

DOI: 10.13476/j.cnki.nsbdcq.2019.0113

岳卫峰,孟恺恺,侯凯旋,等.河套灌区地下水埋深时空变异特征及其影响因素[J].南水北调与水利科技,2019,17(5):81-89.  
YUE W F, MENG K K, HOU K X, et al. Study on spatial and temporal variation of groundwater depth and its influencing factors in Hetao irrigation district[J]. South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology, 2019, 17(5): 81-89. (in Chinese)

# 河套灌区地下水埋深时空变异特征及其影响因素

岳卫峰<sup>1,2</sup>, 孟恺恺<sup>1,2</sup>, 侯凯旋<sup>1,2</sup>, 杨莹<sup>1,2</sup>

(1. 北京师范大学水科学研究院, 北京 100875; 2. 地下水污染控制与修复教育部工程研究中心, 北京 100875)

**摘要:**选择内蒙河套灌区义长灌域作为研究区,利用研究区67眼监测井的地下水埋深资料,采用传统统计学、地统计学和灰色关联分析法,对灌域1990—2015年地下水埋深的时空变异性及其主控因素进行了分析,结果表明:义长灌域26年来潜水位下降近0.4 m,平均下降速率1.6 cm/a;义长灌域26年地下水埋深的最优变异函数有高斯、指数和球状模型,以高斯模型为主,区域地下水埋深具有较强的空间相关性,变程多在5~7 km;空间插值结果表明,不同时期地下水埋深的空间分布存在一定的差异性,但总体上以1.5~2.5 m范围为主,平均占比60%;根据灰色关联分析法和偏相关分析,发现蒸发量和地下水补给量是义长灌域地下水埋深的主要驱动因素。

**关键词:**地下水埋深;时空变异;地统计学法;灰色关联分析;偏相关分析;河套灌区

中图分类号:TV213 文献标志码:A 开放科学(资源服务)标识码(OSID):



## Study on spatial and temporal variation of groundwater depth and its influencing factors in Hetao irrigation district

YUE Weifeng<sup>1,2</sup>, MENG Kaikai<sup>1,2</sup>, HOU Kaixuan<sup>1,2</sup>, YANG Ying<sup>1,2</sup>

(1. College of Water Sciences, Beijing Normal University, Beijing 100875, China; 2. Engineering Research Center of Groundwater Pollution Control and Remediation of Ministry of Education, Beijing Normal University, Beijing 100875, China)

**Abstract:** In recent years, due to the irrational utilization of groundwater, soil salinization has occurred in some arid and semiarid regions of China. In this research, the spatial and temporal variations of groundwater depth and its main influencing factors were analyzed from 1990 to 2015 based on 67 monitoring wells in Yichang irrigation sub-district. Statistical analysis, geostatistics and grey correlation analysis were applied to analyzing these data. The results reveal that: the average phreatic level in Yichang irrigation sub-district has dropped by nearly 0.4 m in 26 years, and the average decline rate is 1.6 cm/a; the optimal variogram of groundwater depth in the last 26 years has Gaussian, exponential and spherical model, however, it is dominated by the Gaussian model. The regional variation of groundwater depth has strong spatial correlation, and the variation ranges from 5 to 7 km; the spatial interpolation results show that there has certain difference in the spatial distribution of groundwater depth in different periods, while the overall range is from 1.5 to 2.5 m; with an average proportion of 60%; evaporation and groundwater recharge are the main driving factors for the variation of groundwater depth in Yichang irrigation sub-district based on the grey correlation analysis and partial correlation analysis.

**Key words:** groundwater depth; spatial and temporal variation; geostatistics; grey correlation analysis; partial correlation analysis; Hetao irrigation district

收稿日期:2019-03-28 修回日期:2019-05-17 网络出版时间:2019-05-27

网络出版地址: <http://kns.cnki.net/kcms/detail/13.1334.tv.20190523.1618.020.html>

基金项目:国家重点研发计划(2016YFC0401303);国家自然科学基金(51879011;41471397)

作者简介:岳卫峰(1978—),男,河南辉县人,副教授,博士,博士生导师,主要从事干旱区水土资源利用研究。E-mail: yuewf@bnu.edu.cn

土壤盐渍化或沙化是原有水盐平衡系统发生改变的结果,而地下水埋深会对土壤盐分的累积造成影响,进而影响土壤次生盐渍化<sup>[1]</sup>。因此研究干旱地区地下水埋深的时空变异及其影响因素对土壤盐渍化防治和地下水资源的合理开发具有重要意义。

近年来许多成熟的方法已被应用于地下水的时空变异研究中<sup>[2]</sup>,其中,地统计学法是常用的方法。Chen 等<sup>[3]</sup>用地统计法对民勤绿洲 1999—2008 年的地下水埋深时空变异规律进行了研究,发现绿洲地下水埋深呈逐渐下降的趋势。姚荣江等<sup>[4]</sup>采用地统计学法对黄河三角洲典型地块的地下水埋深和地下水含盐量的空间变异特征进行了研究,发现地下水埋深会影响地下水含盐量的空间变异性。邓宝山等<sup>[5]</sup>利用地统计学与 GIS 相结合的方法,发现克里雅绿洲地下水埋深与土壤盐分时空分异明显,两者存在交互耦合的关系。管孝艳等<sup>[6]</sup>用地统计学方法对河套灌区解放闸灌域土壤盐分的时空变异特征进行了研究,发现在浅层地下水埋深增大时,土壤盐分会减小。史志广等<sup>[7]</sup>以伊犁河谷西部霍城县平原区为研究区域,采用经典统计学法及地统计学法对该区域的地下水矿化度和地下水埋深的空间变异特征进行了研究,发现两者在空间分布上存在一定的相关性。

