

DOI:10.3880/j.issn.1004-6933.2023.02.020

2009—2019年河西走廊地下水位时空分布及演变趋势

宋子奕, 鲁程鹏, 吴成城, 刘波, 束龙仓

(河海大学水文水资源学院, 江苏南京 210098)

摘要:基于2009—2019年河西走廊的地下水位资料,运用地统计学方法研究了河西走廊地下水位的空间分布特征;采用基于分形理论的 R/S 分析法计算地下水埋深时间序列的Hurst指数,分析了地下水位的动态演变趋势。结果表明:2009—2019年河西走廊的地下水位总体呈现持续下降的趋势;河西走廊地下水位变化与灌溉面积相关性最强,其次为人口数量和地下水供水量;预计在未来一段时间内,金昌、武威、白银以及酒泉中部区域的地下水位将持续下降,而酒泉西部地区与张掖大部分地区的地下水位将不呈现明显的变化趋势,以随机波动变化为主。

关键词:地下水位;分形理论;Hurst指数;地统计学;河西走廊

中图分类号:TV211.1 **文献标志码:**A **文章编号:**1004-6933(2023)02-0160-08

Spatiotemporal distribution and evolution trend of groundwater level in Hexi Corridor from 2009 to 2019// SONG Ziyi, LU Chengpeng, WU Chengcheng, LIU Bo, SHU Longcang (College of Hydrology and Water Resources, Hohai University, Nanjing 210098, China)

Abstract: Based on the observational data of groundwater level in Hexi Corridor from 2009 to 2019, this study used the geostatistical method to investigate the spatial distribution characteristics of groundwater level in Hexi Corridor, and also used R/S analysis based on fractal theory to calculate the Hurst exponent of groundwater depth time series and to analyze the evolution trend of groundwater level. Results showed that the groundwater level in Hexi Corridor had a continuously declining trend from 2009 to 2019; the groundwater level in Hexi Corridor had the highest correlation with irrigated area, followed by population and groundwater supply; the groundwater level in Jinchang, Wuwei, Baiyin, and the central area of Jiuquan would continue to decline in the coming period, while the groundwater level in the western part of Jiuquan and most areas of Zhangye would not show obvious variation trends and would fluctuate randomly.

Key words: groundwater level; fractal theory; Hurst exponent; geostatistics; Hexi Corridor

中国拥有约20%的世界人口,但仅拥有全球淡水资源总量的5%~7%,因此日常生活用水大量依赖于地下水资源^[1-3]。河西走廊位于我国西北部地区,降水量少,潜在蒸发量高,为典型干旱区,地下水在饮用水和灌溉用水以及维持区域生态平衡方面发挥着至关重要的作用^[4-6]。在过去的几十年里,由于对河西走廊水循环认识不足以及对地下水的开采管理不善造成了严重后果,如地下水矿化严重、区域地下水位下降、植被退化、土地荒漠化和盐碱化、沙尘暴频发等^[7]。因此,研究河西走廊地区地下水的时空分布特征及其演变趋势对该地区及类似干旱地区水资源的合理利用与可持续发展都具有

重要的现实意义^[8]。

地统计学方法越来越多地用于水文学和生态学领域^[9-10],它可以准确描述环境的空间变异规律,揭示研究对象的空间变异性与空间格局,是研究水资源变化的有效方法。国际上已有学者探索采用地统计学方法研究水资源变化,如Delhomme^[11]使用克里金插值分析降水数据,Budiman等^[12]使用地统计学方法研究沙特阿拉伯地下水的动态变化,Seyedmohammadi等^[13]应用克里金插值分析伊朗地下水储量的空间变化。分形理论为地下水位演变趋势特征研究提供了有力的理论基础,分形行为研究始于Hurst^[14]的水坝蓄水量调查,此后Mandelbrot^[15]首次

基金项目:国家重点研发计划(2021YFC3200502);江苏省水利科技项目(2018005)

作者简介:宋子奕(1998—),女,硕士研究生,主要从事水文学及水资源研究。E-mail:1024609549@qq.com

通信作者:鲁程鹏(1984—),男,教授,博士,主要从事水文学及水资源研究。E-mail:luchengpeng@hhu.edu.cn

明确提出分形理论,并作进一步拓展^[16-17],使其可以应用于多种水文领域。地下水位动态演变趋势具有分形特征也已得到证明,如 Sutton 等^[18]通过美国佐治亚州地下水位的 Hurst 指数探究地下水位的下降因素,于苗等^[19]研究济南泉群的水位时间序列分形并探究水位波动影响因素,Zhang 等^[20]研究发现地下水位波动时间序列的分形维因地区而异,Zhang 等^[21]研究发现地下水位可能会随时间的分形而波动,Joelson 等^[22]证明了在降雨过程中地下水位动态的分形特征。

在前人研究的基础上,本文以水文资料为基础,运用地统计学与分形理论分析河西走廊地下水位的空间分布特征,并对地下水位的演变趋势做出科学预判,以为河西走廊的地下水开发利用与保护提供指导。

