

# 2011—2020 年新疆鄯善县地下水位时空动态变化规律

陈泽<sup>1,2</sup>, 吴彬<sup>1,2</sup>, 高凡<sup>1,2</sup>, 杜明亮<sup>1,2</sup>, 胡鑫<sup>1,2</sup>

(1.新疆农业大学 水利与土木工程学院, 新疆 乌鲁木齐 830052;

2.新疆水利工程安全与水灾害防治重点实验室, 新疆 乌鲁木齐 830052)

**摘要:** [目的] 分析新疆鄯善县 2011—2020 年地下水位时空动态规律及未来变化趋势, 为该区地下水超采治理和地下水位管控指标确定提供科学支撑。[方法] 利用聚类分析与相关性分析结合的方法, 划分地下水动态类型, 采用时间序列分析法、地统计学法, 结合多元 Logistic 回归模型, 分析地下水位时空变化规律及主要驱动因素, 并利用 R/S 分析法预测地下水位未来变化趋势。[结果] ① 地下水动态类型分为开采型、径流型、径流—开采型及蒸发型, 以开采型为主, 所占比例达 75%。② 2015—2018 年北盆地地下水位由下降趋势变为上升趋势, 2018 年后又变为下降趋势; 南盆地地下水位一直呈下降趋势, 2015 年后下降速率显著减缓。③ 北盆地地下水位变化主要驱动因素为地下水开采及地表水径流量, 贡献率分别为 68.46%, 28.37%; 南盆地主要驱动因素为地下水开采, 贡献率为 89.74%。④ 在外界环境稳定情况下, 预计七克台镇及南盆地北部灌区地下水位将会持续下降, 辟展乡地下水位持续上升, 其他区域呈不明显的变化趋势。[结论] 地下水开采是地下水位变化最重要的影响因素, 为遏制地下水位下降, 应在地下水位下降显著区域继续加大压减地下水超采量。

**关键词:** 地下水位; 动态类型; 动态特征; 驱动因素; 新疆鄯善县

文献标识码: A

文章编号: 1000-288X(2023)02-0060-09

中图分类号: P641

**文献参数:** 陈泽, 吴彬, 高凡, 等. 2011—2020 年新疆鄯善县地下水位时空动态变化规律[J]. 水土保持通报, 2023, 43(2): 60-68. DOI: 10.13961/j.cnki.stbctb.2023.02.008; Chen Ze, Wu Bin, Gao Fan, et al. Spatial-temporal dynamic change law of groundwater level in Shanshan County of Xinjiang Uygur Autonomous Region from 2011 to 2020 [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2023, 43(2): 60-68.

## Spatial-temporal Dynamic Change Law of Groundwater Level in Shanshan County of Xinjiang Uygur Autonomous Region from 2011 to 2020

Chen Ze<sup>1,2</sup>, Wu Bin<sup>1,2</sup>, Gao Fan<sup>1,2</sup>, Du Mingliang<sup>1,2</sup>, Hu Xin<sup>1,2</sup>

(1. College of Water Conservancy and Civil Engineering, Xinjiang Agricultural University, Urumqi, Xinjiang 830052, China; 2. Xinjiang Key Laboratory of Water

Conservancy Engineering Safety and Water Disaster Prevention, Urumqi, Xinjiang 830052, China)

**Abstract:** [Objective] The spatial and temporal dynamic law and future change trend of groundwater level in Shanshan County of Xinjiang Uygur Autonomous Region during 2011—2020 were studied in order to provide scientific support for the determination of groundwater overexploitation control and a groundwater level control index in this area. [Methods] The dynamic types of groundwater were divided by combining cluster analysis and correlation analysis. The spatio-temporal variation of groundwater level and its main driving factors were analyzed by time series analysis, geostatistics, and multivariate logistic regression model. The R/S analysis method was used to predict the future variation trend of groundwater level. [Results] ① Groundwater dynamic types were divided into exploitation type, runoff type, runoff-exploitation type, and evaporation type. The dominant type was exploitation type, accounting for 75% of cases. ② From 2015 to 2018, the groundwater level in the north basin changed from a downward trend to an upward trend. A downward trend was observed after 2018. The groundwater level in the south basin had been declining, and the rate of decline slowed significantly after 2015. ③ The main driving factors of groundwater level change in

收稿日期: 2022-07-06

修回日期: 2022-09-13

资助项目: 新疆自然科学基金项目“变化环境下新疆地下水资源量演变情势研究”(2021D01A99); 新疆水利工程安全与水灾害防治重点实验室研究项目(ZDSYS-YJS-2021-08)

第一作者: 陈泽(1997—), 男(汉族), 山东省淄博市人, 硕士研究生, 研究方向为干旱区地下水管理与保护。Email: 1205360309@qq.com。

通讯作者: 吴彬(1972—), 男(汉族), 甘肃省陇西人, 博士, 教授, 博士生导师, 主要从事内陆干旱区水资源利用研究。Email: wubinxi@163.com。

the north basin were groundwater exploitation and surface runoff, accounting for 68.46% and 28.37% of cases, respectively. The main driving factor in the south basin was groundwater exploitation, accounting for 89.74% of cases. ④ If the external environment is stable, it is expected that the groundwater level in Qiketai Town and the northern irrigation area of the south basin will continue to decline, the groundwater level in Pizhan Township will continue to rise, and the groundwater levels in other areas will show no obvious change. [Conclusion] Groundwater exploitation is the most important factor affecting the change of groundwater level. To control the decline of groundwater level, it will be necessary to further reduce groundwater overexploitation in areas with significant groundwater level declines.

