

DOI:10.19751/j.cnki.61-1149/p.2020.02.020

秦岭北麓地下水位动态特征与影响因素

王浩^{1,2}, 段磊^{1,2}, 王文科^{1,2}

(1. 长安大学环境科学与工程学院, 陕西 西安 710054; 2. 旱区地下水与生态效应教育部重点实验室, 陕西 西安 710054)

摘要:地下水是秦岭北麓地区的主要供水水源,研究该区地下水位动态变化特征及其影响因素对地下水资源合理开发及生态环境保护具有重要意义。以秦岭北麓的户县平原区为例,根据地下水埋深、气象、水文资料,结合研究区水文地质条件,运用克里金插值方法、主成分投影-聚类耦合模型,研究 1980~2019 年地下水位时空演变过程,以影响地下水动态的主要因素划分地下水动态类型,分析地下水位动态变化特征。结果表明,1980~2019 年地下水位总体呈波动下降趋势;冲积平原和洪积平原年际变幅较大,而冲洪积扇前缘相对较小;研究区地下水动态类型可划分为水文型、降雨入渗-开采型、径流型、降雨入渗-水文-开采型 4 类;研究区地下水位变化的主要外在影响因素为降雨、河流径流、开采。

关键词:地下水动态;克里金插值;主成分投影-聚类;秦岭北麓

中图分类号:P641.6

文献标志码:A

文章编号:1009-6248(2020)02-0280-09

Dynamic Features of Groundwater Level in Northern Qinling and Its Influence Factors

WANG Hao^{1,2}, DUAN Lei^{1,2}, WANG Wenke^{1,2}

(1. School of Environmental Science and Engineering, Chang'an University, Xian 710054, Shaanxi, China;

2. Key Laboratory of Groundwater and Ecological Effects in Arid Region, Ministry of Education,

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

Abstract: Groundwater is the main water supply source in the north of Qinling mountains. It is of great significance to study the dynamic variation of groundwater level and its influencing factors for rational development of groundwater resources and protect the ecological environment. This paper chooses the Huxian plain as the regions in the north of Qinling mountains, According to the groundwater depth, meteorological and hydrological data, combined with the hydrogeological conditions in the study area, using the Kriging method and principal component projection-clustering coupling model statistical, the temporal and spatial variation process of groundwater level from 1980 to 2019 was studied, the groundwater dynamic types were classified according to the main factors affecting groundwater dynamics, and the dynamic variation characteristics of groundwater level were analyzed. The results show that the groundwater level fluctuates and declines from 1980 to 2019. The interannual variation of alluvial plain and diluvial plain is large

收稿日期:2019-11-11;修回日期:2019-12-30

基金项目:陕西省重点研发计划项目“渭河流域山水林田湖草”综合治理关键技术研究”(2019ZDLSF05-01)

作者简介:王浩(1995-),男,陕西岐山人,硕士,主要从事地下水流数值模拟工作。E-mail:1158604969@qq.com

while the leading edge of alluvial fan is relatively small. The groundwater dynamic types in the study area can be divided into four types: hydrologic, precipitation-exploration, runoff, and precipitation-hydrologic-exploration type. Rainfall, river runoff and exploitation are the main external influencing factors of groundwater level change in the study area.

Keywords: Groundwater level dynamic features; Kriging method; principal component projection-clustering model; northern Qinling

地下水动态是指其要素随时间的变化规律,研究地下水动态对于认识区域水文地质条件、水资源的合理开发与管理都具有重要意义(曹剑锋等,2016)。近年来,地下水位动态研究主要集中在动态分类、时空变化特征及影响因素、动态预测等方面(金速等,2016;黄浩等,2017,MAIR等,2013;蒋文武,2018)。随着计算机技术的发展,地下水动态分类研究大多采用数学模型分析,如投影寻踪聚类模型(倪长健等,2006)。地下水动态时空演变从空间上和时间上展开研究,其中地下水位空间变异研究一般利用地统计学分析方法(王晓勇等,2019);地下水位时间演化方法包含 Hurst 指数分析(胡海华,2016)、Mann-Kendall 检验(李明乾等,2018)等时间序列分析方法。地下水位动态是多重因素共同作用的结果,通过分析外界变化因子与水位动态变化之间的关联性来确定其主要影响因素,主要方法有灰色关联度分析、回归分析等(李环环,2018)。地下水动态预测方法主要利用地下水流数值模拟方法(郑晓燕,2012),及相关数学模型(LALLAHEM et al.,2005)。

秦岭北麓南抵秦岭,北临渭河,区内主要供水来源于地下水。秦岭北麓地下水资源丰富,然而由于气候变化以及长期掠夺式的开采,造成了日益严重的水资源问题和生态环境负效应,甚至出现地面沉降、地裂缝等地质灾害(马致远等,2011;王奇等,2018;董英等,2019)。因此,研究秦岭北麓地下水动态变化特征及其影响因素,对地下水资源合理开采以及生态环境保护具有重要意义。目前针对秦岭北麓地下水动态研究主要集中在某些特定区域诸如水源地、灌区或市区的研究,缺少从源到汇的地下水流系统的整体性研究。笔者以西安市户县山前至渭河的平原区为例,对地下水位时空演变规律、地下水动态成因类型及其动态特征展开研究。