1 研究区概况与研究方法

1.1 研究区概况

河西走廊(93°27'~104°12'E,37°19'~40°53'N)位于甘肃省西北部、黄河以西,为南山(祁连山)和北山(合黎山、龙首山)之间的一条长廊(图 1),东起乌鞘岭,西至玉门关,东西跨度超过 1 000 km,南北宽 40~100 km,海拔约 1 500 m,大部分为山前倾斜平原^[23-24]。河西走廊的三大河流均发源于祁连山,自西向东分别是疏勒河、黑河和石羊河^[25]。该地区因其丰富的土地与光热资源,是我国西北地区最重要的商品粮基地之一,呈现典型的干旱区特征,年平均气温 5~9℃,年降水量 50~150 mm,年蒸发量 1 500~3 200 mm^[26]。河西走廊处于祁连山地槽边缘拗陷带,由一系列具有共生关系的构造-地貌盆地所组成。河西走廊含水层岩性变化总趋势由山前向平原变细,地下水主要储存在各盆地第四纪松散的地层

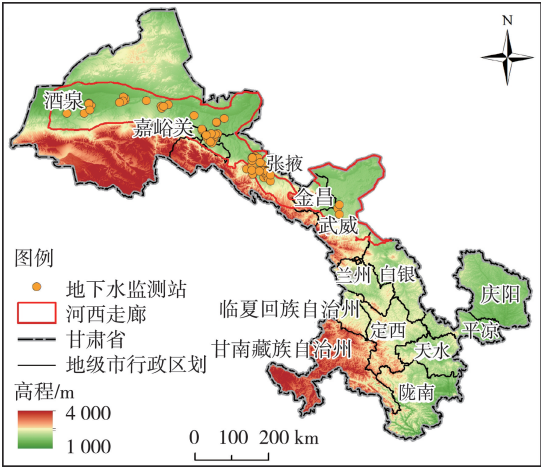


图 1 研究区概况

Fig. 1 Overview of study area

内,浅层地下水具有典型山前平原自流斜地特征^[27]。河西走廊大部分地区地下水流向复杂,主要由南向北流动,在张掖西部转为由东向西流动。

1.2 研究数据

研究区 2009—2019 年浅层地下水埋深监测数据来自水利部信息中心,研究期为 2009 年 1 月 1 日至 2019 年 12 月 31 日;人口、灌溉面积、降水量、浅层地下水供水量等对浅层地下水位有较大影响的变量数据摘录自甘肃省水资源公报(<http://slt.gansu.gov.cn/slt/c106726/c106732/c106773/zcfg.shtml>),如表 1 所示。选择位于河西走廊的 66 个浅层地下水人工监测站每月 1 日 8:00 记录的测点浅层地下水埋深数据,所选择的地下水监测站分布如图 1 所示。地下水监测站所处位置均位于平原地区,各测点高程相差较小,因此测得的地下水埋深具有区域可比性。地下水埋深与地下水位的变化在数值上是一致的,考虑到数据的可获取性,文中对时间序列的分析都使用地下水埋深时间序列,地下水位空间分布则是利用埋深分布与地表高程数据叠加得到。由于地下水监测站可能发生故障或者其他问题,地下水埋深时间序列记录中可能会出现数据缺失或异常值,采用牛顿插值法对数据进行修正和插补^[28]。

表 1 2009—2019 年研究区主要研究数据

年份	降水量/mm	浅层地下水 供水量/亿 m ³	人口/万人	灌溉面积/ 万 hm ²
2009	103.4	17.44	478.22	64.84
2010	133.1	17.63	466.97	65.67
2011	117.9	17.87	469.05	66.25
2012	131.4	18.80	472.82	66.55
2013	115.4	23.56	475.13	83.36
2014	112.8	22.11	476.69	83.52
2015	142.2	21.33	478.23	83.86
2016	148.8	20.31	479.47	84.06
2017	128.5	20.11	481.12	84.11
2018	142.1	19.90	480.26	84.33
2019	195.5	19.84	479.33	84.31

1.3 研究方法

采用地统计学研究河西走廊地下水位的空间分布特征,采用基于分形理论的重标极差方法(R/S 分析法)计算地下水埋深时间序列的 Hurst 指数,从而分析地下水位的动态演变趋势。

1.3.1 地统计学方法

地统计学方法的基本工具有半变异函数与克里格插值^[29],经过对比发现,研究区地下水埋深的半变异函数值与指数模型拟合较好,其通式^[30]为

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

式中: C_0 为块金值,指当两个采样点非常接近时,由于测量误差和空间变异而产生的半变异函数值; C 为偏基台值; h 为步长; $C_0 + C$ 为基台值,当采样点距离随着 h 增大时,半变异函数将达到一个相对稳定的常数; a 为变程,反映了空间相关性的作用范围。

本文采用普通克里格插值法对研究区的地下水埋深进行插值,并结合研究区的地形数据,利用ArcGIS的数学分析工具,将地下水埋深空间分布转化为地下水位空间分布。当被训练的数据变量遵循正态分布时,普通克里格插值的结果会更精确,因此采用Kolmogorov-Smirnov单样本检验(K-S检验)检查数据是否符合正态分布或对数正态分布。如果地下水埋深数据集符合对数正态分布,则进行对数转换以使数据正态化。

1.3.2 R/S 分析法

R/S分析法通常用于分析时间序列的分形特征和长程相关性。在分析极差 R 与标准差 S 比值的统计规律时,Hurst发现一个关系表达式,可以用于识别时间序列中的持续性现象。该式为

