

doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2017.09.025

# 气候变化与人类活动对地下水埋深变化的影响

朱永华<sup>1</sup> 张生<sup>1</sup> 赵胜男<sup>1</sup> 孙标<sup>1</sup> 刘禹<sup>1</sup> 张颖<sup>2</sup>

(1. 内蒙古农业大学水利与土木建筑工程学院, 呼和浩特 010018;

2. 呼和浩特市环境科学研究所, 呼和浩特 010018)

**摘要:** 以通辽市科尔沁区为研究区, 利用累积距平、M-K 突变检验和累积量斜率变化率比较法, 对降水量变化与地下水埋深变化进行突变检验, 定量评估研究区气候变化与人类活动对地下水埋深变化的贡献度。结果表明: 地下水埋深多年来呈显著上升趋势, 降水对地下水埋深动态变化的影响存在明显的滞后现象, 滞后期为 3 a; 研究区地下水埋深与降水量突变点为 1998 年, 前期 1980—1998 年为基准期, 后期 1999—2016 年为影响期; 研究区气候变化对地下水埋深变化影响的贡献度为 24.5%, 人类活动对地下水埋深变化影响的贡献度为 75.5%, 人类活动是造成地下水埋深下降的主要原因。

**关键词:** 气候变化; 人类活动; 西辽河; 地下水埋深

中图分类号: P641 文献标识码: A 文章编号: 1000-1298(2017)09-0199-07

## Impacts of Climate Change and Human Activities on Changes of Groundwater Level

ZHU Yonghua<sup>1</sup> ZHANG Sheng<sup>1</sup> ZHAO Shengnan<sup>1</sup> SUN Biao<sup>1</sup> LIU Yu<sup>1</sup> ZHANG Ying<sup>2</sup>

(1. College of Water Conservation and Civil Engineering, Inner Mongolia Agricultural University, Huhhot 010018, China

2. Institute of Environmental Science in Huhhot, Huhhot 010018, China)

**Abstract:** In recent years, there has been a substantial change for groundwater dynamic change in northern of China, and the level of groundwater in many cities overall decline. The West Liao river plain area in Tongliao City, Inner Mongolia, is a typical ecotone between agriculture and animal husbandry, and the major water source of it is groundwater. Therefore, it is significant to study the groundwater dynamic state and its causes for reasonable exploitation and utilization of water resources and ecological environment management. The Horqin District of Tongliao City was selected as the research area. Based on the relationship between dynamic variation of groundwater, precipitation and groundwater exploitation, by using the comparison method of regression analysis, M-K mutation testing, accumulative anomaly method and accumulation slope change rate, the rate of different impact contribution for the vary of groundwater dynamic was quantitatively separated, and the driving factors also were quantitatively analyzed. The results showed that there was a significant upward trend for the groundwater depth over the years. Besides, precipitation showed clear hysteresis phenomenon for groundwater dynamic changes, and the delay period was three years. The abrupt change year of groundwater and precipitation in the study area is 1998. The contribution of climate change to the dynamic variation of groundwater in the study area was 24.5%, and the contribution of human activities to the dynamic variation of groundwater was 75.5%. The change of groundwater dynamic state was mainly caused by the human activity. The results of this research would have important practical significance for rational exploitation and utilization of water resources and ecological environment management.

**Key words:** climate change; human activities; West Liao river; groundwater depth

收稿日期: 2017-05-04 修回日期: 2017-06-23

基金项目: 水利部公益性行业科研专项(201501031)、国家自然科学基金项目(51339002、51569019、51669021、51509133)和内蒙古农业大学优秀青年基金项目(2014XYQ-10)

作者简介: 朱永华(1986—),男,博士生,主要从事水环境科学与工程研究,E-mail: Yh\_Z@emails.imau.edu.cn

通信作者: 张生(1960—),男,教授,博士生导师,主要从事水环境科学与工程研究,E-mail: shengzhang@imau.edu.cn

## 引言

近年来,位于我国北方农牧交错带的一些城市地下水水流场出现了大幅变动情况,地下水水位总体上呈现下降趋势<sup>[1-2]</sup>,依赖这些地下水资源的社会经济和生态环境受到了一定程度的影响。因此,分析地下水埋深动态变化特征,揭示其异变的原因具有科学指导意义。

关于地下水水流场变化特征的研究,世界各地针对地下水水資源量<sup>[3]</sup>、地下水水质<sup>[4]</sup>、地下水补给方式<sup>[5]</sup>及三水转换<sup>[6]</sup>等开展了大量的研究。其中广泛应用传统的水均衡和数字模型模拟等分析方法,在我国主要涉及华北平原流域<sup>[7]</sup>、西辽河流域<sup>[8]</sup>和三江源流域<sup>[9]</sup>等地区。

关于气候变化和人类活动对地下水水流场变化的影响,地下水水流场对气候变化和人类活动的响应研究多侧重于分别单独研究气候变化或人类活动对地下水水流场变化的影响,如地下水对气候变化的响应<sup>[10]</sup>、景观格局<sup>[11]</sup>、植被覆盖<sup>[12]</sup>、农业灌溉<sup>[7]</sup>等人类活动对地下水变化的影响等。这些成果均表明,气候变化与人类活动对流域地下水水流场变化的影响是相互交织、相互作用的。

