

DOI:10.13476/j.cnki.nsbdqk.2021.0113

李晓峰,平建华,赵继昌,等.安阳市平原区浅层地下水对暴雨洪水的响应[J].南水北调与水利科技(中英文),2021,19(6):1104-1113. LI X F, PING J H, ZHAO J C, et al. Response of shallow groundwater to rain-storm flood in Anyang City plain area [J]. South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology, 2021, 19(6): 1104-1113. (in Chinese)

安阳市平原区浅层地下水对暴雨洪水的响应

李晓峰¹,平建华²,赵继昌³,闫寿松⁴,侯俊山⁵,耿文斌¹

(1. 郑州大学水利科学与工程学院, 郑州 450001; 2. 郑州大学地球科学与技术学院, 郑州 450001;
3. 中国地质环境监测院, 北京 100081; 4. 河南省安阳水文水资源勘测局, 河南 安阳 455000;
5. 安阳市彰武南海水库工程管理局, 河南 安阳 455000)

摘要:在系统分析安阳市“7·19”特大暴雨洪水事件的基础之上,探讨典型极端降雨条件下安阳市东部平原区地下水对暴雨洪水事件的响应。在利用灰色关联分析法确定安阳市东部平原区浅层地下水水位和降雨量二者之间的相关程度的基础上,提出一种基于 ArcGIS 软件的地下水补给量计算模型。研究结果表明:安阳市平原区浅层地下水水位与降雨量的关联系数大于 0.85,地下水资源量变化受降雨补给影响显著;“7·19”事件降雨强度大,雨量集中,受大范围强降雨影响,地下水位变幅沿河道向两岸方向没有形成递减的变化趋势,水位变幅与降雨分布呈正比;此次洪水为单峰型洪水,模型计算研究区地下水补给量为 5.19 亿 m³,洪水转化率 0.8%。该计算模型适用于资料缺乏地区地下水补给量计算和雨洪资源化定量分析,对雨洪资源利用和地下水响应分析具有一定的参考价值。

关键词:暴雨洪水;安阳平原区;相关性分析;地下水补给;响应

中图分类号:TV213 文献标志码:A 开放科学(资源服务)标志码(OSID):



由于地下水资源的不合理开发利用,华北平原存在漏斗区^[1]。安阳市位于华北平原中部,1965—2005年安阳市区域浅层地下水水位下降区面积 4 188.8 km²,平均每年扩大 104.72 km²^[2]。浅层地下水直接受大气降雨和地表水补给,埋深变化与降雨量和人工开采存在着紧密的联系^[3]。随着水资源短缺的加剧,雨洪资源作为一种潜在的可利用资源逐渐受到了人们的关注,但多是对增大雨洪资源转化率和地下水水位波动等方面的分析^[4-8]。受地形等自然属性影响,暴雨洪水对地下水的补给主要发生在河道与地表低洼汇水区域^[9],地下水补给量的大小主要受降雨强度、降雨历时、地下含水层有效蓄水量和地下水埋深等因素影响^[10-12]。受包气带影响,地下水对暴雨洪水的响应在时间上存在一定的滞后性^[13-14],在定量分析地下水水位对雨洪事件的

响应时不仅要考虑雨洪事件的补给特征,地下水响应的滞后性也应考虑在内。

安阳市东部平原区地势平坦,洪水涨水速度较慢^[15-16],2016年地下水位监测数据显示包气带厚度最大可达 34.24 m。2016年7月19日,河南安阳发生特大暴雨洪水(“7·19”事件),洪水强度为 20 世纪 50 年代以来继“82·8”洪水后的第二大规模洪水。从雨洪资源化角度分析,此次事件对安阳市地下水资源补给具有显著作用。张坤等^[17]曾以 2016年6月26日至7月26日的地下水观测井数据计算平原区地下水补给量,分析时段的选取上忽略了地下水对雨洪事件响应的滞后性。运用 ArcGIS 软件建立地下水补给量计算模型,以安阳市(滑县除外)东部冲洪积平原为研究区,在分析地下水水位与降雨量之间的相关程度基础之上,

收稿日期:2020-12-14 修回日期:2021-07-15 网络出版时间:2021-07-23

网络出版地址:https://kns.cnki.net/kcms/detail/13.1430.TV.20210722.1346.004.html

基金项目:国家自然科学基金项目(U1504404);NSFC-河南人才培养联合基金

作者简介:李晓峰(1994—),男,河南许昌人,主要从事水文学及水资源研究。E-mail:18037886820@163.com

通信作者:平建华(1976—),男,河南郑州人,博士,教授,主要从事水文地质研究。E-mail:pingjianhua@zzu.edu.cn

以降雨监测数据、地下水位监测数据和给水度数据等为基础,通过 ArcGIS 的空间数据处理功能定量研究暴雨洪水对地下水资源量的影响。该模型简单、高效、资料要求低,相对于建立复杂的地下水数值模型分析雨洪事件对地下水补给特征和补给量,弱化模拟区建模过程^[18-19],对边界条件概化、水文地质参数、源汇项等基础数据要求较低,过程相对较为简单,对数据缺乏地区研究暴雨洪水事件影响下浅层地下水资源变化和雨洪资源化利用具有重要意义。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

安阳市(滑县除外)位于河南省最北部,属海

河流域-漳卫南运河水系,东经 113°37'~114°58'、北纬 35°12'~36°22',面积约 5 599 km²,属半湿润温带大陆性季风气候,多年平均降雨量 565 mm。安阳市地势西高东低,主要河流有安阳河、淇河、硝河、永通河等,南水北调总干渠自南向北经过汤阴、市区和安阳县,见图 1。地貌主要有山地、山间盆地、丘陵、平原、岗地和洼地等:山地主要分布在林州市和安阳县西部,最高海拔高度 1 653 m;山间盆地分布在林州市境内;丘陵主要分布在林州市东部、安阳县、汤阴县西部;岗地主要指位于汤阴的火龙岗区;安阳县东部、汤阴县大部和内黄境内为安阳河与漳河交互形成的冲洪积倾斜平原,地势平坦宽阔,最低洼地的海拔高度为 47 m,局部地带为洼地。

