

人民胜利渠灌区适宜井渠用水比研究

张嘉星^{1,2}, 齐学斌^{1,2}, Magzum Nur ol la^{1,2}, 李平^{1,2}, 黄仲冬^{1,2}, 胡艳玲^{1,2}

(1. 中国农业科学院 农田灌溉研究所, 河南 新乡 453002;

2. 中国农业科学院 河南新乡农业水土环境野外科学观测试验站, 河南 新乡 453002)

摘要:为合理利用灌区地表水和地下水资源,改善灌区生态环境,以人民胜利渠灌区为例,在对灌区地下水开发利用现状及其水位动态进行分析的基础上,将地下水模拟模型与GIS技术进行结合,并设置8个情景方案,预测了灌区5a后地下水位变化趋势,并提出了灌区适宜的井渠用水比。结果表明,目前灌区地下水位呈不断下降趋势,削减灌区地下水开采量对地下水位的恢复有明显的促进作用。平水年前削减10%的地下水开采量,人民胜利渠灌区井渠用水比例调整为1/0.78,上游调整为1/1.24,中游调整为1/0.85,下游调整为1/0.41,灌区机井数从原来的20261眼削减到14315眼,可以基本实现地下水的采补平衡。

关键词:地下水埋深;井渠用水比;机井布局;模型;GIS

中图分类号:S275

文献标志码:A

doi:10.13522/j.cnki.ggps.2017.02.009

张嘉星,齐学斌, Magzum Nurolla,等. 人民胜利渠灌区适宜井渠用水比研究[J]. 灌溉排水学报,2017,36(2):58-63.

0 引言

目前,我国大多数灌区存在水资源供需矛盾突出、机井布局不合理、地下水超采严重、生态环境恶化等突出问题^[1]。为了实现灌区最严格的水资源管理,科学利用水资源,改善灌区生态环境,选择灌区合理的井渠用水比与机井布局方案已引起了国内外学者的广泛关注。灌区水资源优化配置与调控方法,主要有线性规划法、非线性规划法、多目标规划法、随机规划法、模拟模型法、现代启发式算法等。已有研究中,采用线性规划法优化配置了灌区水资源^[2];采用非线性规划法优化了灌区地下水管理模型^[3];基于多目标规划法建立了综合考虑区域社会、经济与环境的水资源优化模型^[4];运用区间2阶段随机规划方法,建立了地表水和地下水联合调度的优化配置模型^[5];将MODFLOW模型与改进的SWAT模型耦合,建立了灌区地表水-地下水分布式模拟模型^[6];用启发式算法之一粒子群算法将水资源分配到灌区中的不同子区及作物的各生育阶段中,建立了大系统优化模型^[7]。近年来,GIS技术因为其具有强大的空间分析能力,应用范围越来越广,目前常用于土壤侵蚀量研究^[8]、土地空间格局分析、地下水资源评价等方面^[9],但将GIS与MODFLOW相结合,用于灌区水资源优化配置与调控分析,相关文献还不多见^[10-11]。鉴于此,以人民胜利渠灌区为研究对象,将MODFLOW模型及GIS技术进行耦合,对灌区水资源合理配置与调控进行模拟分析,进而确定灌区最优的井渠用水比例与机井数调整方案,对于实现灌区水资源的可持续开发利用具有重要指导意义。

1 材料与方法

1.1 研究区水文地质概况

人民胜利渠灌区位于河南省北部黄河北岸,地处东经113°31'—114°25',北纬35°0'—35°30',主要包括新乡县、新乡市郊、原阳、获嘉、延津、卫辉、武陟、滑县7县1市郊,是河南省粮食主产区之一^[12]。灌区多年平均年降雨量600mm左右,年内降雨量分布不均,主要集中在夏季。灌区地势平坦,平均坡降约1/4000,主要地

收稿日期:2016-09-08

基金项目:公益性行业(农业)科研专项经费资助项目(201203077);国家863计划(2012AA101404)

作者简介:张嘉星(1993-),女,硕士研究生,主要从事水资源高效利用研究。E-mail:898773475@qq.com

通信作者:齐学斌(1963-),男,研究员,主要从事水资源与水环境方面研究。E-mail:qxb6301@sina.cn

貌类型有黄河滩地、黄河背河洼地、古黄河滩区、古黄河背河洼地、太行山前交接洼地、黄河故道沙丘沙滩地6种类型^[13]。人民胜利渠灌区属于冲积扇中上部的主流相沉积物,含水层岩性主要是粗砂含砾石、中细砂,含水层富水性变化较大。

