

银川平原地下水位对黄河流域水量统一调度的时空响应分析

靳晓辉¹, 樊玉苗¹, 段浩², 杨健¹, 宋常吉¹, 贾倩¹, 胡亚伟¹

(1. 水利部黄河水利委员会 黄河水利科学研究院, 河南 郑州 450003; 2. 中国水利水电科学研究院, 北京 100038)

摘要: 引黄水量是银川平原地下水的重要补给来源, 为了分析银川平原地下水位对黄河水量统一调度的响应, 采用趋势分析、R/S 分析及 ArcGIS 地理空间分析等方法, 解析 1995–2019 年银川平原地下水埋深的时空变化特征, 并以黄河水量统一调度后的引黄水量变化为主, 对影响地下水位变化的主要影响因素进行了甄别。结果表明: 银川平原地下水埋深在 2001–2019 年呈现明显的增加趋势, 由 2001 年的 1.4 m 增加到 2019 年的 2.3 m; 采用 R/S 分析法计算地下水埋深月平均值时间序列的 Hurst 指数为 0.78, 表明地下水埋深动态序列具有持续性; 空间上以银川市和石嘴山市为中心, 地下水埋深不断增大, 其中又以银川市地下水埋深增加幅度最大; 2001–2019 年的地下水年均埋深与引黄水量间呈显著相关, 引黄水量的减少是导致地下水埋深增加的主要原因。研究厘清了银川平原地下水埋深与引黄水量间的关系, 为践行黄河流域生态保护与高质量发展提供科学依据。

关键词: 地下水位; 引黄水量; 水量统一调度; R/S 分析; 银川平原

中图分类号: TV213.4

文献标识码: A

文章编号: 1672-643X(2021)04-0045-07

Temporal and spatial response of groundwater depth in Yinchuan Plain to the integrated water regulation of the Yellow River

JIN Xiaohui¹, FAN Yumiao¹, DUAN Hao², YANG Jian¹, SONG Changji¹, JIA Qian¹, HU Yawei¹

(1. Yellow River Institute of Hydraulic Research, Yellow River Conservancy Commission of the Ministry of Water Resources, Zhengzhou 450003, China; 2. China Institute of Water Resources and Hydropower Research, Beijing 100038, China)

Abstract: The water diverted from the Yellow River is an important replenishment source for the groundwater in Yinchuan Plain. In order to analyze the response of Yinchuan Plain groundwater depth to the integrated water regulation of the Yellow River, methods such as trend analysis, R/S analysis and ArcGIS geographic spatial analysis were used to analyze the temporal and spatial variation characteristics of the groundwater depth in Yinchuan Plain from 1995 to 2019 and its main influencing factors were screened with the emphasis on the volume change of the water diversion after the implementation of the integrated water regulation of the Yellow River policy. The results show that the groundwater depth of Yinchuan Plain increased significantly from 2001 to 2019, it increased from 1.4 m in 2001 to 2.3 m in 2019. The Hurst index of the monthly average time series of groundwater depth calculated by R/S analysis method was 0.78, indicating that the dynamic series of groundwater depth was continuous. The depth of groundwater had been increasing spatially centered on Yinchuan and Shizuishan City, with the largest increase in Yinchuan City. The average annual groundwater depth of 2001–2019 was significantly correlated to the amount of water diversion from the Yellow River, and the decrease in the water diversion was the main reason for the increase in the groundwater depth. The study clarified the relationship between the depth of groundwater in Yinchuan Plain and the amount of water diversion from the Yellow River, providing a theoretical support for the promotion of ecological conservation and high-quality development of the

收稿日期: 2020-12-04; 修回日期: 2021-04-28

基金项目: 黄科院 2020 年科技发展基金项目(黄科发 202004、黄科发 202005), 河南省青年科学基金项目(202300410544)

作者简介: 靳晓辉(1987–), 男, 河南郑州人, 博士, 工程师, 研究方向为水文学及水资源。

通讯作者: 胡亚伟(1980–), 男, 河南洛阳人, 硕士, 高级工程师, 研究方向为水文学及水资源。

Yellow River Basin.