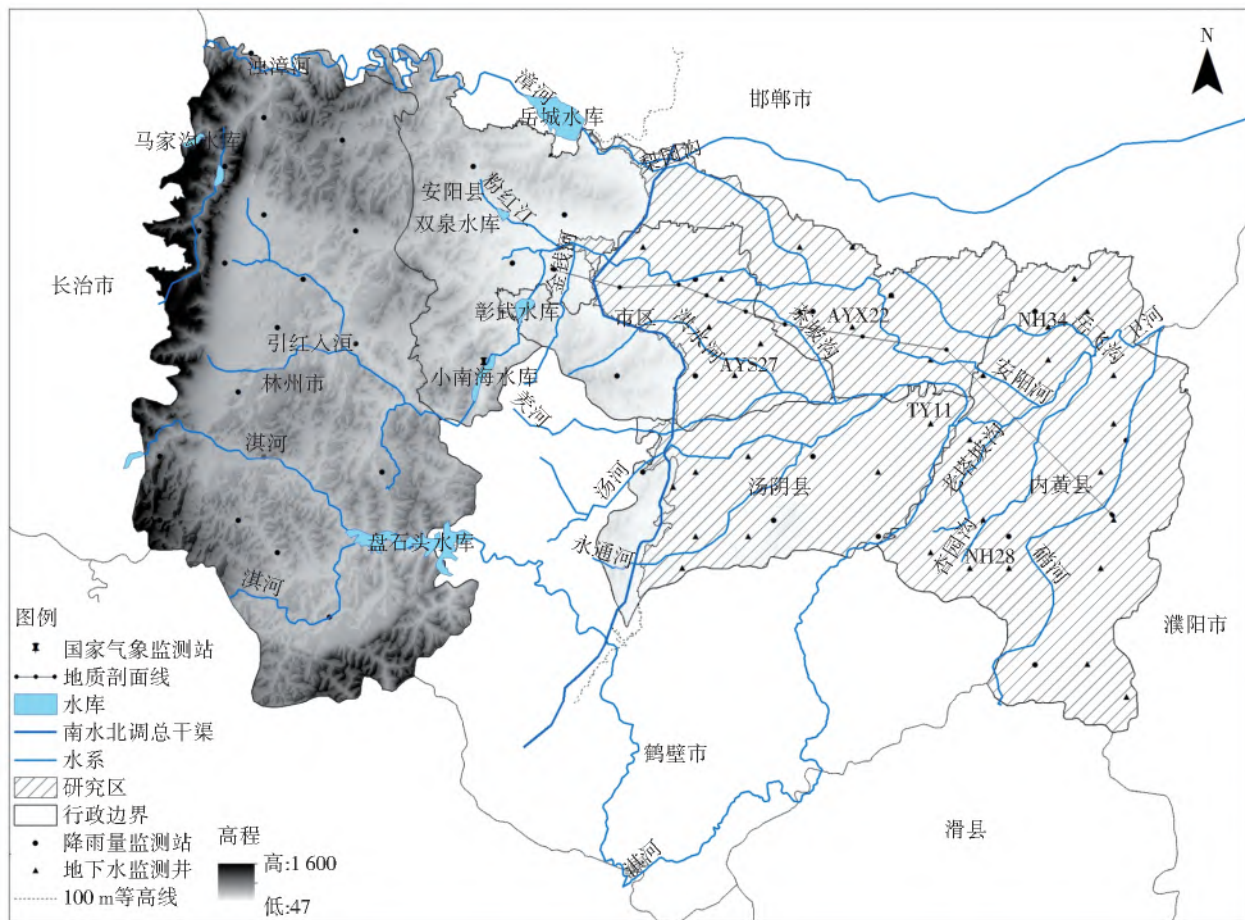


图 1 研究区概况

Fig. 1 Overview of the study area

安阳市东部平原区主要河流有安阳河、卫河、硝河等,地层岩性主要为粉土、黏土、中细砂、泥质细砂和砂砾石等,赋存孔隙水和承压水,主要含水层岩性由西向东为卵砾石层、中细砂和中砂等,为地下水的赋存提供了良好的水文地质条件,见图 2。

1.2 数据与方法

1.2.1 相关性分析

在不同因素的发展过程中,因素之间发展趋势的相似或相异程度可作为因素间关联程度的评价指标。灰色系统理论可以根据因素间的可比性,分析因素之间的相关程度,定量地刻画系统内

部之间的联系^[20]。基于研究区《河南省地下水资料》(2004 年到 2016 年)和中国气象数据网国家气象监测站 2004 年到 2016 年的降雨资料(图 3),首先采用均值化法对地下水位和降雨量长系列月监测数据无量纲化处理,使数据规范化;然后采用灰色关联分析法^[21]定量分析研究区地下水位与降雨量之间的相关程度。为了衡量两者整体之间的关联程度,集中关联度指标,求取系列值所对应关联系数的均值来衡量两者整体关联程度,计算公式为

式为

$$\xi(k) = \frac{\min_k |x_0(k) - x(k)| + \rho \max_k |x_0(k) - x(k)|}{|x_0(k) - x(k)| + \rho \max_k |x_0(k) - x(k)|} \quad (1)$$

$$r = \frac{1}{m} \sum_{k=1}^m \xi(k) \quad (2)$$

式中: $x(k)$ 为影响系统行为特征的比较数列; $x_0(k)$ 为反应系统行为特征的参考数列; ρ 为分辨系数; $\xi(k)$ 为灰色关联系数; r 为灰色关联度。