地下水埋深影响因素研究方面,苏阅文等<sup>[8]</sup>用灰色关联分析法对内蒙古河套灌区解放闸灌域地下水埋深的影响因素进行了分析,发现蒸发量对地下水埋深的影响最大,其次为引黄水量和降雨量。张素芳<sup>[9]</sup>采用主成分分析法对咸阳市 1999—2010 年地下水动态进行分析,发现地下水开采量和降水补给量是咸阳市地下水水位动态变化的主要影响因子。魏晓妹等<sup>[10]</sup>通过水均衡分析,发现降水、灌溉、开采是影响黄土原灌区地下水动态变化的主要因素。陈伏龙等<sup>[11]</sup>采用主成分分析法对玛纳斯河中游莫索湾灌区地下水埋深的动态变化进行了分析,发现灌水量和抽水量是影响灌区地下水埋深的主要因子,蒸发量的影响次之,而降雨量对地下水埋深的变化没有显著影响。王通等<sup>[12]</sup>运用灰色关联分析法对邢家渡灌区地下水动态的影响因素进行研究,发现自然因素(降水和蒸发)对灌区地下水水位动态变化的影响程度较大,而人为因素对地下水水位的影响程度因区域位置而异。

义长灌域是内蒙古河套灌区最大的灌域,目前对义长灌域的研究主要集中在土壤盐渍化和水均衡两个方面<sup>[13-14]</sup>。本文根据义长灌域 67 眼监测井的地下水埋深资料,综合采用地统计学方法、灰色关联分析法和偏相关分析法,研究其时空变异规律和影响因素。

## 1 材料与方法

### 1.1 研究区概况

义长灌域位于内蒙河套灌区东北部,总占地面积为 3 252.5 km<sup>2</sup>,地理位置约为北纬 40°45′~41°17′,东经 107°37′~108°51′。灌域内地势为西南高东北低,地面高程 1 019~1 035.3 m。灌域年平均气温为 6.1℃,年均蒸发量为 2 041.1 mm,年均降水量为 177.5 mm。灌域内土壤比较肥沃,种植作物为一年一熟的小麦、玉米、甜菜、油菜等<sup>[15]</sup>。灌域现有灌溉面积 18.43 万 hm<sup>2</sup>,67 眼监测井均匀分布在灌域中,见图 1。



图 1 义长灌域 67 眼监测井分布

Fig. 1 Location and basin information of 67 monitoring wells in Yichang irrigation sub-district

### 1.2 数据来源与研究方法

#### 1.2.1 数据来源

本文分析计算所采用的数据时段为 1990—2015 年,其中地下水埋深和引水量数据由内蒙古河套灌区义长灌域管理局义长试验站提供,降雨、蒸发等气象数据由内蒙古五原县气象局提供,地下水补给量由引水量及相应的入渗补给系数计算获得。

#### 1.2.2 研究方法

用 SPSS 软件描述数据的基本情况,用地统计学的半变异函数研究时空变异规律,应用灰色关联分析法和偏相关分析法对地下水埋深的影响因素进行量化分析。

地质统计学法是由 G. Matheron 和许多法国数学家基于区域化变量理论为基础提出的一种统计方法<sup>[16]</sup>,现广泛应用于地质和非地质学领域。地质统计学基于区域化变量,借助变异函数进行分析。假设变异函数均值稳定,方差存在且有限,变异函数的通式为

$$\gamma(h) = \frac{1}{2N_h} \sum_{i=1}^{N_h} [Z(x_i) - Z(x_i+h)]^2 \quad (1)$$

式中: $h$ 为分离距离; $\gamma(h)$ 为变异函数; $N_h$ 为间距距离为 $h$ 的样本对数; $Z(x_i)$ 和 $Z(x_i+h)$ 为变量在 $x_i$ 和 $x_i+h$ 处的值。

根据实测变异函数,选取适当的理论模型与变异函数进行拟合。常用的理论模型有球形模型、指数模型和高斯模型,球形模型的一般公式为

$$\gamma(h) = \begin{cases} 0 & h=0 \\ C_0 + C \left( \frac{3}{2} \frac{h}{a} - \frac{1}{2} \frac{h^3}{a^3} \right) & 0 < h \leq a \\ C_0 + C & h > a \end{cases} \quad (2)$$

式中: $C_0$ 为块金值; $C_0+C$ 为基台值(表示区域化变量在空间上的最大变异程度); $C$ 为拱高; $a$ 是变程,表示数据的空间相关距离,其中球形模型的有效变程为 $a$ 。

高斯模型的一般公式为

$$\gamma(h) = \begin{cases} 0 & h=0 \\ C_0 + C[1 - e^{-(h/a)^2}] & h > 0 \end{cases} \quad (3)$$

式中: $C_0$ 和 $C$ 的意义同上;高斯模型的有效变程为 $\sqrt{3}a$ 。

指数模型的一般公式为

$$\gamma(h) = \begin{cases} 0 & h=0 \\ C_0 + C(1 - e^{-h/a}) & h > 0 \end{cases} \quad (4)$$

式中: $C_0$ 和 $C$ 的意义同上;高斯模型的有效变程为 $3a$ 。

灰色关联分析法是基于系统各因素时间序列曲线间相似相异程度来衡量其关联度大小的量化方法<sup>[8]</sup>,是对系统发展变化态势的定量描述和比较。

原始数据变换:对原始数据消除量纲,将其转化成可比较的数列,采用均值化变换,即用各数列数据除以各数列的平均值。

计算关联系数:经数据转化的参考序列记为

$\{X_0(t)\}$ ,比较序列记为 $\{X_i(t)\}$ ,则在 $k$ 时刻的关联系数 $L_{oi}(k)$ 为

$$L_{oi}(k) = \frac{\Delta_{\min} + \rho \Delta_{\max}}{\Delta_{oi}(k) + \rho \Delta_{\max}} \quad (5)$$

式中: $\Delta_{\min}$ 和 $\Delta_{\max}$ 分别表示所有比较序列与参考序列在各时刻绝对差中的最小值和最大值; $\rho$ 是分辨系数,一般取值0.5, $\Delta_{oi}(k)$ 表示 $k$ 时刻参考序列和各比较序列的绝对差值。

