

渠井结合灌区地下水位动态对变化环境的响应及敏感性分析

张京京, 魏晓妹, 降亚楠

(西北农林科技大学水利与建筑工程学院, 陕西 杨凌 712100)

摘要: 以陕西省泾惠渠灌区为研究区, 运用线性趋势分析法及 Spearman 秩次相关检验法分析了灌区地下水系统外部环境因子的变化特征, 建立了基于 BP 神经网络的灌区地下水位动态对变化环境的响应模型, 并应用路径分析方法, 进行了灌区地下水位动态的敏感性分析。结果表明: 近 30 多年来, 灌区降水量呈显著减少趋势, 其线性倾斜率为 $2.09 \text{ mm} \cdot \text{a}^{-1}$, 蒸发量减少趋势不明显, 其线性倾斜率为 $0.04 \text{ mm} \cdot \text{a}^{-1}$; 地表水灌溉引水量呈减小趋势, 渠首农灌引水量 20 世纪 90 年代之前减少了 41.6%; 地下水开采量减少了 39.7%, 渠井用水比例减小了 33.9%; 地下水位埋深不断增大, 近 31 a 来地下水位累计下降了 11.88 m; 地下水位埋深模拟的平均相对误差为 4.52%, 检验的平均相对误差为 2.23%, 误差均在可接受范围之内; 敏感性变化环境因子最大为渠井用水比例, 最小为降水量。

关键词: 泾惠渠灌区; 地下水位; 环境变化; 响应; 路径分析

中图分类号: S273.4 **文献标志码:** A

Groundwater dynamic response and sensitivity analysis to the changing environment in the canal – well combined irrigation area

ZHANG Jing-jing, WEI Xiao-mei, JIANG Ya-nan

(College of Water Resources and Architectural Engineering, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100, China)

Abstract: This study analyzed variations of characteristics of external environment factors for groundwater system of Jinghui canal irrigation area using the Linear trend analysis and Spearman ranking test. A response model of groundwater dynamic affected by external environment was established based on the BP artificial neural network. The sensitivity of the groundwater dynamic of the irrigation area was analyzed by path analysis. The results showed that precipitation was declined significantly, with a linear slope rate of $2.09 \text{ mm} \cdot \text{a}^{-1}$. Evaporation was raised by $0.04 \text{ mm} \cdot \text{a}^{-1}$, which was not obvious in over 30 years. Surface irrigation became decreased. Irrigation intake water from canal head went decreased by 41.6% from that in 1990s. Groundwater exploitation and water ratio of channel vs. well were decreased by 39.7% and 33.9%, respectively. Groundwater depth became increased gradually, and groundwater level cumulative was declined by 11.88m in recent 31 years. The simulation and test average relative errors were 4.52% and 2.23%, reaching acceptable levels. The most sensitive environment factor was water ratio of channel vs. well, and the least was precipitation.

Keywords: jinghui canal irrigation area; groundwater level; environmental change; response; path analysis

地下水位动态是地下水循环过程中, 自然和人为因素对地下水系统综合作用的结果^[1]。地下水位动态变化既是地下水系统对变化环境的响应, 也是地下水均衡的外部表现, 直接反映着灌区地下水资源开发利用的合理程度。近年来, 在变化环境的大

背景下, 北方渠井结合灌区由于地表水资源不足、种植结构调整及管理制度不完善等方面的原因, 出现了地下水位下降、地下水调蓄能力衰减、机井吊泵、地下水环境恶化等诸多问题, 严重影响着灌区水资源的高效安全利用^[2-3]。因此, 研究灌区地下水位

收稿日期: 2015-10-30

基金项目: 水利部公益性行业科研专项(201301016); 陕西省水利科技计划项目资助(2011-07); 国家科技支撑计划项目(2012BAD08B01)

作者简介: 张京京(1989—), 女, 河南商丘人, 硕士研究生, 研究方向为水资源利用与保护。E-mail: 971887350@qq.com。

通信作者: 魏晓妹(1957—), 女, 甘肃甘谷人, 教授, 博士, 主要从事水量转化理论与调控技术研究。E-mail: weixiaomei57@tom.com。

