

DOI: 10.13476/j.cnki.nsbdtqk.2018.0054

张曼菲,周维博. 泾惠渠灌区地下水位埋深的动态特征及影响因素分析[J]. 南水北调与水利科技, 2018, 16(2): 164-170, 195.  
ZHANG M F, ZHOU W B. Analysis of dynamic characteristics and influence factors of groundwater depth in Jinghuiqu Irrigation District[J]. South to North Water Transfers and Water Science & Technology, 2018, 16(2): 164-170, 195. (in Chinese)

# 泾惠渠灌区地下水位埋深的动态特征及影响因素分析

张曼菲<sup>1,2</sup>, 周维博<sup>1,2</sup>

(1. 长安大学 环境科学与工程学院, 西安 710054;

2. 长安大学 旱区地下水文与生态效应教育部重点实验室, 西安 710054)

**摘要:** 地下水作为陕西泾惠渠灌区的重要水源, 对其动态特征的研究在灌区水资源开发利用方面具有重要的指导意义。根据泾惠渠灌区 1981-2010 年的地下水位平均埋深资料, 采用线性倾向估计法、累积距平法、Sen 斜率估计法、Mann Kendall 趋势检验法对泾惠渠灌区地下水位埋深动态序列进行年际变化分析; 采用滑动 T 检验法和双向回归突变分析法分析序列突变性; 采用主成分分析法和灰色关联分析法确定影响灌区地下水位埋深动态的主要因素。结果表明: 灌区 1981-2010 年地下水位平均埋深基本呈增加趋势, 突变点出现在 1994 年, 1994 年之前影响灌区地下水位埋深动态的主要因素为蒸发量, 1994 年之后主要影响因素为蒸发量、地下水开采量和灌渠引水量。

**关键词:** 泾惠渠灌区; 地下水位埋深; 趋势分析; 突变检验; 影响因素

中图分类号: P641 文献标志码: A 文章编号: 1672-1683(2018)02-0164-07

## Analysis of dynamic characteristics and influence factors of groundwater depth in Jinghuiqu Irrigation District

ZHANG Manfei<sup>1,2</sup>, ZHOU Weibo<sup>1,2</sup>

(1. College of Environmental Science and Engineering, Chang'an University, Xi'an 710054, China; 2. Key Laboratory of Subsurface Hydrology and Ecological Effect in Arid Region of Ministry of Education, Xi'an 710054, China)

**Abstract:** Groundwater is an important water source of Jinghuiqu Irrigation District. The analysis of its dynamic characteristics provides important guidance to the development and utilization of water resources. Based on the groundwater depth data of Jinghuiqu Irrigation District during 1981-2010, we analyzed its interannual variation using linear tendency estimation method, cumulative departure, Sen slope estimation method, and Mann Kendall trend test. We analyzed the mutation of groundwater depth using smoothing T test and two-dimensional regression mutation analysis. We determined the most important influence factors of groundwater depth using principal component analysis and grey relationship analysis. The results showed that the groundwater depth tended to increase during 1981-2010. The mutation happened in 1994. Before 1994, evaporation was the most important influence factor of groundwater depth. After 1994, the most important influence factors became evaporation, groundwater extraction, and canal water diversion.

**Key words:** Jinghuiqu Irrigation District; groundwater depth; trend analysis; mutation test; influence factors

自 20 世纪 80 年代以来, 泾惠渠灌区地下水位持续下降, 对灌区的生态环境带来了许多不利的

收稿日期: 2017-07-12 修回日期: 2017-12-09 网络出版时间: 2017-12-29

网络出版地址: <http://kns.cnki.net/kcms/detail/13.1334.TV.20171229.0854.006.html>

基金项目: “十二五”国家科技支撑计划项目(2011BAD29B01); 陕西省自然科学基金(2014JM1030)

Funds: National Science & Technology Pillar Program during the Twelfth Five year Plan Period (2011BAD29B01); Natural Science Foundation of Shaanxi Province (2014JM1030)

作者简介: 张曼菲(1989-), 女, 山西霍州人, 博士研究生, 主要从事地下水合理开发利用方面的研究。E-mail: 791195385@qq.com

通讯作者: 周维博(1956-), 男, 陕西乾县人, 教授, 博士生导师, 主要从事水资源及节水灌溉方面的教学与研究工作。E-mail: zwbzyz823@

163.com



向回归突变分析法在地下水领域的应用较少,现将该方法介绍如下:

假设时间序列的突变点为  $C$  点,则此序列的双向回归模型可表示为

$$T_i = \begin{cases} a_0 + b_0i + e_i, & i = 1, 2, \dots, C \\ a_1 + b_1i + e'_i, & i = C + 1, C + 2, \dots, n \end{cases} \quad (1)$$