1 研究区概况

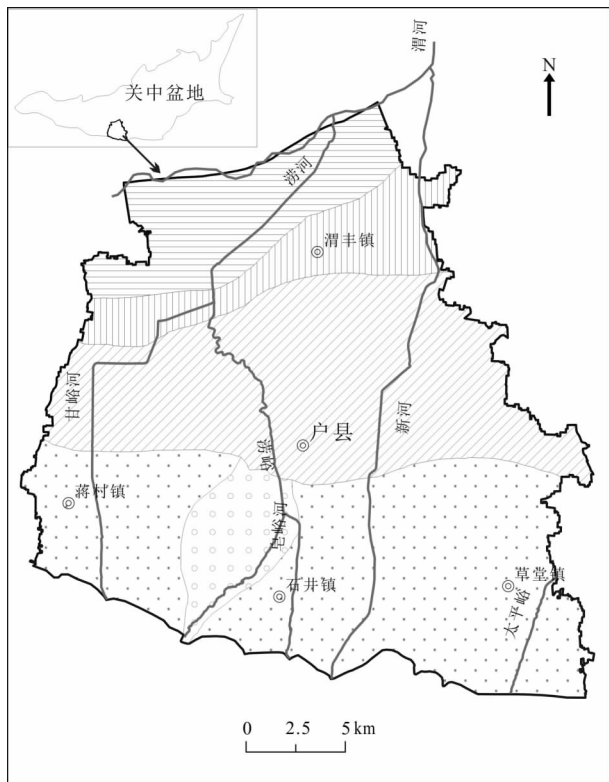
户县平原区地处秦岭北麓关中盆地的中南部,南依秦岭,北濒渭河。根据户县气象站资料,年平均气温为 13.4℃,年总降雨量为 659 mm,年总蒸发量为 1 100 mm,春冬干燥,夏秋多雨。主要河流为涝峪河及其支流甘峪河、皂峪河和新河等。涝河系渭河右岸一级支流,河道平均比降 9.5%,多年平均径流量 1.46 亿 m³。地势由北及北东方向倾斜,海拔高程为 373~576 m。主要地貌类型为山前洪积平原、涝河冲洪积扇、渭河冲积平原。地层岩性以第四系砂砾卵石、漂石、粉质黏土和砂质黏土为主。

区内第四系广泛分布,含水层岩性以砂、砾、卵、漂石为主。根据含水岩组划分,地下水分为分布于涝河冲洪积扇的冲洪积层孔隙水、山前洪积平原的洪积层孔隙水、渭河冲积平原的冲积层孔隙水。涝河冲洪积扇含水层主要为砾卵石含漂石,富水性强,由扇顶至扇缘,岩层结构由单层砾卵漂石层变为砾卵石、粉质黏土互层;含水层由单一大厚度潜水含水层变为潜水、承压水多层结构;地下水埋深变浅。洪积平原含水层主要由砾卵石与粉质黏土组成,富水性相对较差,水位埋深为 5~40 m。冲积平原含水层主要以砂砾石与砂质黏土层互层组成,富水性较强,由阶地到河漫滩岩性颗粒逐渐变粗,含水层厚度增大,富水性增强,水位埋深大多为 2~5 m。区内地下水主要接受大气降水和河流入渗补给,排泄方式主要为人工开采、径流溢出地表洼地及排向河流,流向与地形基本一致,由山前向渭河方向流动(图1)。

2 数据和方法

2.1 数据来源

研究所用地下水埋深数据来源于“陕西省地下水监测资料”与 2019 年 4、5 月份 2 期地下水位统



1. 河流; 2. 漫滩; 3. 一级阶地; 4. 二级阶地; 5. 涝河冲洪积扇;
6. 秦岭山前洪积平原

图1 研究区位置、地貌图

Fig. 1 The location and topography of the study area

测; 降雨量数据来源于户县气象站; 渭河径流量数据来源于咸阳水文站; 涝河径流量数据来源于涝峪口水文站。

2.2 研究方法

利用克里金空间插值研究地下水埋深时空演变过程; 应用主成分投影-聚类耦合模型对不同观测孔的地下水埋深动态数据进行聚类分析, 从而达到对地下水埋深观测孔分类的效果, 并结合研究区气象、水文资料分析地下水埋深动态影响因素, 划分地下水埋深动态类型。

2.2.1 克里金空间插值

空间插值是用有限离散数据来实现某一变量在整个区域内变化规律的研究(WU T等, 2013)。克里金插值法是基于地质统计学方法, 利用已知离散点产生具有统计关系的曲面对未知点达到无偏、最优估计。根据已有研究表明, 克里金插值法能够考虑点距、方位的影响, 对极值点的处理较好, 更好地