近年来,随着灌区经济与社会的发展,水资源短缺问题日益严峻,引黄水量越来越少,为满足灌区作物正常需水,地下水开采量越来越大,灌区地下水位持续下降。若继续过度开采地下水,灌区将会出现大范围地下水降落漏斗,生态环境将会进一步恶化。

1.2 模型的建立

1.2.1 灌区计算单元的划分

根据全灌区228个观测井点的资料,用ArcGIS的克里金插值法得到灌区地下水平均埋深图,根据灌区的地貌类型及灌区地下水的埋深现状,将灌区划分为6个计算单元。其中1区属于灌区的上游,地貌类型为黄河滩地,地势较高,灌溉方式主要是渠灌,地下水平均埋深为3.40 m,埋深较浅,机井密度较小,主要种植的是水稻,用水量较大,故单分为1个区。灌区的中游属于井渠结合地区,其上段地势较高,排水较好,下段地势平缓,地下水埋深比上段小,按其地形地貌和地下水位可划分为4个区。中游2区主要是古黄河背河洼地,地下水平均埋深为7.60 m;中游3区主要是古黄河滩地,地下水开采量较大,地下水平均埋深为12.39 m,明显大于其他区域,已经形成了地下水漏斗;中游4区主要是古黄河背河洼地,地下水平均埋深为6.44 m;中游5区主要是古黄河滩地,地下水平均埋深为6.53 m;下游6区是古黄河滩地,采用井渠结合的灌溉方式,以井灌为主,渠水补源,地下水平均埋深为9.69 m,机井密度较大,单分为1个区。灌区分区图如图1所示。古黄河滩地地势较高,地面、地下水径流条件较好;古黄河背河地区地势低平,地面高程较古黄漫滩区低3~4 m,径流条件较差。

由图1可知,2012年灌区地下水埋深情况分布不均,有的地方严重超采,如中游3区和下游6区;有些地方尚有开发潜力,如1区。

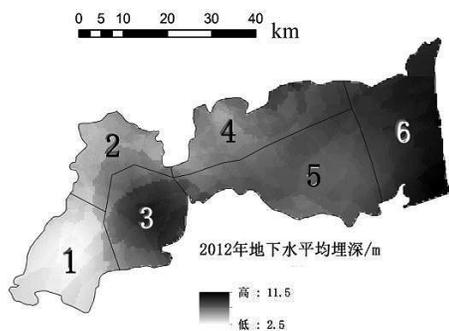


图1 人民胜利渠灌区计算单元分区结果

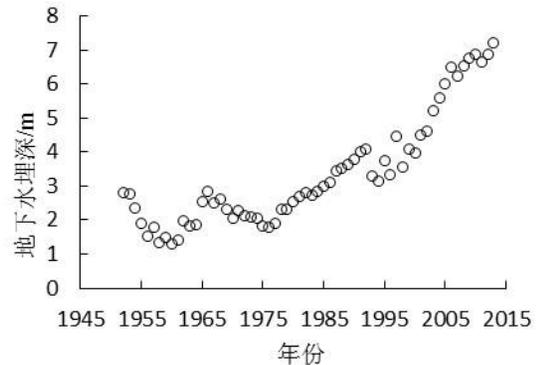


图2 人民胜利渠灌区地下水埋深变化图

灌区历年地下水埋深变化趋势见图2。从图2可看出,1970年以后,地下水埋深呈逐年增加的趋势,且其增加的速率越来越快。根据ArcGIS的分区统计功能,2007—2013年地下水平均埋深除上游1区以外,中下游2区至6区的地下水埋深一直呈增加趋势,其中下游6区埋深变化最大,其线性倾向率为0.358 m/a,其次是中游3区和5区,其线性倾向率分别为0.228 m/a和0.206 m/a。

1.2.2 MODFLOW 数学模型建立

运用MODFLOW模型模拟和预测灌区地下水动态,采用有限差分法进行计算,地下水非稳定流运动模型的偏微分方程为:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(K_{xx} \frac{\partial h}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(K_{yy} \frac{\partial h}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(K_{zz} \frac{\partial h}{\partial z} \right) - W = S_s \frac{\partial h}{\partial t}, \quad (1)$$

