



DOI: 10.13476/j.cnki.nsbdtqk.2016.01.025

李慧,周维博,马聪,等.西安市区地下水位动态特征与影响因素[J].2016,14(1):149-154,160.

LI Hui, ZHOU Wei bo, MA Cong, et al. Dynamic features of groundwater level in Xi'an city and its influence factors[J]. 2016, 14(1): 149-154, 160. (in Chinese)

西安市区地下水位动态特征与影响因素

李慧^{1,2}, 周维博^{1,2}, 马聪^{1,2}, 刘博洋^{1,2}, 宋扬^{1,2}

(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: 根据西安市区地下水位监测资料, 分析了地下水位动态变化特征, 并以水文地质分区为单元, 对水位动态的影响因素(降水和开采)进行了研究。结果表明: 1965年-2010年西安市地下水位整体呈下降趋势; 降水量对地下水位的影响主要体现在丰水年水位回升或下降速率减缓, 枯水年水位下降速率加剧, 不同水文地质分区水位变化与降水量变化的相关程度不同; 开采量对地下水位的影响体现在随着开采量增加, 地下水位下降, 但同样的开采量下, 各个水文地质分区水位下降幅度不同; 最后, 运用灰色关联度分析水位变化的主导因素, 结果表明, 地下水开采是西安市区地下水位变化的主导因素。

关键词: 地下水位动态; 影响因素; 降水量; 开采量; 灰色关联度; 西安市区

中图分类号: P641.74 **文献标志码:** A **文章编号:** 1672-1683(2016)01-0149-06

Dynamic features of groundwater level in Xi'an city and its influence factors

LI Hui^{1,2}, ZHOU Wei bo^{1,2}, MA Cong^{1,2}, LIU Bo yang^{1,2}, SONG Yang^{1,2}

(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, Chang'an University, Xi'an 710054, China)

Abstract: According to the groundwater level monitoring data, here we analyzed the dynamic variation features of groundwater level in Xi'an City and studied its influence factors, such as precipitation and exploitation in different hydrogeological areas. The results showed that the groundwater level in Xi'an City was on the decline during 1965-2010. The dynamic changes of groundwater affected by precipitation mainly reflected in that groundwater level fell slowly or raised in wet years, but fell rapidly in dry years; the increased exploitation of groundwater led to a drop of groundwater level, but under the same exploitation, the drop amplitude of groundwater level in different hydrogeological areas behaved differently. Finally, exploitation is identified as the main influence factors for changes of groundwater level by using grey relational analysis.

Key words: groundwater level dynamic feature; influence factor; precipitation; exploitation; grey relational analysis; Xi'an City

20世纪70年代以来, 西安市地下水开采量不断增加, 水位持续下降, 引发了一系列水文地质环境

问题, 因此研究西安市地下水动态变化规律及其影响因素, 对地下水的保护利用以及社会经济的可持

收稿日期: 2015-03-09 修回日期: 2015-12-16 网络出版时间: 2016-02-27

网络出版地址: <http://www.cnki.net/kcms/detail/13.1334.TV.20160227.1629.009.html>

基金项目: 中国地质调查局地质调查项目(12120113004800); 陕西省自然科学基金(2014JM1030)

Fund: Geological Survey Project of China Geological Survey (12120113004800); Shaanxi Province Natural Science Foundation of China (2014JM1030)

作者简介: 李慧(1991-), 女, 陕西清涧人, 博士研究生, 主要从事水文地质方面的研究。E-mail: 390045111@qq.com.

通讯作者: 周维博(1956-), 男, 陕西乾县人, 教授, 博士生导师, 主要从事水资源与水环境及节水灌溉方面的教学与研究工作。E-mail: zw-bzyz823@163.com.

续发展有着重要的意义。关于西安市地下水动态,已有学者进行了研究。王慧芳、段东平等分析了西安市潜水及承压水水位下降及其环境负效应^[1-2];姜规模对西安城市水文地质条件和多年地下水动态特征进行了综合分析研究^[3];宋令勇等分析了西安市潜水埋深与降水量的关系^[4];陶虹对关中城市群地下水动态及影响因素进行了研究^[5]。综上可知,关于西安市地下水动态的演变已有较多研究,但是针对地下水演变驱动因子的详细分析相对较少。本文从降水变化和人类开采以及地下水动态演变三者关系入手,对影响地下水动态变化的各因素进行了分析研究,并对各要素对地下水动态变化的影响程度进行了定量分析。

1 研究区概况

西安市区位于渭河冲积平原中段南部,地理位置为北纬 $34^{\circ}10' - 34^{\circ}47'$,东经 $108^{\circ}47' - 109^{\circ}16'$,属暖温带大陆性季风区,四季冷暖干湿分明,多年平均降水量 569 mm,总控面积 854 km²,包括未央、莲湖、新城、灞桥、碑林、雁塔六个行政区。区内地势特征为东南高、西北低,自东南向西北依次是黄土台塬、渭河及支流冲积平原。潜水含水岩组在区内均有分布见图 1,其介质主要由第四系全新统、上、中更新统冲积及风积物组成,含水层厚度一般为 20~70 m。其中,冲积含水岩组分布于渭河及支流河漫滩河谷阶地,由冲、洪积砂、砂卵、砾石加亚砂土、亚黏土组成,富水性较强;黄土含水岩组分布于黄土台塬,由黄土及古土壤组成,因孔隙裂隙在水平及垂直方向发育不均,富水性差异较大。