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

式中: τ 为正整数; T 为时间序列的数据点数目; H 为Hurst指数。

当 $H=0.5$ 时,表明该过程是随机的;当 $H>0.5$ 时,表明该过程具有持续性特征,时间序列的未来趋势将与过去保持一致;当 $H<0.5$ 时,表明该过程具有反持续性特征,时间序列的未来趋势将与过去相反。

黄勇等^[31]在进行圣彼得堡的地下水位动态分析时,证明了R/S分析法是进行地下水动态分析的有效方法;张殷钦等^[32]采用R/S分析法分析兴平市地下水埋深时间序列,结果表明Hurst指数能很好地揭示地下水埋深时间序列的趋势性。基于以上成功案例,本文采用R/S分析法对河西走廊地下水位埋深时间序列进行长程相关性的探讨。

表 2 研究区地下水埋深统计特征

Table 2 Statistical characteristics of groundwater depth in study area

年份	平均值/m	中位数/m	变异系数	峰度	偏度	峰度(对数转换)	偏度(对数转换)
2009	10.4	7.0	0.89	3.44	1.78	-0.21	0.08
2010	10.4	6.7	0.90	3.43	1.80	-0.15	0.13
2011	10.6	7.1	0.91	3.10	1.75	-0.09	0.03
2012	10.6	7.2	0.92	3.21	1.77	0.43	-0.39
2013	11.3	7.6	0.92	3.10	1.76	0.51	-0.23
2014	11.9	8.2	0.89	2.46	1.61	0.21	-0.18
2015	12.0	8.4	0.91	2.73	1.68	0.53	-0.30
2016	12.0	8.5	0.93	3.14	1.77	0.12	-0.15
2017	12.7	9.1	0.92	2.95	1.73	0.34	-0.24
2018	13.8	9.6	0.92	3.23	1.76	0.28	-0.38
2019	13.0	9.7	0.94	3.50	1.82	0.31	-0.24

2 结果与分析

2.1 河西走廊地下水位时空分布

河西走廊的地下水埋深数据并不遵循正态分布,但经过对数转换处理后,其地下水埋深数据的峰度与偏度接近于0,且全部通过K-S检验,表明对数转换之后的地下水埋深数据符合正态分布,可以进行地统计分析。河西走廊的地下水埋深统计值见表2,其中地下水埋深的平均值和中位数整体表现为随时间的变化而持续增大,说明2009—2019年河西走廊总体呈现地下水埋深持续增大、地下水位持续下降的变化趋势。

图2为河西走廊2009年地下水位空间分布,河西走廊覆盖酒泉、嘉峪关、张掖、金昌、武威和白银6个地级市,金昌地区海拔较高而其他地区海拔较低,呈现典型山前平原自流斜地特征。由于河西走廊海拔较高,而地下水位的变动相对于海拔来说很小,各年的地下水位空间分布图相差不明显。因此,本文采用2010—2019年相对于2009年的地下水位变化(图3)来表示地下水位的动态变化。

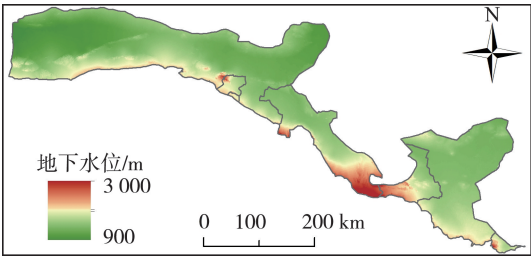


图 2 2009 年河西走廊地下水位空间分布

Fig. 2 Spatial distribution of groundwater level in Hexi Corridor in 2009

图3表明河西走廊地下水位呈现持续下降的变化趋势。不同地区的地下水位变化幅度不尽相同,仅从空间分布来看,河西走廊地下水位变化幅度呈现“两头大中间小”的现象,即酒泉、金昌、武威及白银地区地下水位下降更为明显,而嘉峪关、张掖地区