计算关联度:关联度 $r_{oi}$ 是对序列间关联性大小的量度,计算公式为

$$r_{oi} = \frac{1}{N} \sum_{k=1}^N L_{oi}(k) \quad (6)$$

式中: $N$ 为比较序列的长度。

## 2 结果与分析

### 2.1 地下水埋深时间变化特征

用SPSS软件对义长灌域1990—2015年地下水埋深的变化情况进行了统计分析,6个代表性年份的统计结果见表1。据统计结果可知,从1990年到2015年,平均地下水埋深从1.52 m下降到1.92 m,下降近0.4 m,变化率为1.6 cm/a;地下水埋深中值从1.51 m下降到1.83 m,变化率为1.3 cm/a;最大地下水埋深从2.24 m下降到5 m,变化率为0.11 m/a,说明义长灌域地下水埋深最大值的差异性比较大。另外,变异系数 $C_v$ 可以反映变量的离散程度, $C_v < 10\%$ 属于弱变异性, $C_v = 10\% \sim 100\%$ 属于中等变异, $C_v > 100\%$ 属于强变异性<sup>[17]</sup>。由表1可以看出,从1990—2015年,变异系数在逐年增大,从1990年的24.89%增大到2015年的38.85%,但均属于中等变异。

表1 义长灌域不同年份地下水埋深的统计特征值

Tab. 1 Statistical values of groundwater depth in different years in Yichang irrigation sub-district

年份	监测井	最大值/m	最小值/m	平均值/m	中值/m	变异系数/%	K-S值
1990	67	2.24	0.79	1.52	1.51	24.89	0.772
1995	67	2.47	0.64	1.50	1.46	28.19	0.789
2000	67	2.81	0.88	1.85	1.81	25.85	0.706
2005	67	4.17	1.07	1.91	1.78	30.17	0.960
2010	67	3.99	0.54	1.81	1.72	31.08	0.827
2015	67	5.00	0.27	1.92	1.83	38.85	0.437

为了进一步明确不同区域地下水埋深随时间变化的差异性,选取灌域北部监测井(巴166和巴202)、南部监测井(巴210)、西部监测井(巴181)、东部监测井(巴239)以及中部监测井(巴223)作为代表性监测井,各监测井地下水埋深随时间变化情况见图

2。从图2可以看出,西部、南部和东部监测井的地下水埋深范围在1.0~2.0 m,变化范围比较小;中部监测井(巴223)的地下水埋深变化范围比较大,从1990年的0.84 m逐渐下降到2015年的5.0 m;北部监测井巴202的地下水埋深从1990年的1.42 m下降到

2015 年的 3.77 m,波动比较大,监测井巴 166 的地下水埋深则在 2 m 左右波动;南部监测井(巴 210)的地下水埋深从 1990 年的 0.63 m 下降到 2015 年的 1.60 m,

年均变化率仅为 0.04 m/a,南部监测井距离黄河比较近(图 1),地下水的补给量相对比较大,因此南部监测井地下水埋深变化比较小。

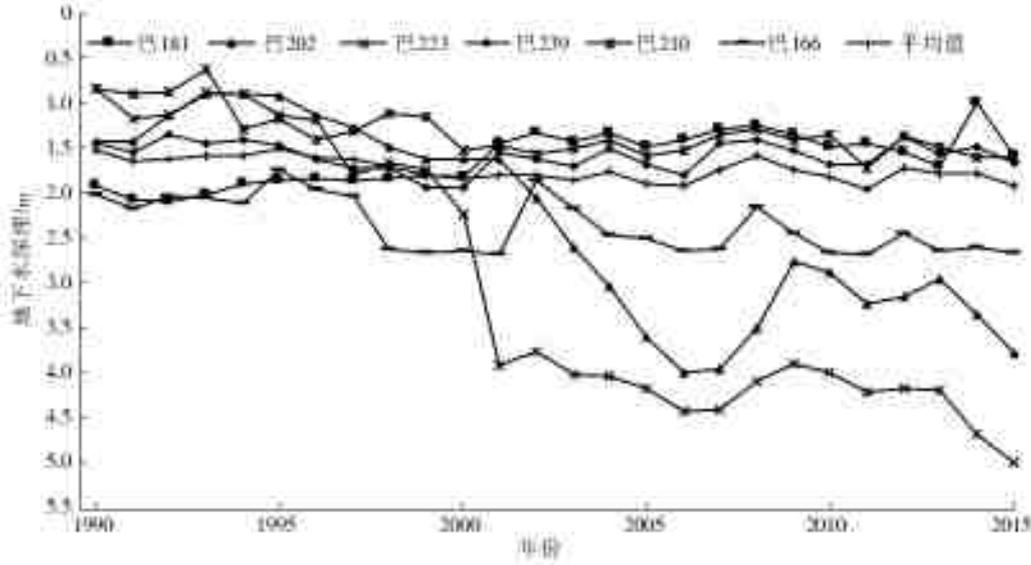


图 2 研究区不同位置监测井 1990—2015 年地下水埋深变化

Fig. 2 Changes in groundwater depth of monitoring wells at different locations in the study area (1990-2015)

### 2.2 地下水埋深空间变异特征

统计特征值在一定程度上反映了地下水埋深的变异性大小,但是为了更好地了解地下水埋深的空间异质性,需要对 1990—2015 年的地下水埋深进行地统计分析,地统计学分析需要数据满足正态分布,本文采用域法识别法对原始数据进行处理,域法识别法就是用平均值  $m$  和标准差  $s$  来识别特异值,定义超过区间  $(m \pm 3s)$  的为特异值,然后用正常值的最大和最小值代替特异值<sup>[18]</sup>。

经过域法识别法处理,在 SPSS 软件中进行单样本 K-S(Kolmogorov-Smirnov)检验,显著水平  $\alpha=0.05$ ,检验结果见表 1。从表 1 的 K-S 值可以看出,6 个典型年的 K-S 值均大于 0.05,属于正态分布,可以进行地统计分析。用 GS+7.0 软件选择最优半变异函数理论模型,选择原则是残差 RSS 最小,决定系数  $R^2$  最大<sup>[19]</sup>。根据 GS+7.0 软件计算