式中: K_{xx} 、 K_{yy} 、 K_{zz} 为沿 x 、 y 、 z 坐标轴方向的渗透系数(LT⁻¹); W 是源汇项(T⁻¹),用以代表流进汇或来自源的水量,主要包括渠灌入渗补给量、井灌入渗补给量和降雨入渗补给量; S_s 为孔隙介质的比释水系数(L⁻¹); t 为时间(T); h 为地下水水头(L)。

1.2.3 网格剖分

根据人民胜利渠灌区的水文地质图和地形图可知,渗流区的含水层属于单一含水层,地下水类型属于

潜水性质,因此,在MODFLOW模型中设置1层含水层,研究区以人民胜利渠灌区的实际控制范围为边界,将渗流区域进行网格剖分,可剖分成160列74行,共计11840个正方形单元,在GIS中将经纬度坐标转换成长度单位,将灌区控制范围的GIS图导入MODFLOW模型中,作为模型的底图,模型的长度是92400m,宽度是42735m,见图3。控制范围内的网格为有效单元,其余为无效单元。

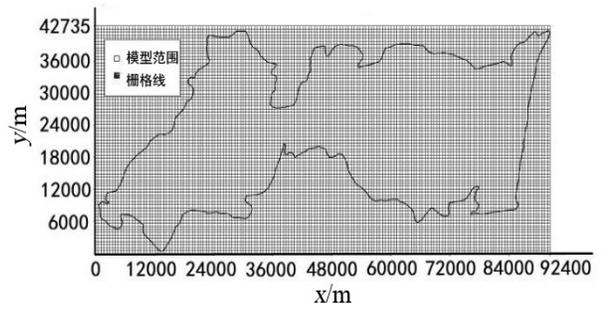


图3 MODFLOW网格剖分

1.2.4 时段划分

通过对人民胜利渠灌区多年地下水埋深、降雨量、灌溉引水量以及地下水开采量等资料进行分析,其中2011年和2012年有228个观测点的地下水埋深数据,数据较为完整,代表性较强,所以选取2011年和2012年为模型的率定期,选取2013年为模型的验证期,以月为应力期,时间步长以天计。

1.2.5 初始条件

根据时段划分,以2011年1月流场作为MODFLOW模型中地下水资源计算的初始流场。将GIS中灌区的高程点数据加载到MODFLOW模型中,再用克里金插值法得到灌区高程插值图。根据人民胜利渠灌区的实际高程及观测点的地下水埋深资料,得到观测点地下水位,在模型中采用克里金插值计算得到灌区潜水含水层初始水位。

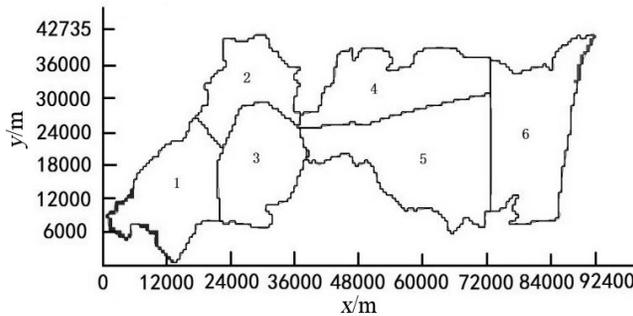


图4 灌区边界条件

1.2.6 边界条件

MODFLOW模型的边界主要分为水平边界和垂直边界。如图4所示,根据灌区水文地质特点,在灌区的西南方向设置定水头,东北方向设置通用水头,通过定水头边界子程序包(GHD)及通用水头边界子程序包(GHB)计算边界补给量或排泄量。垂直补给主要是渠灌入渗补给、井灌入渗补给和降雨入渗补给。在MODFLOW模型中加载之前划分的GIS计算

单元分区图,其补给量按图4进行分区设置;垂直排泄主要是潜水蒸发和地下水开采,蒸发量以ASC II的形式输入到模型中,地下水开采量换算成相应分区的开采强度分配到相应的6个分区中。

1.2.7 模型率定和验证

模型识别需要的确定参数是含水层的渗透系数(k)和给水度(μ)。人民胜利渠灌区在武陟县-新乡(包括新乡县、新乡市区的部分地区)-延津一带水位贮存条件良好,岩性为细砂、粉砂为主的单层结构,导水性良好;在七里营-滑县-内黄一带贮水条件较好,岩性为亚细砂、粉细砂;在卫河和黄河之间的延津、新乡一带,岩性以亚细砂与亚黏土为主。模型参数初始的渗透系数和给水度是根据抽水试验及研究区的水文地质条件进行确定^[14],并利用2011年及2012年隔月实测地下水位资料率定水文地质参数,利用2013年实测地下水位资料验证参数。