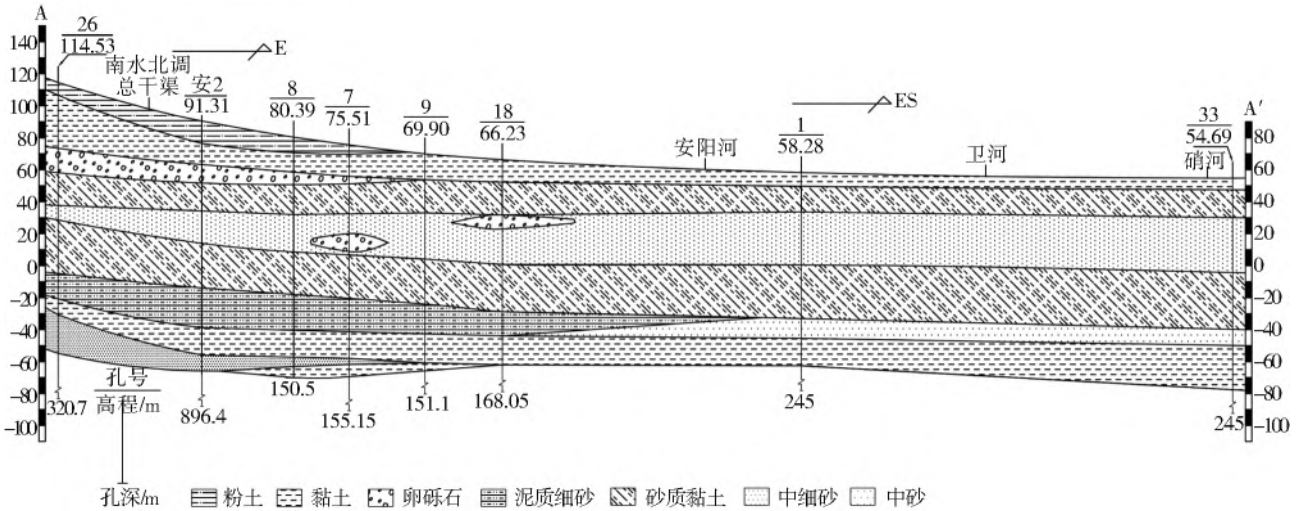


图 2 研究区水文地质剖面
Fig. 2 Hydrogeological profile of the study area

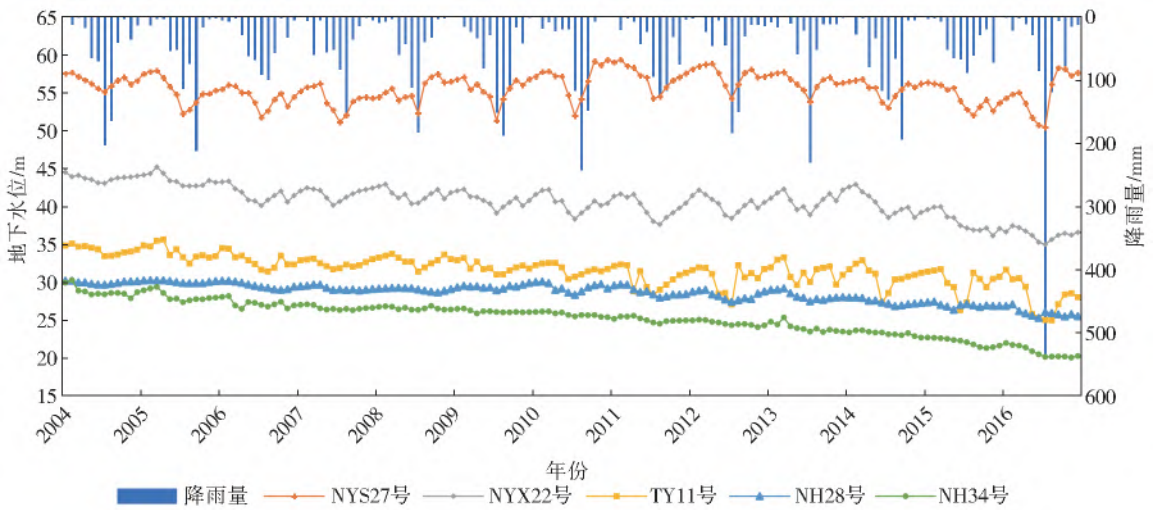


图 3 安阳市雨量站、地下水位代表井多年变化
Fig. 3 Multi-year changes of precipitation stations and representative wells of groundwater level in Anyang

ρ 取值范围为 0~1,取值越小,关联系数间差异越大,通常取 0.5。在 ρ 取 0.5 的情况下,关联系数 r 大于等于 0.6 时认为关联性较好,小于 0.6 时则认为关联性较差。

1.2.2 地下水补给量计算

地理信息系统(GIS)技术作为处理信息数据的有力工具,能够把位置信息和相关属性信息有

效结合,在洪水预报和风险评估方面应用广泛^[22-24]。依据 ArcGIS 中 ArcToolbox 的转换工具、叠加分析、投影转换等空间数据处理功能,提出一种基于 ArcGIS 的地下水补给量计算模型,将综合法^[25]计算过程与 ArcGIS 软件相结合,通过 ArcGIS 的空间数据处理功能和字段计算器的计算功能,定量研究暴雨洪水事件影响下浅层地下水水

位变化特征及相应补给量,模型的数据处理流程图见图4。具体步骤如下。

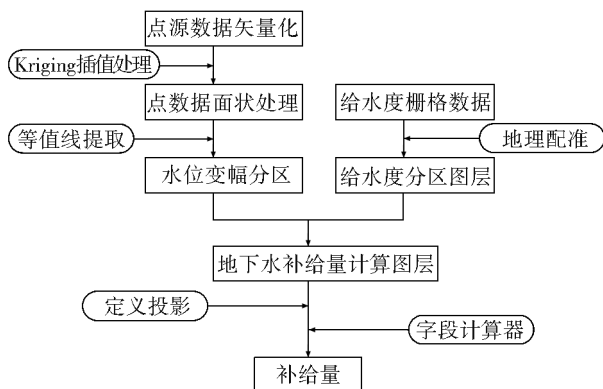


图4 地下水补给量计算模型数据处理流程

Fig. 4 Data processing flow chart of groundwater recharge model

(1)经转换工具将带有地理属性的地下水水位数据和降雨量数据矢量化处理。

(2)基于矢量化处理后的点数据,通过 Spatial Analyst 工具中 kriging 插值将点数据填充至整个研究区,分析降雨前后地下水水位空间分布特征及变化趋势,确定模型的分析时段。

(3)根据分析时段计算暴雨洪水影响下的地下水水位变幅,经 ArcGIS 插值处理后,通过表面分析提取等值线,基于等值线对研究区水位变幅进行分区,建立相应的水位变幅分区图层,给水度分区图层通过新建带有地理属性的面状 shp 文件,参考相关数据手动绘制。

(4)通过分析工具对不同的属性分区图层进行

叠加分析,得到地下水补给量计算综合图层。

(5)对叠加后的综合图层定义投影后,由字段计算器计算具体补给量。地下水储量变化采用综合法计算,计算公式为

$$Q = Q_1 + Q_2 \quad (3)$$

$$Q_1 = 0.001 \times \sum_i \mu \times F_i \times A_i \quad (4)$$

$$Q_2 = 0.001 \times \sum_j \mu \times F_j \times A_j \quad (5)$$

式中:Q为总补给量,亿 m³;Q₁、Q₂ 为正、负补给量,亿 m³;μ 为给水度;F 为水位降幅,m;A 为分区面积,km²。

2 结果与分析

2.1 “7·19”暴雨洪水特征分析

2.1.1 暴雨特征分析

根据安阳市水文水资源勘测局监测的 42 个降水量监测站有关“7·19”的降雨监测资料(表 1),基于 ArcGIS 软件将点数据通过 Kriging 空间插值法^[26]绘制降雨量空间分布等值线图,见图 5。由图 5 知此次特大暴雨形成 2 个降雨中心:一个是安阳县西部和林州的东北部一带,成南-北向分布,24 h 最大降雨量在 400 mm 以上,林州市东岗站监测数据显示 24 h 最大降雨量 668 mm;另一个位于安阳市区及安阳县中部,成东南-西北向分布,24 h 最大降雨量在 300 mm 以上,降雨中心安阳站监测数据显示 24 h 最大降雨量 413.9 mm。

表 1 安阳市“7·19”特大暴雨监测数据

Tab. 1 Monitoring data of "7/19" torrential rain in Anyang

编号	监测站名称	降雨量/mm	编号	监测站名称	降雨量/mm	编号	监测站名称	降雨量/mm	编号	监测站名称	降雨量/mm
1	东岗	668.0	12	道口	148.3	23	横水	330.0	34	千口	53.6
2	砚花	667.5	13	五陵	84.8	24	小屯	137.7	35	内黄	79.7
3	临淇	111.6	14	小河口	245.7	25	东姚	249.1	36	东大城	61.2
4	大峪	131.6	15	大性	138.9	26	小南海	303.7	37	甘庄	47.0
5	茶店	134.4	16	高汉	92.4	27	河顺	613.8	38	天桥段	177.3
6	马家庄	68.4	17	马投涧	323.1	28	李珍	300.5	39	石板岩	145.7
7	桥上	218.6	18	二十里铺	263.9	29	水冶	245.8	40	南谷洞	159.6
8	弓上	146.1	19	姚村	186.3	30	东河坟	292.0	41	任村	204.3
9	小店	163.6	20	石楼	124.5	31	安阳	413.9	42	口上	145.4
10	牛屯	133.9	21	南陵阳	179.4	32	白璧	125.4			
11	东申寨	97.8	22	林县	137.5	33	冯宿	61.9			