但两类影响各占比重多少,即气候变化与人类活动分别对地下水水流场变化影响程度如何,所占的贡献度比重是如何分配的,目前尚没有定量分析,由此,逐渐成为当今研究的重点课题之一。总体上可分为两类研究方式,一是利用地下水埋深动态与各个环境因素的响应关系,分析各自的影响程度<sup>[13]</sup>;二是借助水量平衡方程,分析引起地下水水位位移变化的各种因素所占的权重来计算贡献度<sup>[14]</sup>。前者较后者简单实用,所需数据较少,易于实现,并且易于改进算法,找到适合本研究区的计算模式。

对于西辽河流域平原区,前人已经取得了一些科研成果<sup>[15-16]</sup>。然而,这些研究均为单一或定性地分析了环境因素或人类活动对地下水埋深动态的影响,综合分析气候变化和人类活动对地下水埋深变化的贡献度的研究鲜有报道。

西辽河流域平原区是典型的干旱半干旱地区,降水量较小,主要依赖地下水资源,生态环境脆弱。随着人民生活水平和社会经济的不断发展,其地下水埋深逐年增加,并于20世纪70—80年代开始出现地下水开采漏斗区。本文以地下水漏斗区所处的通辽市科尔沁区为研究区,基于降水变化、地下水开采和地下水埋深动态异变的三者关系,采用回归分析、M-K突变检验、累积距平法与累积量斜率变化率比较法,定量分离对影响地下水埋深异变各要素

的贡献度,并对影响的成因与驱动因素进行定量分析。

## 1 材料与方法

### 1.1 研究区概况

研究区为西辽河流域平原区通辽市科尔沁区,位置见图1,行政区域面积为3 212 km<sup>2</sup>,地理坐标为北纬43°22′~43°58′、东经121°42′~123°02′之间。多年平均降水量为385.1 mm,年蒸发量为2 000 mm(蒸发皿20 cm口径),多年平均气温为6℃左右。科尔沁区境内有西辽河、清河和洪河3条过境河流,境内不产流,其水資源量受上游产流区控制。多年以来,西辽河麦新一郑家屯河段常年断流,河道水利用量及其补给地下水量几乎为零。

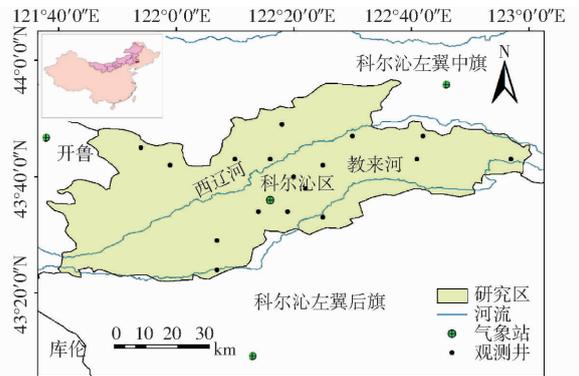


图1 研究区位置图

Fig. 1 Location of study area

研究区坐落在西辽河、教来河冲积平原中部,是工、农业用水量集中区。研究区境内含水层累积厚度约为136 m,主要由第四系松散沉积物构成。粘性土相对隔水层交错分布其中,且多呈薄层透镜体状。含水层的岩性颗粒在水平方向上自西向东逐渐变细,粘性土含量夹层及厚度增多增厚;在垂直方向上,含水层自上而下由河流相过渡到河湖相和冰水相,岩性颗粒多具有上下粗、中间细、中部分选差的沉积特点,大体可分为3个含水层:①主要接受大气降水渗入补给、地表水渗入及地下水径流补给的浅层含水层。②主要接受上游地下水径流补给,上部含水层的渗透补给的中层含水层。③含水层厚度最大50 m,具有承压性的深层含水层<sup>[17]</sup>。人为开采为主要排泄方式,2013年地下水供水量占研究区总供水量的95.74%。

本文1959—2016年降水量数据(通辽站、开鲁站、科左中旗与科左后旗站降水量资料)和1980—2016年地下水埋深观测资料(通辽科尔沁区17口地下水观测井)源自当地气象站与水文局;为使降水与地下水数据更能代表研究区,特选取通辽市科尔沁区周边4个气象站与17口分别位于中层及深

层含水层的地下水观测井数据的平均值进行因素分析;地下水超采及其他相关数据源自2002—2015年通辽市水资源公报、历年通辽市地区地下水相关文献和2000—2015年内蒙古统计年鉴。

## 1.2 研究方法

研究区气候序列采用研究区周边4个气象站资料的平均值代表整个研究区。地下水水位动态序列为研究区内17口观测井月观测值的年平均值。

数据序列之间的关系采用相关系数及回归分析法;突变点的划分采用M-K突变检验法与累积距平法。

Mann-Kendall(M-K)检验法是一种简便有效的非参数统计法,不受变量是否具有正态分布的影响,自20世纪50年代便被广泛应用在气候气象、水文等研究领域<sup>[18-21]</sup>。