以拟合点的水位计算值与其水位实测值的误差作为模型模拟是否准确的标准,误差绝对值越小,说明模型的模拟仿真性越好,模型选取的参数越合理^[15]。率定期和验证期的误差指标的结果统计见表1。

表1 地下水位计算值与观测值误差指标

误差指标	平均残差/m	平均绝对残差/m	标准误差估计/m	均方根/m	标准化均方根比例/%	相关系数
率定期	0.09	0.478	0.118	0.574	2.086	0.997
验证期	0.149	0.458	0.108	0.539	1.959	0.998

由表1可见,各种误差指标均在允许的范围之内,相关系数均在0.99以上,表明地下水位计算值和实测结果吻合较好,因此,所建立的概化的地下水水文地质模型符合研究区的实际情况,可利用所建立的地下水数值模型预测人民胜利渠灌区地下水流场变化趋势。

1.2.8 地下水模型预报方案确定

根据灌区水资源状况,模型设置8个开采预报方案,其中平水年和枯水年分别设置4个方案(表2)。通

表2 开采方案

方案	降水量处理	地下水开采量处理	井渠用水比例
方案1	平水年	现状开采量	1/0.69
方案2	平水年	削减10%	1/0.78
方案3	平水年	削减20%	1/0.87
方案4	平水年	削减30%	1/0.99
方案5	枯水年	现状开采量	1/0.69
方案6	枯水年	削减10%	1/0.78
方案7	枯水年	削减20%	1/0.87
方案8	枯水年	削减30%	1/0.99

通过对1994—2013年降雨资料的频率分析可知,2000—2013年是一个包括了丰、平、枯在内的代表性降水周期,其中平水年(50%,以2008年为代表)降雨量为563.1 mm,枯水年(75%,2012年)降雨量为412.5 mm。

在平水年及枯水年的4个预报方案中,分别设置现状开采量及削减10%、20%、30%地下水的开采量,预测5 a后灌区地下水位动态变化,进而确定灌区合理的地下水开采量及井渠用水比例。

2 结果与分析

2.1 灌区合理地下水开采量和井渠用水比例的选取

在现状开采条件下,将方案1与方案5进行比较,无论采用的是平水年降雨量,还是枯水年降雨量,地下水位都呈逐年下降的趋势(见图5),且2种开采方案都出现机井干枯的现象(见图6和图7)。方案5的年平均地下水位下降了3.01 m,较方案1高0.76 m,说明在降雨严重不足及地下水开采过量的情况下,灌区生态环境受到严重破坏,现状的井渠用水比为1/0.69,显然过大,需要降低井渠用水比,削减地下水开采量。