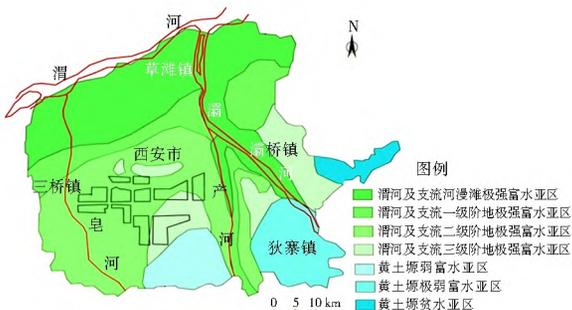


图 1 研究区水文地质分区

Fig. 1 Schematic diagram of hydrogeological units in Xi'an

2 地下水位动态变化

2.1 地下水位年际变化

根据地下水监测资料^[6-7],西安市区地下水位平均埋深的年际变化见图 2,区内地下水位埋深总体呈增大趋势,从 1965 年-2010 年地下水位下降了

20.6 m, 平均每年下降 0.41 m。

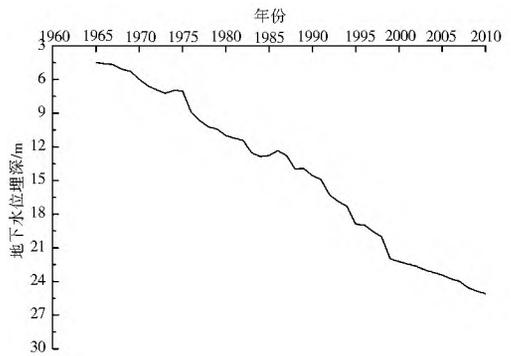


图 2 地下水位平均埋深年际变化

Fig. 2 Inter-annual variation of groundwater level

西安市区地下水的流向的总体趋势是自东南向西北,从东南部的黄土塬区到西北部的冲洪积阶地,地下水位埋深呈现逐渐变浅的趋势。1965 年西安市区大部分地区的地下水位埋深小于 5 m,其面积占总面积的 67.2% 见图 3,局部地区埋深为 10~20 m,主要分布在气候干燥、降水偏少的黄土塬区。

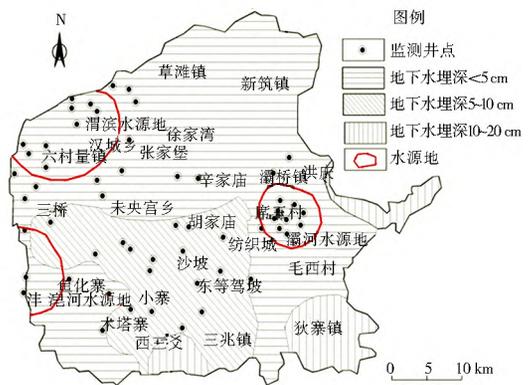


图 3 1965 年地下水位埋深分布

Fig. 3 Distribution of groundwater level in 1965

20 世纪 70 年代起,地下水开始大规模开采,区内水位逐年下降,至 1983 年,水位埋深小于 5 m 的分布区缩小到 31.4%,5~10 m 的埋深区面积扩大了将近一倍,占 42.1%,有埋深大于 30 m 的分布区出现。1965 年-1983 年期间地下水位平均埋深从 4.5 m 增加到 12.51 m,水位平均每年下降 0.44 m。

1984 年-1998 年,随着开采量的进一步增大,地下水位下降速度随之增大,水位平均每年下降 0.58 m,至 1998 年,埋深小于 10 m 的分布区面积缩小为 31.4%,埋深 10~20 m 的分布区面积扩大到 45.4%,埋深大于 20 m 的分布区面积占全区面积达 23.4%,并在局部地区出现了埋深大于 40 m 的分布区。

1998 年以后,地下水位下降速率虽然有所减缓,但仍然以 0.42 m/a 的速度下降,到 2010 年,区内水位埋深小于 5 m 的区域完全消失,地下水位埋深以 10~20 m 为主,主要分布于渭河二、三级阶地

及南部广大地区,面积为 341.6 km², 占总面积的 39.9%; 大于 30 m 埋深的分布区将近 120 km², 主要分布在西郊沣河水源地、白鹿原的狄寨镇以及灞桥以东地区; 大于 40 m 埋深的分布区进一步扩大, 占总面积的 2.5%, 见图 4。