Key words: groundwater level; the amount of water diversion from the Yellow River; integrated water regulation; R/S analysis; Yinchuan Plain

1 研究背景

银川平原是我国西北地区重要的粮食生产基地,同时也是国家西部生态屏障“黄土高原—川滇生态屏障”和“北方防沙带”的重要组成部分。其地处干旱区,降水稀少,蒸发强烈,生态环境脆弱,属于中国地质环境中度脆弱区^[1]。水是干旱区社会经济和生态环境可持续发展的决定因素^[2-3]。其中地下水是银川平原水资源的重要组成部分,影响着区域的经济发展和生态安全,其动态变化特征及发展趋势一直以来备受学者关注,目前研究主要聚焦以下 3 个方面:一是地下水环境研究。该方面研究集中于地下水水化学特征演化规律分析及水质评价研究^[4-6],主要对 *EC* 值、*DO* 值等银川平原地下水环境综合指标进行分析,并通过散点取样对区域的地下水水质进行评价,研究表明近年来银川平原地下水为偏碱性硬水,化学组分未发生明显变化;二是地下水与生态的关系研究。金晓媚等^[7-9]在区域尺度上定量地研究了银川平原地区地下水埋深与植被生长的关系,结果表明银川平原适宜植被生长的地下水埋深范围约为 1~6 m,当地下水位埋深为 3.5 m 左右时,植被长势最好。对于银川平原的湿地生态,夏贵菊等^[10]分析了银川平原地下水埋深对湿地生态系统的影响;三是银川平原引黄灌区地下水与盐渍化的关系研究。地下水资源管理不善往往是干旱地区土壤盐渍化的重要原因。武丹等^[11]建立了基于地下水埋深变动的土壤盐渍化灾害预测模型,对银川平原的土壤盐渍化程度及潜在的发展趋势作出了预测。Li 等^[12]提出联合利用浅层地下水和引黄地表水,以缓解银川平原土壤盐渍化。

银川平原地下水的补给主要包括引黄灌溉入渗、山前侧向、大气降水入渗补给 3 种,其中灌溉入渗是银川平原地下水的主要补给来源,约占地下水资源补给总量的 87%^[13]。自 20 世纪 60、70 年代以来,黄河流域及相关地区社会经济发展迅速,引黄用水量需求大幅度增加,加之黄河径流普遍呈现减少趋势^[14],黄河水资源供需矛盾日益突出^[15],导致黄河断流在 1972 年首次出现之后愈演愈烈。1999 起,国务院授权黄河水利委员会统一调度黄河水量^[16-17]。黄河水量统一调度实施后,宁夏段引黄水量逐渐减少,对银川平原脆弱的生态环境产生不利影响,比如河湖水系等补给水源已逐渐转变为依赖

人工调蓄保障,植被生态稳定受到威胁等^[7,18]。

随着引黄水量的不断变化,银川平原的地下水势必然受到影响,而黄河水量统一调度后银川平原地下水如何响应,以及未来的变化趋势如何目前尚无明确定论。因此,本研究基于近 20 年来引黄水量、地下水资源量、降雨以及地下水埋深等数据资料,分析银川平原地下水埋深的时空变化及主要影响因素,探索 20 年来黄河水量统一调度对银川平原地下水的影响,为保障区域水资源安全和维持生态环境健康提供科学支撑。

2 数据来源与研究方法

2.1 研究区概况

银川平原位于宁夏回族自治区的北部地区,东经 105°45′~106°56′,北纬 37°46′~39°23′,海拔高度介于 981~1 476 m,自西南向东北方向缓倾,平原区主要由冲洪积平原构成。黄河由青铜峡流入银川平原,至石嘴山头道坎的麻黄沟出境,全程约 193 km。银川平原属于中温带干旱区,多年平均气温为 9.5℃,多年平均降雨量和蒸发量分别为 171、1 689 mm,年蒸发量接近降雨量的 10 倍。行政区划上银川平原隶属银川市、石嘴山市和吴忠市的 10 个县,区域内地形平坦,自古修建秦、汉等渠,优越的地理位置使其能充分利用黄河水资源发展水利灌溉,农牧业发达,湖泊众多,湿地连片,具有“塞上江南”之称。银川平原位置及范围如图 1 所示。

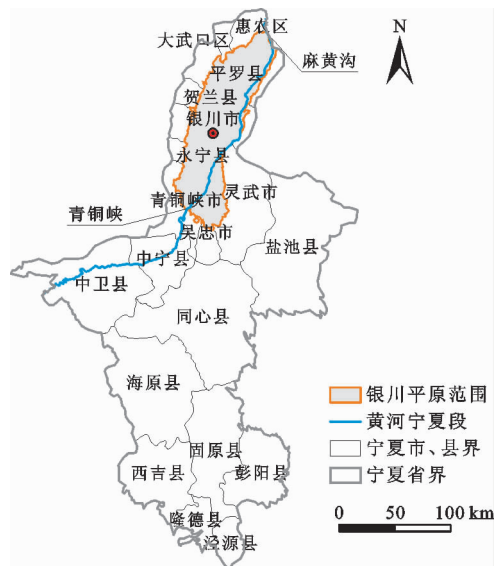


图 1 银川平原位置及范围

2.2 数据来源

银川平原地下水埋深数据来源于宁夏水利相关部门1995–2019年110眼地下水埋深动态监测井的实测埋深数据,银川平原地下水监测井(按埋藏条件均为潜水监测井)的具体分布见图2。