**Keywords:** groundwater level; dynamic type; dynamic characteristics; Shanshan County of Xinjiang Uygur Autonomous Region

地下水是自然界中水循环的一个重要环节,是全球重要的供水水源。中国水资源紧缺,近年来,强烈的人类活动导致原本有限的供水水源愈加稀缺,地下水开发利用不当导致的地下水水位下降<sup>[1]</sup>、泉水流量衰减<sup>[2]</sup>、水质恶化<sup>[3]</sup>以及地面沉降、地面塌陷等<sup>[4]</sup>地质与生态环境问题频繁发生。科学认识地下水补径排规律,掌握区域地下水位时空动态变化趋势,制定合理的地下水管控指标,是实现地下水资源保护与管理,提升国家及地区水安全保障能力的重要途径<sup>[5-7]</sup>。近 10 a 来,中国地下水学科发展迅猛,全球变化和人类活动影响下的地下水动态变化成为重要的热点科学问题<sup>[8-10]</sup>。人为的土地利用变化和农业生产集约化对地下水资源造成了巨大的影响,由于地下水径流较缓慢,地下水资源与生态环境问题常常滞后,需要依靠较长期的监测数据才能揭示其动态变化规律。Zheng 等<sup>[11]</sup>基于观测井长序列数据和现场调查研究表明,20 世纪 60—70 年代以来,地下水开采造成华北平原地下水位持续下降,浅层地下水下降幅度大于 65 m,深层地下水下降幅度高达 110 m,华北平原地下水位下降直接导致河流流量锐减。敖菲等<sup>[12]</sup>分析了黑河下游地下水位动态变化特征,结果表明下部地下水位呈显著下降趋势,上中部呈显著上升趋势,2000 年后各监测井地下水位变化趋势发生显著变化。邓康婕等<sup>[13]</sup>利用地统计学法分析研究了泾惠灌区地下水位的空间分布规律及变异特征,结果表明泾惠灌区的地下水埋深在空间上从东南向西北逐渐变浅,空间各向异性略有增强。高宇阳等<sup>[14]</sup>利用 Mapgis 分析了乌苏市地下水流场及埋深,结果表明地下水位整体呈下降趋势,地下水开采量与地表水引水量是影响地下水位的主要因素。

自 20 世纪 90 年代以来,新疆鄯善县大规模水资源开发,大量开采地下水,导致地下水位持续下降,浅层地下水资源支撑生态系统稳定性不足,引发一系列生态环境问题<sup>[15]</sup>。2004 年鄯善县被划定为严重超采区。为缓解地下水位持续下降,2012 年实施最严格水资源管理制度,严格管理地下水开采。目前针对

方案实施后地下水位变化情况的研究较少,缺乏对鄯善县地下水时空动态特征及驱动因素的科学认识。为此,本文基于鄯善县 2011—2020 年地下水位监测数据,以水文地质条件定性分析与实测数据定量分析相结合的思路划分地下水动态类型,利用地统计学方法、时间序列分析方法结合 R/S 分析法分析鄯善县地下水位时空动态规律及未来变化趋势。研究成果可为研究区地下水超采治理和地下水位管控指标确定提供科学支撑。

## 1 研究区概况

鄯善县位于吐鲁番盆地东侧,属于典型内陆干旱气候,年均降水量仅为 25 mm 左右,而潜在蒸发量可达 2 751~3 217 mm。鄯善县地表水系主要由发源于天山山脉的坎儿其河、二塘沟河、柯柯亚河三条河流构成,多年平均径流量合计  $2.43 \times 10^8 \text{ m}^3$ 。火焰山构造隆起将吐鲁番盆地分为南、北两个盆地,北盆地北部地形坡度大,南盆地向西倾斜,地势平缓,起伏较小。北盆地地下水以潜水为主,承压水只在扇缘靠近火焰山一带分布;南盆地潜水仅分布在北部靠近火焰山及东部区域,承压水主要分布在自吐峪沟至鲁克沁镇以西南区域,由于地下水开采强度持续增大,大部分区域的承压含水层与潜水含水层已经连通。地下水的补给来源主要包括山前侧向补给、河道水渗漏、渠系水渗漏、灌溉水田间入渗补给等,人工开采是地下水的主要排泄方式。鄯善县多年平均水资源可利用量为  $3.83 \times 10^8 \text{ m}^3$ ,其中地表水可利用量  $1.88 \times 10^8 \text{ m}^3$ ,地下水资源可开采量  $1.95 \times 10^8 \text{ m}^3$ 。2020 年水资源实际开发利用量为  $3.99 \times 10^8 \text{ m}^3$ ,其中,地表水供水量  $1.13 \times 10^8 \text{ m}^3$ ,地下水  $2.84 \times 10^8 \text{ m}^3$ 。地下水开采系数 1.41,农业用水占比 84.21%。鄯善县共设置 24 眼地下水监测井(编号为 G<sub>1</sub>-G<sub>24</sub>)。

## 2 材料与方法

### 2.1 数据来源

采用鄯善县 24 眼地下水监测井 2011—2020 年

地下水位监测数据,数据主要来源于自设地下水位监测井,以吐鲁番市水利局地下水监测井监测数据作为补充,北盆地设置地下水监测井 8 眼,南盆地 16 眼,主要分布于平原灌区。地下水开采量、地表水引水量、径流量、灌溉面积等对地下水位动态影响较大的变量数据来源于新疆水资源公报。

## 2.2 研究方法

2.2.1 地下水动态类型划分 本文采用聚类分析法与相关性分析相结合的方法,划分鄯善县地下水动态类型。①利用聚类分析法对地下水位数据进行标准化、聚类、绘制聚类热图,对不同地下水位变化特点的监测井进行分类。②利用相关性分析法,分析自然因素及人为因素与地下水位变化的相关性,判别不同聚类类型地下水位变化的主要影响因素。③根据土地利用类型、地质条件以及地下水补给、径流、排泄条件,综合判别地下水动态类型。

### 2.2.2 时间序列分析法

(1) 累积距平法。绘制累积距平曲线可以进行时间序列数据的趋势分析<sup>[16]</sup>,累积距平曲线变化趋势发生改变的点为时间序列数据变化趋势的突变点,累积距平计算公式为:

$$Z_t = \sum_{i=1}^t (Y_i - \bar{Y}) \quad (t=1, 2 \cdots n) \quad (1)$$

式中: $Z_t$  为累计距平; $Y_i$  为地下水位标准化数据; $\bar{Y}$  为地下水位标准化数据平均值; $n$  为数据个数。

(2) M-K 突变点检验法。Mann-Kendall(M-K) 检验法<sup>[17]</sup>是一种非参数检验法,该方法不要求样本服从一定的分布,也不会受少数的异常值干扰,本研究采用 M-K 检验法对地下水位年际变化趋势进行定量分析,检验统计量值  $Z$  的正负代表增加及减小趋势。M-K 突变检验通过计算每个样本的秩,统计量  $UF_k$  与  $UB_k$  曲线具有交点,且检点在临界值 ( $\pm 1.96$ ) 之间,则交点对应的时间为突变点。

2.2.3 贡献率计算 贡献率可确定地下水位变化的主要驱动因素并定量分析各因素的影响程度<sup>[18]</sup>,采用多元 Logistic 回归模型分析各影响因素对下水位变化的影响。由于各因素的量纲、范围不同,首先对其进行标准化处理,对标准化的数据序列计算贡献率:

$$GWD = b_0 + b_1 Q + b_2 P + b_3 K \quad (2)$$

$$\eta_i = \frac{|b_i|}{|b_1| + |b_2| + |b_3|} \quad (3)$$

式中:GWD 为地下水埋深标准化值; $Q, P, K$  分别为径流量、降雨量及地下水开采量的标准化值; $b_i$  为影响因子对应的回归系数; $\eta_i$  为各影响因素对地下水位变化的贡献率。