其中:上式为  $C$  点之前序列的拟合直线方程,下式为  $C$  点之后序列的拟合直线方程。

为确定时间序列的突变点,需要求出  $C$  的最大似然估计值,计算公式如下:

$$\begin{cases} T_i = a_0 + b_0i + b(i - C)IND_c(i) + e_i \\ IND_c(i) = \begin{cases} 0, & i \leq C \\ 1, & i > C \end{cases} \\ b = b_1 - b_0 \end{cases} \quad (2)$$

对于固定的  $C$  上式为标准的二元线性回归模型,因子为  $i, (i - C)IND_c(i), a_0, b_0, b, b_1$  容易用最小二乘法求出。对于本次论文中研究的地下水位平均埋深序列,确定突变点步骤如下:

- (1) 先计算出假定各年为突变点的双向回归方程;
- (2) 求出每个方程的残差平方和,找出最小残差平方和对应的假定突变点即为最大的突变点;
- (3) 对这一突变趋势是否显著做出检验,其统计量为

$$U = \frac{(S_0 - S) / 3}{S / (n - 4)} \quad (3)$$

式中:  $S_0$  表示  $C = n$  时双向回归方程的残差平方和;  $S$  为对应突变点的残差平方和。统计量  $U$  服从分子自由度为 3,分母自由度为  $n - 4$  的  $F$  分布,给定显著性水平  $\alpha$ ,在显著性水平  $\alpha$  下接受突变点,否则认为突变点两端突变不明显。

对于灌区地下水动态影响因素的研究,选择常用的主成分分析法和灰色关联度法,具体步骤参考文献[24、25]。

### 3 年际变化和突变分析

#### 3.1 年际变化分析

根据灌区 21 个观测井点 1981-2010 年的地下水位埋深数据资料和水文地质分区情况,先计算 4 个水文地质分区的地下水位平均埋深,用其算术平均值作为整个灌区的地下水位平均埋深值,绘制地下水位平均埋深的变化曲线。井点位置见图 1,地下水位平均埋深的变化曲线见图 2。

灌区 1981-2010 年地下水位平均埋深基本呈增加趋势,地下水位平均埋深由 4 m 增加至 14.3

m,30年间平均水位埋深增加10.3m,平均增加速

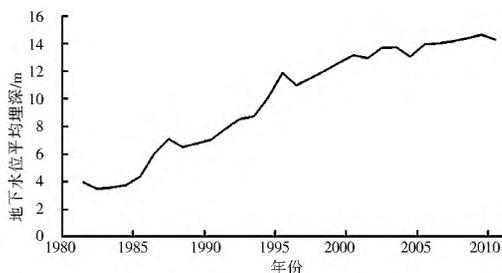


图 2 地下水位平均埋深变化曲线

Fig. 2 Variation of average groundwater depth

率为 0.34 m/a,地下水位平均埋深为 9.98 m。最大值出现在 2009 年,最小值出现在 1982 年。平均水位埋深序列的变差系数为 0.196,极值比 4.2。从地下水位平均埋深的累积距平曲线(图 3)可以看出,灌区水位平均埋深累积距平值在 1981-1994 年,呈现减小趋势,1994-1995 年大致不变,1995 年以后,又呈现增大趋势。

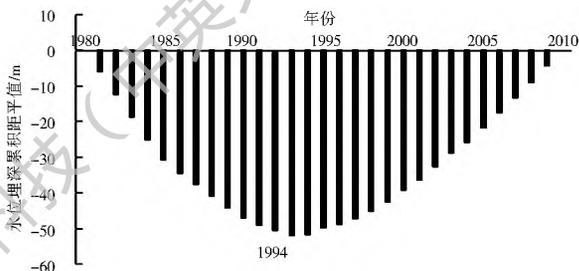


图 3 地下水位平均埋深累积距平曲线

Fig. 3 Cumulative anomalies of groundwater depth

利用 Sen 斜率估计法和 Mann-Kendall 趋势检验法对泾惠渠灌区 1981-2010 年地下水位平均埋深序列进行检验分析,结果见表 1。两种方法结果一致,均显示灌区水位平均埋深有增大趋势,这与实际数据相吻合。Mann-Kendall 趋势检验法通过了 0.05 显著性水平检验,说明水位平均埋深增大趋势明显。

表 1 Sen 斜率估计法和 Mann-Kendall 趋势检验法结果

Tab. 1 Test results of Sen slope estimation method and Mann-Kendall trend test

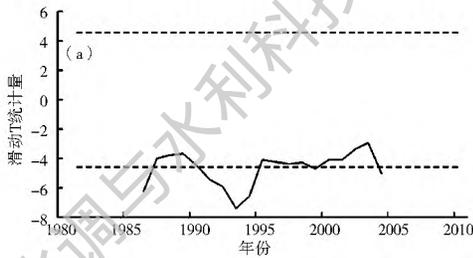
方法	统计量	临界值
Sen 斜率估计法	0.42	
Mann-Kendall 趋势检验法	7.24	1.96