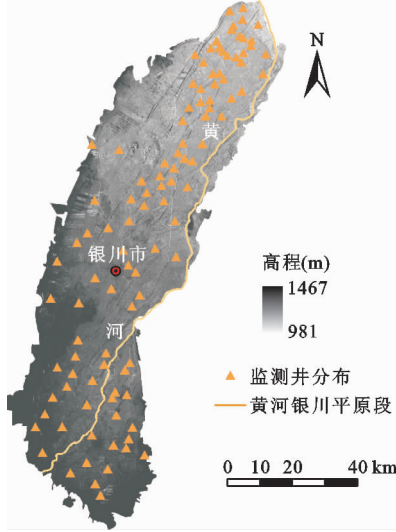


图2 银川平原地下水监测井分布

宁夏引黄水量及地下水资源量数据采用1995–2019年宁夏回族自治区水资源公报等资料。降雨数据来自国家气象科学数据中心。

$$y_{ij} = x_{ij} - \bar{x}_i = \begin{pmatrix} y_{11} & y_{12} & \cdots & y_{1r} \\ y_{21} & y_{22} & \cdots & y_{2r} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ y_{g1} & y_{g2} & \cdots & y_{gr} \end{pmatrix} \quad (i = 1, 2, \dots, g; j = 1, 2, \dots, r)$$

$$z_{ij} = \sum_{k=1}^j y_{ik} = \begin{pmatrix} z_{11} & z_{12} & \cdots & z_{1r} \\ z_{21} & z_{22} & \cdots & z_{2r} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ z_{g1} & z_{g2} & \cdots & z_{gr} \end{pmatrix} \quad (i = 1, 2, \dots, g; j = 1, 2, \dots, r) \quad (4)$$

$$R_i = \max(z_{ij}) - \min(z_{ij}) = \begin{pmatrix} R_1 \\ R_2 \\ \vdots \\ R_g \end{pmatrix} \quad (i = 1, 2, \dots, g; j = 1, 2, \dots, r) \quad (5)$$

$$S = \sqrt{\frac{1}{r-1} \sum_{j=1}^r (x_{ij} - \bar{x}_i)^2} = \begin{pmatrix} S_1 \\ S_2 \\ \vdots \\ S_g \end{pmatrix} \quad (i = 1, 2, \dots, g) \quad (6)$$

进而计算得到RS值及统计量 t (即均值 $\overline{RS}$)

$$RS_i = \frac{R_i}{S_i} \quad (i = 1, 2, \dots, g) \quad (7)$$

$$t = \overline{RS} = \frac{1}{g} \sum_{i=1}^g RS_i \quad (8)$$

2.3 研究方法

银川平原引黄水量、降雨量等因素的变化采用线性趋势分析及相关分析方法,地下水埋深动态描述采用ArcGIS软件进行时空刻画。地下水埋深的趋势性特征采用Hurst指数分析,该指数通过R/S分析法(rescaled range analysis)计算,是一种分析非线性时间序列的统计方法,最初由英国水文学家Hurst提出,目前已在气候、环境等要素的趋势分析中得到广泛应用^[19]。R/S分析通过计算Hurst指数揭示长时间序列的趋势性特征,并以此推断其未来变化趋势。具体应用形式为:

对于时间序列 $x(t), t = 1, 2, \dots, n$,将数据划分为长度为 r 的 g 组互不重叠的子序列,则:

$$x(t) = \begin{pmatrix} x_{11} & x_{12} & \cdots & x_{1r} \\ x_{21} & x_{22} & \cdots & x_{2r} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ x_{g1} & x_{g2} & \cdots & x_{gr} \end{pmatrix} \quad (1)$$

按公式(2)~(6)计算得到均值序列 $\bar{x}_i$ 、离差 y_{ij} 、累积离差 z_{ij} 、极差 R_i 以及标准差 S_i :

$$\bar{x}_i = \frac{1}{r} \sum_{j=1}^r x_{ij} = \begin{pmatrix} \bar{x}_1 \\ \bar{x}_2 \\ \vdots \\ \bar{x}_g \end{pmatrix} \quad (i = 1, 2, \dots, g) \quad (2)$$