结果,从 1990—2015 年,最优半变异函数模型为高斯、球形和指数的年份分别有 14 a、7 a 和 1 a,6 个代表性年份计算结果见表 2。通过表 2 可知,1990 年地下水埋深的半变异函数理论模型为球状模型,自相关范围为 5 240 m;1995 年和 2010 年为块金模型,块金模型表示变量不存在空间自相关性,主要表现为随机变异<sup>[20]</sup>,因此 1995 年和 2010 年地下水埋深的空间相关性较弱,受到随机因素(人为因素、试验误差等)的影响比较大;2000 年和 2015 年为球状模型,变程分别为 7 020 m 和 9 300 m,2005 年为高斯模型,变程为 7 032 m。根据郝芳华等人的研究,空间异质性在自相关变程内,则对应于中尺度,而由随机部分引起的空间异质性则对应于小尺度<sup>[21]</sup>,因此 1995 年和 2010 年的空间异质性主要体现在小尺度上,而 1990 年、2000 年、2005 和 2015 年的空间异质性则体现在中尺度上。

表 2 义长灌域 1990—2015 年地下水埋深半变异函数理论模型及有关参数

Tab. 2 Semivariogram theoretical model and related parameters of groundwater depth of Yichang irrigation sub-district (1990-2015)

年份	理论模型	块金值	基台值	有效变程/m	残差	决定系数	块金系数/%
1990	球状模型	0.002	0.069	5 240	$1.26 \times 10^{-3}$	0.357	2.90
1995	块金模型	0.099	0.099	—	0.023	0.137	100.00
2000	球状模型	0.003	0.077	7 020	$6.14 \times 10^{-4}$	0.677	3.90
2005	高斯模型	$1 \times 10^{-4}$	0.081	7 032	$2.29 \times 10^{-3}$	0.693	0.12
2010	块金模型	0.108	0.108	—	0.011	0.093	100.00
2015	球状模型	$1 \times 10^{-4}$	0.193	9 300	0.011	0.606	0.05

块金值与基台值 $[C_0/(C_0+C)]$ 的比值,称为块金系数,表明了随机因素占空间异质性的比例<sup>[22]</sup>。块金系数小于 25%,说明变量具有强烈的空间相关性;比值在 25%~75%,说明变量具有中等程度的空间变异性;比值大于 75%,说明变量空间相关性很弱<sup>[23]</sup>。根据表 2 得知,1995 年和 2010 年地下水埋深的块金系数为 1,说明 1995 年和 2010 年地下水埋深的空间异质性主要是由随机因素引起的,其余年份的块金系数都小于 25%,并且自相关因素占到 98%,表明地下水埋深具有很强的空间相关性,

空间异质性主要由自相关因素(灌域本身的地质结构以及补给量和排泄量等因素在空间上的变化)引起。

### 2.3 地下水埋深空间插值结果分析

根据选取的最佳变异函数理论模型,用 surfer 软件对 1990、1995、2000、2005、2010 和 2015 年的地下水埋深进行空间插值(图 3),同时对 6 个典型年不同地下水埋深(0.5~1.5、1.5~2.5、2.5~3.5 m 和大于 3.5 m)所占面积进行计算(见图 4)。

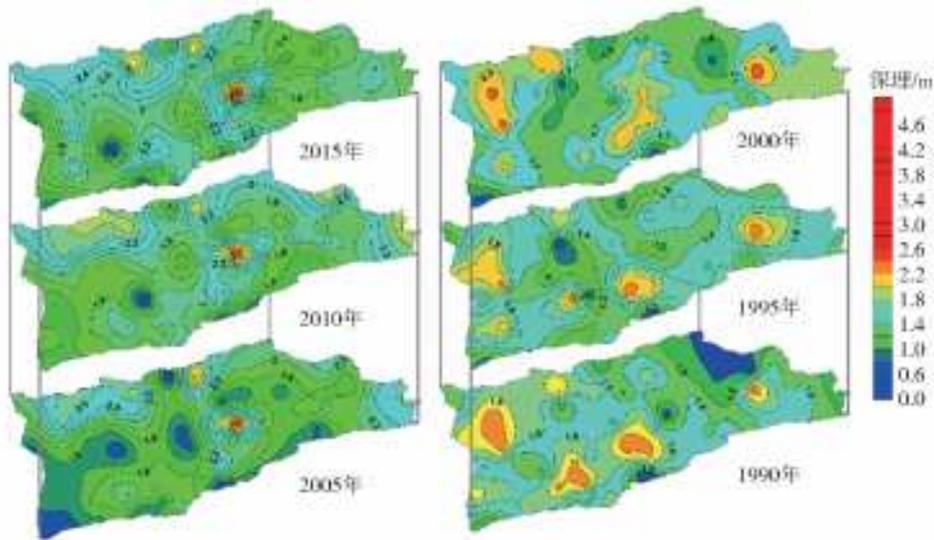


图 3 义长灌域 1990—2015 年地下水埋深空间分布

Fig. 3 Spatial distribution of groundwater depth in Yichang irrigation sub-district (1990-2015)

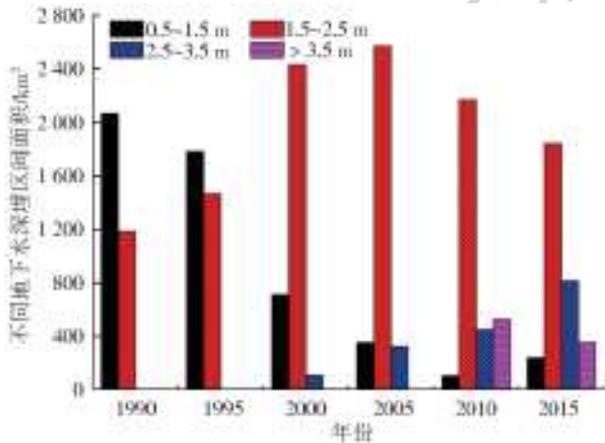


图 4 1990—2015 年不同地下水埋深面积

Fig. 4 Area of different groundwater depth (1990-2015)