#### 3.2 突变分析

对灌区 1981-2010 年地下水位平均埋深序列进行滑动 T 检验,  $n = 30$ , 选取步长为 6, 显著性水平  $\alpha = 0.001$ , 自由度  $v = 10$ , 查表得知  $t_{0.001} = \pm 4.587$ 。滑动 T 统计量曲线见图 4(a), T 的统计量共有 7 次超过 0.001 显著性水平,即存在 7 个可能的突变点,分别

为 1989、1991、1992、1993、1994、1999 和 2004 年。

为进一步确定突变的年份,采用双向回归突变分析法对灌区 1981-2010 年地下水位平均埋深序列再次进行趋势突变分析。由式 12 可知,  $U$  值与假定突变点  $C$  对应的残差平方和  $S$  呈负相关,因此利用  $U$



值与假定突变点  $C$  对应时间的负相关关系来确定突变点,突变点即为通过 0.001 显著性水平检验的最大值,查表得  $F(3, 26) = 7.36$ ,结果见图 4(b),  $U$  的最大值点出现在 1994 年。综合上述两种方法,得出灌区地下水位平均埋深序列的突变点出现在 1994 年。

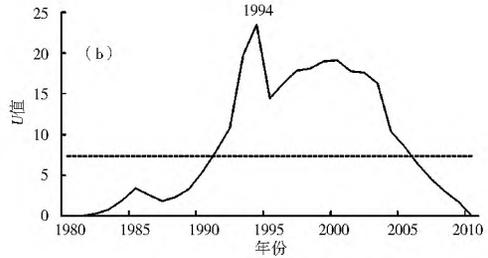


图 4 突变分析结果  
Fig. 4 Results of mutation analysis

## 4 影响因素分析

### 4.1 影响因子的选取

根据地下水均衡方程式,含水层中地下水量的变化取决于两项:补给项和排泄项。

根据现有的泾惠渠灌区资料,地下水补给主要来源有大气降水入渗补给、河流水入渗补给以及灌溉入渗补给,因此选择年降水量、年径流量、渠灌引水量这 3 个指标,此外泾惠渠灌区属于井渠双灌灌区,因此表示渠灌水量与井灌水量用水比例的指标—渠井用水比也是影响灌区地下水动态的因素。

灌区地下水排泄项主要有蒸发排泄和人为开采,因此选择蒸发量和地下水开采量这 2 个指标。

此外气温不仅影响降水量,对蒸发量也有很大的影响,因此,将年平均气温也引入上述指标中。

综上所述,共甄选出 7 个影响灌区地下水动态的指标,如表 2 所示。这 7 个指标可以分为两大类:自然因素指标和人为因素指标。其中年降水量( $I_1$ )、年径流量( $I_2$ )、蒸发量( $I_3$ )和年平均气温( $I_4$ )均属于自然因素,渠灌引水量( $I_5$ )、地下水开采量

( $I_6$ )、渠井用水比( $I_7$ )属于人为因素。上述数据资料参考了文献[3]。

表 2 灌区地下水埋深的影响因素  
Tab. 2 Influence factors of groundwater depth

指标	最大值	最小值	均值	标准差
年降水量 $I_1$ /mm	823.9	187.0	490.6	140.4
年径流量 $I_2$ /( $\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ )	74.7	19.5	42.3	16.1
蒸发量 $I_3$ /mm	1 678.0	794.2	1 186.3	278.7
年平均气温 $I_4$ ( $^{\circ}\text{C}$ )	15.1	12.6	13.9	0.8
渠灌引水量 $I_5$ /万 $\text{m}^3$	39 161.0	11 275.0	18 086.9	6 505.0
地下水开采量 $I_6$ /万 $\text{m}^3$	14 008.3	5 358.0	10 067.9	2 506.1
渠井用水比 $I_7$	4.3	1.1	1.9	0.9

### 4.2 影响因子的年际变化

上述 7 个指标随时间的变化曲线见图 5。图 5(a) 为 4 个自然因素指标的变化曲线,可以看出,年降水量和年径流量随时间整体呈减小趋势,蒸发量整体呈增大趋势,年平均气温的变化并不明显;图 5(b) 为 3 个人为因素指标的变化曲线,渠灌引水量和渠井用水比整体呈减小趋势,而地下水开采量整体呈增大趋势。