设 $X_1, X_2, \dots, X_n$ 为降水量或地下水埋深数据的时间序列变量,构造一秩序列

$$S_k = \sum_{i=1}^k r_i \quad (k=1, 2, \dots, n) \quad (1)$$

$$r_i = \begin{cases} 1 & (X_i > X_j) \\ 0 & (X_i \leq X_j) \end{cases} \quad (2)$$

式中  $r_i$ ——第*i*个样本 $X_i > X_j$ ( $1 \leq j \leq i$ )的样本值  
 $S_k$ ——第*i*个样本 $X_i > X_j$ ( $1 \leq j \leq i$ )的样本累积数

$n$ ——样本时间长度

$i, j, k$ ——样本时间序列代表值

在数据时间序列随机独立假定下,定义统计量

$$I_{UF_k} = \frac{S_k - \bar{S}_k}{\sqrt{V_{S_k}}} \quad (k=1, 2, \dots, n) \quad (3)$$

式中  $\bar{S}_k$ ——数据 $S_k$ 均值

$V_{S_k}$ ——数据 $S_k$ 方差

$I_{UF_k}$ ——M-K检验正序检验值

将数据时间序列调整为 $X_n, X_{n-1}, \dots, X_1$ ,重复以上过程得到检测变量 $I_{UB_k}$ 值

$$I_{UB_k} = -I_{UF_k} \quad (k=1, 2, \dots, n) \quad (4)$$

式中  $I_{UB_k}$ ——M-K检验逆序检验值

则确定由 $I_{UB_k}$ 与 $I_{UF_k}$ 所构成的2条曲线在临界线之间的交点为突变点。

累积距平法是一种通过曲线直观反映离散数据变化趋势的非线性统计方法,便于直接反映不同时期不同阶段气候<sup>[22]</sup>、水文<sup>[23]</sup>等数据的变化,直接确定其突变年份。时间序列 $X$ 在*t*时刻的累积距平值为

$$I_{LP} = \sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X}) \quad (5)$$

式中  $I_{LP}$ ——序列累积距平值

$\bar{X}$ ——序列平均值

根据累积距平曲线的的拐点判断其突变点。

对于气候变化和人类活动对径流变化贡献度的计算分析,借鉴王随继等<sup>[24]</sup>提出的关于累积量斜率变化率比较方法,累积地下水埋深与降水量斜率变化率计算公式为

$$R_{SG} = 100(S_{Ga} - S_{Gb})/S_{Gb} \quad (6)$$

$$R_{SP} = 100(S_{Pa} - S_{Pb})/S_{Pb} \quad (7)$$

式中  $R_{SG}$ ——累积地下水水位斜率变化率, m/a

$R_{SP}$ ——累积降水量斜率变化率, mm/a

$S_{Gb}$ ——假设累积地下水埋深在突变年前年际线性关系式的斜率, m/a

$S_{Ga}$ ——假设累积地下水埋深在突变年后年际线性关系式的斜率, m/a

$S_{Pb}$ ——假设累积降水量在突变年前年际线性关系式的斜率, mm/a

$S_{Pa}$ ——假设累积降水量在突变年后年际线性关系式的斜率, mm/a

降水量变化对地下水动态变化的贡献度为

$$C_p = R_{SP}/R_{SG} \times 100\% \quad (8)$$

式中  $C_p$ ——降水量变化对地下水动态变化的贡献度, %

由于研究区降水是地下水主要补给来源,且由于长期地下水超采,土壤包气带增厚,蒸发量对地下水动态变化影响不大,因此本研究不考虑蒸发等其他因素对地下水动态变化的影响,则人类活动对地下水动态变化的贡献度表达式为

$$C_H = 1 - C_p \quad (9)$$

式中  $C_H$ ——人类活动对地下水动态变化的贡献度, %

## 2 结果与分析

### 2.1 降水量及地下水埋深的变化特征

研究区1959—2016年平均降水量与地下水埋深变化特征如图2所示,降水量年平均值为367.9 mm,在200~600 mm之间波动,通过趋势线分析可知,整体呈下降趋势,但不显著,10 a变化率为-11.5 mm/(10 a);地下水埋深变化整体呈显著上升趋势,10 a变化率为1.83 mm/(10 a)。

降水量变化与地下水埋深变化不同步,降水量下降,地下水埋深也增加,如1991—1992年、1998—1999年与2012—2013年。前人较多认为这与人类活动对地下水开采量增大有关,但根据2012年和2013年通辽市水资源公报可知:2013年全市供水量与用水量都为26.77亿 $m^3$ ,其中地下水供水量