此次暴雨特点一是降雨强度大:安阳县新大堰、岭头、李庄、林州市砚花水等雨量站 1 h 最大降雨量均达 100 mm 以上,林州市东岗、砚花水雨量站 24 h 最大降雨量为 668.0、667.5 mm,均超千年一遇,多站 24 h 最大降雨量超过三百年一遇。特点二是涉

及范围广:特大暴雨造成洪灾,彰武水库、安阳小南海水库均超历史最高水位,广润坡蓄滞洪区、崔家桥蓄洪区进水蓄洪。据安阳河安阳水文站监测资料显示,“7·19”特大暴雨洪水为有实测资料以来的第二大洪水。

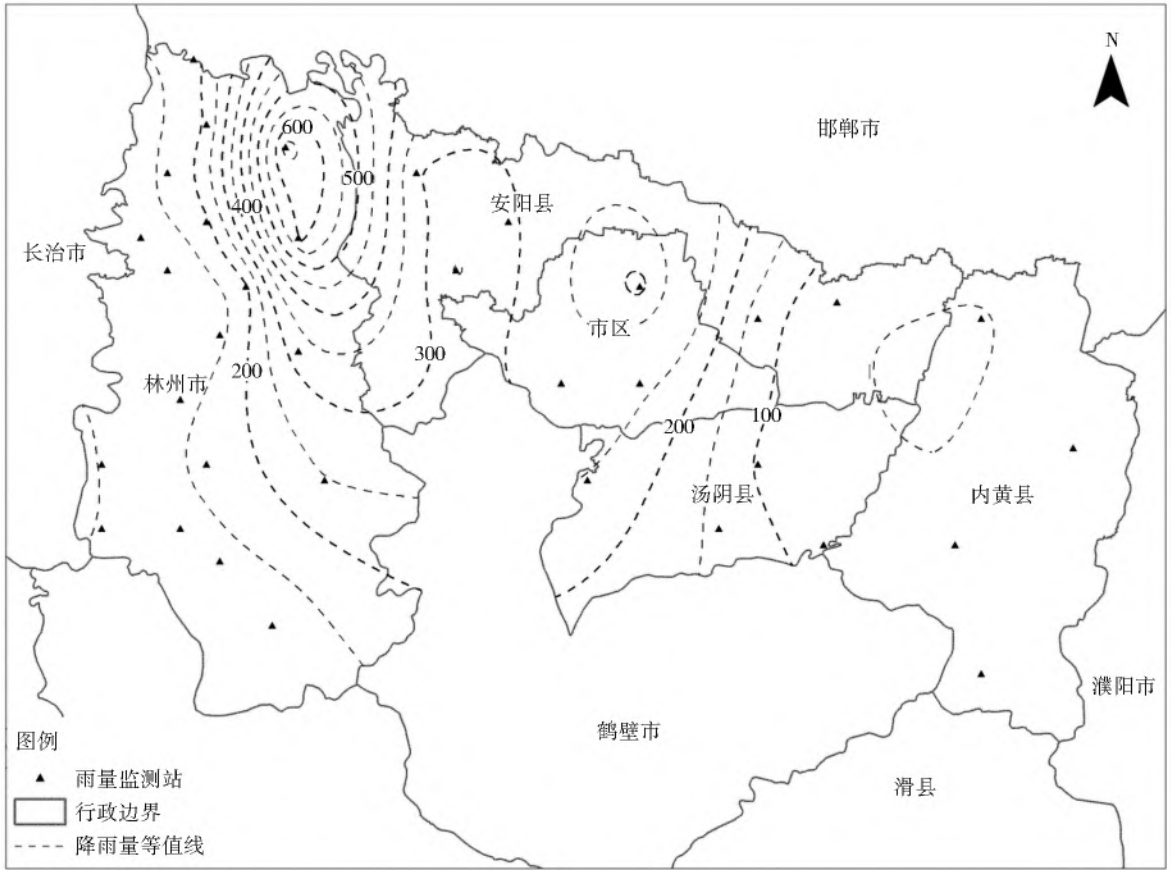


图 5 降雨量空间分布等值线

Fig. 5 Rainfall spatial distribution contour

2.1.2 洪水特征分析

安阳水文站“7·19”洪水水位流量监测资料见图 6:此次洪水为单峰型洪水,7 月 19 日 18 时 20 分起涨,起涨水位为 67.51 m;23 时 30 分达到洪峰水

位,历时 5 h,洪峰水位 75.81 m,超出警戒水位 0.63 m,洪峰流量 1 980 m³/s。洪水下泄总历时长达 40 h。经安阳站实测大断面估算,下泄洪水总量达 656 亿 m³。

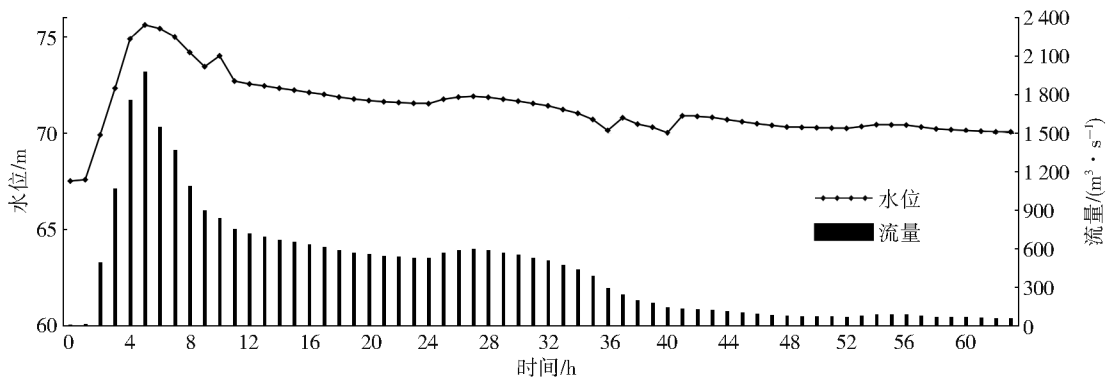


图 6 “7·19”洪水过程

Fig. 6 “7/19” flood process

2.1.3 河道洪水补给过程分析

河流与地下水之间的相互作用存在 3 种基本方式:河流补给地下水(图 7(a)、7(b))、地下水补给河流(图 7(c)、7(d))或者两者兼有。《河南省地下水资料》(2016 年)显示,安阳市东部平原区浅层地下水水位埋深为 5.66~34.24 m,为雨洪水资源提供