反映出地下水埋深时空变异规律及分布特征(许存东等, 2019)。

2.2.2 主成分投影-聚类模型

主成分投影-聚类法模型是将主成分分析法和聚类法有机结合的模型。首先对评价样本矩阵依次作线性变换和均值化预处理, 利用主成分分析法将评价样本矩阵转换到以其特征向量构建的新空间中形成决策矩阵, 之后通过构建理想样本, 并计算得到决策矩阵在理想样本上的投影值; 最后以投影值作为一维评价指标进行聚类分析, 即可达到对原始样本分类的效果。因该方法适用于非线性数据, 已广泛应用于地下水动态、洪水分类等方面(李云排等, 2015; 孙娟, 2019), 模型实现的具体步骤见FOWLER等(FOWLER et al., 2009; 刘玉邦等, 2010)。

3 结果与分析

3.1 地下水位时空变化分析

地下水位时空变化受气象、开采等外在因素和水文地质条件等内在因素的共同影响。前者作为地下含水系统的外界输入因素, 直接影响着地下水量的收支变化; 后者作为转化因素, 影响着外界变化环境的输出结果。为直观了解研究区地下水位时空变化趋势, 通过 Arcgis 软件平台, 利用 1980 年、1990 年、2002 年、2008 年、2019 年同期地下水位埋深数据, 采用克里金空间插值方法和栅格计算绘制年际变幅图(图 2)。

1980~1990 年, 研究区地下水位在不同地貌单元呈不同幅度的上升趋势, 平均上升 1.54 m。从山前补给区到排泄区, 变幅依次增大。在涝河洪积扇和洪积扇裙顶部, 地下水位动态较平稳, 年际升降幅度小于 0.5 m。在山前洪积平原前缘区域地下水位上呈上升趋势, 其中在邻近沔河一侧地下水位上升明显, 增幅大于 2 m。在渭河冲积平原地区, 地下水位上升幅度较大, 其中渭河漫滩部分地区增幅大于 4 m。

1990~2002 年, 地下水位平均下降 3.3 m。在涝河冲洪积扇和山前洪积平原地区, 除其扇顶地下水位上升外, 其余地方均表现为下降, 降幅 0~5 m 不等, 且由南向北递增。在渭河阶地地区, 地下水位下降幅度超过 5 m, 其中部分地区降幅达到 8 m 以

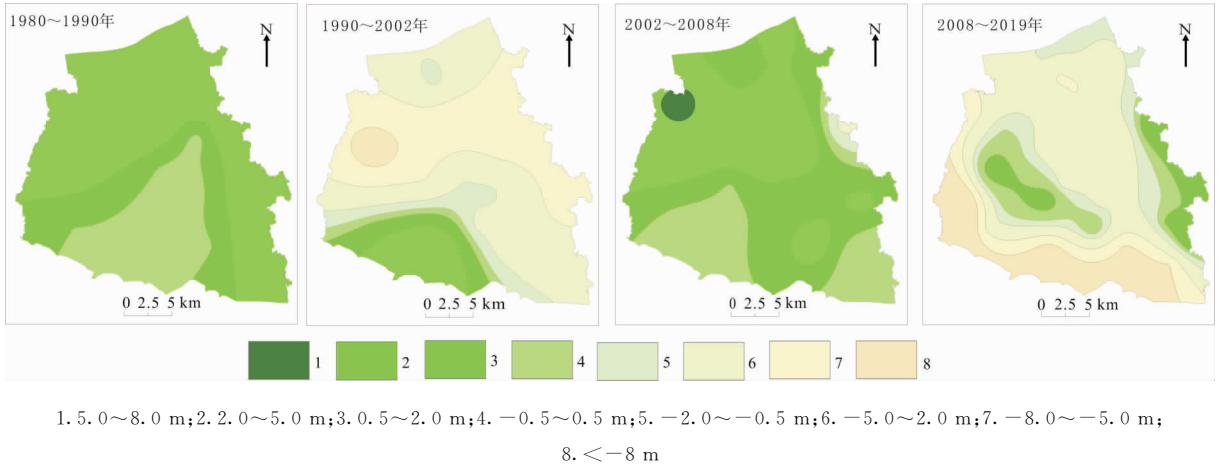


图 2 地下水位年际变幅图

Fig. 2 Interannual variation of groundwater level

上。渭河漫滩处大部分地区地下水位下降 2~5 m, 小范围地区地下水位下降幅度小于 2 m。

2002~2008 年, 研究区地下水位缓慢回升, 平均上升 1.7 m。在涝河洪积扇地区, 地下水位保持稳定, 年际变幅小于 0.5 m。山前洪积平原地下水位总体呈上升趋势, 大部分地区上升幅度为 0.5~2 m, 零星分布升幅大于 2 m。在渭河冲积平原地区, 除小范围内地下水呈下降 2 m 左右之外, 大部分地区上升 2~5 m。

2008~2019 年, 研究区地下水位下降明显。在洪积平原的中上部, 地下水位降幅大于 5 m, 山前降幅甚至超过 8 m; 冲积平原区地下水位大面积下降, 降幅为 2~5 m。在位于东部靠近沔河以及涝河洪积扇的前缘地区, 地下水位保持稳定或小幅度上升, 上升幅度小于 2 m。

3.2 地下水动态类型划分

不同地貌单元的地下水动态年际变化表现出明显的差异性, 表明不同地区地下水动态影响因素有所差别。地下水动态特征是外界因素对地下水系统影响的直观反映, 因此在划分地下水动态成因类型的基础上, 对地下水动态特征与影响因素逐一表述。