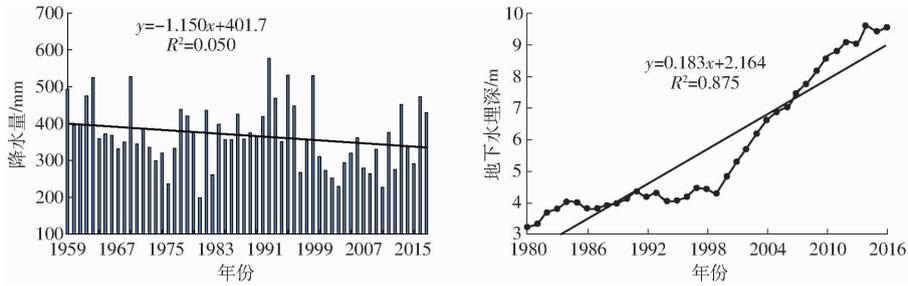


图2 降水量及地下水埋深变化特征

Fig. 2 Characteristics of groundwater dynamics and precipitation

25.63 亿  $m^3$ , 这比 2012 年供水量 28.46 亿  $m^3$  减少了 1.69 亿  $m^3$ , 地下水埋深不仅受人类开采影响, 也受包气带增厚变化影响, 降水对地下水补给产生滞后效应。

通过对比地下水埋深与不同年份降水量的相关性(表 1)可知, 地下水埋深与当年降水量相关系数仅为  $-0.195$ , 与 3 a 前降水量相关系数为  $-0.374$ , 相关关系明显, 从侧面说明降水对地下水埋深有明显的滞后效应, 滞后时间为 3 a。

表 1 地下水埋深与降水量的相关系数

Tab. 1 Correlation coefficients between precipitation and groundwater depth

	地下水埋深	降水量(当年)	降水量(滞后 3 a)
地下水埋深	1	$-0.195$	$-0.374^*$
降水量(当年)		1	0.274
降水量(滞后 3 a)			1

注: \* 表示在  $p < 0.05$  水平(双侧)显著相关。

## 2.2 突变年份的确定及突变特征

运用 M-K 突变检验与累积距平方法分别对研

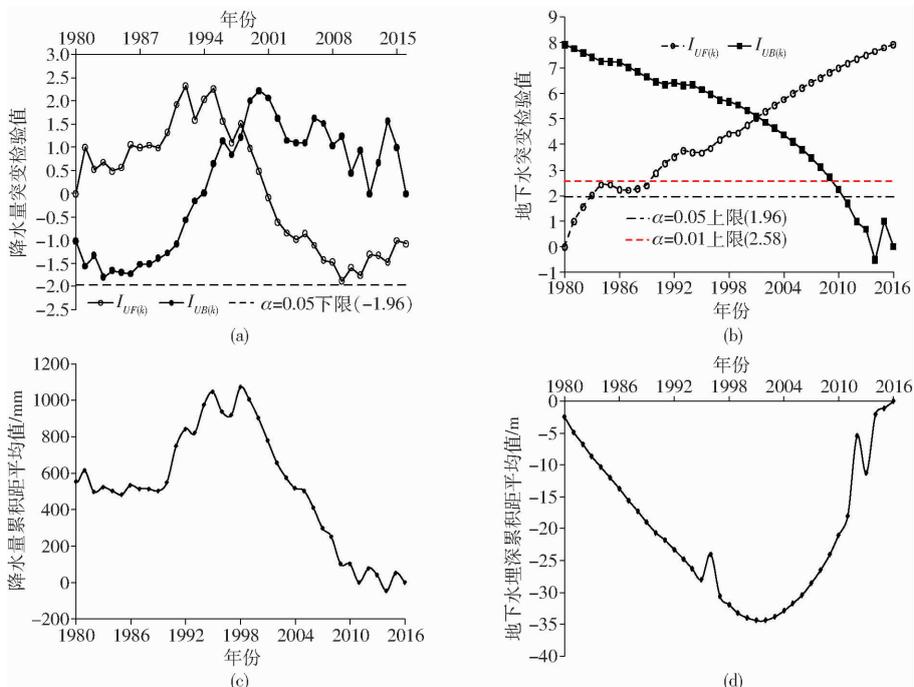


图3 地下水埋深、降水量变异点识别

Fig. 3 Variance recognition of groundwater depth and precipitation

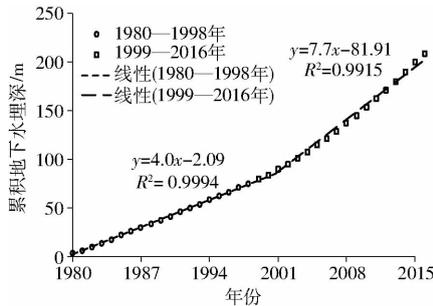
究区地下水埋深与降水量变化的突变点进行确定(图 3)。从图 3a 可知, 研究区降水量  $I_{UF(k)}$  的绝对值均在置信区间内, 显著性水平较高, 呈低—高一低的变化趋势; 并确定突变年份为 1998 年, 这与图 3c 运用累计距平法确定的突变年份相一致, 都为 1998 年; 但图 3b 所确定的地下水埋深突变年份为 2001 年, 且不在置信区间内, 表现为变化不显著, 同样对地下水埋深运用累积距平法进行分析(图 3d), 确定突变年份也为 2001 年。