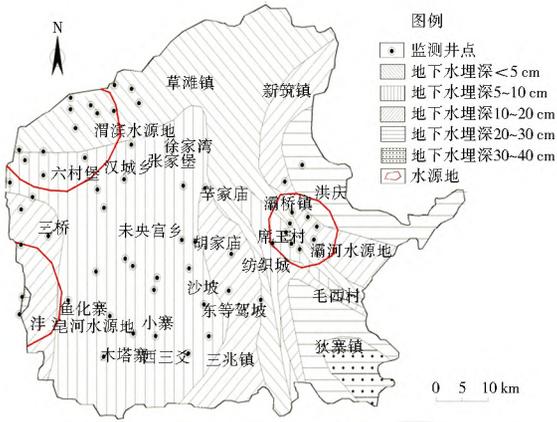


图 4 2010 年地下水位埋深分布

Fig. 4 Distribution of groundwater level in 2010

表 1 西安市地下水位埋深分布区面积统计
Tab. 1 Distribution area statistics of groundwater buried depth in Xi'an (%)

年份	潜水位埋深					
	< 5m	5~10m	10~20m	20~30m	30~40m	> 40m
1965	67.2	23.9	8.9	0	0	0
1983	31.4	42.1	17.8	8.7	0.8	0
1998	11.3	20.1	45.4	13.6	9.6	0.2
2010	0	24.7	39.9	21.6	11.3	2.5

2.2 地下水位年内变化

受地貌、含水层岩性、水位埋深、包气带岩性渗透性能的影响, 特别是受降水量与人为开采因素的影响, 研究区内地下水位年内动态变化规律不尽一致, 但总的趋势是 1 月- 4 月份水位呈缓慢波动下降期, 5 月- 9 月份为全年最低水位期, 10 月份后水位开始回升, 年内水位变化总体上以缓慢下降或相对稳定为主。

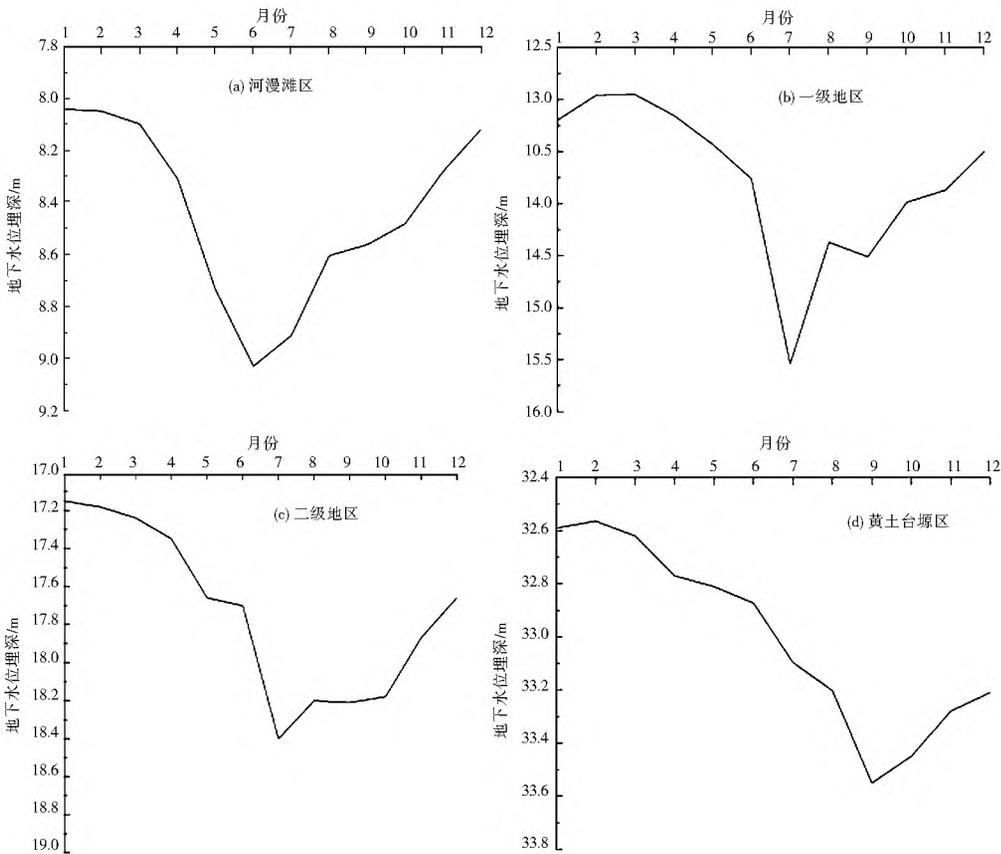


图 5 地下水位年内变化

Fig. 5 Variation of groundwater level during the year

河漫滩及一、二级阶地区(图 5(a)、(b)、(c)), 1 月- 4 月份由于气温较低, 开采量较小, 水位变化较小, 为全年高水位期, 5 月- 9 月份, 虽然降雨量增大, 但随着气温的升高, 地下水开采量大幅增加, 水位明显下降, 是年内低水位期, 10 月份之后, 随着气