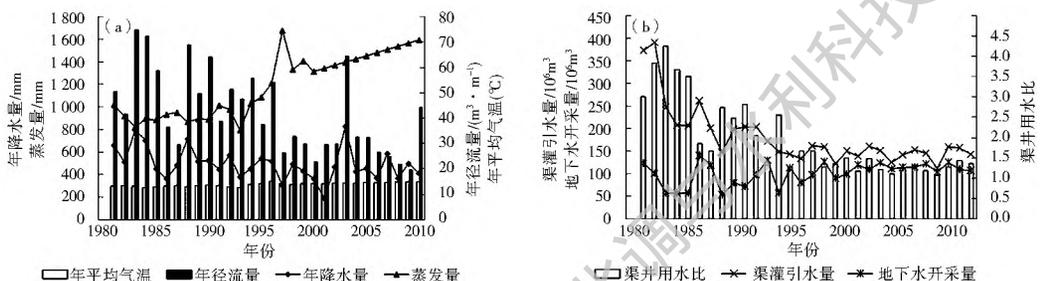


图 5 各变量指标随时间的变化

Fig. 5 The changes of the seven influence factors with time

为分析各因素在突变年 1994 年前后的变化规律,利用线性倾向回归估计法计算突变年前后各因

素变化曲线的回归系数,计算结果见表 3。在突变年前后,年径流量和渠灌引水量先减小后增大,渠井

用水比一直呈现减小趋势,其余因素均呈现增大趋势。回归系数绝对值的大小可以反映序列变化速率的大小。

表 3 回归系数

Tab. 3 Regression coefficient

指标	回归系数	
	1981-1994 年	1995-2010 年
$I_1$	0.495	0.218
$I_2$	-0.447	0.539
$I_3$	1.861	20.2
$I_4$	0.019	0.042
$I_5$	-14.49	0.035
$I_6$	0.314	1.192
$I_7$	-0.164	-0.017

由表 3 可知,年降水量、渠灌引水量和渠井用水比在 1994 年之前的变化率大于 1994 年之后,尤其是渠灌引水量;其余 4 个指标在 1994 年之前的变化率均小于 1994 年之后,且蒸发量的变化最为明显

#### 4.3 基于主成分分析法的影响因子提取

利用 SPSS 软件得到突变年前后 7 个变量指标的相关系数矩阵,由表 4 可知,7 个指标间存在不同程度的相关性。在突变前,相关系数达到 0.7 以上的有年降水量( $I_1$ )和年径流量( $I_2$ )、年径流量( $I_2$ )和地下水开采量( $I_6$ )、蒸发量( $I_3$ )和地下水开采量( $I_6$ ),其中年径流量( $I_2$ )和地下水开采量( $I_6$ )呈负相关,其余两组呈正相关。在突变后,相关系数最高的是地下水开采量( $I_6$ )和渠井用水比( $I_7$ ),但相关系数仅为 0.647。

表 4 各指标的相关系数矩阵

Tab. 4 The correlation coefficient matrix of the seven influence factors

指标	$I_1$	$I_2$	$I_3$	$I_4$	$I_5$	$I_6$	$I_7$	
突变前	$I_1$	1	0.728	-0.185	-0.247	0.148	-0.375	0.541
	$I_2$	0.728	1	-0.429	-0.259	-0.226	-0.709	0.549
	$I_3$	-0.185	-0.429	1	0.538	0.197	0.763	-0.568
	$I_4$	-0.247	-0.259	0.538	1	0.077	0.374	-0.346
	$I_5$	0.148	-0.226	0.197	0.077	1	0.332	0.473
	$I_6$	-0.375	-0.709	0.763	0.374	0.332	1	-0.643
	$I_7$	0.541	0.549	-0.568	-0.346	0.473	-0.643	1
突变后	$I_1$	1	0.629	-0.221	0.137	-0.621	-0.345	-0.161
	$I_2$	0.629	1	-0.343	0.162	-0.213	-0.340	0.173
	$I_3$	-0.221	-0.343	1	0.296	0.202	0.633	-0.516
	$I_4$	0.137	0.162	0.296	1	0.231	0.118	0.053
	$I_5$	-0.621	-0.213	0.202	0.231	1	0.425	0.408
	$I_6$	-0.345	-0.340	0.633	0.118	0.425	1	-0.647
	$I_7$	-0.161	0.173	-0.516	0.053	0.408	-0.647	1

利用 SPSS 软件对上述 7 个指标提取主成份。经检验,突变前后地下水埋深序列的样本充足度分别为 0.541 和 0.655,均大于 0.5,可以进行主成分分析。以变量指标特征值大于 1 且累计贡献率达到 80% 以上为准则,分别提取 1981-1994 年和 1995-2010 年 7 个指标的公共因子,结果见表 5。1994 年前后的两个序列均提取到 3 个主因子,1981-1994 年 3 个主因子的累计贡献率达到 85.664%,1995-2010 年 3 个主因子的累计贡献率达到 83.579%。

在旋转因子荷载矩阵(表 6)中剔除绝对值小于 0.8 的因子,提取出突变前后影响地下水位平均埋深的主要因素。1994 年之前影响地下水位平均埋深的第一主成分主要由蒸发量决定,相关系数达到 0.900,第二主成分主要由年降水量和年径流量决