2.2.4 R/S 分析法 R/S 分析法即重标极差法,由英国水文学家 Hurst 提出,常用于分析时间序列的长程相关性和分形特征<sup>[19]</sup>。R/S 分析通过计算 Hurst 指数揭示时间序列的持续性特征,并以此推断未来变化趋势,在地下水动态研究中广泛应用<sup>[20-21]</sup>,表达形式为:

$$\frac{R}{S} \propto \left(\frac{\tau}{2}\right)^H \quad (\tau=1, 2 \cdots T) \quad (4)$$

式中: $R$  为极差; $S$  为标准差; $\tau$  为正整数; $T$  为时间序列数据点目数; $H$  为 Hurst 指数,能够揭示地下水时间序列的持续性。

$H=0.5$ , 时间序列变化是随机的,不具有持续性。 $H>0.5$ , 时间序列具有持续性特征,未来趋势将与过去趋势保持一致。 $H<0.5$ , 时间序列具有反持续性特征,未来趋势与过去相反。

## 3 结果与分析

### 3.1 地下水动态类型

3.1.1 地下水动态类型划分 基于研究区 2020 年各月平均地下水位数据,通过聚类分析绘制地下水位聚类热图(图 1)。结果显示,研究区地下水位变化可分为 4 种类型。在此基础上,结合监测井所在区域土地利用类型、地质条件以及地下水补给、径流、排泄条件,分析地下水位变化的主要影响因素,划分地下水动态类型。

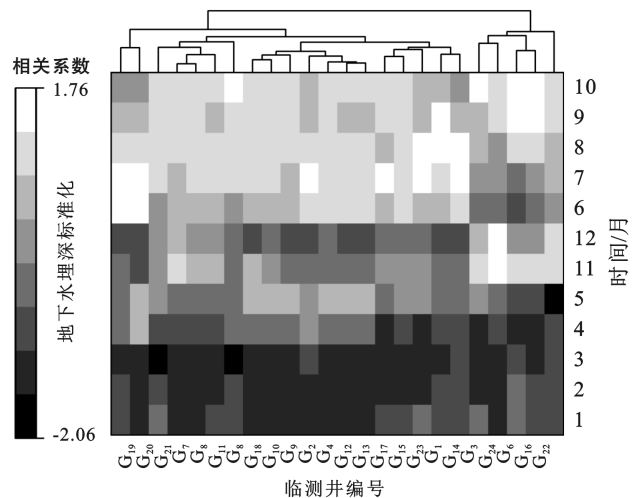


图 1 研究区监测井地下水动态类型聚类热图

Fig.1 Cluster heat map of groundwater dynamic types of monitoring wells in the study area

①第 1 类:地下水位变化与地下水开采相关系数  $r_1 \geq 0.6$ , 地下水位变化受地下水开采影响显著,划分为开采型。②第 2 类: $0.4 \leq r_1 < 0.6$ , 地下水位变化仍受到地下水开采影响,但明显受到其他因素影响,区

域气候干旱,降水极少,地表水资源匮乏,降雨及地表径流对地下水的影响较小,主要考虑侧向径流与地下水开采叠加影响,划分为径流—开采型。③第 3 类: $r_1 < 0.4$ ,地下水位变化受人工开采影响较小,且地下水埋深大于区域潜水蒸发极限埋深 5.5 m<sup>[22-23]</sup>,结合土地利用类型及地质条件判断地下水位主要受侧向径流影响,划分为径流型。④第 4 类:地下水位变化与蒸发相关系数  $r_2 \geq 0.6$ ,且地下水埋深小于 5.5 m,潜水蒸发是地下水位变化的主要影响因素,划分为蒸发型。综上所述,鄯善县地下水成因类型划分为开采型、径流—开采型、径流型及蒸发型 4 种,地下水动态划分结果及分布区域详见表 1 和图 2。

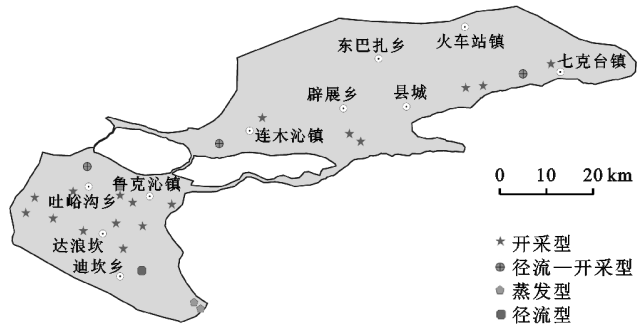


图 2 研究区地下水动态类型分布图

Fig.2 Groundwater dynamic type distribution map in the study area

表 1 研究区地下水动态类型与监测井数量统计

Table 1 Groundwater dynamic type and monitoring well number statistics in the study area

分区	开采型	径流—开采型	径流型	蒸发型
北盆地	6	2	0	0
南盆地	12	1	1	2
合计	18	3	1	2

3.1.2 典型地下水动态类型分析

(1) 开采型。主要分布于灌区内,地下水开采强度大,地下水位变化主要受地下水开采影响。以吐峪沟乡 G<sub>23</sub> 监测井为例,绘制多年平均月水位动态变化图(图 3),农业灌溉开采始于 3 月,地下水位受人工开采影响开始下降,5—7 月为农业灌溉高峰期,大多在 6 月达最低水位,此后地下水位开始回升。与径流—开采型动态比,径流补给作用相对较弱,水位降幅大,最大可达 30 m,水位变化曲线多呈单谷型。