温的降低以及开采量的减少, 水位开始回升; 黄土塬区(图 5(d)), 由于地下水位埋深较大, 受降雨补给影响较小, 1 月- 9 月份水位呈下降趋势, 9 月份水位为全年最低, 之后随着开采量减少以及降雨补给的滞后作用的影响, 水位开始缓慢回升。

3 地下水位动态变化主要影响因素

区内地下水位持续下降的主要原因有二：一是气候逐渐干旱化引起地下水补给量的减少；二是地下水过量开采。本文从降雨和开采量两个因素出发，探讨其对水位的影响^[817]。

3.1 降水

根据 1975 年 - 2010 年气象资料，西安市降雨量整体呈现缓慢波动下降趋势见图 6，趋势线的斜率为 - 1.54 mm/a；此外，用 Mann-Kendall 趋势检验法对降水量变化趋势进行显著性分析，经检验，其统计量 $U = - 0.86$ ，说明降水量呈不显著下降趋势，与前面的分析一致。受大陆性季风气候影响，西安市降水量年际变化较大，丰水年和枯水年相差 2~ 3 倍，丰枯交替出现，20 世纪 70 年代为枯水期，20 世纪 80 年代为丰水期，20 世纪 90 年代为持续枯水期，2000 年以后降水量虽有所回升，但其年均降水量仍小于多年平均降水量。研究区降水量年内分布也不均匀，7 月 - 9 月降水量占全年降水量的 60% 左右，冬季（12 月 - 1 月）降水量最少，仅占全年降水量的 3% 左右。

降水是地下水重要的补给来源，其季节性和年际性变化规律对区内地下水动态变化有着重要的驱动意义。从图 6 中可以看出，随着降水量的减少，各水文地质分区地下水位埋深呈增大趋势。为进一步分析地下水位随降水量的变化规律，将 1975 年 - 2010 年降水量与多年平均降水量差值作为横坐标，

以各分区平均水位变幅作为纵坐标，建立两者相关关系图，见图 7。从图中可以看出，随着降水量的增大，各分区水位下降的速率明显减缓，甚至出现回升，降水量减少，水位下降速率加剧，二者具有一定的相关关系。例如，1983 年降雨量达 909 mm，较多年平均降水量多 340 mm，河漫滩区(图 7(a)) 地下水位回升了 0.07 m，阶地区(图 7(b)) 地下水位回升了 0.04 m，黄土塬区(图 7(c)) 回升了 0.03 m；1995 年降雨量为 363 mm，是多年平均降水量的 63.8%，各分区水位降幅明显增大，其中，河漫滩区水位下降 1.24 m，阶地区地下水位下降 1.35 m，黄土塬区水位下降 1.54 m；而 1994 年、1996 年研究区降雨量为 573.2 mm、639.8 mm，分别是多年平均降水量的 1.01 倍、1.12 倍，而各分区水位下降值分别为 - 0.38 m、- 0.23 m、- 0.51 m、- 0.33 m、- 0.71 m、- 0.58 m；此外，由图 5 可知，河漫滩区地下水位变幅与降水量变化相关系数达 0.63，阶地区为 0.56，而黄土塬区仅为 0.49，