了储存空间。受暴雨洪水影响,“7·19”事件期间河流水位快速上升,补给关系以地表水补给地下水为主,河道洪水入渗过程可分 3 个阶段(图 7(e)、7(f)) (起涨期-高峰期-消退期):阶段 1 为起涨期,见图 7(f)中 1—2 阶段,洪水最高水位未高于河漫滩,河流经河床下渗经包气带补给地下水,受河水水位上涨

影响,下渗水量逐渐增大;阶段2为高峰期,见图7(f)中2—3阶段,河道水位受洪水影响不断上升并逐渐淹没河漫滩,河漫滩透水性好,包气带受下渗补给快速达到饱和状态,此后下渗过程发生在河床和河漫滩,地表洪水经河床及河漫滩大面积下渗;阶段3为

消退期,见图7(f)中3—1阶段,河道洪水水位开始下降,洪水下渗面积不断减少,逐渐恢复至正常下渗状态。研究区属冲洪积平原,区域包气带多为粉土、泥质细砂等(图2),透水性良好,为河道洪水经河床、河漫滩大面积入渗补给地下水提供良好的地质条件。

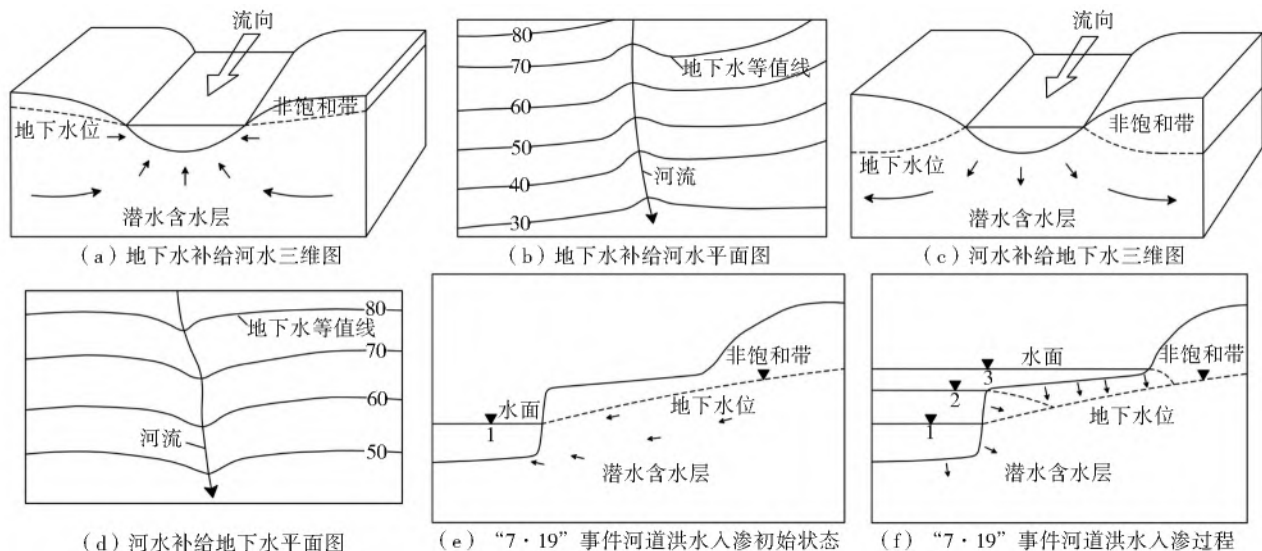


图7 安阳市平原区河道补给示意(Thomas C. W. 修改于1998年)

Fig. 7 Anyang city plain area river channel supply(Modified by Thomas C. W. in 1998)

2.2 地下水响应分析

2.2.1 相关性分析

根据研究区浅层地下水水位观测井的分布和长系列监测资料的完整性,选取安阳市27号(NYS27号),安阳县22号(NYX22号),汤阴县11号(TY11号),内黄县28号(NH28号)、34号(NH34号)等5眼观测井为代表井(图1),分析2004年1月至2016年12月水位月监测数据和相应时间段的降雨量,见表2。由图3可知,受雨季影响,在每年的6至9月,地下水位会随着降雨量的增加而上升。地下水位监测数据显示,每年地下水位最高点出现时间并非与降雨同步,而是出现在雨季之后,说明地下水位对降雨的响应具有一定的滞后性,地下水位上升的趋势比雨季持续时间长。

表2 关联度计算结果

Tab. 2 Correlation degree calculation results

周期	观测井编号	灰色关联度 r
2004年1月—2016年12月	NYS 27号	0.866 6
	NYX 22号	0.859 5
	TY 11号	0.858 6
	NH 28号	0.862 2
	NH 34号	0.860 0

以地下水水位观测井的水位标高值作为参考数列 $x_0(k)$,降雨量作为比较数列 $x(k)$,按上述过程计算其灰色关联度。计算结果(表2)表明研究区潜

水位和降雨量的关联度 r 均大于0.85,表明地下水资源量受降雨影响显著,两者相关性较强。

2.2.2 补给量计算

此次特大暴雨存在2个暴雨中心,降雨量较大的降雨中心(24h降雨量 >400 mm)位于西部山地丘陵区,次降雨中心(24h降雨量 >300 mm)位于研究区内。为估算“7·19”事件对西部平原区地下水资源量的综合影响,根据地下水水位变化趋势,选取研究区21眼地下水位监测井7至9月的水位标高数据进行水位变幅计算,并将相应的点数据进行kriging空间插值。以0.5 m为水位变幅分区标准进行等值线提取,建立地下水水位变幅分区图层见图8(a)。由图8(a)可知,“7·19”暴雨洪水事件后地下水位有明显抬升,水位变化趋势与降雨等值线趋势基本一致,越靠近降雨中心位置,地下水位抬升越明显。在水位变幅分区处理的基础上,结合方樟等^[27]安阳平原区研究成果,用ArcGIS对研究区给水度进行分区、赋值,建立给水度分区图层见图8(b)。

通过模型计算此次特大暴雨洪水对研究区补给地下水总量5.19亿 m^3 。漏斗区受周边地下水流场影响水流向漏斗中心汇集,漏斗区地下水位回升幅度比周边水位回升幅度大,如汤阴漏斗中心7号监测井水位变幅3.88 m,比邻近的16号水位变幅1.93 m高出1.95 m。