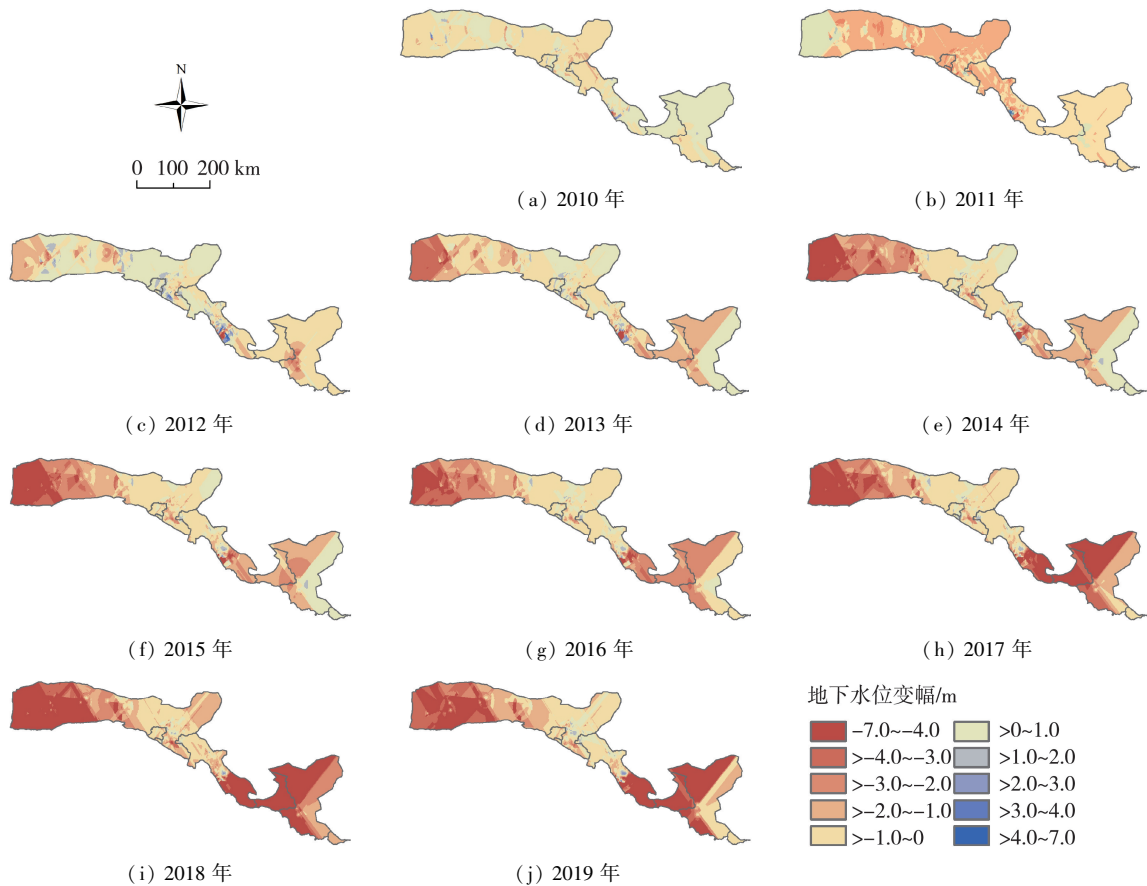


图3 河西走廊地下水位变化空间分布

Fig.3 Spatial distribution of groundwater level variation in Hexi Corridor

地下水位下降更为平缓。具体来讲,酒泉地区的地下水位呈现明显的下降趋势,与2009年相比,该地区2017年地下水位下降基本达到极值,整体约达7 m,此后酒泉地区的地下水位变化幅度较小,但仍呈持续下降趋势;嘉峪关与张掖地区地下水位变幅较小,与2009年相比,2010—2019年该地区的地下水位呈现下降趋势,但地下水位下降量仅为1~2 m;金昌、武威及白银地区的地下水位同样呈现下降趋势,与2009年相比,该地区2010—2015年地下水位下降量较小,但2016年以后地下水位下降量陡增,表明存在相关因素使得该地区地下水位变幅增大。

2.2 河西走廊地下水埋深时间序列的Hurst指数时空分布

Hurst指数的大小可以用来判断地下水埋深时间序列长程相关性程度。一般来说,Hurst指数越大,地下水埋深时间序列的记忆性越强,保持以前变化趋势的能力就越强^[33]。

使用R/S分析法计算了研究区内每个地下水测站2009—2019年地下水埋深时间序列的Hurst指数,其空间分布如图4所示。由图4可见河西走廊全域的Hurst指数均大于0.50,表明研究区地下水埋深时间序列均具有长程相关性,但不同区域的地

下水埋深时间序列持续性强度略有不同。根据Hurst指数的大小,将持续性强度由弱到强分为5个等级,分别为很弱(0.50~0.55)、较弱(>0.55~0.65)、较强(>0.65~0.75)、强(>0.75~0.80)和很强(>0.80~1.00),如图4所示。从空间来看,武威东部、白银及酒泉中部区域的Hurst指数在0.75~0.80之间,地下水埋深时间序列长程相关性特征表现为强持续性;金昌、武威西北部及酒泉大部分区域的Hurst指数在0.65~0.75之间,地下水埋深时间序列长程相关性特征表现出较强的持续性;其他地区的Hurst指数在0.50~0.65之间,表现出弱持续性特征,地下水埋深时间序列长程相关性特征不显著。

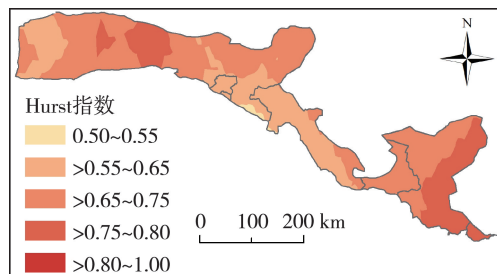


图4 河西走廊地下水埋深时间序列Hurst指数空间分布

Fig.4 Spatial distribution of Hurst exponent of groundwater depth time series in Hexi Corridor

3 讨 论

3.1 河西走廊地下水位动态变化影响因素分析

河西走廊地下水位动态变化是自然因素和人为因素综合作用的结果^[34]。自然因素主要包括气象因素与水文因素,在气象因素中,降水与蒸发对地下水位动态变化产生主要影响,而水文因素主要表现为入渗、地表径流等。人为因素主要指农业灌溉、地下水开采等人类活动。在西北内陆干旱区这类水资源供需不平衡的地区,人类活动对水资源分布格局可能产生极大影响,进而影响地下水位的动态变化^[35]。本文根据甘肃省水资源公报和水利部信息中心地下水监测资料分析影响河西走廊地下水位动态变化的因素。