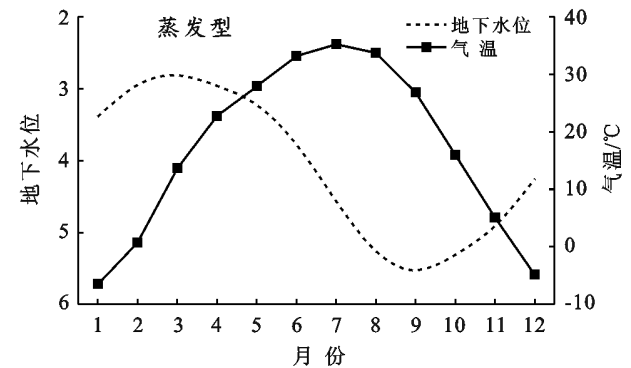
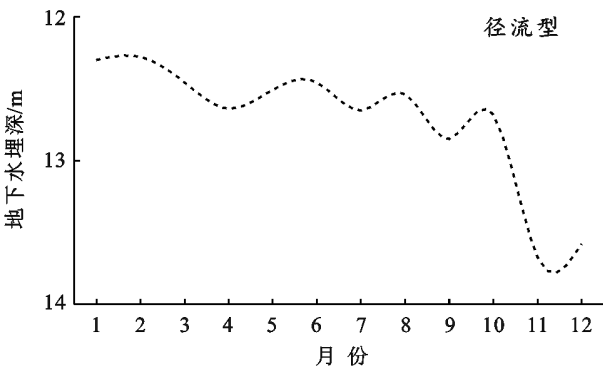
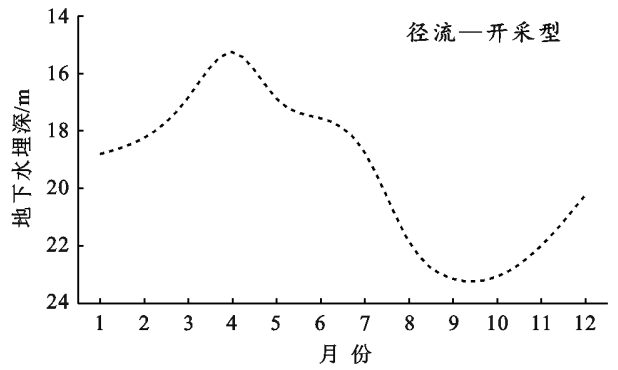
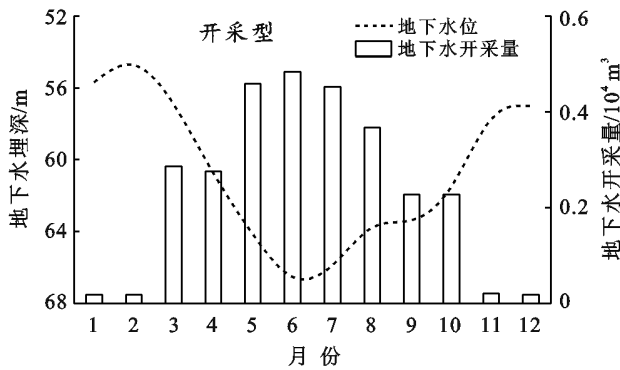


图 3 研究区动态类型水位变化特征

Fig.3 Dynamic type water level variation characteristics in the study area

(2) 径流—开采型。主要分布于灌区周边,含水层岩性以砂砾石为主,地下水位变化除受到人工开采影响外,受侧向径流影响显著。地下水主要补给源为

上游侧向补给,主要排泄为人工开采。以鲁克沁镇 G<sub>11</sub> 监测井为例(图 3),非灌溉季节基本不开采地下水,受侧向径流补给,地下水位持续上升,灌溉季节随

着地下水开采强度增大,开采量超过径流补给量,地下水位开始下降,大多在 9 月达最低水位,径流补给强度大,水位降幅相对较小,且稍滞后,动态曲线呈 S 形。

(3) 径流型。分布在灌区周边,地下水开采强度小,地下水位变化主要受到地下径流影响,地下水位主要随水力坡度变化,变化幅度较小。以  $G_{21}$  监测井为例(图 3),地下水位受到上游补给强度和下游开采强度的影响呈波动变化。

(4) 蒸发型。分布在迪坎乡最南部,土地利用类

型为草地及林地,地下水开采强度小,地下水位变化主要受自然因素影响,地下水埋深浅,年内变化幅度小。以  $G_{16}$  监测井为例(图 3),随着气温升高,蒸发量变大,地下水位下降,低水位期出现在气温较高的 6—9 月。

### 3.2 地下水位时空动态特征

3.2.1 地下水位变化趋势 鄯善县南、北盆地间水力联系较弱,地下水位变化规律不同,分别绘制 2011—2020 年南北盆地地下水埋深年际变化趋势(图 4)。

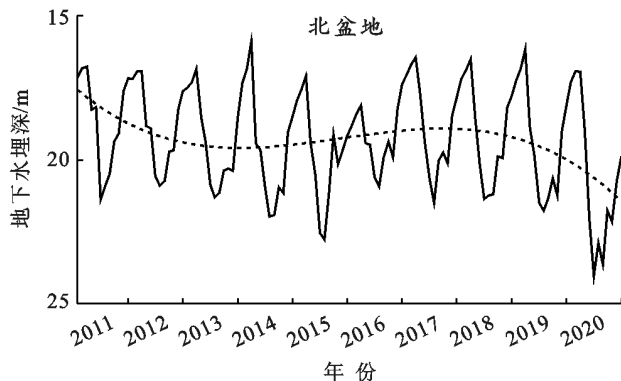


图 4 研究区 2011—2020 年地下水位年际变化趋势

Fig.4 Interannual variation trend of groundwater level in the study area from 2011 to 2020

利用 M-K 检验法及累积距平法对地下水位变化趋势进行突变检验(图 5)。结果表明,M-K 检验求得南盆地与北盆地地下水位变化趋势突变时间均为 2015 年;累计距平法求得北盆地地下水位变化趋势突变时间为 2015 及 2018 年,南盆地突变时间为 2015 年。综合突变点检验结果划分北盆地与南盆地地下水位变化阶段,北盆地划分为 2011—2015 年、2015—2018 年及 2018—2020 年;南盆地划分为 2011—2015 年及 2015—2020 年。①2011—2015 年:地下水位整体呈显著下降趋势,北盆地地下水位年均下降速度为 0.29 m/a,南盆地地下水补给条件较差,地下水位下降速度为 1.53 m/a,下降趋势更加显著;②2015—2018 年:地下水位整体下降减缓,北盆地地下水位以 0.23 m/a 的速度上升,南盆地地下水位下降速度减小至 0.60 m/a;③2018—2020 年:北盆地地下水位整体变为下降趋势,下降速度为 0.77 m/a。

3.2.2 地下水位空间变化 利用克里金插值法绘制研究区 2011 年及 2020 年地下水埋深分区图(图 6),2011 与 2020 年鄯善县地下水埋深总体分布情况基本一致。北盆地地下水埋深自北向南方向递减,南盆地自西北向东南方向递减。北盆地北部地势较高区域受地势与含水层性质影响地下水埋深大于 120 m,为鄯善县地下水埋深最大区域,靠近火焰山地下水埋