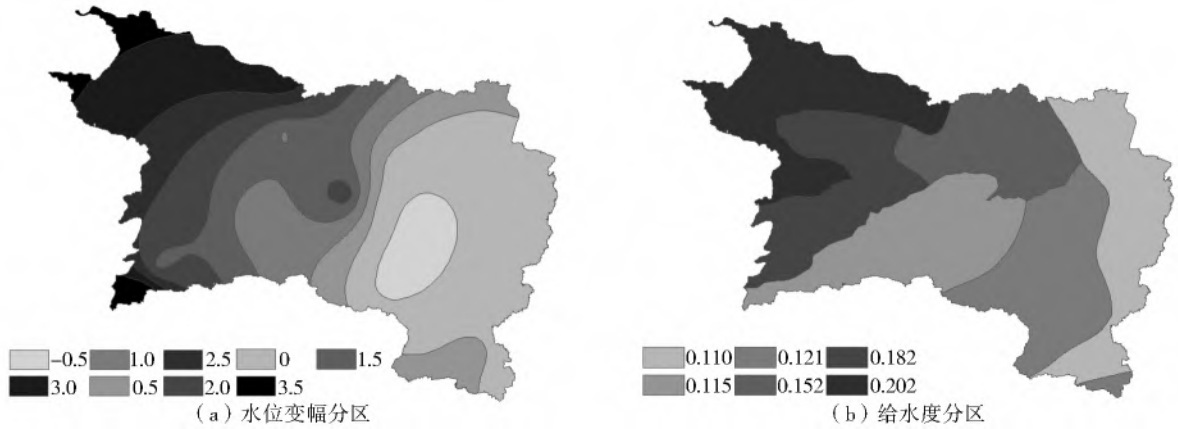


图 8 地下水补给量计算模型参数专题图层

Fig. 8 Parameter layer of groundwater storage variable calculation model

3 讨论

依据长系列地下水位变化监测资料和同期降雨量监测资料可知,研究区地下水位变化和降雨量之间相关系数在 0.85 以上,相关性较高。相对于王光生等^[28]、周涛等^[29]分析降雨条件下地下水位动态特征,本文在分析降雨与地下水位变幅的相关性基础上,利用 ArcGIS 建立地下水补给量计算模型定量计算暴雨洪水对地下水资源的补给。模型计算结果显示,此次安阳市平原区地下水补给量为 5.19 亿 m^3 ,地下水位响应程度西高东低,与降雨强度成正比。与其他模型相比,利用 ArcGIS 建立计算模型对数据要求低,是一种直观、高效、可行的方法。除“7·19”事件以外,1980 年以来安阳市共发生 3 次暴雨洪水事件,安阳站监测资料显示 1982 年 8 月“82·8”事件洪峰流量 2 060 m^3/s 、1996 年 8 月“96·8”事件洪峰流量 707 m^3/s 。利用模型计算相应的地下水补给量分别为 5.58 亿 m^3 和 4.16 亿 m^3 ,研究区地下水对暴雨洪水事件的响应与雨洪事件强度成正比。

该结果与张泽宇等^[30]通过建立室内物理模型试验和数值模拟分析在洪水作用下河岸带地下水响应结果相比,研究区地下水位波动没有呈现出随着距河岸距离的增加波动幅度呈指数衰减趋势,主要原因在于张泽宇等人的模型是基于实验室水槽系统的,模拟的河道洪水过程受水位控制室调节,主要考虑河道内水位变动对河岸带横断面的影响,不考虑地下水侧向补给、降雨入渗补给和地表漫流补给等对地下水位变动的影响,与实际降雨情况相差较大。张坤等^[17]以 2016 年 6 月 26 日至 7 月 26 日的地下水观测井数据计算平原区地下水补给量,一方面没有考虑“7·19”降雨分布特征,忽略了西部山地丘陵区的降雨中心对平原区地下水侧向补给的影响,另

一方面由于暴雨洪水对地下水补给在时间上的滞后性,其计算结果不能完全反应该事件对地下水资源量的影响。

4 结论

安阳市东部平原区地下水位变化和降雨量的相关性计算结果显示,两者关联系数大于 0.85,存在较大的相关性,合理利用雨洪资源是解决安阳市地下水超采的有效途径。此次“7·19”特大暴雨降雨中心位于安阳县西部—林州东北部一带和安阳市区—安阳县中部一带,多数雨量站 24 h 最大降雨量超过 300 年一遇,降雨中心 1 h 最大降雨量超 1 000 年一遇,由该暴雨引发的洪水事件为安阳市有实测资料以来的第二大洪水。分析洪水过程线可知,此次洪水为单峰型洪水,起涨 5 h 后达到洪峰水位,洪峰水位高出警戒水位 0.63 m。洪水下泄总历时 40 h,下泄洪水总量多达 656 亿 m^3 。经模型计算地下水补给量为 5.19 亿 m^3 ,洪水转化率 0.8%。漏斗区受周边地下水流场影响,地下水位回升幅度比周边水位回升幅度大。“7·19”事件虽然河道过洪量大,但其降雨历时长、强度大且涉及范围广,受西部山区补给、平原区地表漫流补给和低洼地带下渗补给等影响,平原区地下水位响应明显的区域集中在西部地区,响应程度与降雨强度成正比,地下水位变幅整体呈现出自西向东由大到小的带状展布,水位变幅与其距河岸的距离之间没有呈现出明显的负相关。本模型适用于资料缺乏地区地下水补给量和雨洪资源化的定量分析,是一种更简洁、高效的方法。在人类活动影响下,不同地区浅层地下水位变化受降雨影响程度不同,该模型的应用需要确定地下水位的变化与降雨量两者之间的相关性,以保证模型的准确性。

参考文献(References):