表 5 主成分特征值和方差贡献率

Tab. 5 Eigenvalues and variance contribution rates of principal components

时间	主成分	初始特征值	贡献率	累积贡献率
1981-1994 年	1	3.474	49.633	49.633
	2	1.490	21.291	70.923
	3	1.032	14.741	85.664
1995-2010 年	1	2.703	38.617	38.617
	2	1.830	26.143	64.759
	3	1.317	18.820	83.579

定,相关系数分别为 0.888、0.906,第三主成分由渠灌引水量决定,相关系数达到 0.987。1994 年后影响地下水位平均埋深的第一主成分主要由蒸发量、地下水开采量、渠井用水比决定,相关系数分别是

0.813、0.832、0.891,第二主成分主要由年降水量和渠灌引水量决定,相关系数分别为0.917、0.832,第三主成分由年平均气温决定,相关系数达到0.894。

表6 主成分的因子荷载矩阵

Tab.6 Factor loading matrix of principal components

指标	1981-1994年			1995-2010年		
	成份			成份		
	1	2	3	1	2	3
$I_1$	-0.041	0.888	0.210	-0.094	-0.917	0.173
$I_2$	-0.269	0.906	-0.185	-0.371	-0.629	0.420
$I_3$	0.900	-0.205	0.101	0.813	0.205	0.249
$I_4$	0.772	-0.032	-0.055	0.144	-0.038	0.894
$I_5$	0.119	-0.028	0.987	-0.039	0.832	0.436
$I_6$	0.693	-0.563	0.250	0.832	0.347	0.121
$I_7$	-0.556	0.557	0.555	-0.891	0.342	0.227

综上所述,1994年之前,灌区地下水位平均埋深主要受年降水量、年径流量、蒸发量、渠灌引水量这4个因素的影响,可以看出自然因素是影响1994年之前地下水位平均埋深的主要因素。1994年之后,灌区地下水位平均埋深主要受年降水量、蒸发量、年平均气温、渠灌引水量、地下水开采量、渠井用水比这6个因素的影响,自然因素和人为因素均影响1994年后的地下水位平均埋深。

#### 4.4 基于灰色关联度法的主导因子确定

采用灰色关联度法分别确定灌区突变年前后,各影响因子对灌区地下水位平均埋深的影响程度。根据上面对灰色关联度法的介绍,分别计算1981-1994年年降水量、年径流量、蒸发量、渠灌引水量这4个因素的对地下水位平均埋深影响程度,1995-2010年年降水量、蒸发量、年平均气温、渠灌引水量、地下水开采量、渠井用水比这6个因素对地下水位平均埋深影响程度,计算结果见表7。将这些因素与地下水位平均埋深的关联度从大到小排序,1981-1994年关联度排序为蒸发量>年径流量>年降水量>渠灌引水量,1995-2010年关联度排序为蒸发量>地下水开采量>渠灌引水量>气温>年降水量>渠井用水比。

将关联度大于0.7的因子视为主导因子,则1981-1994年影响地下水位平均埋深的主导因子为蒸发量,1995-2010年影响地下水位平均埋深的主导因子依次为蒸发量、地下水开采量和渠灌引水量,表明灌区地下水动态的影响因素由自然因素转变为人为因素和自然因素。

表7 灰色关联度计算结果

Tab.7 Calculation results of grey relationship analysis

1981-1994年		1995-2010年	
影响因子	关联度	影响因子	关联度
年降水量	0.565	年降水量	0.617
年径流量	0.569	蒸发量	0.745
蒸发量	0.708	气温	0.686
渠灌引水量	0.553	渠灌引水量	0.700
		地下水开采量	0.732
		渠井用水比	0.540

## 5 结论

(1) 灌区1981-2010年地下水位平均埋深基本呈增加趋势,平均增加速率为0.34 m/a,1981-1994年灌区水位平均埋深值呈现减小趋势,且变化率较快,1994年以后水位平均埋深值呈现增大趋势,变化率变慢。

(2) 对灌区1981-2010年地下水位平均埋深序列采用滑动T检验法和双向回归突变分析法,得出灌区地下水位平均埋深序列的突变点出现在1994年。

(3) 利用主成分分析法提取突变年前后影响灌区地下水位平均埋深的主要影响因子,结果表明灌区地下水位平均埋深在1994年之前,主要受年降水量、年径流量、蒸发量、渠灌引水量这4个因素的影响;1994年之后,主要受年降水量、蒸发量、年平均气温、渠灌引水量、地下水开采量、渠井用水比这6个因素的影响。采用灰色关联度法确定影响突变年前后灌区地下水位平均埋深的主导因子,结果表明,1981-1994年主导因子为蒸发量,1995-2010年主导因子为蒸发量、地下水开采量和渠灌引水量,灌区地下水动态的影响因素由自然因素转变为人为因素和自然因素。