3.1.1 自然因素的影响

a. 气象因素。水文观测试验表明,浅层地下水蒸发主要发生在地下水埋深小于5 m的区域。而现有的地下水监测站资料显示,河西走廊地下水埋深小于5 m的区域只占20%,大部分区域的浅层地下水蒸发对地下水位的影响很微弱。河西走廊处于干旱区,降水量少且蒸发能力强,大气降水无法有效补给地下水,这在一定程度上削弱了降水对地下水位动态的影响。

b. 水文因素。河西走廊河流径流的主要补给来源为降水和冰雪融水,在平原地区通过河水入渗、渠道入渗、田间入渗补给转化为地下水。绝大部分的地下水资源由地表水体转换而来,因此对地表水体的开发利用会引起地下水补给资源的急剧变化,从而对地下水位动态造成影响。

3.1.2 人为因素的影响

甘肃省气候干旱、水资源缺乏,而河西走廊有冰雪融水作为水源,农业发达、地形平坦、交通便利。因此甘肃省的人口与城市主要集中分布在河西走廊,人类活动对当地的地下水位动态变化影响很大。

a. 农业灌溉的影响。河西走廊农业发展历史悠久,是甘肃省最重要的农业区,农业灌溉用水量约占河西走廊总用水量的85%。夏秋季节是河西走廊农业灌溉用水的高峰时期,需要大量引用地表水与抽取地下水。而夏秋季节的降水量占全年80%以上,径流量大且集中,农业灌溉对水资源的大量引用削弱了降水、径流对地下水的补给作用。从表1可以看出,2009—2019年河西走廊的灌溉面积先明显增大后保持稳定,这与图3中地下水位的变化过程高度一致,说明当地的农业灌溉对地下水位动态变化具有重要影响。

b. 人口分布的影响。河西走廊的人口数量与

人口分布对地下水位动态变化具有重要的影响。2009—2019年河西走廊的人口数量逐年增长,直接导致水资源利用量的增加。另外,受自然资源与社会经济影响,河西走廊的人口主要集中在河西走廊东南部地区,该地区人口密度最大,水资源的消耗量也较大,因此,地下水位相对较低。

3.1.3 影响因素相关性分析

为了深入分析各因素对浅层地下水影响程度,将2009—2019年河西走廊年平均地下水埋深分别与该地区人口数量、灌溉面积、降水量、浅层地下水供水量和径流量等因子进行相关性分析。并采用多元logistic回归^[36]探究各因素的权重,计算得出各个影响因素对地下水位动态变化的贡献率,结果如表3所示。

表3 研究区地下水埋深与各影响因素相关性及各影响因素贡献度分析

Table 3 Correlation between groundwater depth and various influencing factors and their contributions in study area

影响因素	Spearman 相关性	贡献率/%
灌溉面积	0.967 **	48.96
人口数量	0.805 **	24.23
地下水供水量	0.759 **	15.87
降水量	0.515	9.98
径流量	0.169	0.96

注: ** 表示在0.01级别(双尾)相关性显著。

由表3可见,2009—2019年河西走廊地下水埋深与灌溉面积的相关性最强,相关系数达到了0.967,其次为人口数量和地下水供水量,而与降水量和径流量的相关系数较低,文静等^[37]在研究河西走廊地下水埋深动态影响因素时得出了类似结论。通过多元logistic回归计算得出的贡献率可知,灌溉面积对地下水位动态变化的贡献率最高,达到48.96%,人口数量和地下水供水量对地下水位动态变化的贡献率分别为24.23%和15.87%,降水量和径流量对地下水位动态变化的贡献率很低,这与前文的分析一致。

3.2 Hurst 指数验证与地下水位演变趋势预测

如前所述,可利用R/S分析法计算出的Hurst指数预测研究区的地下水位演变趋势,但Hurst指数的预测准确性需要进一步探讨。不同区域的地下水位变化程度各有不同,而地下水埋深时间序列的标准差可以反映出地下水位的动态变化程度,为了验证Hurst指数预测地下水位演变趋势的可靠性,根据标准差将河西走廊分为低(0.0~0.8)、较低(>0.8~1.2)、中(>1.2~1.5)、高(>1.5~4.5)4类区域,如图5所示。

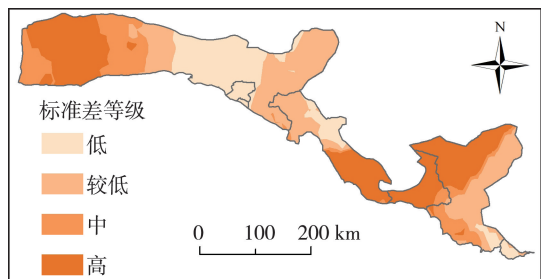


图5 研究区地下水埋深时间序列标准差分区

Fig. 5 Study area division based on standard deviation of groundwater depth time series

2009—2019 年研究区的地下水埋深呈现增大的趋势,将整个研究期划分为长度大致相同的两个时间段,即 2009—2013 年和 2014—2019 年,各时期各标准差分区的地下水埋深的变化趋势如图 6 所示。使用 R/S 分析法计算各标准差分区不同时间段的 Hurst 指数,其中 H_1 为 2009—2013 年地下水埋深时间序列的 Hurst 指数, H_2 为 2014—2019 年地下水埋深时间序列的 Hurst 指数。