通过不断调整序列长度 r ,得到不同的统计量 t ,由此得到数据对 $(\log r_m, \log t_m), m = 1, 2, \dots, k$,以 $\log r_m$ 为自变量, $\log t_m$ 为因变量,用此 m 对数据做线性回归,得到的直线斜率即为Hurst指数 H 。

通过Hurst指数的大小揭示数据序列趋势方

向。若 H 值在 $0 \sim 0.5$ 区间内,表示数据序列未来趋势与过去趋势相反,若 H 值在 $0.5 \sim 1$ 区间内,表示数据序列未来趋势与过去趋势相同,若 $H = 0.5$,则表明数据序列为随机序列。

3 结果与分析

3.1 银川平原地下水水位时间变化特征

3.1.1 地下水年均埋深动态分析 综合研究区内 110 眼观测井 1995–2019 年数据,计算银川平原地下水埋深的年平均值并绘制其埋深年际动态过程图,如图 3 所示。

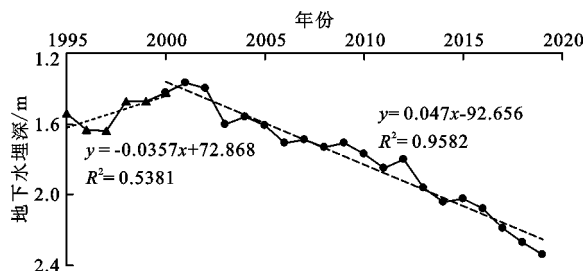


图 3 1995–2019 年银川平原地下水埋深年际动态过程图

由图 3 可以看出,银川平原范围内的地下水埋深在 2001 年前后发生了明显变化,整个序列的地下水埋深变化可分为两个阶段,第 1 阶段(1995–2001 年)为波动变化时期,年均埋深在 $1.35 \sim 1.65$ m 波动,第 2 阶段(2001–2019 年)为线性增加时期,年均埋深由 2001 年的 1.35 m 增加到 2019 年的 2.35 m,埋深倾向率为 0.47 m/10a。

3.1.2 地下水埋深时间序列的 R/S 分析 地下水埋深年际变化可从直观上反映出研究区地下水位的整体走势,为进一步揭示地下水埋深时间序列的分形特征,以 1995–2019 年银川平原的地下水埋深月平均值构建时间序列,采用 R/S 分析法计算 Hurst 指数。根据公式(8),序列长度 r 依次取 3、4、5、6、10、12、15、20、25、30、50、60、75、100、150、300,不同的序列长度可相应计算得出地下水埋深月平均值的统计量 t ,绘制 $\log r_m$ 与 $\log t_m$ 关系的散点及线性拟合图,结果如图 4 所示。

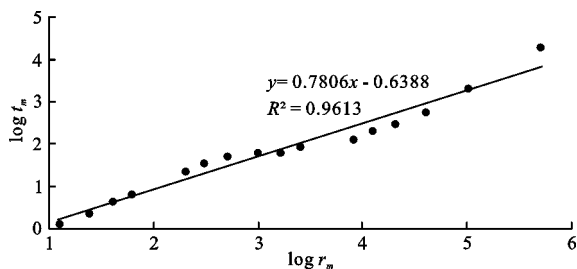


图 4 银川平原地下水埋深月平均值序列 R/S 分析图

由图 4 可以看出,线性趋势地下水埋深月平均值序列的 Hurst 指数为 0.7806 ,大于 0.5 ,表明银川平原地下水埋深未来变化趋势与现状增加趋势相同。

3.2 银川平原地下水水位空间变化特征

根据研究区地下水埋深的序列长度,以 5 a 为间隔展布银川平原地下水埋深的空间分布与变化,如图 5 所示。

由图 5 可以看出,在 2000 年,即黄河水量统一调度之初,银川平原地下水埋深基本维持在 2 m 以内,局部地区地下水埋深零星伴有超过 2 m 的现象,最大埋深为 2.78 m。此后银川平原地下水埋深整体呈增加趋势,以银川市和石嘴山市增加幅度最大,出现明显的地下水降落漏斗,并且以漏斗为中心不断向外缓冲。

根据研究区地下水埋深变化情况,以 2 m 为埋深间隔,各埋深范围面积及变化情况如表 1 和图 6 所示。

表 1 2000–2019 年地下水不同埋深范围面积变化 km^2

埋深范围/m	2000 年	2005 年	2010 年	2015 年	2019 年
0~2	6004.2	4970.2	4119.9	3540.1	2452.9
2~4	267.8	1296.9	2062.2	2287.7	2996.2
4~6	0.0	4.8	87.3	395.5	741.2
6~8	0.0	0.0	2.6	37.5	79.8
>8	0.0	0.0	0.0	11.2	1.8