由图 3 和图 4 可知,埋深在 0.5~1.5 m 的区域面积在 1990 和 1995 年分别占到灌域总面积的 64%和 55%。然而从 2000 年开始,此范围地下水埋深所占面积开始减少,而埋深范围为 1.5~2.5 m 的区域所占面积则呈增加趋势,6 个典型年分别占到总面积的 36%、45%、75%、79%、67%和 57%。埋深范围在 2.5~3.5 m 的区域面积从 2000 年开始出

现,亦呈增加趋势,所占灌域总面积比例在 2000 年、2005 年、2010 年和 2015 年分别为 3%、10%、14%和 25%。埋深范围大于 3.5 m 的区域面积则从 2010 年开始出现,所占灌域总面积比例在 2010 年和 2015 年分别为 16%和 11%,且主要分布在灌域中部(如监测井巴 223 附近)和北部局部地区(如监测井巴 166 和巴 202),其中中部监测井巴 233 位于五原县县城。这 3 个位置的地下水埋深年变化率明显大于其他区域。从 1990—2015 年,灌域南部的地下水埋深变化不是很大,原因是引水总干渠以及各干渠取水口分布在南部,渠系渗漏入渗补给比其他区域大,且受西南高东北低的地势影响,使得南部地下水埋深年际变化比较平缓。从整体上看,灌域多年地下水埋深在空间上呈现连续性分布,但从 1990 年到 2015 年,灌域北部和中部等值线逐渐密集,说明局部地区地下水埋深空间存在差异性。

### 2.4 地下水埋深的影响因素

地下水位的动态变化一般受到降水、蒸发、气候条件和人为开采等综合因素的影响。根据贾书惠等人的分析,地下水开采量占地下水消耗量的比重较

低,其对地下水埋深变化影响不大<sup>[14]</sup>,因此文章主要针对灌溉、蒸发和降水因素进行了分析。1990—2015 年蒸发量、降雨量、地下水补给量和平均地下

水埋深变化情况见图 5。采用灰色关联分析与偏相关分析相结合的方法量化分析了义长灌域地下水埋深的影响因素,灰色关联分析计算结果见图 6。

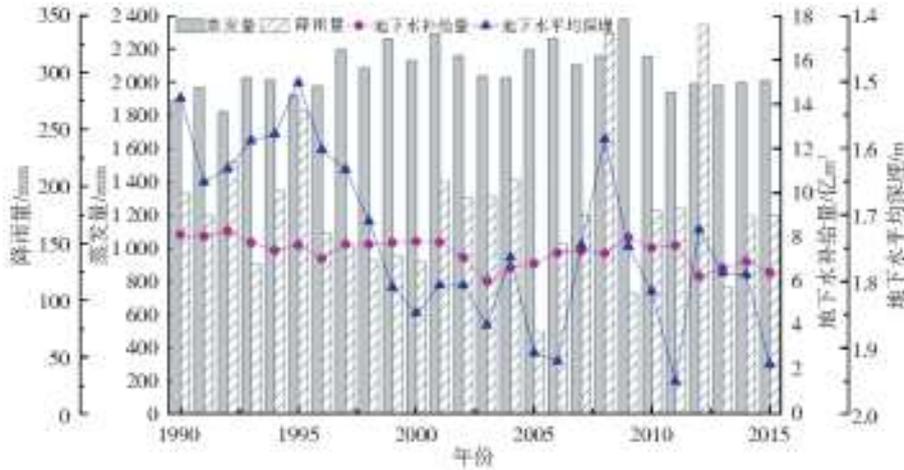


图 5 蒸发量、降雨量、地下水补给量和地下水平均埋深 1990—2015 年变化

Fig. 5 Variations of evaporation, rainfall, groundwater recharge and groundwater depth (1990-2015)

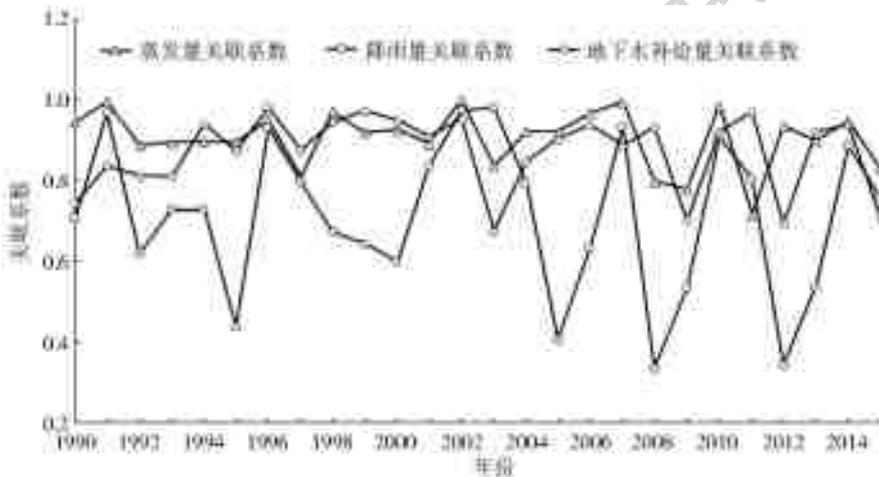


图 6 各影响因素关联系数变化

Fig. 6 Change of coefficient of correlation coefficient of each influencing factor

根据图 6,义长灌域地下水埋深与蒸发量、降雨量和地下水补给量年际间的关联度分别为:0.904、0.711 和 0.870。3 个因素对地下水埋深的影响程度排序为:蒸发量>地下水补给量>降雨量。可见,区域蒸散发和地下水补给对研究区平均地下水位年际变化的影响比较大。另外,1990—2015 年月平均地下水位埋深与蒸发量、降雨量和地下水补给量的关联度分别为 0.898、0.716 和 0.883,驱动因素排序为蒸发量>地下水补给量>降雨量。因此,义长灌域地下水位年际变化与年内变化的影响因素具有一致性,即蒸发量对地下水埋深的影响最大,地下水补给量次之,降雨量对地下水位变化的影响最弱。综上所述,可知蒸发量和地下水补给量是研究区地下水位变化的主要驱动因素,且蒸发量略大于地下水补给量,但两者关联度系数差别不大,且根据图 6 可知,从 1990—2015 年,在节水改造之前(2000 年