深变浅,最南部东巴扎乡、小东湖一带等区域有泉水出露。南盆地地下水埋深大多介于 40~80 m,南部靠近沙漠区域地下水埋深小于 10 m。绘制 2011—2020 年地下水位下降速度分区图(图 6),南盆地地下水位下降较北盆地更为显著,2012 年鄯善县开展地下水取用水量控制示范研究,2012—2020 年地下水开采量整体呈减小趋势,北盆地地下水位整体下降幅度小,除七克台镇东部区域地下水位下降速度较大( $>0.5$  m/a),其他区域地下水位较为稳定,且部分区域地下水位上升。南盆地地下水位下降显著,吐峪沟乡、鲁克沁镇、迪坎乡区域等农业灌溉集中区域,地下水开采强度大,地下水位下降速度大于 1.0 m/a。

### 3.3 地下水位变化影响因素分析

#### 3.3.1 自然因素

(1) 气象因素。研究区属于内陆干旱气候,年均降水量仅为 25 mm 左右,而潜在蒸发量可达 2 751~3 217 mm,降水对地下水无法形成有效补给,对研究区地下水位动态影响较小。据研究区相关研究结果表明,地下水潜水蒸发极限埋深为 5.5 m,随着地下水位不断下降,研究区地下水埋深小于 5.5 m 的区域主要分布在南盆地与北盆地最南部,仅占研究区面积 2.5%,因此潜水蒸发对研究区地下水位动态影响较小。

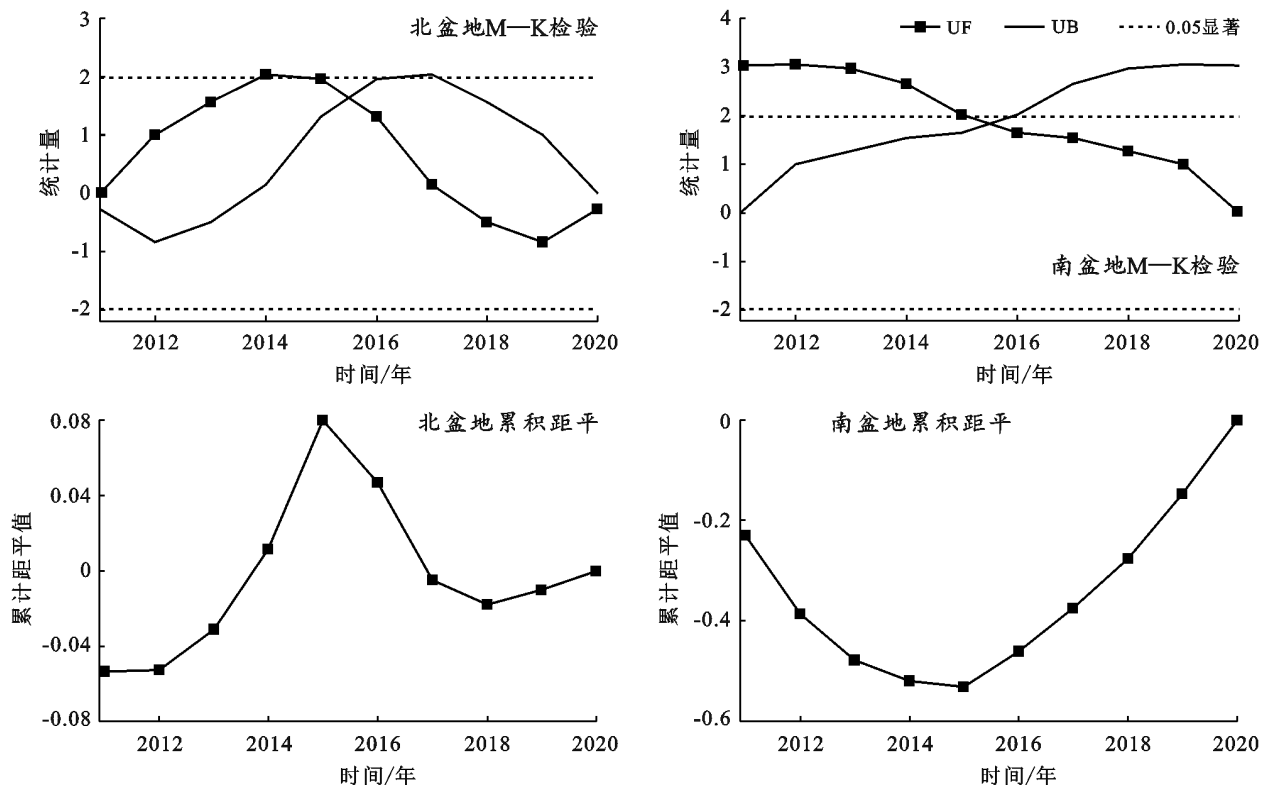


图 5 研究区 2011—2020 年地下水水位变化趋势突变检验

Fig.5 The mutation test of groundwater level change trend in the study area from 2011 to 2020

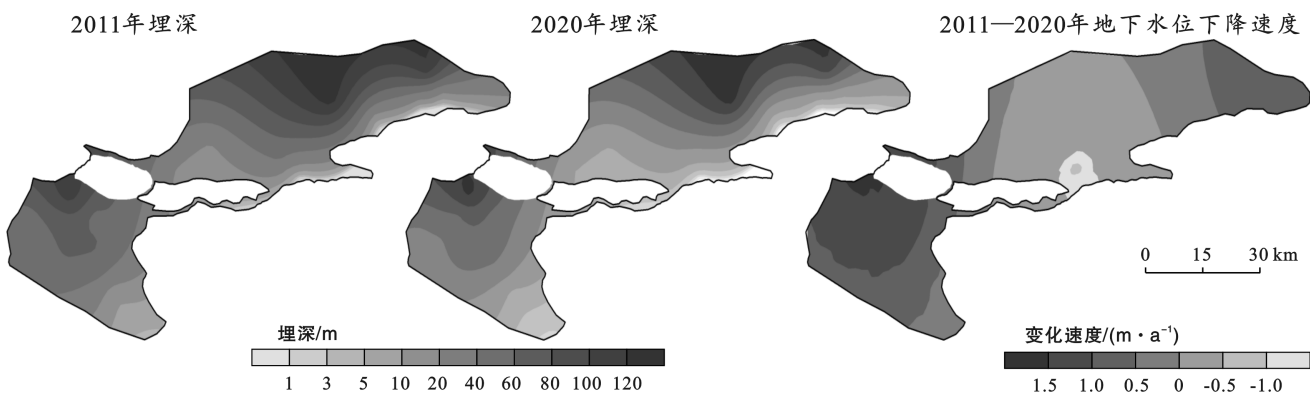


图 6 研究区 2011 和 2020 年地下水埋深与变化速度分布

Fig.6 Distribution of groundwater depth and change rate in the study area in 2011 and 2020