由表 1 和图 6 可以看出,黄河水量统一调度之初,银川平原 96% 的面积地下水埋深在 2 m 范围内。此后地下水埋深小于 2 m 的面积逐渐减少,其面积占比减少至 2019 年的 39%,而且分布上趋于破碎化; $2 \sim 4$ m 埋深范围的面积占比增加最为明显,由 2000 年的 4% 增至 2019 年的 48%。 4 m 以上的埋深面积虽然占比较少,但整体也呈现持续增加的态势。截至 2019 年,大于 4 m 的埋深面积达到 822.5 km^2 ,占比为 13%。

根据银川平原的埋深空间展布结果,绘制 2000–2019 年银川平原地下水埋深不同变幅的空间分布,如图 7 所示。依据地下水埋深变幅情况,以 1 m 为间隔,各埋深变幅范围的面积占比如图 8 所示。

由图 7 可以看出,地下水埋深变幅最大的区域以银川市和石嘴山市为中心渐次缓变,其中又以银川市地下水埋深变幅最大,达到 $4 \sim 5$ m。由图 8 可以看出,银川平原范围内埋深变浅的面积占比仅为 1.4%,且零星分布。在埋深增加的各区域, $0 \sim 1$ m

埋深变幅范围内的面积占比最大,为 59.1%,其次为 1~2 m 埋深变幅,其范围内的面积占比为 23.8%,剩余埋深增加幅度在 2~3、3~4、4~5 m 的面积占比分别为 7.7%、6.2%、1.8%。