动态对变化环境的响应,并对影响地下水位动态的变化环境因子进行敏感性分析,对地下水资源的合理利用显得尤为重要。

关于地下水位动态响应方面的研究, Brouyere 等^[4]建立了基于土壤水与地下水相互作用的地下水模型,用以预测不同气候情景下的地下水动态;周维博^[5]根据地下水位与其影响因素之间的关系,建立了地下水位动态预报模型;陈皓锐等^[6]运用 GMS-Modflow 模型,模拟了基准情景、气候变化和人类自主活动 3 种情景下未来 40 年华北平原吴桥县潜水位对气候变化和人类活动的响应。目前,有关灌区地下水位动态敏感性分析的研究尚未形成一个完善的理论体系。张冠儒等^[7]将正交试验与地下水动态建模相结合,进行了地下水位动态敏感性方法分析的研究;于国强等^[8]采用改进的灰色斜率关联法分析了各影响因子与地下水位埋深的敏感关系;谢正辉等^[9]利用陆面水文模型开展黄淮海平原浅层地下水埋深对气候变化敏感性分析的纵向研究。北方渠井结合灌区地下水位的动态变化与气候因素及人类活动密切相关,地下水的循环过程往往比较复杂,而有关灌区地下水动态对变化环境响应的研究相对较少^[3]。因此,本文以陕西省泾惠渠灌区为研究区,建立灌区地下水位动态对变化环境的响应模型,并识别地下水位动态变化的敏感性因子,旨在为灌区地下水资源的合理开发利用和科学管理提供依据。

1 研究区概况及数据来源

1.1 研究区概况及其地下水系统

泾惠渠灌区地处陕西省关中平原中部(N34°25'20"~34°41'40", E108°34'34"~109°21'35"),东西长 70 km,南北宽 20 km,总面积约 1 180 km²,属于大陆型半干旱半湿润季风气候区,多年平均降水量为 533 mm,蒸发量为 1 212 mm,是一个自泾河自流引水、渠井双灌、灌排结合,以农业灌溉为主的典型渠井结合型灌区。灌区设施灌溉面积 9.69 万 hm²,渠井双灌面积 7.33 万 hm²。灌区辖西安、咸阳、渭南三市的泾阳、三原、高陵、临潼、阎良和富平六个县(区),粮食作物主要以小麦、玉米为主,经济作物则以蔬菜、果树为主,粮经比为 7:3,是陕西省重要的粮食生产基地。

灌区地下水系统是指浅层地下水在时空分布上有共同的演变规律与水文地质特征的一个整体,与外界进行着频繁的物质与能量交换,其输入量有降雨入渗补给,河道及渠系渗漏补给,田间灌溉入渗补

给及井灌回归补给;输出量有人工开采,潜水蒸发及河道侧向排泄。泾惠渠灌区地处平原区,侧向径流微弱,地下水主要以垂向水量交换为主。已有的相关研究^[3,10]表明 20 世纪 70 年代末 80 年代初,降水入渗补给量和灌溉渗漏补给量约占总补给量的 85%,是地下水系统重要的补给来源;地下水开采和潜水蒸发分别占总排泄量的 47% 和 26%,是地下水系统主要的排泄途径。进入 21 世纪以来,灌区补给量较上世纪末期减少 45.26%;随着地下水资源的大量开采,灌区自然排泄作用减弱,地下水位埋深逐渐超出潜水蒸发极限埋深(7 m)^[3],导致地下水的蒸发排泄能力减弱,仅占排泄总量的 3.2%,因此认为潜水蒸发量可忽略不计。外界环境因素即气候因素(降水及蒸发)与人类活动因素(灌溉引水及地下水开采等)通过对地下水系统的输入与输出影响地下水循环,最终表现为地下水位的动态变化。综上所述,灌区地下水系统的外部环境因素主要为降水、蒸发、渠首农灌引水、田间灌溉用水、渠井用水比例及地下水开采等。

1.2 数据来源

本文所用的反映灌区变化环境因素的气候资料和人类活动资料,通过陕西省泾惠渠管理局统计及实地调研获得,地下水位埋深资料通过陕西省地下水管理监测局获得。其中,降水和蒸发资料序列共计 56 a(1955—2010 年),灌溉引水及地下水开采资料序列共计 31 a(1980—2010 年),地下水位埋深资料序列共计 31 a(1980—2010 年)。经分析与审查,符合可靠性、一致性及代表性的要求。