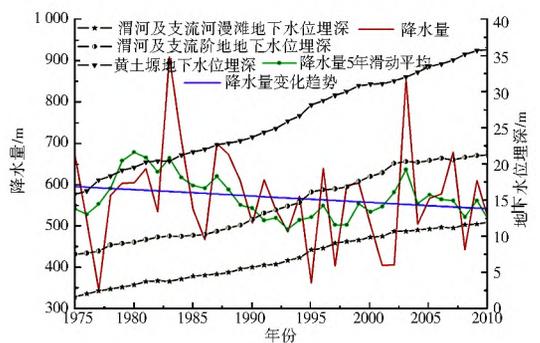


图 6 研究区降水量及地下水位埋深变化
Fig. 6 Change of precipitation and groundwater level

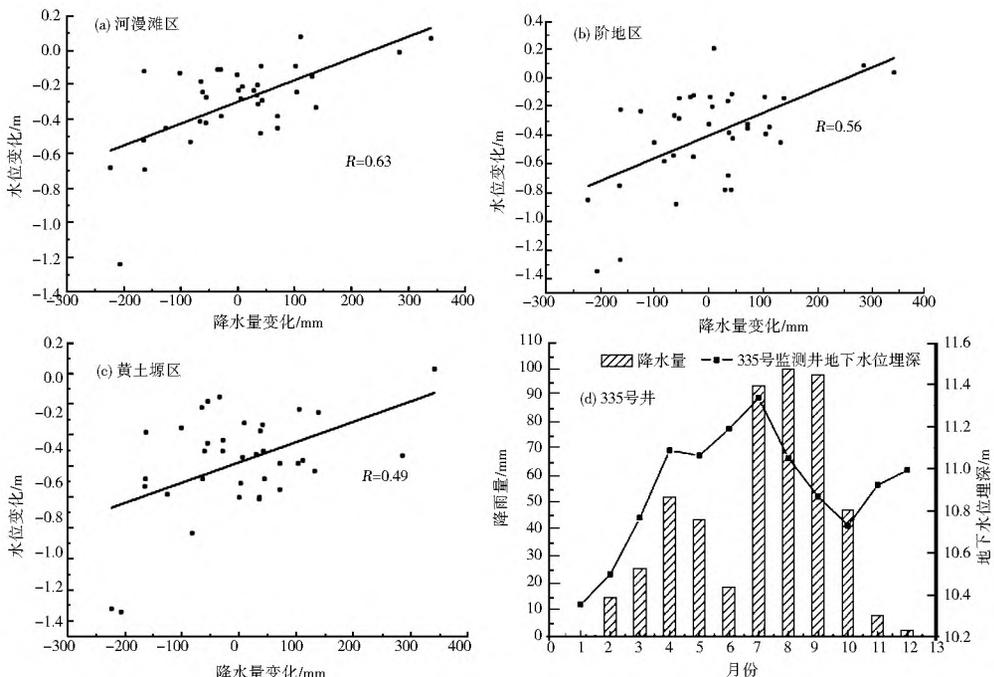


图 7 降水量与地下水位变化关系

Fig. 7 Relationship between precipitation and groundwater level

这主要是由于黄土塬区地下水位埋深过大使得包气带滞留水分多,不利于地下水的补给所致^[18]。综上所述,降水量与地下水资源有着明显的正相关关系,也间接说明了1990年以后西安市降水量的减少与水位埋深的增加有一定的关联。

水量与地下水位变化关系密切,研究区汛期主要集中在7月-9月,从7月份开始降水量增多,对地下水的补给量随之开始增多,但受降雨入渗补给系数、包气带厚度等水文地质条件的影响,水位埋深对降水的响应存在明显的滞后现象,至8月份后水位埋深才开始减小,9月份后降水量开始减少,但水位埋深在10月份后才开始增大。图7(d)为禁采区范围内335号监测井2010(平水年)年水位埋深与降水量的年内波动关系图,从图中可以看出,在尽量排出开采因素干扰后,水位埋深随降水量变化而变化,但其对降水的响应稍晚于降水周期。

3.2 开采量

过量开采地下水是区内地下水位不断下降的另一主要原因。根据文献[19]资料,1975年以前,西安市地下水开采量呈波动增加趋势,开采量较小,水位下降缓慢;1975年-1989年地下水开采量急剧增加,从1975年1.1亿m³增大到1989年3.77亿m³,水位平均每年下降0.73m;1990年-1997年地下水开采量呈稳定增加趋势,从1990年3.95亿m³增加到1997年的4.28亿m³,年均开采量4.14亿m³,水位平均每年下降0.87m/a;1997年以后,随着黑河水库的全面通水,西安市逐渐减少地下水开采量,水位下降速度大幅减小,1998年-2003年水位下降速率为0.47m/a;2003年后,随着西安市政府进一步加强地下水的管理,区内地下水开采量进一步减少,从2003年3.7亿m³减少到2010年3.0亿m³,年均开采量3.4亿m³,水位下降速率进一步减缓,部分地区水位开始回升。西安市地下水开采量变化见图8。

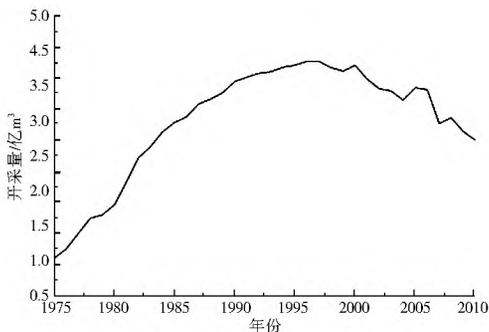


图8 研究区地下水开采量变化

Fig. 8 Change of exploitation of groundwater in Xi'an

对研究区1975年-2010年间各分区地下水开采量和地下水位埋深数据进行曲线拟合,拟合关系式见图9(其中y代表水位埋深,x代表开采量)。从图9(a)可以看出,1997年以前水位埋深随开采量的增加而增加。对各关系式两边求导,将1975年-1997年各分区地下水开采量数据带入该式,得到水位埋深对开采量的导数,求其平均值。结果表明:渭河及支流河漫滩区地下水开采量每增加0.1亿m³,水位下降0.693m;渭河及支流阶地区地下水开采量每增加0.1亿m³,水位下降0.767m;黄土塬区地下水开采量每增加0.1亿m³,水位下降2.793m。1997年以后,地下水开采量开始减小,各分区水位缓慢下降,后逐渐趋于平稳(曲线上方明显偏离的数据)。

开采量与潜水位年内波动有着密切的关系。以灞河水源地漏斗中心K25号监测井为例(图9b),1月-5月份水位随开采量的增加呈波动下降,6月-9月份,地下水开采量急剧增加,地下水位为全年最低水位期,9月份后,地下水开采量逐渐减少,水位开始有所回升。