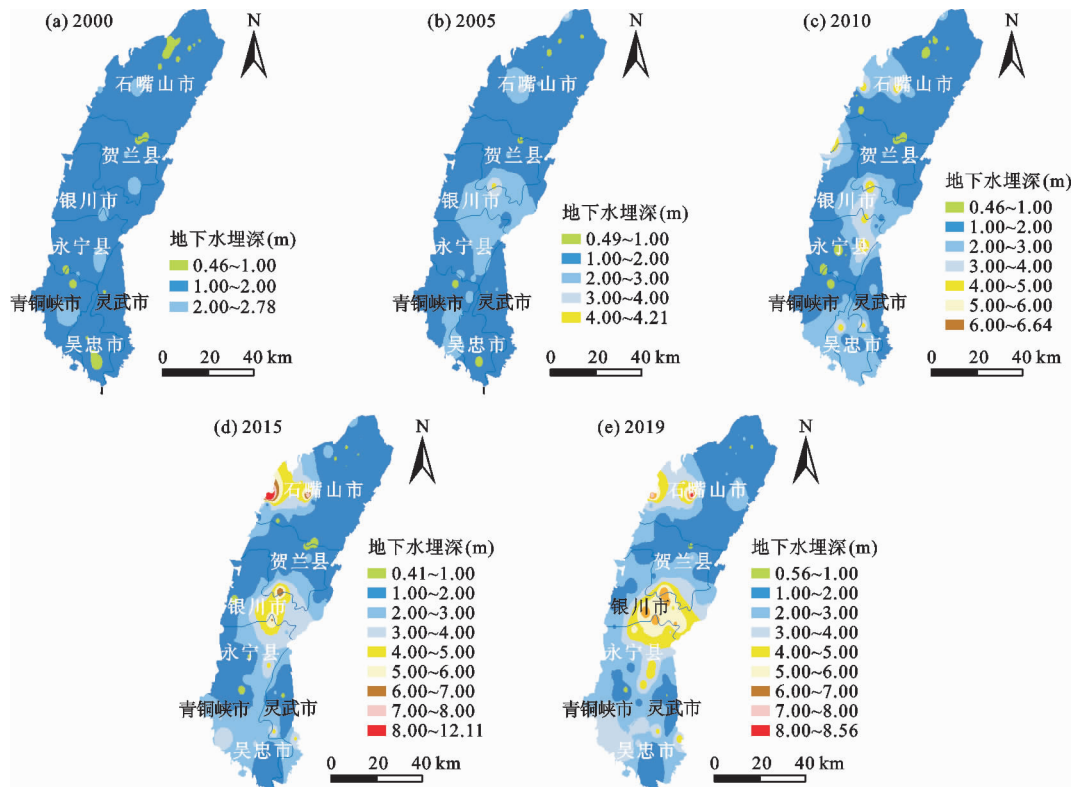


图 5 2000 – 2019 年银川平原地下水埋深时空动态

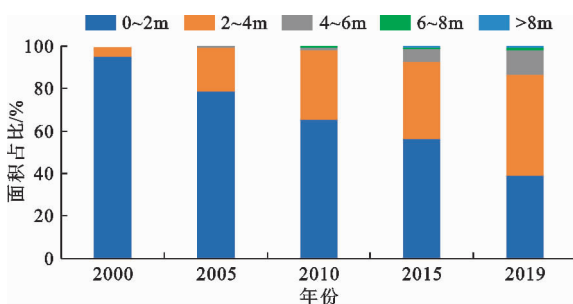


图 6 2000 – 2019 年银川平原地下水不同埋深范围面积占比

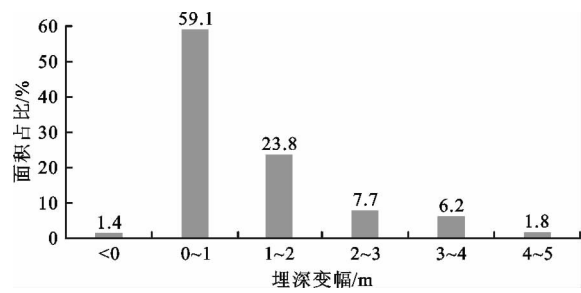


图 8 2000 – 2019 年银川平原地下水不同埋深变幅面积占比

3.3 银川平原地下水水位变化影响因素

根据《宁夏水资源公报》等资料数据,点绘宁夏引黄灌区引黄水量及地下水资源量动态变化,如图 9、10 所示。

由图 9、10 可以看出,黄河水量在 1999 年统一调度之后,灌区引黄水量呈线性减少趋势,由 1999 年的 $87.8 \times 10^8 \text{ m}^3$ 逐渐削减至 2019 年的 $59.7 \times 10^8 \text{ m}^3$,引黄水量减少了 32%。同时,区域地下水资源量也呈显著线性减少趋势,根据 2001 – 2019 年的宁夏引黄灌区地下水资源量变化图(图 10),黄河水量统一调度之后,地下水资源量由 $23.0 \times 10^8 \text{ m}^3$ 逐渐削减至 $14.1 \times 10^8 \text{ m}^3$,地下水资源量减少了 37%。

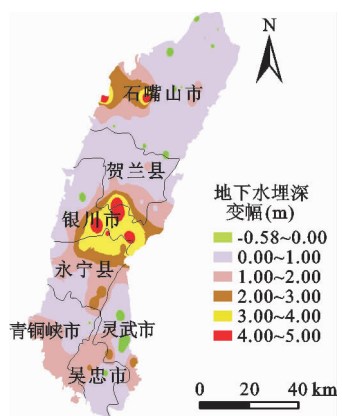


图 7 2000 – 2019 年银川平原地下水埋深不同变幅空间分布

对黄河水量统一调度之后的引黄灌区的引黄水量与银川平原的地下水年均埋深进行相关分析,如图 11 所示;同时分析该时段银川平原的降水量年际变化趋势,如图 12 所示。