2 灌区地下水系统外部环境因素变化趋势分析

2.1 气候因素及其变化趋势

灌区 1955—2010 年的降水量及蒸发量资料分析表明,近 56 a 来灌区多年平均降水量为 504.5 mm,多年平均蒸发量为 1 173.8 mm。灌区最大年降水量为 832.0 mm(2003 年),最小年降水量为 293.7 mm(1997 年),最大值和最小值之比为 2.83,年际间差异较大,其偏态系数为 0.78,表明年降水量序列为正偏序列;灌区最大和最小年蒸发量为 1 788.0 mm 和 794.2 mm,分别出现在 2002 年和 1993 年,最大值与最小值之比为 2.25。由灌区年降水量及年蒸发量时程变化曲线及 5 年滑动平均变化曲线图 1 和图 2 可以看出,灌区近 56a 来降水量整体呈下降趋势,其线性倾向率为 2.09 mm·a⁻¹;蒸发量整体呈

下降趋势,变化甚微,其线性倾向率为 $0.04 \text{ mm} \cdot \text{a}^{-1}$,其中 20 世纪 90 年代以前,灌区多年平均蒸发量呈下降趋势,而 90 年代以后,呈上升趋势。利用 Spearman 秩次相关检验法,取显著性水平 $\alpha = 0.05$,求得降水的统计量 $|T| = 2.43 > T_{\alpha/2} = 2.01$,蒸发的

统计量 $|T| = 1.22 < T_{\alpha/2} = 2.01$ 。综合分析可知,灌区降水量序列下降趋势显著,而蒸发量序列下降趋势不明显,这与近年来关中地区气候变暖,降水量减少,蒸发量增加的大趋势吻合^[11-12]。

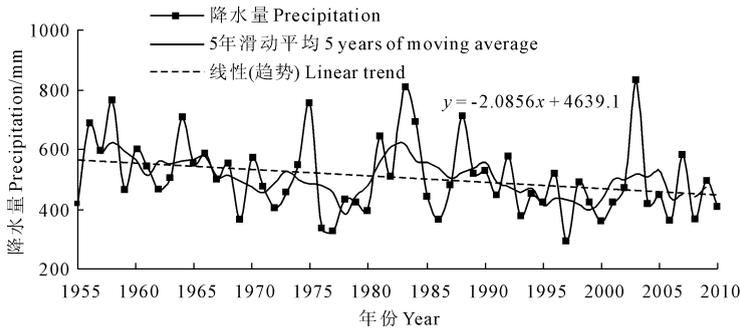


图 1 灌区降水量变化趋势

Fig.1 Precipitation variation e trend of the irrigation area

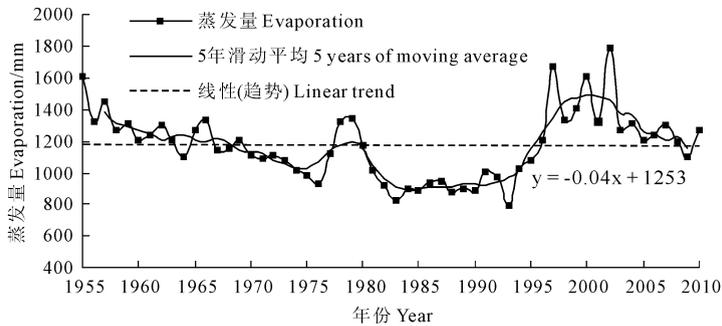


图 2 灌区蒸发量变化趋势

Fig.2 Evaporation variation trend of the irrigation area

2.2 人类活动因素及其变化趋势

泾惠渠灌区以占全省 2.4% 的耕地,生产了全省 5.7% 的粮食,是陕西省重要的粮食生产基地。灌区农事活动十分发达,农业用水量占灌区用水总量的 90% 左右。近年来,随着经济建设速度的加

快,灌区的人类活动更加密集,对整个灌区的地下水动态的影响也更加明显^[1,13]。图 3 和图 4 分别是灌区 1980—2010 年地表水灌溉引水量、地下水开采量及渠井用水比例变化趋势图。