- [1] 艾慧,郭得恩. 地下水超采威胁华北平原[J]. 生态经济,2018,34(8):10-13. (AI H, GUO D E. Groundwater overdraft threatens north China plain [J]. Ecological Economy, 2018, 34(8): 10-13. (in Chinese)) DOI: CNKI;SUN;STJJ. 0. 2018-08-003.
- [2] 苗晋祥. 论安阳市区地下水位下降漏斗演变与地下水可持续利用规划[J]. 南水北调与水利科技, 2010, 8(6): 21-24, 32. (MIAO J X. Evolution of depression cones and planning of sustainable utilization for groundwater in the urban areas of Anyang City [J]. South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology, 2010, 8(6): 21-24, 32. (in Chinese)) DOI: CNKI;SUN;NSBD. 0. 2010-06-012.
- [3] 卫磊,杨桂莲,鲁程鹏,等. 华北平原超采区浅层地下水埋深变化及控制因素分析[J]. 水资源与水工程学报, 2019, 30(6): 39-44. (WEI L, YANG G L, LU C P, et al. Analysis of buried depth variation and controlling factors of shallow groundwater overexploited areas of in north China plain [J]. Journal of Water Resources & Water Engineering, 2019, 30(6): 39-44. (in Chinese)) DOI: ;CNKI;SUN;XBSZ. 0. 2019-06-007.
- [4] 方生,代文元. 华北平原咸水区雨洪控制利用[J]. 南水北调与水利科技, 2003, 1(1): 38-43. (FANG S, DAI W Y. Control and utilization of rainwater in saline groundwater region of north China plain [J]. South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology, 2003, 1(1): 38-43. (in Chinese)) DOI: 10. 13476/j. cnki. nsbdqk. 2003. 01. 012.
- [5] 赵志杰,姜黎. 拒马河“12·7”暴雨洪水对地下水埋深的影响[J]. 海河水利, 2014(5): 31-32, 56. (ZHAO Z J, JIANG L. Influence of "12/7" rainstorm flood on groundwater depth in Juma River [J]. Haihe Water Resources, 2014(5): 31-32, 56. (in Chinese)) DOI: CNKI;SUN;HHSL. 0. 2014-05-017.
- [6] 张石春,高寅堂. “96·8”暴雨洪水对河北平原地下水的补给特征[J]. 河北水利水电技术, 1998(3): 60-61. (ZHANG S C, GAO Y T. Recharge characteristics of groundwater in Hebei plain by "96/8" rainstorm and flood [J]. Water Sciences and Engineering Technology, 1998(3): 60-61. (in Chinese)) DOI: 10. 19733/j. cnki. 1672-9900. 1998. 03. 027.
- [7] VÁZQUEZ-SUNÉ E, CAPINO B, ABARCA E, et al. Estimation of recharge from floods in disconnected stream-aquifer systems [J]. Ground Water, 2007, 45(5): 579-589. DOI: 10. 1111/j. 1745-6584. 2007. 00326. x.
- [8] 王庆平,刘金艳,时振阁. 唐山市洪水资源利用可行性分析[J]. 南水北调与水利科技, 2010, 8(4): 103-106, 141. (WANG Q P, LIU J Y, SHI Z G. Feasibility analysis of flood resources utilization in Tangshan City [J]. South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology, 2010, 8(4): 103-106, 141. (in Chinese)) DOI: CNKI;SUN;NSBD. 0. 2010-04-030.
- [9] 张光辉,费宇红,田言亮,等. 暴雨洪水对地下水超采缓解特征与资源增量[J]. 水利学报, 2015, 46(5): 594-601. (ZHANG G H, FEI Y H, TIAN Y L, et al. Characteristics of alleviating the over-exploitation and its recharge on the rainstorm flood to the shallow groundwater in the southern plain of Haihe River basin [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2015, 46(5): 594-601. (in Chinese)) DOI: 10. 13243/j. cnki. slxb. 20140990.
- [10] BIRKHEAD A L, JAMES C S, KLEYNHANS M T. Hydrological and hydraulic modelling of the Nyl River floodplain part 2: Modelling hydraulic behaviour [J]. Water Research Commission, 2007, 33(1): 9-20.
- [11] MORIN E, GRODEK T, DAHAN O, et al. Flood routing and alluvial aquifer recharge along the ephemeral arid Kuiseb River, Namibia [J]. Journal of Hydrology, 2009, 368(1): 262-275. DOI: 10. 1016/j. jhydrol. 2009. 02. 015.
- [12] DAHAN O, TATARSKY B, ENZEL Y, et al. Dynamics of flood water infiltration and ground water recharge in hyperarid desert [J]. Ground Water, 2008, 46(3): 450-461. DOI: 10. 1111/j. 1745-6584. 2007. 00414. x.
- [13] WORKMAN S R, SERRANO S E. Recharge to alluvial valley aquifers from overbank flow and excess infiltration [J]. Journal of the American Water Resources Association, 1999, 35(2): 425-432. DOI: 10. 1111/j. 1752-1688. 1999. tb03600. x.
- [14] GERECHT K E, CARDENAS M B, GUSWA A J, et al. Dynamics of hyporheic flow and heat transport across a bed-to-bank continuum in a large regulated river [J]. Water Resources Research, 2011, 47(3): W03524. DOI: 10. 1029/2010WR009794.
- [15] 万贵生. 安阳市暴雨洪水分析[J]. 河南水利, 2002(2): 25, 27. (WAN G S. Analysis of rainstorm and flood in Anyang City [J]. Henan Water Resources & South-to-North Water Diversion, 2002(2): 25, 27. (in Chinese)) DOI: CNKI;SUN;HNBD. 0. 2002-02-021.
- [16] 杨永芹,张春盛. 安阳河“2000·7”暴雨洪水分析[J]. 河南水利, 2003(2): 13. (YANG Y Q, ZHANG C S. Analysis of "2000/7" rainstorm flood in Anyang River