以研究区 2008 年 1~12 月数据较完整的 13 眼地下水动态观测孔月平均埋深资料为基础, 构建原始矩阵。通过对原始数据进行拟线性变化处理, 应用主成分投影-聚类模型, 计算得到 13 眼地下水动态观测孔的投影值和聚类结果。投影结果及聚类效果分别见图 3、图 4。

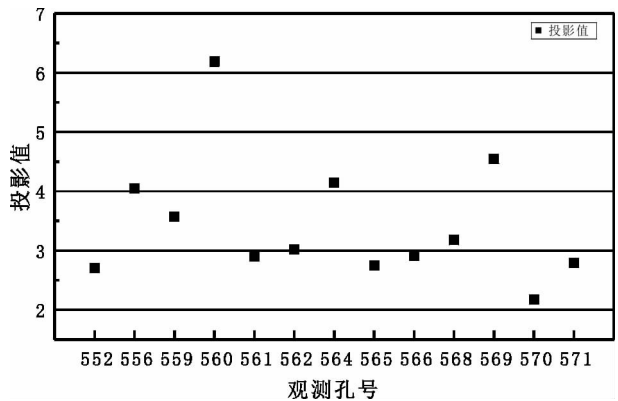


图 3 观测孔主成分投影值散点图

Fig. 3 Scatter distribution of the principal component projection value of observation wells

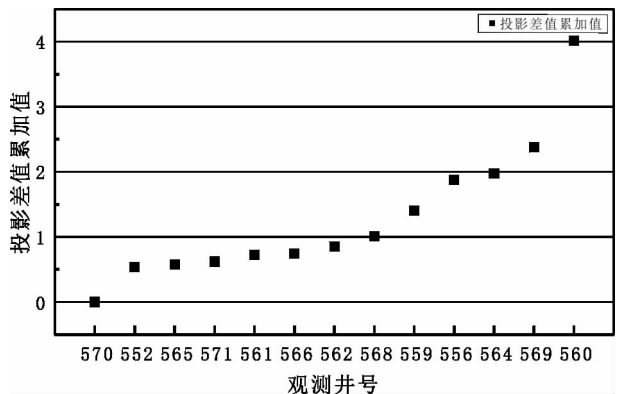


图 4 观测孔聚类效果图

Fig. 4 Clustering effect of observation wells

依据图 4 的聚类效果图并以投影差值的累积值 δ_i 为表征, 可将研究区 13 眼观测孔分为 5 类: ① $0 \leq \delta_i \leq 0.5$, 观测孔号为 570, 分布于渭河漫滩。② $0.5 < \delta_i$

≤ 1 , 观测孔号为 552、565、571、561、566、562、568, 分布于渭河阶地。③ $1 < \delta_i \leq 1.5$, 观测孔号为 559, 分布于涝河冲洪积扇前缘。④ $1.5 < \delta_i \leq 2$, 观测孔号为 556、564, 零星分布于渭河二级阶地。⑤ $\delta_i > 2$, 观测孔号为 569、560, 分布于山前洪积平原中山部。在此基础上, 通过分析每一类别中观测孔的地下水埋深历时曲线特征及相应时期的气象、水文资料, 结合各类观测孔所在区域的地下水补给、径流、排泄条件, 确定地下水动态变化的影响因素, 并以此对地下水动态类型予以命名。

表 1 地下水动态类型划分结果表

Tab. 1 Classification of dynamic patterns of groundwater

编号	观测孔号	动态类型	分布区域
I	570	水文型	渭河漫滩
II	552、565、571、561、566、562、568、556、564	降雨入渗-开采型	渭河一、二级阶地和洪积平原前缘地区
III	559	径流型	冲洪积扇前缘
IV	569、560	降雨入渗-水文-开采型	洪积平原中上部地区