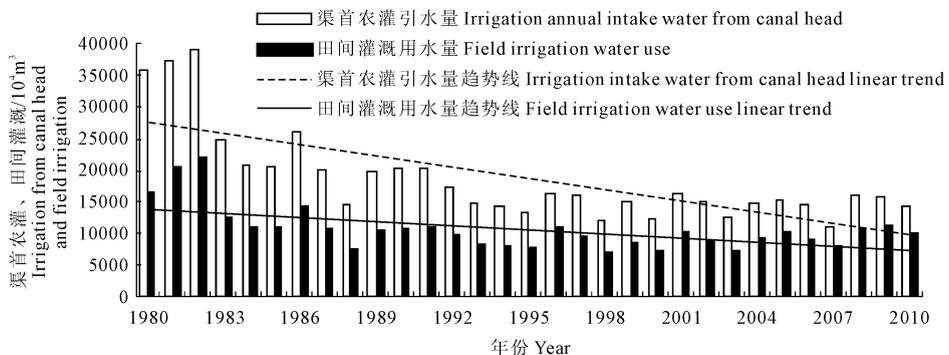


图 3 渠首农灌引水量及田间灌溉用水量变化趋势

Fig.3 Variation trends of irrigation intake water from canal head and field irrigation water use

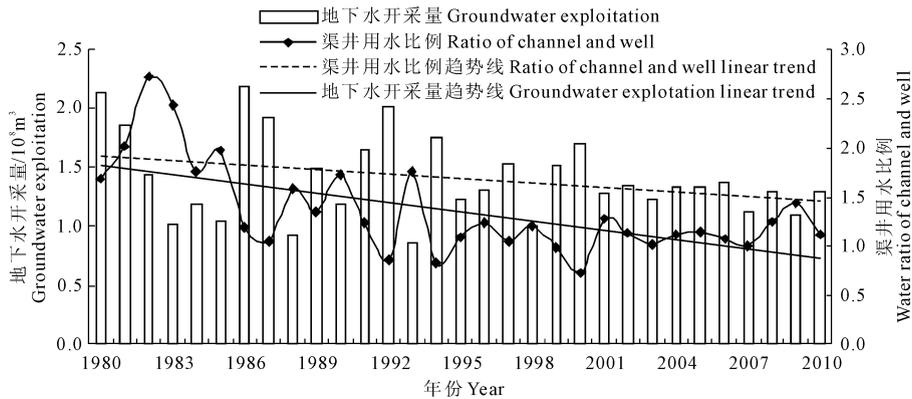


图 4 灌区地下水开采量及渠井用水比例变化趋势

Fig. 4 Variation trends of groundwater exploitation and water ratio of channel vs. well in the irrigation area

从图 3 中可以看出,20 世纪 80 年代,渠首农灌引水量较大,最大值为 $3.92 \times 10^8 \text{ m}^3$ (1982 年),灌区 10 年平均(1980—1989 年)为 $2.59 \times 10^8 \text{ m}^3$,90 年代以后,渠首农灌引水量明显减少,平均为 $1.51 \times 10^8 \text{ m}^3$,减少了 41.6%;灌区多年平均(1980—2010 年)田间灌溉用水量为 $1.06 \times 10^8 \text{ m}^3$,其中,20 世纪 80 年代,田间灌溉用水量较大,最大值为 $2.19 \times 10^8 \text{ m}^3$ (1982 年),10 年(1980—1989 年)平均值为 $1.36 \times 10^8 \text{ m}^3$;90 年代以后,田间灌溉用水量明显减少,平均为 $0.93 \times 10^8 \text{ m}^3$,减少了 32.1%。经分析知,近 31 a 来,渠首农灌引水量和田间灌溉用水量均呈显著下降趋势。灌区地表灌溉水的入渗是地下水补给的主要来源之一,随着灌区地表灌溉引水量的减少,地下水补给量也随之减少,进而导致灌区地下水位的下降。

分析图 4 知,灌区多年平均地下水开采量为 $1.41 \times 10^8 \text{ m}^3$,近年来,灌区地下水开采量略有下降,由 $2.14 \times 10^8 \text{ m}^3$ (1980 年)减少为 $1.29 \times 10^8 \text{ m}^3$ (2010 年),减少了 39.7%,较渠首农灌引水量而言,减小幅度相对较小,趋势不明显;渠井用水比例呈逐年递减趋势,由 1.68(1980 年)减少为 1.11(2010 年),减少了 33.9%,其中 1980—1985 年,渠井用水比例相对较高,最高达到 2.73,1985 年之后渠井用水比例显著下降,2000 年达到最小值 0.73,之后渠井用水比例略有回升,这说明灌区灌溉水源已由地表水灌溉为主逐步转变为渠井水持平的灌溉格局。