(2) 水文因素。研究区地表水系主要由发源于天山山脉的坎儿其河、二塘沟河、柯柯亚河三条河流构成,在平原区通过河道入渗、渠道入渗、田间入渗转化为地下水。随着径流量不断衰减,南盆地河道干枯,地表水资源主要分布北盆地,因此地表水资源量的变化对北盆地地下水动态具有一定影响,对南盆地影响较小。

3.3.2 人为因素 地下水水位变化受到自然因素与人为因素共同影响,在干旱与半干旱地区人为因素往往占据主导地位<sup>[24]</sup>。研究区气候干旱、降水极少,水资源极端匮乏,地下水的主要排泄为人工开采,农业灌溉用水量占水资源利用量 84.21% 以上,且地下水资

源供水量占水资源供水量的 71.18%,区域生产发展高度依赖于地下水,人工开采是地下水水位变化的重要影响因素。

3.3.3 影响因素相关性分析 为了进一步分析各因素对地下水水位变化的影响程度,自然因素中选取径流量与降水量,人为因素中选取地下水开采量,分析各因素与地下水水位变化的相关性,并采用多元 Logistic 回归模型<sup>[25]</sup> 计算各因素对地下水水位变化的贡献率,结果详见表 2。结果表明,南盆地地下水开采量与地下水水位具有显著相关性,对地下水水位变化的贡献率为 89.74%,径流量及降水与地下水水位变化相关性较小;北盆地地下水开采量及径流量与地下水水位变化具有

显著相关性,地下水开采量对地下水位变化贡献率最高,为 68.46%,其次为径流量,贡献率为 28.37%,降水与地下水位相关性较低。

表 2 研究区地下水位变化与各影响因素相关性检验分析

Table 2 Correlation test analysis of groundwater level change and influencing factors in the study area

区域	项目	地下水开采量	径流量	降水
北盆地	Pearson 相关性	0.84**	-0.74*	-0.44
	贡献率	68.46%	28.37%	3.17%
南盆地	Pearson 相关性	0.87**	-0.46	-0.32
	贡献率	89.74%	7.79%	2.76%

注: \*\* 在 0.01 级别,相关性显著; \* 在 0.05 级别,相关性显著。

### 3.4 地下水位变化趋势预测

3.4.1 Hurst 指数空间分布 利用 R/S 分析法计算研究区 2011—2020 年地下水埋深序列的 Hurst 指数,绘制研究区 Hurst 指数等值线图(图 7)。结果表明研究区全部区域的 Hurst 指数均大于 0.55,表明地下水埋深时间序列具有长程相关性,但不同区域 Hurst 指数有所差异,地下水埋深时间序列持续性强度不同。根据 Hurst 指数的大小,将研究区地下水埋深时间序列持续性强度分为 4 个等级,分别为弱(0.55~0.65)、较弱(0.65~0.75)、较强(0.75~0.80)、强(0.80~1.00)。由图 7 可知,北盆地七克台镇及辟展乡南部 Hurst 指数在 0.75~0.80,地下水埋深时间序列具有较强持续性,北盆地其他区域 Hurst 指数均小于 0.75,持续性较弱。南盆地由北向南 Hurst 指数逐渐减小,地下水埋深时间序列持续性逐渐减弱,吐峪沟及达浪坎农业灌溉集中区域 Hurst 指数为 0.80~1.00,表现出强持续性特征,地下水时间序列长程相关性最为显著。

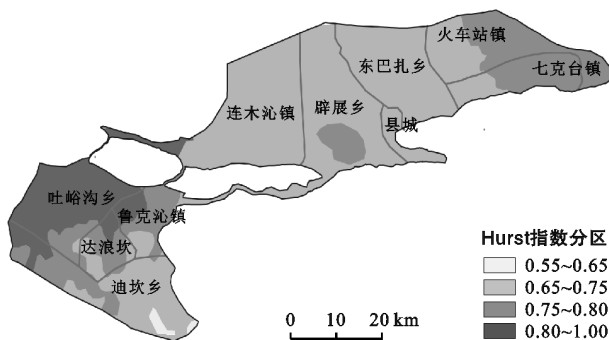


图 7 研究区 Hurst 指数分区

Fig.7 Hurst index partition of the study area

3.4.2 Hurst 指数验证与地下水位演变趋势预测 利用 R/S 分析法计算地下水时间序列的 Hurst 指数,通过 Hurst 指数的大小反映时间序列的持续性,可预测区域地下水位的变化趋势,但该方法对研究区

地下水位变化趋势预测的准确性需进一步探讨,地下水时间序列的标准差可以反映出地下水位的动态程度。为了进一步检验 Hurst 对地下水位变化趋势预测的准确性,将研究区南盆地与北盆地基于标准差分别划分为低(L)、中(M)、高(H)区域(图 8)。其中南盆地地下水位均呈下降趋势,根据标准差划分为 3 个区域,北盆地辟展乡地下水位上升,其他区域地下水位下降,划分为 1 个上升区域与 3 个下降区域。