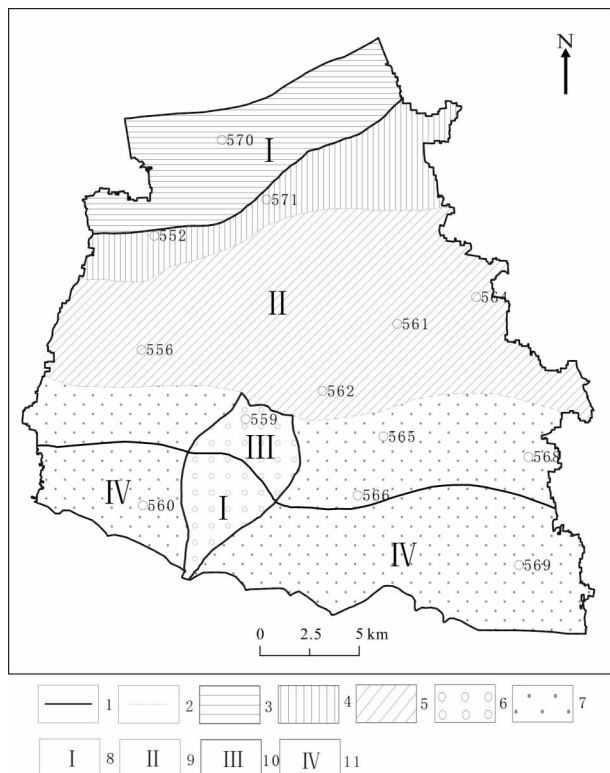


图 5 地下水动态类型分区图

Fig. 5 Dynamic patterns of groundwater

其中第 I 类地下水动态变化受河流径流涨落影响明显, 确定为水文型; 第 II 类地下水动态变化受降雨和开采影响, 确定为降雨入渗-开采型; 第 III 类地下水动态变化受径流排泄控制, 确定为径流型; 第 IV 类地下水在 2008 年期间, 受开采影响地下水动态呈现严重下降, 但是根据多年水位变化, 地下水动态依然受降雨和开采影响, 因此亦命名为降雨入渗-开采型; 第 V 类地下水动态变化降雨、河流径流和开采的共同作用, 确定为降雨入渗-水文-开采型。地下水动态分类结果及其主要分布区域详见表 1、图 5。

3.3 地下水动态特征与影响因素

(1) 水文型。此动态类型分布在渭河漫滩及涝河冲洪积扇中上部地区, 地下水动态受河流流量与河水位影响为主。地下水动态滞后于河流径流变化, 地下水位变幅与径流量变幅成正比。

在 570 号孔所处的渭河漫滩处, 渭河与地下水相互转化频繁。动态特征如图 6 所示。在丰水期, 随着径流增大, 河水水位抬升, 河流补给地下水使地下水位迅速上升, 于 10 月至次年 1 月份达到年内最大。在枯水期至次年汛期, 地下水排泄于河流, 地下水位缓慢下降, 中间略有起伏, 最低水位常见于汛期前的 7、8 月份。年内水位变幅为 0.5~2 m。在涝河冲洪积扇中上部地区, 河床及河漫滩处漂石、卵砾石层厚度较大, 结构疏松, 河经常年渗漏补给地下水。河流径流量的大小直接影响到地下水动态变化, 其影响范围波及整个冲洪积扇中上部地区。一般 1~3 月地下水位较低, 2、3 月份为年内最低。4 月份起水位上升, 至 8~11 月份达到年内最大。受河流径流暴涨暴落影响, 地下水动态具有年变幅大, 变化速度快的特点。

(2) 降雨入渗-开采型。分布于渭河阶地和洪积平原前缘地区。区内地下水埋深较浅, 有利于降雨入渗补给。此外, 区内城镇密集且广泛种植农作物,

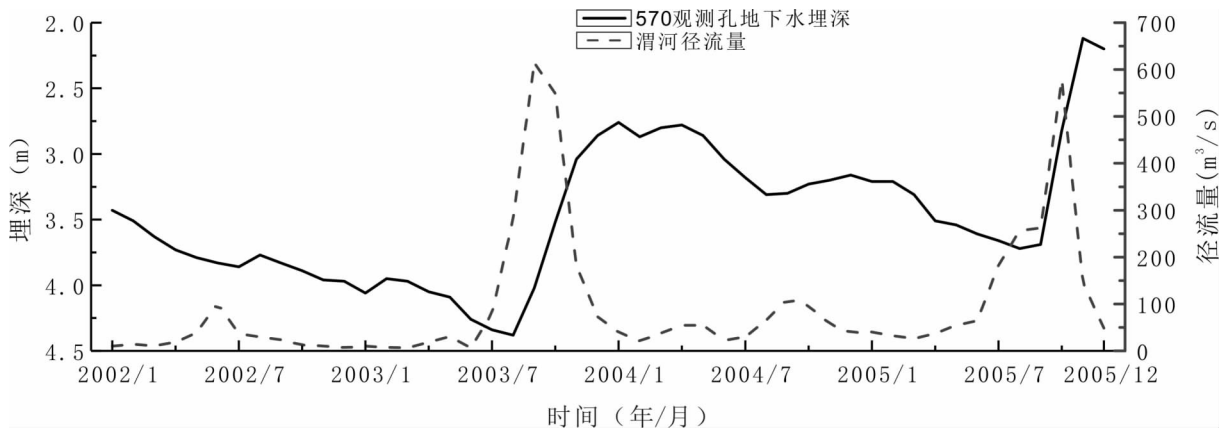


图 6 570 号观测孔地下水埋深与渭河径流量动态曲线图

Fig. 6 Dynamic curve of groundwater level depth of observation hole No. 570 and runoff of Weihe river

地下水开采量大。地下水动态主要受降雨入渗补给与开采排泄的综合影响。

该动态一般特征如 552 号观测孔动态所示。在枯水期 1~3 月份,地下水开采量少,水位多呈略微下降之势。4~7 月份,虽然降雨量有所增加,但是随着农作物灌溉用水及居民生活用水量增加,地下水位表现为快速下降,至 6、7 月份为降至年内最低。受夏秋多雨的影响,地下水位持续上升,至 9~11 月份达到年内峰值。由于在此期间地下水位上