之前),地下水补给量对地下水埋深的影响相对较大;而在节水改造之后,蒸发量相比地下水补给量对地下水的影响更大。

为了进一步确定蒸发量和地下水补给量对地下水埋深的影响,采用 SPSS 的偏相关分析,偏相关分析是在控制其他变量的条件下,分析多个变量中某两个变量的线性相关性,相比简单相关分析,根据偏相关系数描述两个变量之间的内在联系更可靠和合理<sup>[24]</sup>。为了绘制偏相关分析散点图,计算采用地下水埋深、蒸发量和地下水补给量的残差,原因是各变量残差的相关系数与原始数据的偏相关系数的计算结果是一致的<sup>[25]</sup>,因此根据图 7 的残差关系可知,蒸发量残差和地下水埋深残差呈正相关,偏相关系数为 0.419;地下水补给量残差和地下水埋深残差呈负相关,偏相关系数为-0.454;根据偏相关系数的绝对值越大,两

个变量间的相关程度越大,通过偏相关分析可知,相比于地下水补给量,蒸发量对地下水埋深的影响更大。

结合灰色关联分析和偏相关分析,发现地下水补给量和蒸发量与地下水埋深的相关性比较显著,且蒸发量的影响要稍大于地下水补给量,主要原因

是灌域位于干旱区,全年的蒸发量都比较大,而地下水补给量对地下水埋深的影响主要发生在春灌、秋灌和秋浇时期,且随着节水改造工程的实施,研究区地下水补给量也呈现减少趋势但逐渐趋于稳定(图5),因此从长期变化角度分析,灌域蒸发量对地下水埋深的影响要稍大于地下水补给量。

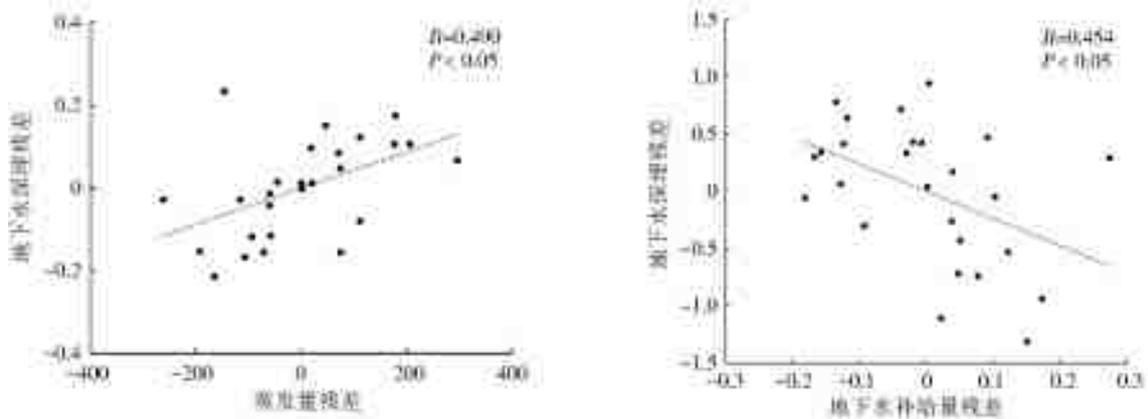


图7 蒸发量、地下水补给量与地下水埋深偏相关分析关系

Fig.7 Partial correlation analysis of evaporation, groundwater recharge and groundwater depth

### 3 讨论

本文利用统计学方法对义长灌域地下水埋深的时空变异性和影响因素进行了分析。监测井数据显示,从1990—2015年,研究区平均地下水埋深增加了近0.4 m,灌域地下水埋深范围为1.5~2.5 m和2.5~3.5 m的区域面积均在增加,这与张越等<sup>[22]</sup>发现河套灌区平均地下水埋深呈增加趋势和埋深大于2.5 m的区域面积不断扩大的结论相一致。根据岳卫峰等<sup>[26]</sup>的研究,河套灌区的地下水埋深应控制在3.0 m以内,对于作物生育期地下水埋深应保持在2.0 m以内,干旱地区地下水位的变化会对土壤盐分、生态环境产生重要的影响<sup>[27]</sup>,可能会产生土壤盐渍化、荒漠化等问题,因此埋深较大区域的出现应该引起重视。本文研究表明,研究区地下水埋深范围为1.5~2.5 m的区域面积占比从1990年的36%增加到2005年的79%,之后又减少到57%;而埋深范围在2.5~3.5 m的区域面积占比从2000年的3%逐渐增加到2015年的25%,同时从2010年开始出现埋深大于3.5 m的区域面积,且主要分布在县城区域以及研究区北部区域(监测井(巴202)和监测井(巴166)附近);县城区域地下水埋深增加主要归结于城镇生活、生态等用水量加大,而北部区域埋深加大的原因尚需要结合局部地区可能会引起地下水埋深变化的因素进行进一步地分析研究。另外,义长灌域地下水埋深平均空间自相关变程在5~7 km,自相关因素占98%,说明义长灌域上的空

间变异主要由结构性因素造成。这一研究结果为义长灌域乃至整个河套灌区地下水监测网的优化设计提供了一定的借鉴意义。

此外,基于灰色关联和偏相关联合分析结果显示,区域蒸散发和地下水补给量对区域地下水埋深的影响比较大,而且蒸发量的影响程度要稍大于地下水补给量,这与苏阅文等人对河套灌区解放闸灌域的研究结果类似<sup>[8]</sup>。尽管随着节水改造工程的实施<sup>[27]</sup>,地下水补给量的变化在一定时期内会对地下水埋深变化产生较大影响,但随着影响的逐渐减缓,地下水水位会达到一个新的动态平衡,因此从地下水长期演变的角度分析,区域气候条件的影响程度要显著一些。另外李中昊等<sup>[13]</sup>研究发现全球变暖会导致蒸散发加剧而造成盐渍化,蒸散发加剧和节水工程的实施将会对研究区地下水水量和水质方面产生重要影响,因此进一步定量研究区域蒸散发尤其是潜水蒸发以及人类活动(灌溉、节水改造等)对地下水动态变化以及灌区生态环境的影响机理就显得尤为重要。