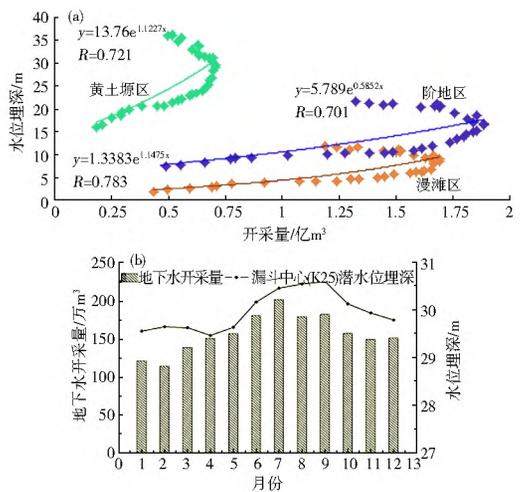


图9 开采量与地下水位变化关系

Fig. 9 Correlation between exploitation and groundwater level

3.3 主导因素确定

3.3.1 研究方法

为定量分析降水和地下水开采量对地下水动态变化的影响,文章采用灰色关联度^[20]法计算二者的影响程度。

设 x_i 为系统因素,则在时间点上的观测数据为 $x_i(k)(k=1, 2, \dots, n)$,则称

$$x_i = (x_i(1), x_i(2), \dots, x_i(n)), i = 0, 1, 2, \dots, m \quad (1)$$

为系统因素 x_i 的时间序列。

定义 x_0 为母序列; x_i 为子序列, $i=1, 2, \dots, m$ 为便于关联度计算,对序列进行无量纲化处理,

得到新序列:

$y_i = x_i d = (y_i(1), y_i(2), \dots, y_i(n)), i = 0, 1, 2, \dots, m$
式中: d 为序列算子。

对新序列求差

$$\Delta_{0,i}(k) = |y_0(k) - y_i(k)|, i = 1, 2, \dots, n \quad (2)$$

求两极最大差和最小差

$$\Delta_{\max} = \max_i \max_k \Delta_{0,i}(k), \Delta_{\min} = \min_i \min_k \Delta_{0,i}(k) \quad (3)$$

求关联系数

$$r_{0,i}(k) = \frac{\Delta_{\min} + \rho \Delta_{\max}}{\Delta_{0,i}(k) + \rho \Delta_{\max}}, \rho \in [0, 1];$$

$$i = 1, 2, \dots, m; k = 1, 2, \dots, n \quad (4)$$

式中: ρ 为分辨系数, 且 $\rho \in [0, 1]$ 。一般取 $\rho = 0.5$ 。

计算关联度

$$r(x_0, x_i) = \frac{1}{n} \sum_{k=1}^n r(x_0(k), x_i(k)), i = 1, 2, \dots, m \quad (5)$$

3.3.2 计算结果

根据上面对灰色关联度分析法的介绍, 以西安市 1978 年—2010 年气象、地下水开采量以及各分区平均水位埋深资料为依据, 计算各因素的灰色关联度, 计算结果见表 2。

表 2 灰色关联度计算结果

Tab. 2 Calculation results of grey relational analysis

分区	影响因子关联度	
	降雨量	地下水开采量
渭河及支流河漫滩	0.60	0.74
渭河及支流阶地	0.54	0.79
黄土塬区	0.36	0.83

4 结论与讨论

(1) 西安市年际地下水位下降明显, 1965 年—2010 年期间地下水位下降了 20.6 m; 年内地下水位一般 1 月—4 月份为高水位期, 7 月—9 月份为低水位期。

(2) 降水和人类开采与地下水位动态变化关系密切。不同水文地质分区, 降水量与开采量对地下水位动态的影响程度不同。河漫滩地区地下水位变化受降水量的影响最大, 阶地地区次之, 黄土塬区最弱; 开采量对黄土塬区地下水位变化的影响程度最高, 开采量每增加 0.1 亿 m^3 , 水位下降 2.793 m, 而同样的开采量下, 阶地地区水位下降 0.767 m, 河漫滩地区水位下降 0.693 m。

(3) 灰色关联度计算结果表明, 降雨量与地下水开采量都对西安市地下水动态的影响较大。地下水开采量是研究区各水文地质分区地下水位动态变化的主导因素, 但各分区开采量对水位动态变化的贡

献程度不一。其中, 河漫滩区地下水开采量对地下水位动态变化的贡献度为 55.2%, 阶地地区为 59.4%, 黄土塬区达 69.7%。

参考文献 (References):