升是多次降雨入渗补给过程的叠加,因此其峰值滞后于降雨量峰值 2 到 3 个月。之后,受降雨量减少与居民生活用水开采影响,地下水位缓慢下降。地下水位具有夏秋变化速度快、春冬变化缓慢的特点,年变幅为 1~2 m。当开采量过大时,地下水动态主要受人工开影响为主,其变化特征如 2008 年的 556 观测孔所示,地下水位无明显规律且无突出峰值,枯水期地下水位近似直线下降,丰水期地下水位亦无明显回升,年变幅最大为 8.92 m(图 7)。

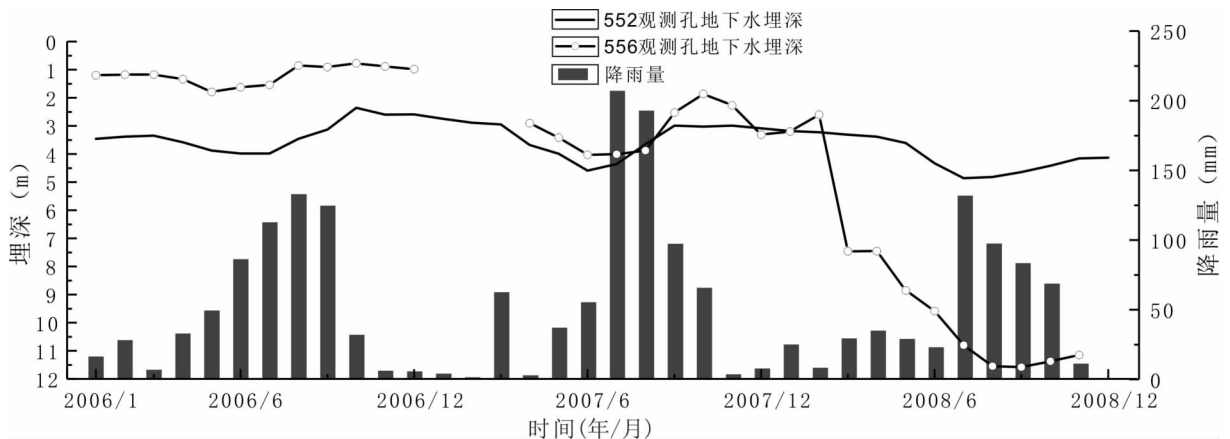


图 7 552、556 号观测孔地下水埋深与降雨量动态图

Fig. 7 Dynamic of groundwater level depth in observation hole No. 552, no. 556 and rainfall

(3)径流型。此类动态以 559 号观测孔为典型,小范围分布于局部水流系统的排泄区-涝河冲洪积扇前缘。在此区域,随着地形变缓,含水层厚度锐减,黏土夹层增多,地下水径流受阻以泉水溢出排泄

于洼地处。地下水动态主要受径流排泄控制,排泄量的大小对地下水位变化起到缓冲与调节作用。因此,地下水位年内变化平缓,多年变幅均小于 0.5 m。年内地下水位动态呈单峰单谷趋势变化,

丰水期来临前地下水降至年内最低,雨季来临之后地下水水位小幅上升(图8)。受溢出带地表高程影

响,地下水位不会有大幅度的上升,年际动态变化相对稳定。

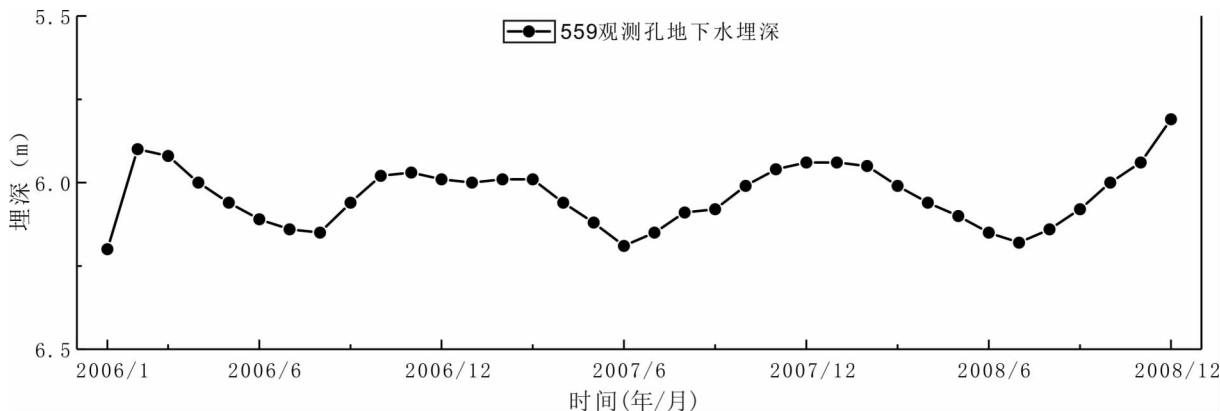


图8 559号观测孔地下水埋深历时曲线图

Fig. 8 Dynamic curve of groundwater level depth in observation hole no. 559

(4)降雨入渗-水文-开采型。分布于山前洪积平原中上部地区。区内包气带和河床结构疏松,透水性强,区内河流密集且均与地下水脱节,地下水同时接受河流和降雨补给。此外区内分布农业基地以及地下水水源地,开采量较大。地下水动态受降雨、河流径流和开采的共同影响。地下水水位年变幅大且不均,枯水年小于1.5 m,丰水年可达5 m左右。地下水动态曲线呈双峰双谷的特点。由于包气带延迟效应明显,地下水水位动态变化滞后于降水与河流流