3 灌区地下水位动态对变化环境的响应

根据所收集的地下水动态监测资料,对灌区内 21 眼观测井的地下水位动态数据采用空间插值的

方法,分析近 31 a 来灌区年均地下水位埋深变化趋势。由图 5 可以看出,灌区地下水位埋深整体呈增大趋势。其中,最小值为 1982 年的 3.48 m,最大值为 2010 年的 15.36 m。近 31 a 间,灌区地下水位累计降幅为 11.88 m,年均降速为 $0.38 \text{ m} \cdot \text{a}^{-1}$ 。1980—1985 年间,灌区地下水位埋深变化不大,1986 年以后,地下水位埋深变化较大。其中,1986—1994 年,年均降速为 $0.50 \text{ m} \cdot \text{a}^{-1}$,1996—2003 年,年均降速为 $0.55 \text{ m} \cdot \text{a}^{-1}$,地下水位下降速度在增大。近些年来,由于灌区地下水位不断下降,出现了机井吊泵、地下水环境恶化等诸多问题,严重影响着灌区的健康发展。

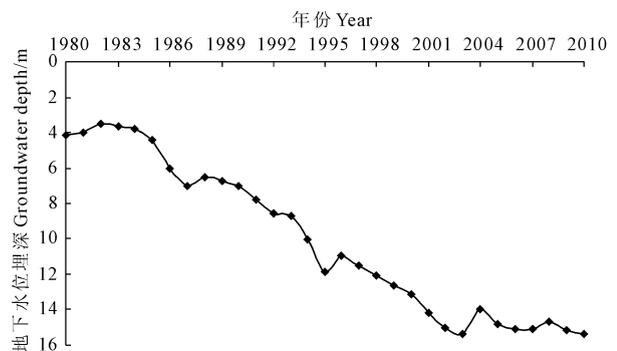


图 5 灌区地下水位埋深变化趋势

Fig. 5 Variation trend of groundwater depth in the irrigation area

灌区地下水位动态既是对地下水系统外部环境响应的结果,也是地下水均衡的外部表现,直接反映着灌区地下水资源开发利用的合理程度。因此,通过建立灌区地下水位动态对变化环境的响应模型,研究灌区地下水位动态对变化环境的响应,可为灌区地下水资源的合理开发和科学管理提供依据。灌区地下水位动态受多种变化环境因素的影响表现出明显的非线性特征,而人工神经网络模型以其良好

台,进行通径分析。选用的统计指标有相关系数、通径系数、决定系数,对回归方程 R^2 的总贡献^[21]。求

解结果见表 2 及表 3。

表 2 自变量对地下水埋深的通径分析

Table 2 Path analysis of variables to groundwater depth

自变量 Independent variable	相关系数 Correlation coefficient	直接通径系数 Direct path coefficient	间接通径系数 Indirect path coefficient					和 Total
			x_1	x_2	x_3	x_4	x_5	
x_1	-0.3014	-0.0624		-0.0480	0.0772	0.2624	-0.5306	-0.2390
x_2	-0.7500	-0.4019	-0.0075		1.1403	-0.4193	-1.0616	-0.3481
x_3	-0.6008	1.1880	-0.0041	-0.3858		-0.3695	-1.0294	-1.7888
x_4	-0.2468	-0.9377	0.0175	-0.1797	0.4682		0.3850	0.6910
x_5	-0.6989	-1.4658	-0.0226	-0.2911	0.8343	0.2463		0.7669

表 3 自变量对地下水埋深的决定系数和 R^2 的总贡献

Table 3 Variables to determination coefficient of groundwater and contribution R^2

自变量 Independent variable	决定系数 Determination coefficient					R^2
	x_1	x_2	x_3	x_4	x_5	
x_1	0.0039	0.0060	-0.0096	-0.0327	0.0662	0.0188
x_2		0.1615	-0.9165	0.3371	0.8533	0.3014
x_3			1.4113	-0.8780	-2.4459	-0.7138
x_4				0.8793	-0.7222	0.2314
x_5					2.1486	1.0244