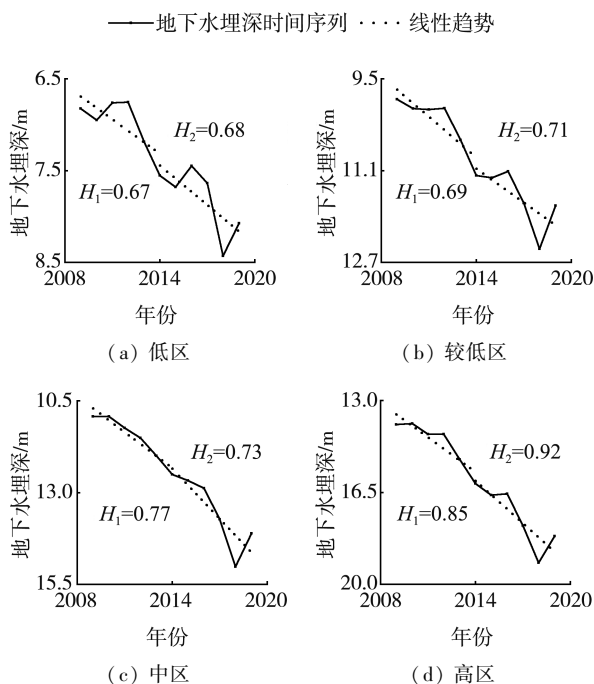


图6 不同标准差区域的地下水埋深演变趋势

Fig. 6 Evolution trends of groundwater depth in regions with different standard deviations

对于各标准差分区,两个时期的 Hurst 指数均大于 0.5,说明该研究区地下水埋深的演变趋势都具有长程相关性,即下一个时期与前一时期具有相同的趋势。如图 6 所示,从第 1 个时期到第 2 个时期,地下水埋深的增大趋势很明显,这些趋势与 Hurst 指数结果一致。从图 6 可以看出,标准差越大的区域,地下水埋深增大的趋势越明显,Hurst 指数越大,地下水埋深所具有的长程相关性更显著。通

过对 Hurst 指数与地下水埋深动态变化的对比,分析出 Hurst 指数具有良好的预测准确性,能够用来预测河西走廊地下水位的演变趋势。

根据图 4 研究区 Hurst 指数等值线结果,并结合图 3 地下水位动态变化图,可预测在未来一段时间内河西走廊地下水位的演变趋势。在外界影响因素保持稳定的情况下,预计在未来一段时间内,酒泉西部地区与张掖大部分地区地下水位将维持现状,不呈现明显的变化趋势;酒泉中部地区与金昌、武威、白银等地区地下水位将会持续下降,这与 Wen 等^[38-39]对河西走廊地下水位动态变化趋势的预测结论一致。

4 结 论

a. 2009—2019 年河西走廊地下水位整体呈现持续降低的演变趋势。分区域来看,该地区地下水位变幅出现东部与西部较大、中部较小的特征,呈现区域变异性。

b. 基于观测资料分析与多元 logistic 回归综合分析表明,河西走廊地下水位演变是自然因素和人为因素综合作用的结果,且与灌溉面积相关性最强,其次为人口数量和地下水供水量。

c. 金昌、武威、白银及酒泉中部地区地下水埋深时间序列的 Hurst 指数在 0.75 ~ 0.80 之间,外界影响因素保持稳定的情况下,预计在未来一段时间内,这些地区的地下水埋深将会持续增大,地下水位将持续下降,酒泉西部地区与张掖大部分地区地下水埋深时间序列的 Hurst 指数在 0.50 ~ 0.65 之间,地下水位将不呈现明显的变化趋势。

参考文献:

- [1] 李福林,陈华伟,王开然,等. 地下水支撑生态系统研究综述[J]. 水科学进展, 2018, 29(5): 750-758. (LI Fulin, CHEN Huawei, WANG Kairan, et al. Comprehensive review of groundwater-dependent ecosystems[J]. Advances in Water Science, 2018, 29(5): 750-758. (in Chinese))
- [2] 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. (CHEN Fei, XU Xiangyu, YANG Yan, et al. Investigation on the evolution trends and influencing factors of groundwater resources in China[J]. Advances in Water Science, 2020, 31(6): 811-819. (in Chinese))
- [3] 赵振,陈惠娟,秦光雄,等. 青海乌兰盆地地下水资源评价及可开采潜力分析[J]. 水资源保护, 2021, 37(6): 60-66. (ZHAO Zhen, CHEN Huijuan, QIN Guangxiong, et al. Groundwater resources evaluation and exploitable

