和供水构成变化特征[J].吉林大学学报(地球科学版),2023,53(2):566-577.
 [3] 束龙仓,张彤,豪澈丽木格,等.降水和地下水开采对通辽市科尔沁区潜水位的影响[J].吉林大学学报(地球科学版),2024,54(3):954-966.

[4] 陈彬鑫,何新林,杨丽莉,等.莫索湾灌区近 22 年来地下水埋深变化及影响因素分析[J].干旱区资源与环境,2020,34(12):155-160.
 [5] 刘静,宋梦,林斌超,等.松辽平原地下水埋深变化及关键影响因素分析[J].华北水利水电大学学报(自然科学版),2021,42(2):58-65.
 [6] 杨怀德,冯起,郭小燕.1999—2013 年民勤绿洲地下水埋深年际变化动态及影响因素[J].中国沙漠,2017,37(3):562-570.
 [7] 王默涵,张淑花,周亦,等.邯郸市地下水埋深变化及其影响因素定量分析[J].矿产勘查,2018,9(5):985-992.
 [8] 王发信,柏菊.淮北平原浅层地下水埋深区域分布特点[J].地下水,2014,36(5):51-53.
 [9] 陈玺,郝振纯,戴明龙.淮北平原浅层地下水动态研究[J].安徽农业科学,2016,44(28):73-76.
 [10] 刘猛,许一.安徽省淮北地区地下水超采治理对策[J].安徽农业科学,2022,50(15):190-192.
 [11] 刘琦,曹先树.安徽省淮北平原地区地下水超采原因与对策研究[J].安徽地质,2025,35(1):47-51.
 [12] LI Z, CHEN Y, YANG J, et al. Potential evapotranspiration and its attribution over the past 50 years in the arid region of Northwest China[J]. Hydrological Processes, 2014,28(3):1025-1031.
 [13] 张正宇.变化环境下拉萨河谷区地下水动态演化规律研究[D].西安:长安大学,2020.
 [14] 南林江,杨明祥,郝少魁.1965~2014 年重庆地区降水时空分布特征分析[J].人民长江,2021,52(增刊 2):64-69.
 [15] 王晟,田琳,李峰平,等.松花江流域陆地水储量时空变异特征与影响因素探究[J].中国农村水利水电,2024(10):47-58.
 [16] LI F X, ZHANG S Y, CHEN D, et al. Inter-decadal variability of the east Asian summer monsoon and its impact on hydrologic variables in the Haihe River basin, China[J]. Journal of Resources and Ecology, 2017,8(2):174-184.
 [17] 张晨晨,黄翀,何云,等.黄河三角洲浅层地下水埋深动态与降水的时空响应关系[J].水文地质工程地质,2020,47(5):21-30.
 [18] 王劲峰,徐成东.地理探测器:原理与展望[J].地理学报,2017,72(1):116-134.
 [19] 王赫生,龚建师,陶小虎,等.淮北平原浅层地下水多年动态变化及监测统测评估[J].中国地质,2022,49(6):1778-1791.
 [20] 谢广阔,陶庭叶,马敏,等.利用 GRACE 卫星分析安徽省地下水储量的时空变化[J].合肥工业大学学报(自然科学版),2024,47(3):367-372,378.

(责任编辑 吴 亮)