#### 参考文献(References):

- [1] 刘燕. 泾惠渠灌区地下水位动态变化特征及成因分析[J]. 人民长江, 2010, 41(8): 100-103, 107. (LIU Y. Dynamics of ground water table in Jinghui Canal Irrigation District of China[J]. Yangtze River, 2010, 41(8): 100-103, 107. (in Chinese)). DOI: 10.3969/j.issn.1001-4179.2010.08.027.
- [2] 李娜, 周维博, 董起广, 等. 基于ARIMA模型的灌区地下水动态预报[J]. 人民长江, 2014(9): 43-47. (LI N, ZHOU W B, DONG G Q, et al. Groundwater dynamic prediction in irrigation area based on ARIMA Model[J]. Yangtze River, 2014(9): 43-47. (in Chinese)). DOI: 10.3969/j.issn.1001-4179.2014.09.011.
- [3] 李娜, 周维博, 王金凤, 等. 基于主成分分析法的ANFIS模型及

- 其应用[J]. 人民黄河, 2014(6): 80-83. (LI N, ZHOU W B, WAGN J F, et al. ANFIS Model and its application in ground water prediction in Irrigation District based on principal component[J]. Yellow River, 2014(6): 80-83. (in Chinese)). DOI: 10.3969/ J. issn. 1000 1379. 2014. 06. 026.
- [4] 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. (DENG K J, WEI X M, JIANG Y N, et al. Spatiotemporal variability of groundwater table in Jinghui Irrigation District based on geostatistics[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2015, 34(3): 75-80. (in Chinese)). DOI: 10.13522/ j. cnki. ggps. 2015. 03. 016.
- [5] 宋宝德, 郑新崑, 吴建华, 等. 泾惠渠灌区干旱时段内的地下水动态[J]. 水利科技与经济, 2010, 16(4): 386-388. (SONG B D, ZHEN X Y, WU J H, et al. Groundwater dynamics of Jinghui Irrigation Area in arid period[J]. Water Conservancy Science and Technology and Economy, 2010, 16(4): 386-388. (in Chinese)). DOI: 10.3969/ j. issn. 1006 7175. 2010. 04. 011.
- [6] 王建莹, 刘燕, 姚阿漫, 等. 泾惠渠灌区地下水位动态分析[J]. 灌溉排水学报, 2015, 34(2): 67-70. (WANG J Y, LIU Y, Y A M, et al. Dynamics of the groundwater table in Jinghui Canal Irrigation District of China[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2015, 34(2): 67-70. (in Chinese)). DOI: 10.13522/ j. cnki. ggps. 2015. 02. 016.
- [7] 郑江禹, 张强, 史培军, 等. 珠江流域多尺度极端降水时空特征及影响因子研究[J]. 地理科学, 2017, 37(2): 283-291. (ZHENG J Y, ZHANG Q, SHI P J, et al. Spatiotemporal Characteristics of extreme precipitation regimes and related driving factors in the Pearl River Basin[J]. Scientia Geographica Sinica, 2017, 37(2): 283-291. (in Chinese)). DOI: 10.13249/ j. cnki. sgs. 2017. 02. 015.
- [8] 孙宁, 程伍群. 河北燕山山区径流变化规律研究[J]. 河北农业大学学报, 2017, 40(2): 123-128. (SUN N, CHENG W Q. Study on the runoff variation rules of Hebei Yanshan Mountains[J]. Journal of Agricultural University of Hebei, 2017, 40(2): 123-128. (in Chinese)). DOI: 10.13320/ j. cnki. jauh. 2017. 0048.
- [9] 苏向明, 刘志辉, 魏天峰, 等. 新疆精河径流变化及其原因分析[J]. 水文, 2016, 36(5): 92-96, 91. (SU X M, LIU Z H, WEI T F, et al. Analysis of runoff variation and its causes in Jinghe Basin, Xinjiang[J]. Journal of China Hydrology, 2016, 36(5): 92-96, 91. (in Chinese)). DOI: 10.3969/ j. issn. 1000-0852. 2016. 05. 018.
- [10] 张范平, 方少文, 周祖昊, 等. 鄱阳湖水位多时间尺度动态变化特性分析[J]. 长江流域资源与环境, 2017, 26(1): 126-133. (ZHANG F P, FANG S W, ZHOU Z H, et al. Research on multi time scale dynamic characteristics of water level fluctuation of the Poyang Lake in China[J]. Resources and Environment in the Yangtze Basin, 2017, 26(1): 126-133. (in Chinese)). DOI: 10.11870/ cjlyzyhj201701015.