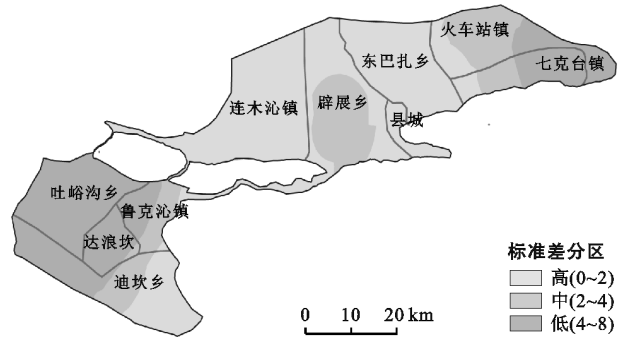


图 8 研究区地下水时间序列标准差分区

Fig.8 Standard deviation partition of groundwater time series in the study area

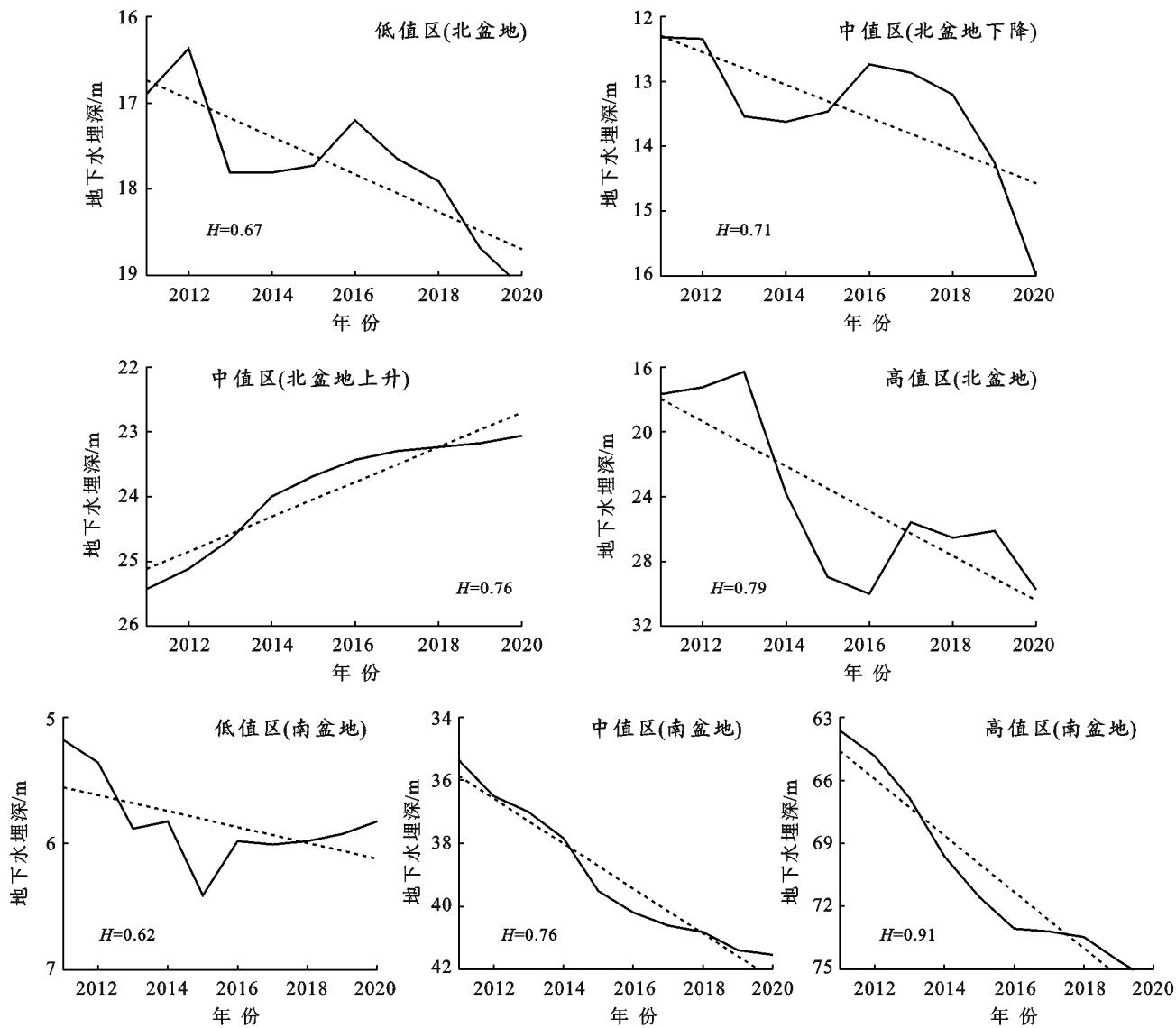
分别绘制研究区各分区地下水埋深变化趋势图(图 9)。结果表明,各分区地下水时间序列 Hurst 指数均大于 0.55,地下水埋深变化趋势具有长程相关性。通过对比各分区地下水埋深变化趋势可知,区域标准差越大,地下水埋深变化趋势越明显,Hurst 指数越大,地下水埋深变化趋势持续性更加显著。利用标准差将 Hurst 指数与地下水动态变化对比,表明 Hurst 指数对研究区地下水位变化趋势的预测较为准确。根据研究区 Hurst 指数等值线图(图 7)结合研究区地下水位变化分区图(图 6),对研究区未来一段时间地下水位变化趋势进行预测。在外界条件稳定的情况下,北盆地七克台镇地下水位将会持续下降,辟展乡区域地下水位持续上升,其他区域地下水位将会维持现状,变化趋势不明显,主要呈波动变化;南盆地北部灌区地下水位将会持续下降,下降趋势显著,南部地下水位将会呈不显著的下降趋势。

## 4 讨论

本文基于水文地质条件定性分析与实测数据定量分析相结合的思路,将聚类分析法与相关性分析法相结合应用于地下水动态类型划分。地下水动态类型划分传统方法<sup>[25-26]</sup>主要基于定性分析,根据地下水动态变化曲线特点进行分类,易造成划分结果多解性。由于不同地区地下水埋藏条件和成因各不相同,地下水动态成因类型划分存在规则不统一,量化低

等问题<sup>[27]</sup>。本文基于鄯善县地下水水位实测数据,利用聚类分析法对地下水水位变化过程曲线特征进行初步分类,并对地下水开采量、蒸发量、降雨量等多源数据与地下水水位变化进行相关性分析,结合土地利用类

型及水文地质条件判别地下水动态类型,并对典型地下水动态类型变化特点及主要影响因素进行探讨,总结了适合鄯善县地下水动态类型划分标准,提高了研究结果的准确性。



注:实线表示地下水埋深时间序列,虚线表示地下水埋深变化趋势。

图 9 各分区地下水埋深变化趋势

Fig.9 Variation trend of groundwater depth in each subregion

地下水动态类型划分结果表明鄯善县地下水动态类型 75% 为开采型,多元 Logistic 回归模型计算显示地下水开采量对北盆地及南盆地地下水水位变化贡献率分别为 68.46% 及 89.74%,地下水开采是南、北盆地地下水水位变化最重要的影响因素。为缓解地下水水位持续下降现象,2012 年实施最严格水资源管理制度,政策实施初期地下水开采未实现有效控制,地下水水位仍保持严重下降趋势,2015 年鄯善县进一步加强地下水资源管理,严格控制地下水开采,累计封停机井 365 眼,地下水水位开采量减少  $8.20 \times 10^7 \text{ m}^3$ ,