- [J]. Henan Water Resources & South-to-North Water Diversion, 2003(2): 13. (in Chinese)) DOI: CNKI;SUN;HNBD. 0. 2003-02-017.
- [17] 张坤,张青艳. 河南安阳 7·19 特大暴雨对地下水动态的影响[J]. 河南水利与南水北调, 2017(1): 10-11. (ZHANG K, ZHANG Q Y. Influence of 7/19 heavy rain on groundwater regime in Anyang, Henan Province [J]. Henan Water Resources & South-to-North Water Diversion, 2017(1): 10-11. (in Chinese)) DOI: CNKI;SUN;HNBD. 0. 2017-01-006.
- [18] 王鹏. 基于 MIKE SHE 模型在辽南地区地下水模拟验证的研究[J]. 陕西水利, 2020(7): 7-10. (WANG P. Study on groundwater simulation verification based on MIKE SHE model in south Liaoning [J]. Shaanxi Water Resources, 2020(7): 7-10. (in Chinese)) DOI: 10. 16747/j. cnki. cn61-1109/tv. 2020. 07. 003
- [19] 胡健,张祥达,魏志诚. 基于 FEFLOW 在地下水数值模拟中的应用综述[J]. 地下水, 2020, 42(1): 9-13. (HU J, ZHANG X D, WEI Z C. Literature review of the groundwater numerical simulation method based on the application of FEFLOW [J]. Ground Water, 2020, 42(1): 9-13. (in Chinese)) DOI: 10. 19807/j. cnki. DXS. 2020-01-003
- [20] 刘思峰,杨英杰,吴利丰. 灰色系统理论及其应用[M]. 北京:科学出版社, 2014. (LIU S F, YANG Y J, WU L F. Grey System Theory and Its Application [M]. Beijing: Science Press, 2014. (in Chinese))
- [21] 王先庆,李博,郑建. 基于灰色关联-网络层次分析模型的水资源安全综合评价[J]. 南水北调与水利科技, 2019, 17(4): 87-93. (WANG X Q, LI B, ZHENG J. Comprehensive evaluation of water resources security based on GRA-ANP model [J]. South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology, 2019, 17(4): 87-93. (in Chinese)) DOI: 10. 13476/j. cnki. nsbdqk. 2019. 0088.
- [22] 周成虎,万庆,黄诗峰,等. 基于 GIS 的洪水灾害风险区划研究[J]. 地理学报, 2000(1): 15-24. (ZHOU C H, WAN Q, HUANG S F, et al. A GIS-based approach to flood risk zonation [J]. Acta Geographica Sinica, 2000(1): 15-24. (in Chinese)) DOI: CNKI; SUN;DLXB. 0. 2000-01-002.
- [23] 陈华,郭生练,熊立华,等. 面向对象的 GIS 水文水资源数据模型设计与实现[J]. 水科学进展, 2005, 16(4): 556-563. (CHEN H, GUO S L, XIONG L H, et al. Design and implementation of the object-oriented GIS hydrology and water resource data model [J]. Advances in Water Science, 2005, 16(4): 556-563. (in Chinese)) DOI: CNKI; SUN; SKXJ. 0. 2005-04-014.
- [24] 丁志雄,李纪人,李琳. 基于 GIS 格网模型的洪水淹没分析方法[J]. 水利学报, 2004(6): 56-60, 67. (DING Z X, LI J R, LI L. Method for flood submergence analysis based on GIS grid model [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2004(6): 56-60, 67. (in Chinese)) DOI: CNKI;SUN;SLXB. 0. 2004-06-010.
- [25] 朱金峰,章树安,戴宁,等. 地下水水资源量监测分析技术应用探讨[J]. 水文, 2017, 37(3): 58-62. (ZHU J F, ZHANG S A, DAI N, et al. Application of groundwater resources monitoring and analysis technology [J]. Journal of China Hydrology, 2017, 37(3): 58-62. (in Chinese)) DOI: CNKI; SUN; SWZZ. 0. 2017-03-010.
- [26] 王国泰,张守平,杨清伟,等. 基于空间插值方法的重庆降水信息展布[J]. 南水北调与水利科技, 2018, 16(3): 18-23. (WANG G T, ZHANG S P, YANG Q W, et al. Precipitation information distribution in Chongqing based on spatial interpolation method [J]. South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology, 2018, 16(3): 18-23. (in Chinese)) DOI: 10. 13476/j. cnki. nsbdqk. 2018. 0063.
- [27] 方樟,谢新民,马喆,等. 河南省安阳市平原区地下水控制性管理水位研究[J]. 水利学报, 2014, 45(10): 1205-1213. (FANG Z, XIE X M, MA Z, et al. Confirmation of controlled groundwater management level and demonstration study in Anyang City, Henan Province [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2014, 45(10): 1205-1213. (in Chinese)) DOI: 10. 13243/j. cnki. slxb. 2014. 10. 009.
- [28] 王光生,杨建青,于钊,等. 地下水动态预测的探讨[J]. 水文, 2013, 33(3): 25-28, 51. (WANG G S, YANG J Q, YU P, et al. Preliminary study on groundwater level prediction [J]. Journal of China Hydrology, 2013, 33(3): 25-28, 51. (in Chinese)) DOI: CNKI;SUN;SWZZ. 0. 2013-03-005.
- [29] 周涛,房浩. 强降雨条件下北京地区地下水水位动态特征:以 7·21 特大暴雨为例[J]. 地下水, 2016, 38(2): 81-83. (ZHOU T, FANG H. Groundwater dynamic characteristics under conditions of heavy rainfall: An example of 7/21 in heavy rain [J]. Ground Water, 2016, 38(2): 81-83. (in Chinese)) DOI: CNKI; SUN; DXSU. 0. 2016-02-029.
- [30] 张泽宇,余夏杨,辛沛. 洪水过程对河岸带地下水水位波动的影响[J]. 水资源保护, 2017, 33(2): 22-30. (ZHANG Z Y, YU X Y, XIN P. Impact of flood process on groundwater level fluctuation in a riparian zone [J]. Water Resources Protection, 2017, 33(2): 22-30. (in Chinese)) DOI: CNKI; SUN; SZYB. 0. 2017-02-005.

Response of shallow groundwater to rain-storm flood in Anyang City plain areaLI Xiaofeng¹, PING Jianhua², ZHAO Jichang³, YAN Shousong⁴, HOU Junshan⁵, GENG Wenbin¹

(1. School of Water Conservancy Engineering, Zhengzhou University, Zhengzhou 450001, China;

2. School of the Geo-Science & Technology, Zhengzhou University, Zhengzhou 450001, China;

3. China Institute Geological Environment Monitoring, Beijing 100081, China; 4. Anyang Hydrology and

Water Resources Survey Bureau of Henan Province, Anyang 455000, China;

5. Zhangwu Nanhai Reservoir Project Authority of Anyang, Anyang 455000, China)

Abstract: The North China Plain has become the most serious groundwater overexploitation area in China due to development and utilization of groundwater resources. Rainwater resources have gradually attracted people's attention because of potential water resources. However, most of the current researches focuses on increasing the conversion rate of rain-flood resources and analyzing the fluctuation of groundwater level, lacking the concerns on the characteristics and amount of groundwater recharge under the influence of rain-storm flood events. Based on the systematic analysis of rain and flood events, the response characteristics of groundwater to rain-storm flood events is discussed, a groundwater recharge solution model based on ArcGIS software is proposed to quantitatively analyze the response of groundwater to the events.

7/19 heavy rain-storm flood event in Anyang City is taken as an example. Based on the long-term monitoring data of groundwater level and rainfall, the grey correlation coefficient between the elevation value of groundwater level and the precipitation in the corresponding period is calculated, and the correlation between the variation range of groundwater level and the precipitation is determined. The collected monitoring data of the 7/19 heavy rain from groundwater level monitoring wells and precipitation monitoring stations in the plain area of Anyang City are used to analyze the spatial distribution characteristics of rainfall. Groundwater recharge solution model is established through ArcGIS according to the temporal and spatial distribution characteristics of rainfall and the changing trend of groundwater level. The steps are as follows: the variation of groundwater level is calculated and the point data is filled into the whole study area by Kriging interpolation; use the surface analysis tools of ArcGIS to partition data such as water level variation and hydrogeological parameters to establish corresponding attribute thematic layers; perform overlay analysis on attribute thematic layers, define projection to calculate the recharge of groundwater.

The correlation coefficient show that phreatic level and precipitation is greater than 0.85, which reflects the amount of groundwater resources is significantly affected by rainfall intensity. The 7/19 heavy rain formed two rainfall centers: One is located in the western part of Anyang County and the northeastern part of Linzhou, distributed in a north-south direction. Other one is located in the urban area of Anyang and central Anyang County, distributed in a southeast-northwest direction. The total process of flood discharge caused by heavy rain lasted 40 hours. The total amount of discharged floodwater reached 65.6 billion m³ based on estimation of the large cross-section measurement in Anyang Station. The model calculated total amount of groundwater recharged to the study area was 519 million m³, the flood conversion rate was 0.8%. Using the same model to analyze the storm flood events since 1980, the response degree of shallow groundwater to storm floods is directly proportional to the precipitation intensity.

Compared with other studies, it is an efficient, intuitive, and feasible method to establish a solution model by using ArcGIS software to determine groundwater recharge which has relatively low data requirements. In addition to the 7/19 event, the analysis and calculation of three torrential rain and flood events in Anyang City exhibited good results. This model is suitable for the calculation of groundwater replenishment and quantitative analysis of rainwater resource utilization in areas with limited data. It also provides a certain reference value for rainwater resource utilization and groundwater response analysis. Under the influence of human activities, there are various correlations between the change of shallow groundwater level and precipitation in different regions. It is necessary to determine the correlation between the change of groundwater level and precipitation to exclude the influence of other factors on the change of groundwater level to ensure the accuracy of the model.

Key words: heaviest rain-storm flood; Anyang City plain area; correlation analysis; groundwater recharge; response