地下水埋深的突变年份与降水量突变年份分别为 2001 年与 1998 年, 这可能与降水量变化对地下水埋深变化影响有滞后 3 a 的作用有关, 所以本文将研究区突变年份定为 1998 年, 其前、后分为基准期与影响期。

## 2.3 气候变化和人类活动对地下水动态变化的贡献

研究区累积地下水埋深、降水量与年份对应关系见图 4, 突变年份前、后均达到了 0.01 以上显著水平。再通过趋势线分析可知, 累积地下水埋深变

化在影响期(1999—2016年)上升速率为 7.7 m/a, 约为基准期(1980—1998年)上升速率 4.0 m/a 的 2 倍,这说明研究区累积地下水埋深呈显著增加趋势,特别是在影响期内;累积降水量变化在基准期与影响期上升速率分别为 408.0 mm/a 和 315.2 mm/a, 两者差异不明显,说明研究区累积降水量变化整体呈上升趋势,但在影响期内增加趋势减弱。研究区累积地下水埋深与累积降水量变化率见表 2。



由图 4 与表 2 可知,影响期(1999—2016年)与基准期相比较,累积地下水埋深、降水量与年份的斜率变化量分别为 3.7 m/a 与 -92.8 mm/a,减少率分别为 92.5% 和 -22.7%;结合式(6)~(8),计算出研究区气候变化对地下水埋深动态变化影响的贡献度为 24.5%,则根据式(9)可知,人类活动对地下水埋深动态变化影响的贡献度为 75.5%。

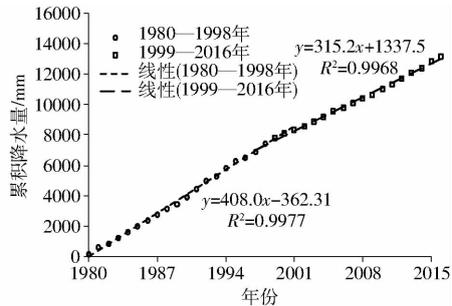


图 4 研究区累积地下水埋深、降水量与年份对应关系

Fig. 4 Variations of cumulative groundwater depth and precipitation for study area

表 2 研究区累积地下水埋深、降水量变化特征

Tab. 2 Characteristics of cumulative groundwater depth and precipitation for study area

年份	累积地下水埋深 斜率/(m·a <sup>-1</sup> )	影响期与基准期对比		累积降水量 斜率/(mm·a <sup>-1</sup> )	影响期与基准期对比	
		变化量/(mm·a <sup>-1</sup> )	相对变化率/%		变化量/(mm·a <sup>-1</sup> )	相对变化率/%
1980—1998 年	4.0			408.0		
1999—2016 年	7.7	3.7	92.5	315.2	-92.8	-22.7

### 3 讨论

人类活动是引起研究区地下水动态变化的关键因子。研究区地表水匮乏,地下水开发利用程度较高,农业灌溉、城市用水、工业用水等集中应用,且高度依赖地下水,使得地下水开采量居高不下,超采情况严重。由表 3 可知,随着时间的推移,地下水开采量显著增加,影响期开采量约为基准期的 2 倍,地下水超采漏斗面积增加 236.76 km<sup>2</sup>,这说明人类活动对地下水动态变化影响显著;从影响期的前 10 a (1999—2008 年)数据可知,研究区地下水动态变化与超采漏斗面积都有所增加,但第一产业地下水开采量却大于影响期后段(2009—2016 年),这与第二产业地下水开采量变化趋势相反,说明随着经济社会发展,研究区地下水水位动态变化受农业影响减弱,受工业影响在逐渐加强。再从研究区水资源供需关系方面分析可知(图 5),1980—2016 年地下水动态与 R/E(研究区补给量与地下水开采量比值,表明水资源供需关系)关系显著,随着 R/E 值的减小,地下水开采漏斗的中心水位与研究区超采面积明显增大;影响期与基准期相比较,前者中心水位与超采面积随着 R/E 减小都呈指数增加,而后者中心

水位与超采面积随着 R/E 减小都呈线性增加,前者变化速率明显大于后者。

表 3 研究区地下水资源不同时段统计平均值

Tab. 3 Statistical meanings of groundwater resources in different times of study area

年份	地下水 开采量/m <sup>3</sup>	不同行业地下水 开采量/m <sup>3</sup>		地下水超采漏 斗面积/km <sup>2</sup>
		第一产业	第二产业	
1980—1998 年	3.08 × 10 <sup>9</sup>	2.45 × 10 <sup>9</sup>	3.00 × 10 <sup>8</sup>	115.27
1999—2016 年	5.85 × 10 <sup>9</sup>	4.63 × 10 <sup>9</sup>	6.90 × 10 <sup>8</sup>	352.03
1999—2008 年	5.69 × 10 <sup>9</sup>	4.98 × 10 <sup>9</sup>	3.20 × 10 <sup>8</sup>	266.86
2009—2016 年	6.11 × 10 <sup>9</sup>	4.23 × 10 <sup>9</sup>	1.11 × 10 <sup>9</sup>	601.66