分析表 3 和表 4 可知,各因子对地下水埋深均有不同程度的影响,但从其直接作用和间接作用来说,有一定的差异。就直接影响程度而言依次为渠井用水比例(x_5)、田间灌溉用水量(x_3)、地下水开采量(x_4)、渠首农灌引水量(x_2)、降水量(x_1)。 x_3 与 x_5 对 y 的综合决定系数绝对值最大,为 2.4459,

说明二者的相互作用对 y 的影响最大;此外, x_3 、 x_5 对 y 的单独决定系数分别 1.4113、2.1486,对 R^2 的总贡献分别为 -0.7138、1.0244,直接通径系数分别为 1.1880、-1.4658,相较于其他因子数值最大,这说明 x_3 、 x_5 是影响 y 的重要人类活动因子; x_2 与 x_3 、 x_2 与 x_5 、 x_3 与 x_4 及 x_4 对 y 的决定系数也较大,而 x_1 的单独或与其他因素综合的决定系数均不大,且直接通径系数及 R^2 均较小,这说明 x_1 对 y 的影响程度较小。

4.3 地下水埋深动态敏感性因子分析

利用逐步剔除敏感性较弱自变量的方法,进行敏感性分析。在 5 个指标对 R^2 的贡献表中,降水量 x_1 的贡献最小,且 x_1 的直接和间接通径系数的绝对值也较小,因此首先考虑剔除 x_1 。以此类推,表 4 是逐步剔除不敏感因子的直接通径系数和对 R^2 的总贡献的计算结果。

表 4 逐步剔除不敏感因子对地下水埋深的通径分析

Table 4 Path analysis of groundwater depth by gradually removing insensitive factors

自变量 Independent variable	x_1		x_2		x_3		x_4		x_5	
	直接 Direct	R^2	直接 Direct	R^2	直接 Direct	R^2	直接 Direct	R^2	直接 Direct	R^2
5 个 Five	-0.0624	0.0188	-0.4019	0.3014	1.1880	-0.7138	-0.9377	0.2314	-1.4658	1.0244
剔除 x_1 Remove			-0.4408	0.3306	1.2341	-0.7414	-0.9274	0.2289	-1.4899	1.0413
再剔除 x_2 Remove again					1.0692	-0.6424	-1.1267	0.2781	-1.7457	1.2201
再剔除 x_4 Remove again					-0.2170	0.1304			-0.5465	0.3819

剔除 x_1 后,渠首农灌引水量 x_2 和地下水开采量 x_4 对 R^2 的总贡献均较小,但 x_4 的直接通径系数绝对值为 0.9274 较 x_2 的 0.4408 大,因此考虑剔除 x_2 ;剔除 x_2 后,在剩余的 x_3 、 x_4 和 x_5 对地下水埋深 y 的通径分析中, x_4 对 R^2 的总贡献和直接通径

系数均较小,因此继续剔除 x_4 ; x_3 和 x_5 对 y 的通径分析结果显示, x_5 的直接通径系数和对回归方程的总贡献均大于 x_3 。综上计算和分析可知,5 个变化环境因子对地下水埋深 y 影响的敏感性大小为 $x_5 > x_3 > x_4 > x_2 > x_1$,即渠井用水比例 > 田间灌溉

用水量 > 地下水开采量 > 渠首农灌引水量 > 降水量。

5 结 论

1) 降水量、蒸发量、渠首农灌引水量、田间灌溉用水量、地下水开采量及渠井用水比例是影响灌区地下水动态的主要外部环境因子。趋势分析法及 Spearman 秩次检验法表明,灌区降水量下降趋势显著,其线性倾斜率为 $2.09 \text{ mm} \cdot \text{a}^{-1}$,蒸发量减少趋势不明显,其线性倾斜率为 $0.04 \text{ mm} \cdot \text{a}^{-1}$;地表水灌溉引水量呈减小趋势,渠首农灌引水量较 90 年代之前减少了 41.6%,地下水开采量减少了 39.7%,渠井用水比例减小了 33.9%;灌区地下水位埋深呈增加趋势,近 31 a 间,灌区地下水位累计降幅为 11.88 m,年均降速为 $0.38 \text{ m} \cdot \text{a}^{-1}$ 。