- potential analysis in Wulan Basin, Qinghai Province[J]. Water Resources Protection, 2021, 37(6): 60-66. (in Chinese))
- [4] 尹立河,张俊,王哲,等. 西北内陆河流域地下水循环特征与地下水资源评价[J]. 中国地质, 2021, 48(4): 1094-1111. (YIN Lihe, ZHANG Jun, WANG Zhe, et al. Groundwater circulation patterns and its resources assessment of inland river catchments in northwestern China[J]. Geology in China, 2021, 48(4): 1094-1111. (in Chinese))
- [5] 王希义,徐海量,潘存德,等. 2000—2014 年塔里木河下游地下水补给量及合理需求量[J]. 水资源保护, 2017, 33(4): 32-39. (WANG Xiyi, XU Hailiang, PAN Cunde, et al. Study on groundwater recharge amount and suitable demand amount in lower reaches of Tarim River from 2000 to 2014[J]. Water Resources Protection, 2017, 33(4): 32-39. (in Chinese))
- [6] 凌敏华,陈万贺. 地下水资源对新疆经济社会支撑作用的定量评价[J]. 水资源保护, 2021, 37(2): 49-54. (LING Minhua, CHEN Wanhe. Quantitative evaluation of groundwater resources supporting economy and society in Xinjiang[J]. Water Resources Protection, 2021, 37(2): 49-54. (in Chinese))
- [7] WANG Liheng, DONG Yanhui, XU Zhifang. A synthesis of hydrochemistry with an integrated conceptual model for groundwater in the Hexi Corridor, northwestern China[J]. Journal of Asian Earth Sciences, 2017, 146: 20-29.
- [8] 王文科,宫程程,张在勇,等. 旱区地下水文与生态效应研究现状与展望[J]. 地球科学进展, 2018, 33(7): 702-718. (WANG Wenke, GONG Chengcheng, ZHANG Zaiyong, et al. Research status and prospect of the subsurface hydrology and ecological effect in arid regions[J]. Advances in Earth Science, 2018, 33(7): 702-718. (in Chinese))
- [9] 林莎,贺康宁,王莉,等. 基于地统计学的黄土高寒区典型林地土壤水分盈亏状况研究[J]. 生态学报, 2020, 40(2): 728-737. (LIN Sha, HE Kangning, WANG Li, et al. Soil moisture surplus and loss of typical forestland in loess alpine area by the geostatistical analyst method[J]. Acta Ecologica Sinica, 2020, 40(2): 728-737. (in Chinese))
- [10] 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. (YAO Ling, YANG Yang, SUN Guanfang, et al. Spatiotemporal variation in depth of groundwater table and water salinity in Hetao Irrigation District estimated using geostatistics[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2020, 39(8): 111-121. (in Chinese))
- [11] DELHOMME J P. Spatial variability and uncertainty in groundwater flow parameters: a geostatistical approach[J]. Water Resources Research, 1979, 15(2): 269-280.
- [12] BUDIMAN J S, AL-AMRI N S, CHAABANI A, et al. Geostatistical based framework for spatial modeling of groundwater level during dry and wet seasons in an arid region: a case study at Hadat Ash-Sham experimental station, Saudi Arabia[J]. Stochastic Environmental Research and Risk Assessment, 2022, 36(8): 2085-2099.
- [13] SEYEDMOHAMMADI J, ESMAEELNEJAD L, SHABANPOUR M. Spatial variation modelling of groundwater electrical conductivity using geostatistics and GIS[J]. Modeling Earth Systems and Environment, 2016, 2(4): 1-10.
- [14] HURST H E. Long-term storage capacity of reservoirs[J]. Transactions of the American Society of Civil Engineers, 1951, 116: 770-799.
- [15] MANDELBROT B B. How long is the coast of Britain? statistical self-similarity and fractional dimension[J]. Science, 1967, 156(3775): 636-638.
- [16] MANDELBROT B B, VAN NESS J W. Fractional Brownian motions, fractional noises and applications[J]. SIAM Review, 1968, 10(4): 422-437.
- [17] MANDELBROT B B, WALLIS J R. Robustness of the rescaled range R/S in the measurement of noncyclic long run statistical dependence[J]. Water Resources Research, 1969, 5(5): 967-988.
- [18] SUTTON C, KUMAR S, LEE M K, et al. Human imprint of water withdrawals in the wet environment: a case study of declining groundwater in Georgia, USA[J]. Journal of Hydrology: Regional Studies, 2021, 35: 100813.
- [19] 于苗,邢立亭,吴吉春,等. 基于时间序列分形的济南岩溶大泉动态研究[J]. 地质学报, 2020, 94(8): 2509-2519. (YU Miao, XING Liting, WU Jichun, et al. Study of large karst springs using the time series fractal method in Jinan[J]. Acta Geologica Sinica, 2020, 94(8): 2509-2519. (in Chinese))
- [20] ZHANG Youkuan, SCHILLING K. Temporal scaling of hydraulic head and river base flow and its implication for groundwater recharge[J]. Water Resources Research, 2004, 40(3): W03504.
- [21] ZHANG Youkuan, YANG Xiaoying. Effects of variations of river stage and hydraulic conductivity on temporal scaling of groundwater levels: numerical simulations[J]. Stochastic Environmental Research and Risk Assessment, 2010, 24(7): 1043-1052.
- [22] JOELSON M, GOLDER J, BELTRAME P, et al. On fractal nature of groundwater level fluctuations due to rainfall process[J]. Chaos, Solitons & Fractals, 2016, 82: 103-115.
- [23] 罗晓玲,李岩瑛,严志明,等. 近 60 年河西走廊地区沙尘暴发生演变特征及其气象影响因子[J]. 水土保持研究, 2021, 28(5): 254-260. (LUO Xiaoling, LI Yanying, YAN Zhiming, et al. Evolution characteristics of