随着开采量的不断增加,研究区土壤包气带不断增厚,降水量作为研究区地下水资源的主要补给来源势必受到影响<sup>[25]</sup>。许多学者已经对研究区降水量变化与地下水埋深的响应关系进行了研究:在地下水埋深均值为 0.6 m 左右的草甸地区,由于受到人为因素影响较少,即使较少的降水量也会引起地下水埋深的相应变化,但在地下水埋深均值为 6 m 左右的固定沙丘地区,强降水对地下水埋深变化影响也相对很弱<sup>[26-28]</sup>。研究区多年地下水埋深均值一般在 5 m 左右,1998 年(变异年)以后,地下

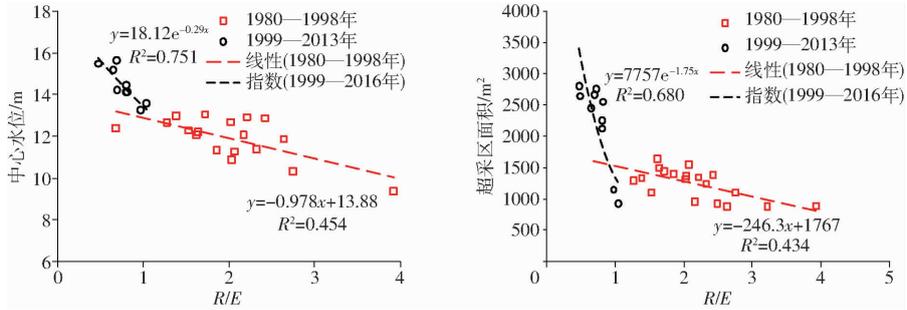


图5 地下水动态与R/E关系变化

Fig. 5 Variations between groundwater depth and R/E

水埋深持续增加,2012年以后年地下水埋深甚至达到9 m以上。降水量对地下水资源量的补给作用与时间随着包气带的不断增厚而不断减弱与滞后,通过单纯的数学统计分析得出,通辽市科尔沁区降水量对地下水资源量补给时间滞后期长达3 a,这也从另一侧面补充了孙傲等<sup>[28]</sup>在科尔沁沙地的研究成果,即在埋深较大处降水量对相应地下水埋深响应关系不明确的问题。

突变年份的确定,应该运用适合研究区现状与数据资料的合理方法,准确、有效地确定出时间序列存在的突变情况,以便更加细化各个分析阶段数据变化情况与气候变化的各自贡献度。本文在分析时,加入了降水变化对地下水埋深影响滞后作用的考虑,最终确定出1998年为研究区突变年份。但分析时仅对2种环境因素进行了相关性分析,还存在一定的改进空间,今后应进一步完善。

本文首次借鉴累积量斜率变化率比较法应用于气候变化与人类活动对地下水动态变化影响的分析中,不一定具有完全很好的实践性与合理性。累积量斜率变化率比较法虽然分离了气候变化与人类活动对地下水动态变化的影响,却忽略了蒸散发等影

响不显著的环境因素,而且也没有具体讨论人类活动对地下水动态的影响,这可能会影响研究成果的计算精度。因此,如何进一步定量研究气候变化与人类活动对地下水的影响,并融入蒸发、气温与生态等环境因素,还需要不断全面与深入地研究。

## 4 结论

(1)研究区地下水埋深多年来总体呈明显上升趋势,10 a变化率为1.83 mm/(10 a);降水量总体呈不显著的下降趋势,10年变化率为-11.5 mm/(10 a);但是地下水埋深随着降水的增加而减少,呈负相关关系。

(2)通过M-K突变检验与累积距平检验法确定出研究区地下水埋深变化突变年份为2001年,降水量变化突变年份为1998年;结合降水量变化对地下水埋深变化影响存在滞后现象,滞后期为3 a;精准确定出1998年为研究区的突变年份,其前、后分别为基准期(1980—1998年)与影响期(1999—2016年)。