由图 11 可以看出,2001–2019 年的地下水年均埋深与引黄水量呈显著相关,即随着引黄水量减少地下水埋深逐渐增加;由图 12 可以看出,自 2000

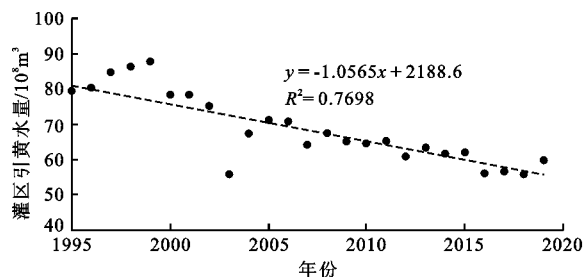


图 9 1995–2019 年宁夏引黄灌区引黄水量变化

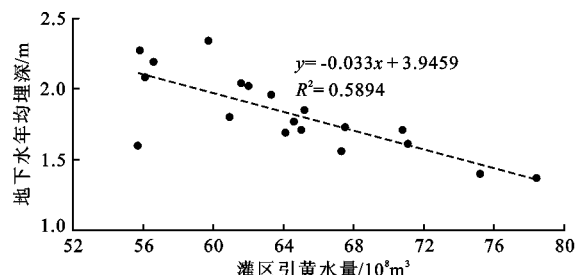


图 11 2001–2019 年银川平原地下水埋深与引黄水量关系

综上,从对影响银川平原地下水变化的 3 个主要因素的分析可得出,引黄水量的减少是导致地下水埋深增加的主要原因。

4 讨论

地下水是干旱地区水循环的重要构成,支撑着区域的经济发展和生态安全。对银川平原而言,地下水一方面保障工农业发展,如银川等城市的不断发展需要加大对地下水的开发,宁夏引黄灌区的粮食供给安全需要适宜的地下水位支持^[20];另一方面地下水维持着区域脆弱生态系统的基本格局,如天然林草的生长依靠地下水的潜水蒸发,河湖水系的维持更是依赖其与地下水的补排平衡^[21]。黄河是银川平原的重要过境水资源,地下水的补给主要来源于引黄水量。随着黄河水量统一调度的实施,宁夏的引黄水量有所削减,数据分析表明地下水埋深也在不断增加。刘光龙^[22]在对银川平原河东灌区地下水动态模拟研究的结果也表明,引黄水量是灌区地下水的重要“补源”,引黄水量的减少将会直接影响区域的地下水埋深。关于引黄水量对地下水的

年开始,银川平原降雨呈波动增加的趋势,与地下水埋深增加的趋势相反。另据银川平原范围内的银川市片区和石嘴山市片区两个主要开采区的地下水开采量水资源公报数据统计,银川平原地下水开采量 2000–2003 年平均为 $1.75 \times 10^8 \text{ m}^3$,2016–2019 年平均为 $1.79 \times 10^8 \text{ m}^3$,近 20 年来银川平原地下水开采量变化相对较小。

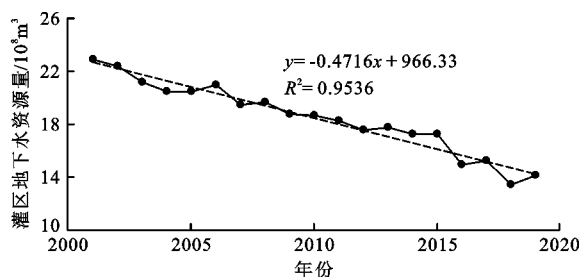


图 10 2001–2019 年宁夏引黄灌区地下水资源量变化

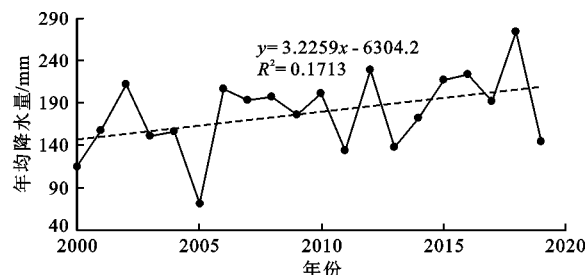


图 12 2000–2019 年银川平原降水量年际变化趋势

影响,在内蒙古的河套灌区也存在类似银川平原的现象。河套灌区地下水的补给主要来源于引黄灌溉的人渗^[23],黄河水量统一调度后,河套灌区的引黄水量由 $52 \times 10^8 \text{ m}^3$ 逐步减少为 $40 \times 10^8 \text{ m}^3$,成为河套灌区地下水埋深增加的主要原因之一^[24]。在全球气候变化和人类活动的双重影响下,黄河流域的水资源面临着多维格局演变^[25],相应的地下水资源也会发生多样变化,揭示区域地下水水位对引黄水量变化的动态响应,辨识区域地下水水位的变化态势,将是未来黄河流域各地区地下水水位时空变化的重要研究方向。

5 结论

(1) 银川平原地下水埋深在 1999 年的黄河流域水量统一调度后,呈现出逐年增加的变化趋势,由 2001 年的 1.4 m 增加到 2019 年的 2.3 m,主要地下水埋深范围由 1~2 m 向 2~3 m 范围发展;通过 R/S 分析,银川平原地下水埋深序列的 Hurst 指数为 0.780 6,表明银川平原地下水埋深未来变化趋势与现状增加趋势相同。空间上,银川平原地下水埋深

变幅最大的区域以银川市和石嘴山市为中心渐次缓变,其中以银川市地下水埋深变幅最大。

(2)通过回归分析表明,2001–2019年的地下水年均埋深与引黄灌区引黄水量呈显著相关关系,随着引黄水量的减少地下水埋深逐渐增加;综合分析影响地下水变化的降水量、地下水开采量和引黄水量表明,引黄水量的减少是导致地下水埋深增加的主要原因。

(3)银川平原生态环境脆弱,地下水埋深的增加对该地区生态环境保护提出了新的挑战。为了维护银川平原的地下水安全、防范重大生态灾害风险,未来有必要进一步量化分析银川平原地下水埋深对引黄水量的响应关系,明确维护银川平原地下水和生态安全的引黄水量阈值。