量变化(图9)。

其中在1~3月份,地下水位连续下降,一般至3月份为年内最低。随着河流流量与降雨量的增加,地下水位从4月份开始上升,至5月份达到年内第一个峰值,之后由于河流流量的减少以及开采量的增加,水位短暂下降。6月份后随着河流流量和降雨量迅速增加,地下水位大幅上升,至9~10月份达到全年峰值。

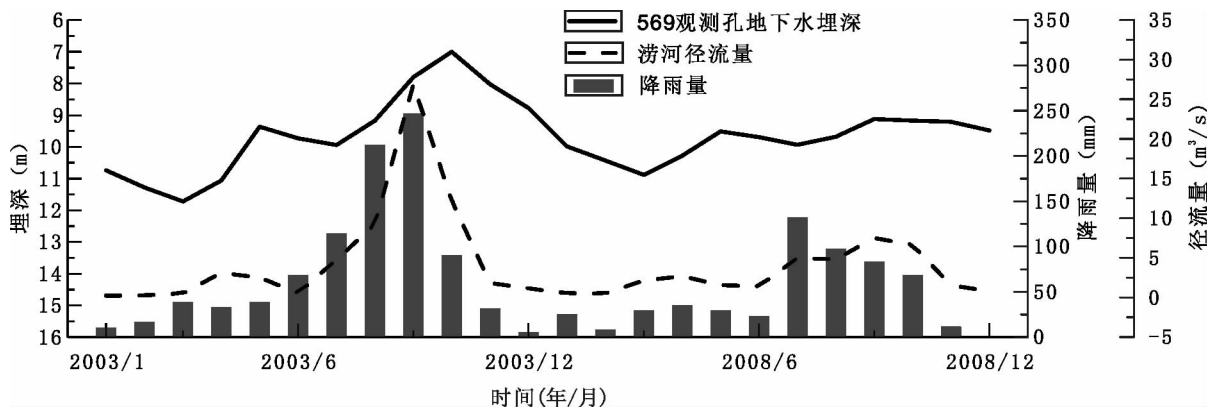


图9 569号观测孔地下水埋深与降雨量、涝河径流量动态曲线图

Fig. 9 Dynamic curve of groundwater level depth of observation hole No. 569 and rainfall and runoff of Lao river

4 结论

(1)地下水水位时空动态变化受地质地貌、水文地

质条件及外界环境变化的综合影响,不同时期、不同地貌单元地下水位变化不尽相同。在1980~1990年地下水位小幅上升;1900~2002年地下水位下降较大;2002~2008年地下水位缓慢回升;2008~

2019年地下水位严重下降;冲积平原、洪积平原中上部地下水位年际变幅较大,冲洪积扇前缘相对较小。1980年以来,研究区地下水位总体呈下降趋势,近年来洪积平原区下降严重,引起了诸如洪积扇前缘溢出带下移甚至消失,以及下游河流基流量减少等环境负效应,应注重控制地下水开采量,合理分配水资源。

(2)研究区地下水动态类型可分为4类。其中,水文型主要分布在渭河漫滩以及涝河冲洪积扇中上部;降雨入渗-开采型分布在渭河冲积平原一、二级阶地和洪积平原前缘地区;径流型分布于涝河冲洪积扇前缘;降雨入渗-水文-开采型分布于秦岭山前洪积平原中上部地区。降雨、河流径流、开采是研究区地下水位态变化的主要外在影响因素。

参考文献(References):

梁秀娟,迟宝明,王文科,等. 专门水文地质学[M]. 北京:科学出版社,2016.

LIANG Xiujuan, CHI Baoming, WANG Wenke, et al. Applied Hydrogeology [M]. Beijing: Science Press, 2016.

金速,张静,王咏林. 辽宁省地下水动态成因类型分析[J]. 城市地质,2016,11(02):64-68.

JIN Su, ZHANG Jing, WANG Yonglin. The Genetic Type of Groundwater Dynamic Change in Liaoning Province [J]. Urban Geology, 2016, 11(02): 64-68.

黄浩,黄雷,鲁朝林,等. 江汉平原地下水位动态变化特征分析[J]. 人民长江,2017,48(18):33-38.

HUANG Hao, HUANG Lei, LU Zhaolin, et al. Analysis on dynamic characteristics of groundwater level in Jianghan plain[J]. Yangtze River, 2017, 48(18): 33-38.

蒋文武. 成都平原地下水动态特征及预测研究[D]. 成都:成都理工大学,2018.

JIANG Wenwu. Study on the Dynamic Characteristics and Prediction of Groundwater in Chengdu Plain [D]. Chengdu: Chengdu University of Technology, 2018.