- [1] 王慧芳, 岳彩琴, 石建胜, 等. 西安地区地下水位下降及其环境负效应[J]. 水文地质工程地质, 2005, 32(3): 78-80. (WANG Hui fang, YUE Cai qin, SHI Jian sheng, et al. Lowering of groundwater level and its negative environment effects in the area of Xi'an[J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2005, 32(3): 78-80. (in Chinese))
- [2] 段东平, 薛科社. 西安地下水埋深变化分析及预测[J]. 地下水, 2009, 31(6): 10-12. (DUAN Dong ping, XUE Ke she. Analysis and forecast to water depth changes of Xi'an in recent years[J]. Groundwater, 2009, 31(6): 10-12. (in Chinese))
- [3] 姜规模, 韩凤霞. 西安城市地下水动态研究[J]. 城市勘察, 2007(2): 124-127. (JIANG Gui mo, HAN Feng xia. The city groundwater regime study about Xi'an[J]. City Survey, 2007(2): 124-127. (in Chinese))
- [4] 宋令勇, 宋进喜. 西安市潜水埋深与降水量的关系分析[J]. 地下水, 2009, 31(5): 34-36. (SONG Ling yong, SONG Jin xi. Analysis on correlation between groundwater table and precipitation in Xi'an City[J]. Groundwater, 2009, 31(5): 34-36. (in Chinese))
- [5] 陶虹, 陶福平, 刘文波. 关中城市群 50 年地下水动态变化及影响因素分析研究[J]. 水文地质工程地质, 2013, 14(6): 37-42. (TAO Hong, TAO Fu ping, LIU Wen bo. Characteristics and influencing factors of groundwater dynamics in Guanzhong urban agglomeration during the last 50 years[J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2013, 14(6): 37-42. (in Chinese))
- [6] 陕西省地质矿产局水文地质总站. 西安地区地下水位年鉴[R]. (Bureau of geology and mineral resources of shaanxi province hydrology station. Yearbook of groundwater level in Xi'an[R]. (in Chinese))
- [7] 陕西省地质环境监测总站. 西安地区地下水动态研究报告(1986-2010)[R]. (Shaanxi Institute of Geo Environment Monitoring. Groundwater dynamic report of Xi'an[R]. (in Chinese))
- [8] 张光辉, 费宇红, 刘春华, 等. 华北漳滏平原地下水位下降与灌溉农业关系[J]. 水科学进展, 2013, 24(2): 228-234. (ZHANG Guang hui, FEI Yu hong, LIU Chun hua, et al. Relationship between decline of shallow groundwater levels and irrigated agriculture on Hufu Plain of North China[J]. Advances in Water Science, 2013, 24(2): 228-234. (in Chinese))
- [9] 刘艳丽, 张建云, 王国庆, 等. 气候自然变异在气候变化对水资源影响评价中的贡献分析[J]. 水科学进展, 2012, 23(2): 147-155. (LIU Yar li, ZHANG Jian yun, WANG Guo qing, et al. Evaluation on the influence of natural climate variability in assessing climate change impacts on water resources[J]. Advances in Water Science, 2012, 23(2): 147-155. (in Chinese))
- [10] 张光辉, 费宇红, 张行南, 等. 滹沱河流域平原区地下水流量异常变化与原因[J]. 水利学报, 2008, 39(6): 747-752. (ZHANG Guang hui, FEI Yu hong, ZHANG Xing nan, et al. Abnormal variation of groundwater flow field in plain area of Hutuo River Basin and analysis on its cause[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2008, 39(6): 747-752. (in Chinese))

(下转第 160 页)

- bility evaluation of Chenjiapo Landslide in Gaochuan County [J]. South to North Water Transfers and Water Science & Technology, 2011, 9(1): 134-138. (in Chinese)
- [13] 樊晓一, 黄润秋, 乔建平, 等. 未受河流阻止的滑坡水平运动距离与滑坡堵江判别[J]. 水文地质工程地质, 2014, 41(1): 128-133. (FAN Xiaoyi, HUANG Runqiu, QIAO Jianping, et al. Horizontal movement distances of non blocking landslide and blocking river assessment [J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2014, 41(1): 128-133. (in Chinese))
- [14] 周必凡. 泥石流防治指南[M]. 北京: 科学出版社, 1991. (ZHOU Bifan. Handbook of debris flow prevention and control[M]. Beijing: Science press, 1991. (in Chinese))
- [15] 地矿部成都水文地质工程地质中心, 成都地质学院, 水利部常委会勘测总队. 长江三峡工程库岸稳定性[M]. 北京: 科学出版社, 1992. (Chengdu Hydrogeology & Engineering Geology Center, Chengdu Institute of Geology, et al. On Stability of the Bank Slopes around the Three Gorges of the Yangtze River[M]. Beijing: Science Press, 2001. (in Chinese))
- [16] 黄润秋, 王士天, 张倬元, 等. 中国西南地壳浅表层动力学过程及其工程环境效应研究[M]. 成都: 四川大学出版社, 2001. (HUANG Runqiu, WANG Shitian, ZHANG Zheyuan, et al. The Dynamic Process of Earth's Superficial Crust and its Engineering Environmental Effects[M]. Chengdu: Sichuan University Press, 2001. (in Chinese))
- [17] 杨绍平, 王子忠. 崩滑堰塞湖沉积物工程地质特性研究[J]. 四川地质学报, 2013, 3(2): 192-195. (YANG Shaoping, WANG Zhong. Study of engineering geological characteristics of dammed lake deposit [J]. Acta Geologica Sichua, 2013, 3(2): 192-195. (in Chinese))
- [18] 韦方强, 刘淑珍, 范建容, 等. 小江流域生态环境灾害与治理对策[J]. 自然灾害学报, 2004, 13(4): 109-114. (WEI Fangqiang, LIU Shuzhen, FAN Jianrong, et al. Formation mechanism of landslide and analysis on blocking river [J]. Journal of Natural Disasters, 2004, 13(4): 109-114. (in Chinese))
- [19] 柴贺军, 董云, 李绍轩, 等. 大型天然土石坝的溃坝方式及环境效应分析[J]. 地质灾害与环境保护, 2005, 16(2): 172-176. (CHAI Hejun, DONG Yun, LI Shaoyuan, et al. Analysis of natural rock filled dam break mode and environmental effects [J]. Journal of Geological Hazards and Environment Preservation, 2005, 16(2): 172-176. (in Chinese))
- [20] 徐文杰, 陈祖煜, 何秉顺, 等. 肖家桥滑坡堵江机制及灾害链效应研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2010, 29(5): 933-942. (XU Wenjie, CHEN Zuyu, HE Bingshun, et al. Research on river-blocking mechanism of Xiaojiaqiao landslide and disasters of chain effects [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2010, 29(5): 933-942. (in Chinese))
- [21] 段立曾, 明庆忠, 张虎才, 等. 金沙江堵江堰塞事件及其地貌环境效应研究进展[J]. 地球科学前沿, 2013, 3: 8-17. (DUAN Lizeng, Ming Qingzhong, ZHANG Hucan, et al. Research progress of landslide dam events of Jinsha river and its geomorphologic and environment effects [J]. Advances in Geosciences, 2013, 3: 8-17. (in Chinese))