- sandstorm and meteorological influence factors in Hexi Corridor in recent 60 years [J]. Research of Soil and Water Conservation, 2021, 28 (5): 254-260. (in Chinese)
- [24] 张建永,李扬,赵文智,等.河西走廊生态格局演变跟踪分析[J].水资源保护,2015,31(3):5-10. (ZHANG Jianyong,LI Yang,ZHAO Wenzhi,et al. Tracking analysis on changes of ecological patterns in Hexi Corridor Region [J]. Water Resources Protection,2015,31(3):5-10. (in Chinese))
- [25] 朱秉启.中纬度荒漠区河西走廊沙丘地貌的演化特征及其环境指示[J].地理学报,2021,76(11):2710-2729. (ZHU Bingqi. The recent evolution of dune landforms and its environmental indications in the mid-latitude desert area(Hexi Corridor)[J]. Acta Geographica Sinica,2021,76(11):2710-2729. (in Chinese))
- [26] 刘洪润,高雪纯,彭艳新,等.近55年来河西走廊农业水热资源变化特征与趋势[J].中国农业科技导报,2018,20(1):85-94. (LIU Hongrun, GAO Xuechun, PENG Yanxin,et al. Changing characteristics and trends of agricultural water and thermal resources in Hexi Corridor of Gansu Province in recent 55 years [J]. Journal of Agricultural Science and Technology,2018,20(1):85-94. (in Chinese))
- [27] 李计生,王静,李斌,等.河西走廊疏勒河灌区地下水特征现状分析[J].冰川冻土,2014,36(5):1288-1297. (LI Jisheng,WANG Jing,LI Bin,et al. Groundwater in the Shule River irrigation area of Hexi Corridor;characteristics and current situation [J]. Journal of Glaciology and Geocryology,2014,36(5):1288-1297. (in Chinese))
- [28] WERNER W. Polynomial interpolation: Lagrange versus Newton[J]. Mathematics of Computation,1984,(167)43:205-217.
- [29] AHMADI S H, SEDGHAMIZ A. Application and evaluation of Kriging and Cokriging methods on groundwater depth mapping[J]. Environmental Monitoring and Assessment,2008,138(1/2/3):357-368.
- [30] KITANIDIS P K. Introduction to geostatistics: applications to hydrogeology [M]. Cambridge: Cambridge University Press, 1997.
- [31] 黄勇,周志芳,王锦国,等.*R/S*分析法在地下水动态分析中的应用[J].河海大学学报(自然科学版),2002,30(1):83-87. (HUANG Yong, ZHOU Zhifang, WANG Jinguo, et al. Application of *R/S* method to dynamic groundwater analysis [J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences),2002,30(1):83-87. (in Chinese))
- [32] 张殷钦,胡伟,刘俊民.基于*R/S*分析法的地下水动态变化趋势分析[J].中南大学学报(自然科学版),2012,43(12):4912-4916. (ZHANG Yinqin, HU Wei, LIU Junmin. Groundwater level regime variation trend on basis of rescaled range analysis [J]. Journal of Central South University (Science and Technology), 2012, 43 (12):4912-4916. (in Chinese))
- [33] HABIB A. Exploring the physical interpretation of long-term memory in hydrology [J]. Stochastic Environmental Research and Risk Assessment, 2020, 34 (12): 2083-2091.
- [34] 李生潜,张彦洪,马雁萍,等.石羊河流域盆地地下水动态变化特征分析[J].干旱区资源与环境,2018,32(12):145-151. (LI Shengqian, ZHANG Yanhong, MA Yanping,et al. Analysis of groundwater dynamic changes in Shiyang River Basin [J]. Journal of Arid Land Resources and Environment,2018,32(12):145-151. (in Chinese))
- [35] 栗晓玲,褚江东,张特,等.西北地区地下水干旱时空演变趋势及对气象干旱的动态响应[J].水资源保护,2022,38(1):34-42. (SU Xiaoling, CHU Jiangdong, ZHANG Te, et al. Spatio-temporal evolution trend of groundwater drought and its dynamic response to meteorological drought in Northwest China [J]. Water Resources Protection,2022,38(1):34-42. (in Chinese))
- [36] HOSMER D W, LEMESBOW S. Goodness of fit tests for the multiple logistic regression model[J]. Communications in Statistics: Theory and Methods, 1980, 9 (10): 1043-1069.
- [37] 文静,黄小龙.河西走廊区域地下水埋深动态影响因素研究[J].地下水,2019,41(6):37-40. (WEN Jing, HUANG Xiaolong. Study on dynamic factors affecting groundwater depth in Hexi Corridor [J]. Ground Water, 2019,41(6):37-40. (in Chinese))
- [38] WEN X H, WU Y Q, LEE L J E, et al. Groundwater flow modeling in the Zhangye Basin, Northwestern China [J]. Environmental Geology, 2007, 53 (1): 77-84.
- [39] LI Huanhuan, LU Yudong, ZHENG Ce, et al. Groundwater level prediction for the arid oasis of Northwest China based on the artificial bee colony algorithm and a back-propagation neural network with double hidden layers [J]. Water, 2019, 11 (4): 860.

(收稿日期:2022-01-15 编辑:施业)