倪长健,王顺久,崔鹏. 投影寻踪动态聚类模型及其在地下水分类中的应用[J]. 工程科学与技术,2006,(06):29-33.

NI Changjian, WANG Shunjiu, CUI Peng. Projection Pursuit Dynamic Cluster Model and Its Application in

Groundwater Classification[J]. Advanced Engineering Sciences, 2006,(06):29-33.

王晓勇,朱立峰,董佳秋,等. 干旱-半干旱区下垫面变化对地下水的影响[J]. 西北地质,2019,52(02):227-235.

WANG Xiaoyong, ZHU Lifeng, DONG Jiaqiu, et al. Influence of Underlying Surface Change on Hydrogeological Conditions in Arid and Semi-arid Regions[J]. Northwestern Geology, 2019, 52(02): 227-235.

胡海华,丁宏伟,贺兵英. 石羊河流域中下游近40a地下水动态特征分析[J]. 西北地质,2016,49(03):164-174.

HU Haihua, DING Hongwei, HE Bingying. Dynamic Variation of Groundwater Level in the Middle-Lower Reaches of Shiyanghe River Basin for Nearly 40 Years[J]. Northwestern Geology, 2016, 49(03): 164-174.

李环环. 干旱区绿洲地下水位动态时序分析与预测[D]. 西安:长安大学,2018.

LI Huanhuan. Analysis on Dynamic State and Prediction of Groundwater in Arid Oasis -Take Yaoba Oasis of Inner Mongolia for Instance [D]. Xi'an: Changan University, 2018.

郑晓艳. 关中盆地地下水对气候变化的响应研究[D]. 西安:长安大学,2012.

ZHENG Xiaoyan. Mechanism of groundwater response to climate change in Guanzhong basin[D]. Xi'an: Changan University, 2012.

马致远,李婷,胡伟伟,等. 秦岭北麓水资源可持续开发利用分析[J]. 西北地质,2011,44(02):165-169.

MA Zhiyuan, LI Ting, HU Weiwei, et al. Analysis of Sustainable Exploitation and Utilization of Water Resources in Northern Qinling[J]. Northwestern Geology, 2011, 44(02): 165-169.

王奇,唐世南,潘扎荣. 秦岭北麓地下水资源开发利用分析[J]. 水利规划与设计,2018,(11):40-43.

WANG Qi, TANG Shinan, PAN Zharong. Analysis of exploitation and utilization of groundwater resources in the northern foot of Qinling Mountains [J]. Water Resources Planning and Design, 2018,(11): 40-43.

董英,张茂省,刘洁,等. 西安市地下水与地面沉降地裂缝耦合关系及风险防控技术[J]. 西北地质,2019,52(02):95-102.

DONG Ying, ZHANG Maosheng, LIU Jie, et al. Coupling

- Relationship between Groundwater and Ground Fissures of Land Subsidence in Xi'an City and Risk Prevention and Control Technology[J]. *Northwestern Geology*, 2019, 52(02):95-102.
- 徐存东,朱兴林,张锐,等. 地下水埋深空间插值方法比较和空间变异性研究[J]. *节水灌溉*, 2019, (01):49-56.
- XU Cundong, ZHU Xinglin, ZHANG Rui, et al. Spatial Interpolation Methods Comparison and Spatial Variability of Groundwater Depth [J]. *Water Saving Irrigation* 2019, (01): 49-56.
- 李云排,李娜,周维博. 西安市主城区地下水动态类型划分研究[J]. *水资源与水工程学报*, 2015, 26(05): 121-124.
- LI Yunpai, LI Na, ZHOU Weibo. Study on division of groundwater dynamic type in main urban of xi'an[J]. *Journal of Water Resources and Water Engineering*, 2015, 26(05):121-124.
- 孙娟. 基于多因子 PCP-C 耦合模型的流域历时洪水分类方法研究[J]. *水利技术监督*, 2019, (02):89-91.
- SUN Juan. Research on diachronic flood classification method based on multi-factor PCP—C coupling model[J]. *Technical Supervision in Water Resources*, 2019, (02): 89-91.
- 刘玉邦,梁川. 基于非线性变换的 PCP-C 模型及其在地下水动态分类中的应用[J]. *数学的实践与认识*, 2010, 40(10):91-96.
- LIU Yubang, LIANG Chuan. The Principal Component Projection-clustering Model Based on Nonlinear Transformation and Its Application in Groundwater Classification [J]. *Mathematics in Practice and Theory*, 2010, 40(10): 91-96.
- MAIRA, HAGEDORN B, TILLERY S, et al. Temporal and spatial variability of groundwater recharge on Jeju Island, Korea [J]. *Journal of Hydrology*, 2013, 501(501): 213-226.
- LALLAHEM, HANI, NAJJAR. On the use of neural networks to evaluate groundwater levels in fractured media [J]. *Journal of Hydrology*, 2005, 307(1): 92-111.
- WUT, LI Y. Spatial interpolation of temperature in the United States using residual kriging[J]. *Applied Geography*, 2013, 44: 112-120.
- FOWLER, J. E. Compressive-Projection Principal Component Analysis[J]. *IEEE Transactions on Image Processing*, 2009, 18(10):2230-2242.