北盆地地下水水位由下降趋势变为上升趋势,南盆地地下水水位下降速度显著减小,地下水水位下降趋势得以有效缓解。2018 年径流量减小,造成北盆地地表水资源供水量减少  $3.60 \times 10^7 \text{ m}^3$ ,最终导致北盆地地下水开采量增加,地下水水位由上升趋势变为下降趋势。地下水水位对地下水开采量的变化响应十分显著,为进一步缓解地下水水位下降趋势,应持续加强地下水资源管理,尤其是在七克台镇及南盆地北部灌区等地下水水位未来持续下降区域,以压减地下水开采量为主,开展水源置换及地下水回补协调措施,实现地下水采补平衡。



## 5 结论

(1) 基于水文地质条件定性分析与实测数据定量分析相结合的思路,将鄯善县地下水位划分为开采型、径流—开采型、径流型及蒸发型 4 种动态类型,以开采型为主,占比达 75%。

(2) 通过时间序列分析结合地下水位变化影响因素分析,2015 年受地下水开采量减少影响,北盆地地下水位由下降趋势变为上升趋势,南盆地下降趋势显著缓解;2018 年径流量减少,导致北盆地地表水供水量减少,地下水开采量增加,地下水位变为显著下降趋势。

(3) 多元 Logistic 回归分析表明,北盆地地下水位变化的主要驱动因素为地下水开采量及径流量,南盆地主要为地下水开采量。各因素中地下水开采量与北盆地及南盆地地下水位相关性均最高,对北、南盆地地下水位变化的贡献率分别为 68.46%,89.74%。

(4) 北盆地七克台镇、辟展乡及南盆地北部灌区 Hurst 指数大于 0.75,在外界因素保持稳定的情况下,七克台镇及南盆地北部灌区区域地下水位将会持续下降,辟展乡地下水位持续上升,其他区域 Hurst 指数为 0.55~0.75,地下水位将呈不显著的变化趋势,呈波动变化。

### [ 参 考 文 献 ]

- [1] 蔡奕,徐佳,朱勃,等.濮阳市浅层地下水位时空演变特征及驱动机制[J].灌溉排水学报,2021,40(10):109-116.
- [2] 吴彬,杜明亮,杨鹏年,等.近 60 年鄯善县地下水补排量演变与坎儿井流量衰减关系[J].农业工程学报,2016,32(16):102-108.
- [3] 殷秀兰,李圣品.基于监测数据的全国地下水水质动态变化特征[J].地质学报,2021,95(5):1356-1365.
- [4] 郭海朋,白晋斌,张有全,等.华北平原典型地段地面沉降演化特征与机理研究[J].中国地质,2017,44(6):1115-1127.
- [5] Kang R. Spatial pattern of ground water level changes in the irrigated agricultural region of Bist Doab, Punjab, India [J]. Singapore Journal of Tropical Geography, 2018,39(1):75-89.
- [6] Hu K X, Awange J L, Kuhn M, et al. Spatio-temporal groundwater variations associated with climatic and anthropogenic impacts in South-West Western Australia [J]. Science of the Total Environment, 2019,696(C):133599.
- [7] 姚蕊,孙鹏,张强,等.淮北平原区浅层地下水埋深时空分布特征[J].中山大学学报(自然科学版),2020,59(2):110-119.
- [8] 中国科学院.中国学科发展战略—地下水科学[M].北京:科学出版社,2018.
- [9] 孙青言,郭辉,陆垂裕.地下水动态演变研究现状与发展趋势[J].灌溉排水学报,2021,40(S1):58-64.
- [10] 杜伟,魏晓妹,李萍,等.变化环境下灌区地下水动态演变趋势及驱动因素[J].排灌机械工程学报,2013,31(11):993-999.
- [11] Zheng Chunmiao, Liu Jie, Cao Guoliang, et al. Can China Cope with Its Water Crisis? Perspectives from the North China Plain [J]. Ground Water, 2010, 48(3):350-354.
- [12] 敖菲,于静洁,王平,等.黑河下游地下水位变化特征及其原因[J].自然资源学报,2012,27(4):686-696.
- [13] 邓康婕,魏晓妹,降亚楠,等.基于地统计学的泾惠渠灌区地下水位时空变异性研究[J].灌溉排水学报,2015,34(3):75-80.
- [14] 高宇阳,杨鹏年,阚建,等.人类活动影响下乌苏市地下水埋深演化趋势[J].灌溉排水学报,2019,38(10):90-96.
- [15] 许璇.新疆鄯善县地下水开发利用“红线”管理研究[D].新疆 乌鲁木齐:新疆农业大学,2012.
- [16] 闫云霞,王随继,颜明,等.张掖盆地中部地下水位时空变化及机理探讨[J].干旱区资源与环境,2014,28(11):90-97.
- [17] 薛雨婷,李谢辉,王磊,等.1976—2017 年西南地区夏季不同等级降水时空变化特征[J].西南大学学报:自然科学版,2022,44(2):137-145.
- [18] 白宜斐,王戈,陈亚宁,等.叶尔羌河流域灌区地下水埋深变化及影响因素分析[J].水资源与水工程学报,2019,30(6):242-249.
- [19] 宋子奕,鲁程鹏,吴成城,等.2009—2019 年河西走廊地下水位时空分布及演变趋势[J].水资源保护 2023,39(2):160-167.
- [20] 祁晓凡,李文鹏,李传生,等.济南岩溶泉域地下水位与降水的趋势性与持续性[J].灌溉排水学报,2015,34(11):98-104.
- [21] 胡海华,丁宏伟,贺兵英.石羊河流域中下游近 40 年地下水位动态特征分析[J].西北地质,2016,49(3):164-174.
- [22] 董新光,邓铭江.新疆地下水科学[M].新疆 乌鲁木齐:新疆科学出版社,2005:112-157.
- [23] 商佐.吐鲁番盆地地下水动态特征及控制性水位分析[D].北京:中国地质大学,2020.
- [24] 魏士禹,郭云彤,崔亚莉,等.1985—2016 年民勤地下水位及储变量动态特征分析[J].干旱区地理,2021,44(5):1272-1280.
- [25] 王占全,李海明,杨丽霞,等.太原市冲积平原区潜水水位动态变化趋势分析[J].人民黄河,2018,40(7):58-62.
- [26] 魏兴,贾瑞亮,周金龙,等.新疆玛纳斯河流域典型剖面地下水位动态分析[J].南水北调与水利科技,2017,15(5):127-133.
- [27] 冶雪艳,吴亚敏,杜新强,等.潜水地下水动态成因类型的综合判别方法:以三江平原松花江流域为例[J].水科学进展,2022,33(1):68-78.