2) 基于 BP 神经网络的地下水位动态对变化环境的响应模型模拟结果表明,地下水位埋深模拟的平均相对误差为 4.52%,检验的平均相对误差为 2.23%,误差均在可接受范围之内,所建模型能够用于地下水位动态对变化环境响应的模拟计算。

3) 5 个因子的通径分析结果表明,人类活动因子是灌区地下水位动态的最敏感影响因子;逐步剔除不敏感因子的通径分析表明,敏感性最大为渠井用水比例,最小为降水量,其次为田间灌溉用水量、地下水开采量、渠首农灌引水量。

参 考 文 献:

[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): 100-107.
 [2] 韩业珍. 基于变化环境的灌区地下水动态时空变异规律研究[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2010.
 [3] 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.
 [4] Serge Brouy ère, Guy Carabin, Alain Dassargues. Climate change im-

pacts on groundwater resources: modelled deficits in a chalky aquifer, Geer basin, Belgium[J]. Hydrogeology Journal, 2004, 12(2): 123-134.
 [5] 周维博. 人工神经网络理论在渠井结合灌区地下水动态预报中的应用[J]. 西北水资源与水工程, 2003, 14(2): 5-9.
 [6] 陈皓锐, 高占义, 王少丽, 等. 基于 Modflow 的潜水位对气候变化和人类活动改变的响应[J]. 水利学报, 2012, 43(3): 344-362.
 [7] 张冠儒, 魏晓妹. 基于变化环境的地下水动态敏感性分析方法研究[J]. 西北农林科技大学学报(自然科学版), 2011, 39(2): 223-228.
 [8] 于国强, 李占斌, 张 霞, 等. 洛惠渠灌区地下水动态敏感因子研究[J]. 水土保持通报, 2009, 29(5): 137-141.
 [9] 谢正辉, 梁妙玲, 袁 星, 等. 黄淮海平原浅层地下水埋深对气候变化响应[J]. 水文, 2009, 29(1): 30-35.
 [10] 刘 燕, 朱红艳. 泾惠渠灌区水环境劣变特征及地下水调蓄能力分析[J]. 农业工程学报, 2011, 27(6): 19-24.
 [11] 王德丽. 全球变暖环境下陕北、关中、陕南气候变化对比研究[D]. 西安: 陕西师范大学, 2011.
 [12] 陈太根, 董 婕. 关中平原近 49 年来气候变化特征分析[J]. 干旱区资源与环境, 2009, 23(12): 76-81.
 [13] 姜 鹏, 刘俊民, 黄一帆, 等. 泾惠渠地下水对气候变化和人类活动的响应[J]. 人民黄河, 2014, 36(5): 45-51.
 [14] 杨忠平, 卢文喜, 龙玉桥, 等. 两种随机地下水位动态预测模型在吉林西部的应用与对比[J]. 水文, 2008, 28(2): 49-54.
 [15] 李 鹏. 变化环境对灌区水循环的影响研究[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2014.
 [16] 高志永, 汪有科, 周玉红, 等. 微观时间尺度气象因子影响露水的通径分析[J]. 西北林学院学报, 2014, 30(5): 12-18.
 [17] 谭 静, 陈洪梅, 韩学莉, 等. 玉米杂交种产量与产量构成因素的相关和通径分析[J]. 华北农学报, 2009, 24(Z2): 155-158.
 [18] 蔡甲冰, 刘 钰, 许 迪, 等. 基于通径分析原理的冬小麦缺水诊断指标敏感性分析[J]. 水利学报, 2008, 39(1): 83-90.
 [19] 邵光成, 俞双恩, 刘 娜, 等. 通径分析在冬小麦受渍胁迫诊断指标敏感性分析中的应用[J]. 应用基础与工程科学学报, 2011, 19(4): 527-534.
 [20] 唐启义, 冯明光. DPS 数据处理系统: 实验设计、统计分析及数据挖掘[M]. 北京: 科学出版社, 2007: 631-636.
 [21] 明道绪. 通径分析—基本步骤[J]. 四川农学院学报, 1983, 1(1): 129-136.