- [11] 李艳玲, 畅建霞. 基于 Morlet 小波的径流突变检测[J]. 西安理工大学学报, 2012, 28(3): 322-325. (LI Y L, CHANG J X. Detection of the abrupt changes in runoff based on the Morlet Wavelet[J]. Journal of Xi'an University of Technology, 2012, 28(3): 322-325. (in Chinese)). DOI: 10.3969/ j. issn. 1006 4710. 2012. 03. 014.
- [12] 史建桥, 白淑英, 周寅, 等. 近 50 年甘肃日照时数时空变化特征及突变分析[J]. 南京信息工程大学学报, 2016, 8(1): 64-70. (SHI J Q, BAI S Y, ZHOU Y, et al. Spatiotemporal variation and abrupt change analysis of sunshine duration in Gansu in the last 50 years[J]. Journal of Nanjing University of Information Science & Technology, 2016, 8(1): 64-70. (in Chinese)). DOI: 10.13878/ j. cnki. jnuist. 2016. 01. 007.
- [13] 王秀萍, 金巍. 1964-2013 年大连地区暴雨气候特征及变化规律[J]. 气象与环境学报, 2015(3): 75-80. (WANG X P, JIN W. Climate characteristics of rainstorm and its variation in Dalian region from 1964 to 2013[J]. Journal of Meteorology and Environment, 2015(3): 75-80. (in Chinese)). DOI: 10.3969/ j. issn. 1673-503X. 2015. 03. 012.
- [14] 李斌, 解建仓, 胡彦华, 等. 1961 年-2013 年渭河流域降水与径流变化特征[J]. 南水北调与水利科技, 2017, 15(2): 29-36. (LI B, XIE J C, HU Y H, et al. Characteristics of precipitation and runoffs during 1961-2013 in Weihe River basin[J]. South to North Water Transfers and Water Science & Technology, 2017, 15(2): 29-36. (in Chinese)). DOI: 10.13476/ j. cnki. nsbdqk. 2017. 02. 005.
- [15] 吴凯, 王晓琳, 王高旭, 等. 1961 年-2014 年西辽河流域降水时空变异性诊断[J]. 南水北调与水利科技, 2017, 15(2): 22-28. (WU K, WANG X L, WANG G X, et al. Spatiotemporal variation of precipitation in West Liao River Basin during 1961-2014[J]. South to North Water Transfers and Water Science & Technology, 2017, 15(2): 22-28. (in Chinese)). DOI: 10.13476/ j. cnki. nsbdqk. 2017. 02. 004.
- [16] 李荣波, 魏鹏, 纪昌明, 等. 雅砻江流域近 60 a 径流趋势特征分析[J]. 人民长江, 2017, 48(5): 38-42. (LI R B, WEI P, JI C M, et al. Analysis of runoff tendency characteristics of Yalong River for past 6 decades[J]. Yangtze River, 2017, 48(5): 38-42. (in Chinese)). DOI: 10.16232/ j. cnki. 1001-4179. 2017. 05. 009.
- [17] 危润初, 肖长来, 方樟. 黑龙江建三江地区地下水动态趋势突变点分析[J]. 吉林大学学报(地球科学版), 2016, (1): 202-210. (WEI R C, XIAO C L, FANG Z. Trends mutation nodes of groundwater dynamic in Jiansanjiang Area of Heilongjiang Province[J]. Journal of Jilin University (Earth Science Edition), 2016, (1): 202-210. (in Chinese)). DOI: 10.13278/ j. cnki. jjuese. 2016. 01. 204.
- [18] 林卓宏, 梁敏妍, 梁军, 等. 江门市雷暴多发性气候特征研究[J]. 气象, 2012(12): 1502-1507. (LIN Z H, LIANG M Y, LIANG J, et al. A study on climatic characters in high frequency period of thunderstorm in Jiangmen of Guangdong province[J]. Meteorological Monthly, 2012(12): 1502-1507. (in Chinese))
- [19] 李慧, 周维博, 马聪, 等. 泾惠渠灌区地下水调蓄研究[J]. 干旱区研究, 2015, 32(4): 828-833. (LI H, ZHOU W B, MA C, et al. Research on regulating capacity of groundwater in Jinghui Irrigation District[J]. Arid Zone Research, 2015, 32(4): 828-833. (in Chinese)) DOI: 10.13866/ j. azr. 2015. 04. 29.