(上接第 154 页)

- [11] 王电龙, 张光辉, 冯慧敏, 等. 降水和开采变化对石家庄地下水流场影响程度[J]. 水科学进展, 2014, 25(3): 420-426. (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): 420-426. (in Chinese))
- [12] 费宇红, 张兆吉, 张凤娥, 等. 气候变化和人类活动对华北平原水资源影响分析[J]. 地球学报, 2007, 28(6): 567-571. (FEI Yuhong, ZHANG Zhaoji, ZHANG Feng'e, et al. An analysis of the influence of Human activity and climate change on water resources of the North China Plain [J]. Acta Geoscientia Sinica, 2007, 28(6): 567-571. (in Chinese))
- [13] XU Xu, HUANG Guanhua, QU Zhongyi, et al. Using MODFLOW and GIS to assess changes in groundwater dynamics in response to water saving measures in irrigation districts of the upper Yellow River basin [J]. Water Resource Manage, 2011(25): 2035-2059.
- [14] 刘中培, 王富强, 于福荣. 石家庄平原区浅层地下水位变化研究[J]. 南水北调与水利科技, 2012, 10(5): 124-127. (LIU Zhongpei, WANG Furuqiang, YU Furong. Variation of shallow groundwater level in Shijiazhuang plain [J]. South to North Water Transfers and Water Science & Technology, 2012, 10(5): 124-127. (in Chinese))
- [15] 王仕琴, 宋献方, 王勤学, 等. 华北平原浅层地下水位动态变化[J]. 地理学报, 2008, 63(5): 462-472. (WANG Shiqin, SONG Xianfang, WANG Qinxue, et al. Dynamic features of shallow groundwater in North China Plain [J]. Acta Geographica Sinica, 2008, 63(5): 462-472. (in Chinese))
- [16] 贾金生, 刘昌明. 华北平原地下水动态及其对不同开采量响应计算: 以河北省栾城县为例. 地理学报, 2002, 57(2): 201-209. (JIA Jinsheng, LIU Changming. Groundwater dynamic drift and response to different exploitation in the North China Plain: A case study of Luancheng County, Hebei Province [J]. Acta Geographica Sinica, 2002, 57(2): 201-209. (in Chinese))
- [17] 张茂省, 朱立峰, 王小勇. 关中盆地地下水系统分析与地下水资源可持续开发利用对策[J]. 第四纪研究, 2005, 25(1): 15-22. (ZHANG Maosheng, ZHU Lifeng, WANG Xiaoyong. Groundwater systems and sustainable development counter measures of groundwater resources in the Guanzhong Basin [J]. Quaternary Sciences, 2005, 25(1): 15-22. (in Chinese))
- [18] 张人权, 梁杏, 靳孟贵, 等. 于青春. 水文地质学基础[M]. 北京: 地质出版社, 2011. (ZHANG Renquan, LIANG Xing, JIN Menggui, et al. Fundamentals of Hydrogeology [M]. Beijing: Geology Publishing House, 2011. (in Chinese))
- [19] 周维博, 刘博洋. 西安市地下水资源保护利用规划[R]. 2014. (ZHOU Weibo, LIU Boyang. Protection and utilization planning of groundwater resources in Xi'an [R]. 2014. (in Chinese))
- [20] 邓聚龙. 灰理论基础[M]. 武汉: 华中理工大学出版社, 2002. (DENG Julong. Grey theory [M]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology Publishing House, 2002. (in Chinese))