(3)影响期与基准期相比,研究区气候变化对地下水动态变化影响的贡献度为24.5%,人类活动对地下水动态变化影响的贡献度为75.5%。

## 参 考 文 献

- 米丽娜,肖洪浪,朱文婧,等. 1985—2013年黑河中游流域地下水位动态变化特征[J]. 冰川冻土,2015, 37(2):461-469. MI Li'na, XIAO Honglang, ZHU Wenjing, et al. Dynamic variation of the groundwater level in the middle reaches of the Heihe river during 1985—2013[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2015, 37(2):461-469. (in Chinese)
- 张光辉,费宇红,刘春华,等. 华北漳滏平原地下水下降与灌溉农业关系[J]. 水科学进展,2013, 24(2):228-234. ZHANG Guanghui, FEI Yuhong, LIU Chunhua, et al. Relationship between decline of shallow ground water levels and irrigated agriculture on Hufu plain of North China[J]. Advances in Water Science, 2013, 24(2):228-234. (in Chinese)
- MEDELLIN-AZUARA J, MACEWAN D, HOWITT R E, et al. Hydro-economic analysis of groundwater pumping for irrigated agriculture in California's Central Valley, USA[J]. Hydrogeology Journal, 2015, 23(6):1205-1216.
- ALAZARD M, BOISSON A, MARECHAL J C, et al. Investigation of recharge dynamics and flow paths in a fractured crystalline aquifer in semi-arid India using borehole logs: implications for managed aquifer recharge[J]. Hydrogeology Journal, 2016, 24(1):1-23.
- SIADE A, NISHIKAWA T, MARTIN P. Natural recharge estimation and uncertainty analysis of an adjudicated groundwater basin using a regional-scale flow and subsidence model (Antelope Valley, California, USA)[J]. Hydrogeology Journal, 2015, 23(6):1267-1291.
- HATIPOGLU Z, MOTZ L H, BAYARI C S. Characterization of the groundwater flow system in the hillside and coastal aquifers of the Mersin-Tarsus region (Turkey)[J]. Hydrogeology Journal, 2009, 17(7):1761-1778.
- 严明疆,张光辉,王金哲,等. 漳滏平原地下水系统脆弱性最佳地下水水位埋深探讨[J]. 地球学报,2009, 30(2):243-248. YAN Mingjiang, ZHANG Guanghui, WANG Jinzhe, et al. Discussion on the groundwater depth of the optimal groundwater system vulnerability in Hufu plain[J]. Acta Geoscientica Sinica, 2009, 30(2):243-248. (in Chinese)
- QIN L J, QIU H. Study on water resources compensation in Songliao river basin[J]. Journal of Natural Resources, 2005, 20(1):