(下转第 195 页)

- 008.
- [14] 钱钧,周庆连,刘超,等.双向立式潜水轴流泵装置特性研究[J].中国农村水利水电,2016(2):101-105&108.(QIAN J,ZHOU Q L,LIU C,et al.A numerical simulation and model of two way submersible axial flow pumping system[J].China Rural Water and Hydropower,2016(2):101-105,108.(in Chinese) DOI:10.3969/j.issn.1007-2284.2016.02.026.
- [15] 朱红耕,袁寿其,刘厚林.肘形进水流道对立式轴流泵水力性能影响的数值模拟[J].农业工程学报,2006,22(2):6-9.(ZHU H G,YUAN S Q,LIU H L.Numerical simulation of the influence of elbow inlet passages on the hydraulic characteristics of vertical axial flow pumps[J].Transactions of the CSAE,2006,22(2):6-9.(in Chinese) DOI:10.3321/j.issn:1002-6819.2006.02.002.
- [16] BLAZEK J. Computational fluid dynamics: principles and applications[M]. 2nd ed. Netherlands: Elsevier Ltd, 2005: 227-270.
- [17] LAUNDER B E, SPALDING D B. Lectures in mathematical models of turbulence[M]. London: Academic Press, 1972.
- [18] LAUNDER B E, SPALDING D B. The numerical computation of turbulent flows[J]. Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering, 1974, 3(2): 269-289.
- [19] 成立.泵站水流运动特性及水力性能数值模拟研究[D].南京:河海大学,2006.(CHENG L.Numerical simulation for flow pattern and hydraulic performance of pumping systems[D].Nanjing:HoHai University,2006.(in Chinese))
- [20] 肖惠民.基于计算流体力学的水轮机及水电站尾水系统数值研究[D].武汉:武汉大学,2005.(XIAO H M.Numerical simulation for flow pattern and hydraulic performance of pumping systems[D].Wuhan:Wuhan University,2005.(in Chinese))
- [21] RODI W. Turbulence models and their application in hydraulics experimental and mathematical fluid dynamics[M]. Delft: IAHR Section on Fundamentals of Division 0, 1980: 44-46.
- [22] 杨帆.低扬程泵装置水力特性及多目标优化关键技术研究[D].扬州:扬州大学,2013.(YANG F.Research on hydraulic performance and multi objective optimization design of low lift pump system[D].Yangzhou:Yangzhou University,2013.(in Chinese))
- [23] 谢龙汉,赵新宇.ANSYS CFX 流体分析及仿真(第二版)[M].北京:电子工业出版社,2013.(XIE L H,ZHAO X Y.ANSYS CFX flow analysis& simulation(second edition)[M].Beijing:Publishing House of Electronics Industry,2013.(in Chinese))
- [24] 李彦军,颜红勤,葛强,等.大型低扬程泵装置优化设计与试验[J].农业工程学报,2010,26(9):144-148.(LI Y J,YAN H Q,GE Q,et al.Optimum hydraulic design and model test of large scale low lift pump devices[J].Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering,2010,26(9):144-148.(in Chinese) DOI:10.3969/j.issn.1002-6819.2010.09.024.
- [25] 刘超.立式轴流泵进水流场 PIV 测量[J].农业机械学报,2015,46(8):33-41.(LIU Chao.PIV measurements of intake flow field in axial flow pump[J].Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2015,46(8):33-41.(in Chinese) DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2015.08.006.

(上接第 170 页)

- [20] 翟晓丽.关中盆地降水变化趋势研究[D].西安:西安科技大学,2012.(ZHAI X L.The study of precipitation trend in the Guanzhong Basin[D].Xi'an:Xi'an University of Science and Technology,2012.(in Chinese) DOI:10.7666/d.d223800.
- [21] 赵嘉阳,王文辉,郭福涛,等.福建省 2000—2013 年气象因子的变化趋势[J].福建农林大学学报(自然科学版),2016,45(5):567-575.(ZHAO J Y,WANG W H,GUO F T,et al.Analysis on the changes of meteorological factors of Fujian Province during 2000-2013[J].Journal of Fujian Agriculture and Forestry University(Natural Science Edition),2016,45(5):567-575.(in Chinese) DOI:10.13323/j.cnki.j.fafu(nat.sci.).2016.05.015.
- [22] 赵卓文,张连蓬,李行,等.基于 MOD13Q1 数据的宁夏生长季植被动态监测[J].地理科学进展,2017,36(6):741-752.(ZHAO Z W,ZHANG L P,LI X,et al.Monitoring vegetation dynamics during the growing season in Ningxia based on MOD13Q1 data[J].Progress in Geography,2017,36(6):741-752.(in Chinese) DOI:10.18306/dlxxjz.2017.06.009.
- [23] 黄强,孔波,樊晶晶,等.水文要素变异综合诊断[J].人民黄河,2016,38(10):18-23.(HUANG Q,KONG B,FAN J J,et al.Hydrological elements comprehensive detecting variation[J].Yellow River,2016,38(10):18-23.(in Chinese) DOI:10.3969/j.issn.1000-1379.2016.10.004.
- [24] 张展羽,梁振华,冯宝平,等.基于主成分-时间序列模型的地下水位预测[J].水科学进展,2017,(03):415-420.(ZHANG Z Y,LIANG Z H,FENG B P,et al.Groundwater level forecast based on principal component analysis and multivariate time series model[J].Advances in Water Science,2017,(03):415-420.(in Chinese). DOI:10.14042/j.cnki.32.1309.2017.03.012.
- [25] 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,(03):562-570.(YANG H D,FENG Q,GUO X Y.Variation of groundwater depth and its influence factors in Minqin Oasis in 1999-2013[J].Journal of Desert Research,2017,(03):562-570). DOI:10.7522/j.issn.1000-694X.2016.00077.