### 4 结论

(1)地下水埋深统计分析和空间插值结果显示,义长灌域1990—2015年的地下水平均埋深呈增加趋势,从1990年的1.52 m下降到了2015年的1.92 m,变化幅度为0.4 m,平均年变化率为1.6 cm,埋深范围在1.5~2.5 m的区域占据了主导地位,平均占到灌域面积的60%,这个范围的埋深有利于作物生

长和土壤盐渍化的防治工作,同时也可减少潜水无效蒸发,增加地下水有效资源量,但从 2005 年之后该埋深范围的区域面积有所下降,而埋深超过 3.0 m 的区域开始出现,且呈增加趋势,这一现象应当引起管理部门的重视,尽早分析原因并采取合理措施,防治大埋深区域面积的持续扩大。

(2)结合地下水埋深空间变异特征与影响因素的分析结果,义长灌域地下水埋深具有较强的空间变异性,且空间变异主要是由结构性变异引起,随机变异占的比重非常小,仅为 2%,最优变异函数以高斯模型为主,占比 54%,变程平均约为 5~7 km。

(3)根据灰色关联和偏相关综合分析结果可知,研究区地下水平均埋深长期变化的驱动因素主要为灌溉入渗补给和区域蒸散发,且蒸散发的影响程度略微显著,但空间上差异性的影响因素尚需进一步研究。比如结合蒸散发、灌溉水量、节水改造工程、作物种植结构以及下垫面条件等不同因素对地下水变化的空间差异性影响进行分析。

#### 参考文献(References):

- [1] JIA Y F, GUO H M, XI B D, et al. Sources of groundwater salinity and potential impact on arsenic mobility in the western Hetao basin, Inner Mongolia[J]. *Science of The Total Environment*, 2017, 601-602: 691-702.
- [2] 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. (YANG H D, FENG Q, GUO X Y. Variation of groundwater depth and its influence factors in the Minqin oasis in 1999-2013[J]. *Journal of Desert Research*, 2017, 37(3): 562-570. (in Chinese))
- [3] CHEN L J, FENG Q. Geostatistical analysis of temporal and spatial variations in groundwater levels and quality in the Minqin oasis, Northwest China[J]. *Environmental Earth Sciences*, 2013, 70(3): 1367-1378.
- [4] 姚荣江,杨劲松,刘广明. 黄河三角洲地区典型地块地下水特征的空间变异性研究[J]. *土壤通报*, 2006, 37(6): 1071-1075. (YAO R J, YANG J S, LIU G M. Spatial variability of groundwater properties in some typical areas of the Yellow River Delta[J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 2006, 37(6): 1071-1075. (in Chinese))
- [5] 邓宝山,瓦哈甫·哈力克,党建华,等. 克里雅绿洲地下水埋深与土壤盐分时空分异及耦合分析[J]. *干旱区地理*, 2015, 38(3): 599-607. (DENG B S, WAHAFUH, DANG J H, et al. Coupled analysis of spatio-temporal variability of groundwater depth and soil salinity in Keriya Oasis[J]. *Arid Land Geography*, 2015, 38(3): 599-607. (in Chinese))
- [6] 管孝艳,王少丽,高占义,等. 盐渍化灌区土壤盐分的时空变异特征及其与地下水埋深的关系[J]. *生态学报*, 2012, 32(4): 198-206. (GUAN X Y, WANG S L, GAO Z Y, et al. Spatio-temporal variability of soil salinity and its relationship with the depth to groundwater in salinization irrigation district [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2012, 32(4): 198-206. (in Chinese))
- [7] 史志广,姜纪沂,赵振宏,等. 基于地统计学的伊犁河谷西部霍城县平原区地下水特征空间变异性分析[J]. *干旱区资源与环境*, 2017, 31(10): 71-76. (SHI Z G, JIANG J Y, ZHAO Z Y, et al. Study on spatial variability of groundwater properties in Huocheng county plain located in western Yili River[J]. *Journal of Arid Land Resources and Environment*, 2017, 31(10): 71-76. (in Chinese))
- [8] 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. (SU Y W, FENG S Y, WANG J, et al. An analysis of distribution regularities and the influencing factors of groundwater level in the Hetao Irrigation District of Inner Mongolia[J]. *China Rural Water and Hydropower*, 2017(7): 33-37. (in Chinese))
- [9] 张素芳. 基于主成分分析法的咸阳市区地下水动态驱动因子分析[J]. *水利与建筑工程学报*, 2012, 10(2): 126-129. (ZHANG S F. Analysis on groundwater dynamic driving factors in Xianyang City based on principal component analysis method [J]. *Journal of Water Resources and Architectural Engineering*, 2012, 10(2): 126-129. (in Chinese))
- [10] 魏晓妹,刘俊民,王立坚,等. 黄土原灌区地下水动态机理的试验研究[J]. *干旱地区农业研究*, 1999(1): 100-105. (WEI X M, LIU J M, WANG L J, et al. Dynamic regime of groundwater in irrigation area of Loess Plateau[J]. *Agricultural Research in the Arid Areas*, 1999(1): 100-105. (in Chinese))
- [11] 陈伏龙,郑旭荣,何新林,等. 莫索湾灌区 1998—2007 年地下水埋深变化及影响因素[J]. *武汉大学学报(工学版)*, 2011, 44(3): 317-320. (CHEN F L, ZHENG X R, HE X L, et al. Change of groundwater depth and impact factors in Mosuowan Irrigation District during 1998-2007 [J]. *Engineering Journal of Wuhan University*, 2011, 44(3): 317-320. (in Chinese))
- [12] 王通,徐征和,张立志,等. 邢家渡灌区地下水动态特征及驱动因素研究[J]. *人民黄河*, 2017, 39(8): 49-54. (WANG T, XU Z H, ZHANG L Z, et al. Research of dynamic characteristics and driving factors of groundwater in Xingjiadu Irrigation Area[J]. *Yellow River*, 2017, 39(8): 49-54. (in Chinese))