- 14 - 19.
- 9 OUYANG W, LIU B, WU Y. Satellite-based estimation of watershed groundwater storage dynamics in a freeze-thaw area under intensive agricultural development[J]. *Journal of Hydrology*, 2016, 537:96 - 105.
- 10 ROZELL D J, WONG T F, ROZELL D J. Efeitos das alterações climáticas nos recursos hídricos subterrâneos da ilha de Shelter, Estado de Nova Iorque, EUA[J]. *Hydrogeology Journal*, 2010, 18(7):1657 - 1665.
- 11 周俊菊, 张恒玮, 张利利, 等. 综合治理前后民勤绿洲景观格局时空演变特征[J]. *干旱区研究*, 2017, 34(1):79 - 87.
- ZHOU Junju, ZHANG Hengwei, ZHANG Lili, et al. Spatiotemporal evolution of landscape pattern in the Minqin Oasis before and after implementing the comprehensive management[J]. *Arid Zone Research*, 2017, 34(1):79 - 87. (in Chinese)
- 12 蓝欣, 郑娇玉, 江帆, 等. 石羊河流域下游植被覆盖变化与地下水和气候的响应分析[J]. *兰州大学学报:自然科学版*, 2015, 51(6):865 - 870.
- LAN Xin, ZHENG Jiaoyu, JIANG Fan, et al. A study on the responses of vegetation cover to dynamic changes in groundwater and climatic factors in the lower reaches of Shiyang river basin[J]. *Journal of Lanzhou University: Natural Sciences Edition*, 2015, 51(6):865 - 870. (in Chinese)
- 13 李萍, 魏晓妹, 降亚楠, 等. 关中平原渠井双灌区地下水循环对环境变化的响应[J]. *农业工程学报*, 2014, 30(18):123 - 131.
- LI Ping, WEI Xiaomei, JIANG Ya'nán, et al. Response of groundwater cycle to environmental changes in Guanzhong plain irrigation district[J]. *Transactions of the CSAE*, 2014, 30(18):123 - 131. (in Chinese)
- 14 王电龙, 张光辉, 冯慧敏, 等. 降水和开采变化对石家庄地下水动态影响强度[J]. *水科学进展*, 2014, 25(3):420 - 427.
- WANG Dianlong, ZHANG Guanghui, FENG Huimin, et al. Contribution degrees of precipitation and groundwater exploitation to the groundwater flow field in Shijiazhuang[J]. *Advances in Water Science*, 2014, 25(3):420 - 427. (in Chinese)
- 15 于春娟, 于春莉. 内蒙古西辽河平原近 20 年来地下水动力场与化学场演化规律研究[J]. *内蒙古科技与经济*, 2009(21):52 - 54.
- 16 付玉娟, 张玉清, 何俊仕, 等. 西辽河农灌区降雨及农业灌溉对地下水埋深的影响演变分析[J]. *沈阳农业大学学报*, 2016, 47(3):327 - 333.
- FU Yujuan, ZHANG Yuqing, HE Junshi, et al. Influence of precipitation and agricultural of irrigation agriculture on groundwater depth in Xiliaohe river[J]. *Journal of Shenyang Agricultural University*, 2016, 47(3):327 - 333. (in Chinese)
- 17 李曙光, 张旭, 梁建财, 等. 通辽市科尔沁区地下水动态监测与分析[J]. *内蒙古农业大学学报:自然科学版*, 2015, 36(1):114 - 121.
- LI Shuguang, ZHANG Xu, LIANG Jiancai, et al. The dynamic monitoring and analysis groundwater in Tongliao city Horqin district[J]. *Journal of Inner Mongolia Agricultural University: Natural Science Edition*, 2015, 36(1):114 - 121. (in Chinese)
- 18 刘宇峰, 原志华, 封建民, 等. 基于地表湿润指数的 1959—2014 年陕西省地表干湿时空变化特征[J]. *干旱区地理*, 2016, 39(6):1186 - 1196.
- 19 张彦龙, 刘普幸. 基于 AI 指数的新疆干湿时空变化及其影响因素分析[J]. *自然资源学报*, 2016, 31(4):658 - 671.
- ZHANG Yanlong, LIU Puxing. Study on temporal and spatial variation of the dry-wet and its influence factors in Xinjiang based on aridity index[J]. *Journal of Natural Resources*, 2016, 31(4):658 - 671. (in Chinese)
- 20 张莉秋, 张红, 李皎, 等. 晋北沙漠化地区 1980—2014 年的气候变化[J]. *中国沙漠*, 2016, 36(4):1116 - 1125.
- ZHANG Liqiu, ZHANG Hong, LI Jiao, et al. Climate change in sandy desertification area of the Northern Shanxi from 1980 to 2014[J]. *Journal of Desert Research*, 2016, 36(4):1116 - 1125. (in Chinese)
- 21 陈玥, 管仪庆, 苗建中, 等. 基于长期水文变化的苏北高邮湖生态水位及保障程度[J]. *湖泊科学*, 2017, 29(2):398 - 408.
- CHEN Yue, GUAN Yiqing, MIAO Jianzhong, et al. Determination of the ecological water-level and assuring degree in the Gaoyou lake, northern Jiangsu with long-term hydrological alteration[J]. *Journal of Lake Sciences*, 2017, 29(2):398 - 408. (in Chinese)
- 22 唐敏, 张勃, 张耀宗, 等. 近 55 年三江源地区地表干燥度时空变化特征及其对气候因子的响应[J]. *生态环境学报*, 2016, 25(2):248 - 259.
- TANG Min, ZHANG Bo, ZHANG Yaozong, et al. Characteristics of temporal and spatial variations of surface aridity index and climatic factors on the impact in headwaters of the three rivers in recent 55 years[J]. *Ecology and Environmental Sciences*, 2016, 25(2):248 - 259. (in Chinese)
- 23 付金霞, 张鹏, 郑粉莉, 等. 河龙区间近 55 a 降雨侵蚀力与河流输沙量动态变化分析[J/OL]. *农业机械学报*, 2016, 47(2):185 - 192. [http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view\\_abstract.aspx?file\\_no=20160224&flag=1](http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?file_no=20160224&flag=1). DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2016.02.024.
- FU Jinxia, ZHANG Peng, ZHENG Fenli, et al. Dynamic change analysis of rainfall erosivity and river sediment discharge of He-Long reach of the Yellow River from 1957 to 2011[J/OL]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2016, 47(2):185 - 192. (in Chinese)
- 24 王随继, 闫云霞, 颜明, 等. 皇甫川流域降水和人类活动对径流量变化的贡献率分析——累积量斜率变化率比较方法的提出及应用[J]. *地理学报*, 2012, 67(3):388 - 397.
- WANG Suiji, YAN Yunxia, YAN Ming, et al. Contributions of precipitation and human activities to the runoff change of the Huangfuchuan drainage basin: application of comparative method of the slope changing ratio of cumulative quantity[J]. *Acta Geographica Sinica*, 2012, 67(3):388 - 397. (in Chinese)
- 25 龙文华, 邸志强, 李志, 等. 西辽河平原(内蒙古部分)地下水的环境同位素特征[J]. *地质与资源*, 2008, 17(2):148 - 152.
- 26 李东方, 刘廷玺, 王冠丽, 等. 科尔沁沙地沙丘-草甸区土壤水、地下水对降雨的响应[J]. *干旱区资源与环境*, 2013, 27(4):123 - 128.
- LI Dongfang, LIU Tingxi, WANG Guanli, et al. Response of soil moisture and groundwater to rainfall in Horqin sandy land with sand-meadow land features[J]. *Journal of Arid Land Resources and Environment*, 2013, 27(4):123 - 128. (in Chinese)
- 27 赵哈林, 赵学勇, 张铜会, 等. 东北西部沙地近 20 年地下水变化动态及其成因分析[J]. *干旱区研究*, 2002, 19(2):1 - 6.
- ZHAO Halin, ZHAO Xueyong, ZHANG Tonghui, et al. The changing dynamics of groundwater and its relationship with the precipitation and desertification in the Western part of Northeast China since recent 20 years[J]. *Arid Zone Research*, 2002, 19(2):1 - 6. (in Chinese)
- 28 孙傲, 刘廷玺, 杨大文, 等. 科尔沁沙丘-草甸相间地区不同地貌类型地下水位对降雨的响应研究[J]. *干旱区地理*, 2016, 39(5):1059 - 1069.