参考文献:

- [1] 王尧,张茂省,杨建锋. 中国地质环境脆弱性评价[J]. 西北地质,2019,52(2):198–206.
- [2] 邓铭江. 中国西北“水三线”空间格局与水资源配置方略[J]. 地理学报,2018,73(7):1189–1203.
- [3] DONG Wen, CUI Baoshan, LIU Zhihui, et al. Relative effects of human activities and climate change on the river runoff in an arid basin in northwest China[J]. Hydrological Processes, 2015, 28(18):4854–4864.
- [4] HAN Shuangbao, ZHANG Fucun, ZHANG Hui, et al. Spatial and temporal patterns of groundwater arsenic in shallow and deep groundwater of Yinchuan Plain, China[J]. Journal of Geochemical Exploration, 2013, 135:71–78.
- [5] 张兆迪,于开宁,刘景涛. 银川平原水化学特征分析[J]. 水文地质工程地质,2017,44(2):23–30.
- [6] 柳凤霞,史紫薇,钱会,等. 银川地区地下水水化学特征演化规律及水质评价[J]. 环境化学,2019,38(9):2055–2066.
- [7] 金晓媚,万力,张幼宽,等. 银川平原植被生长与地下水关系研究[J]. 地学前缘,2007,14(3):197–203.
- [8] 金晓媚,万力,薛忠歧,等. 基于遥感方法的银川盆地植被发育与地下水关系研究[J]. 干旱区资源与环境,2008,22(1):129–132.
- [9] JIN Xiaomei, ZHANG Youkuan, TANG Yun, et al. Quantifying bare soil evaporation and its relationship with groundwater depth[J]. International Journal of Remote Sensing, 2014, 35(21):7567–7582.
- [10] 夏贵菊,何彤慧,于骥,等. 银川平原草甸湿地表层盐分累积特征[J]. 农业工程学报,2016,32(5):142–148.
- [11] 武丹,贾科利,张晓东,等. 基于异质SVM神经网络的土壤盐渍化灾害预测模型[J]. 水文地质工程地质,2018,45(5):143–149+157.
- [12] LI Peiyue, QIAN Hui, WU Jianhua. Conjunctive use of groundwater and surface water to reduce soil salinization in the Yinchuan Plain, North–West China[J]. International Journal of Water Resources Development, 2018, 34(3):337–353.
- [13] 尹秉喜. 银川平原地下水补给及水质分布综合研究[D]. 北京:中国地质大学,2006.
- [14] KONG Dongxian, MIAO Chiyuan, WU Jingwen, et al. Impact assessment of climate change and human activities on net runoff in the Yellow River Basin from 1951 to 2012[J]. Ecological Engineering, 2016, 91:566–573.
- [15] 鲍振鑫,严小林,王国庆,等. 1956–2016年黄河流域河川径流演变规律[J]. 水资源与水工程学报,2019,30(5):52–57.
- [16] 乔西现. 黄河水量统一调度回顾与展望[J]. 人民黄河,2019,41(9):1–5+25.
- [17] 金双彦,张萍,张春岚,等. 水量统一调度以来黄河宁夏河段引黄耗水量分析[J]. 水文,2015,35(6):82–86.
- [18] 田巍. 宁夏引黄灌区重点湖泊生态需水量测算及再生水补水方案研究[J]. 中国农村水利水电,2018(12):45–49.
- [19] 杜灵通,宋乃平,王磊,等. 近30a气候变暖对宁夏植被的影响[J]. 自然资源学报,2015,30(12):2095–2106.
- [20] 张娜,韩小龙,汤英,等. 宁夏石嘴山市引黄灌区地下水时空变化特性及影响因素[J]. 干旱区研究,2020,37(5):1124–1131.
- [21] 冯勇. 宁夏艾依河银川段河湖水与地下水水量转换研究[J]. 水资源与水工程学报,2014,25(5):179–184.
- [22] 刘光龙. 宁夏河东灌区浅层地下水动态特征与仿真模拟[D]. 兰州:兰州大学,2012.
- [23] 苏阅文,冯绍元,王娟,等. 内蒙古河套灌区地下水位埋深分布规律及其影响因素分析[J]. 中国农村水利水电,2017(7):33–37+44.
- [24] 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.
- [25] 王煜,彭少明,郑小康. 黄河流域水量分配方案优化及综合调度的关键科学问题[J]. 水科学进展,2018,29(5):614–624.