- [13] 李中昊,陈阜,文新亚,等. 气温上升对河套义长灌域土壤盐分含量的影响[J]. 中国农业大学学报, 2013, 18(1): 61-68. (LI Z H, CHEN F, WEN X Y, et al. Effects of climate change on soil salinity in Hetao irrigation area [J]. Journal of China Agricultural University, 2013, 18(1): 61-68. (in Chinese))
- [14] 贾书惠,岳卫峰,王金生,等. 内蒙古义长灌域近 20 年地下水均衡分析[J]. 北京师范大学学报(自然科学版), 2013, 49(2): 243-245. (JIA S H, YUE W F, WANG J S, et al. Groundwater Balance in the Yichang Irrigation Sub-district in Inner Mongolia in the past 20 years[J]. Journal of Beijing Normal University (Natural Science), 2013, 49(2): 243-245. (in Chinese))
- [15] 马韬,李琦,杨丽清,等. 基于不同根系分布形式的盐渍化农田向日葵根系吸水模拟[J]. 中国农村水利水电, 2016(9): 18-23. (MA T, LI Q, YANG L Q, et al. Simulation of root water on different uptake for sunflower in saline field based root distribution functions[J]. China Rural Water and Hydropower, 2016(9): 18-23. (in Chinese))
- [16] JOSHI C, MOHANTY B P. Physical controls of near-surface soil moisture across varying spatial scales in an agricultural landscape during SMEX02 [J]. Water Resources Research, 2010, 46(12).
- [17] 徐翠兰,侯淑楠,姚紫东,等. 南方农田土壤容重空间变异性及其尺度效应[J]. 排灌机械工程学报, 2017, 35(5): 424-429. (XU C L, HOU S N, YAO Z D, et al. Spatial variability and scale effect of soil bulk density of farm land in South China[J]. Journal of Drainage and Irrigation Machinery Engineering, 2017, 35(5): 424-429. (in Chinese))
- [18] 刘爱利,王培法,丁园圆. 地统计学概论[M]. 北京: 科学出版社, 2012: 167-170. (LIU A L, WANG P F, DING Y Y. Introduction to geostatistics[M]. Beijing: Science Press, 2012. (in Chinese))
- [19] 张娜,张栋良,屈忠义,等. 不同尺度下内蒙古河套灌区有机质空间变异[J]. 生态学杂志, 2016, 35(3): 630-640. (ZHANG N, ZHANG D L, QU Z Y, et al. Spatial variability of soil organic matter at different sampling scales Hetao irrigation area [J]. Chinese Journal of Ecology, 2016, 35(3): 630-640. (in Chinese))
- [20] 张宏伟,胡广录,刘桂民,等. 黑河中游荒漠绿洲过渡带斑块植被区土壤水分与有机质空间变异特征[J]. 土壤通报, 2016, 47(6): 1325-1331. (ZHANG H W, HU G L, LIU G M, et al. Spatial variability of soil moisture and organic matter in desert-oasis ecotone in the Middle Reaches of Heihe River [J]. Chinese Journal of Soil Science, 2016, 47(6): 1325-1331. (in Chinese))
- [21] 郝芳华,欧阳威,李鹏,等. 河套灌区不同灌季土壤氮素时空分布特征分析[J]. 环境科学学报, 2008, 28(5): 845-852. (HAO F H, OUYANG W, LI P, et al. Temporal and spatial variability of nitrogen in soil in the Wulate irrigation district of the Hetao irrigation area in Inner Mongolia[J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2008, 28(5): 845-852. (in Chinese))
- [22] 张越,赵勇,薛泽宇,等. 河套灌区地下水时空变化趋势成因分析[J]. 人民黄河, 2016, 38(11): 44-49. (ZHANG Y, ZHAO Y, XUE Z Y, et al. Cause analysis of temporal and spatial variation of groundwater level in Hetao Irrigation Area [J]. Yellow River, 2016, 38(11): 44-49. (in Chinese))
- [23] AHMADI S H, SEDGHAMIZ A. Geostatistical analysis of spatial and temporal variations of groundwater level[J]. Environmental Monitoring and Assessment, 2007, 129(1-3): 277-294.
- [24] 严丽坤. 相关系数与偏相关系数在相关分析中的应用[J]. 云南财经大学学报, 2003, 19(3): 78-80. (YAN L K. Application of correlation coefficient and biased correlation coefficient in related analysis[J]. Journal of Yunnan University of Finance and Economics, 2003, 19(3): 78-80. (in Chinese))
- [25] 罗敏,古丽·加帕尔,郭浩,等. 2000—2013 年塔里木河流域生长季 NDVI 时空变化特征及其影响因素分析[J]. 自然资源学报, 2017, 32(1): 50-63. (LUO M, GULI J, GUO H, et al. Spatial-temporal variation of growing-season NDVI and its responses to hydrothermal condition in the Tarim River Basin from 2000 to 2013 [J]. Journal of Natural Resources, 2017, 32(1): 50-63. (in Chinese))
- [26] 岳卫峰,贾书惠,高鸿永,等. 内蒙古河套灌区地下水合理开采系数分析[J]. 北京师范大学学报(自然科学版), 2013, 49(2): 239-242. (YUE W F, JIA S H, GAO H Y, et al. Allowable withdrawal coefficient of groundwater in Hetao Irrigation District Inner Mongolia[J]. Journal of Beijing Normal University (Natural Science), 2013, 49(2): 239-242. (in Chinese))
- [27] 高鸿永,伍靖伟,段小亮,等. 地下水位对河套灌区生态环境的影响[J]. 干旱区资源与环境, 2008, 22(4): 134-138. (GAO H Y, WU J W, DUAN X L, et al. The impact of water-table on the ecological environment of HeTao Irrigation [J]. Area Journal of Arid Land Resources and Environment, 2008, 22(4): 134-138. (in Chinese))