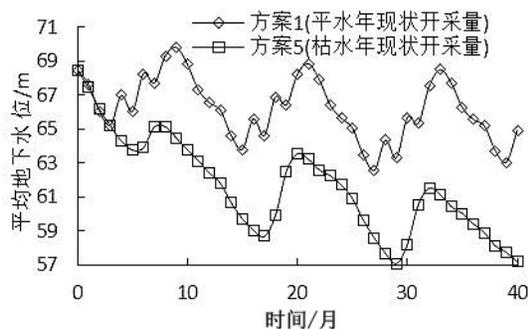


图5 方案1与方案5水位预测图

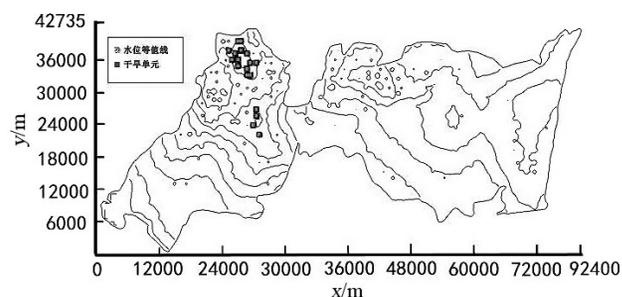


图6 方案1模拟5 a后水位等值线图

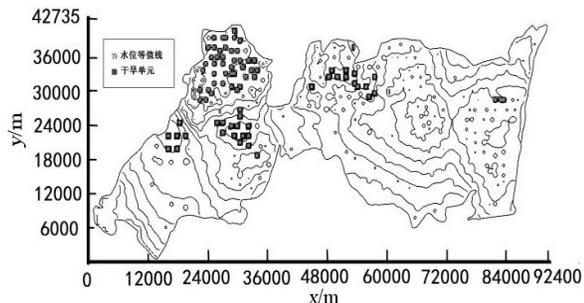


图7 方案5模拟1 215 d后水位等值线图

统计计算可知,平水年间,若采用方案1、方案2、方案3、方案4,全灌区年平均地下水水位变化值分别是-0.76、-0.03、0.82、1.80 m,说明随着地下水开采量削减幅度的增大全灌区的平均地下水位也在不断上升,可见,削减灌区(尤其已经过量开采地区)的地下水开采量,对地下水位的恢复有着明显的作用。从方案2的预测结果可以看出,平水年间,当地下水开采量削减10%时,地下水年平均水位下降了0.03 m,灌区的地下水处于一个动态平衡的状态(见图8)。但与方案1相比,地下水位动态变化趋势发生了明显改变,全灌区的地下水位的下降幅度显著降低。当削减的开采量大于10%时,其地下水位呈上升趋势,削减的幅度越大,其水位上升的速度越快。所以在平水年时,井渠用水比例采取1/0.78,能使灌区地下水保持动态平衡。

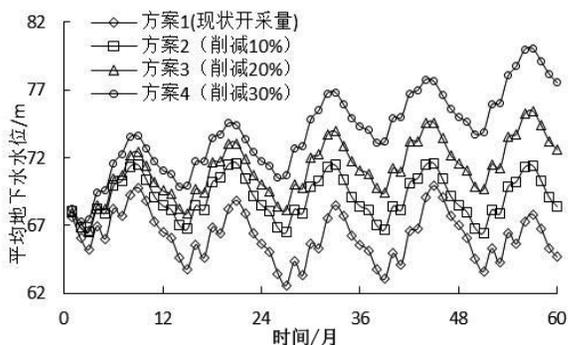


图8 平水年地下水位预测

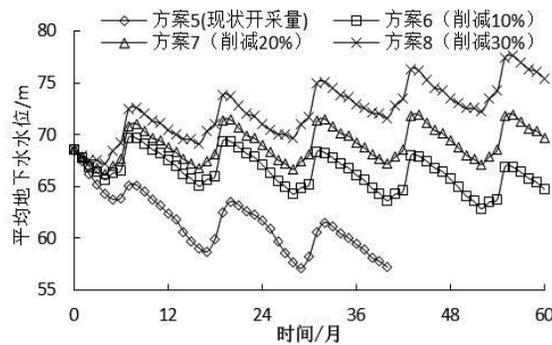


图9 枯水年地下水位预测

枯水年间,方案5、方案6、方案7、方案8全灌区年平均地下水位变化分别是-3.01、-0.76、0.23、1.38 m,可见随着地下水开采量削减幅度的增大全灌区的平均地下水位也在不断上升。从方案7的预测结果可看出,当地下水开采量削减20%时,地下水年平均水位上升了0.23 m,灌区的地下水处于一个动态平衡的状态(见图9),但与方案5相比,地下水动态变化趋势发生了明显改变,全灌区地下水位的下降幅度显著降低,因此枯水年井渠用水比例采取1/0.87较为合理。

2.2 灌区合理机井数的确定

平水年间,方案2能使灌区的地下水保持采补平衡,相应的全灌区适宜的井渠用水比例为1/0.78,上游用水比例为1/1.24,中游为1/0.85,下游为1/0.41,据此用水比例,可以制定灌区机井合理调整方案。

2.2.1 计算方法

依据《机井技术手册》^[17],机井数量可以按照规划区内需提取地下水量进行计算:

$$N=Q/W, \quad (2)$$

$$W=Q' tT, \quad (3)$$

式中: N 是井渠结合灌区需要机井数(眼); Q 是灌区每个月的规划地下水开采量(m^3); W 是每个月平均单井出水量(m^3); Q' 是单井出水量(m^3/h); t 是灌溉期间开机时间(h/d); T 是每次轮灌期的时间(d)。

表3 灌区机井规划计算参数

分区		$Q'/(m^3 \cdot h^{-1})$	$t/(h \cdot d^{-1})$	T/d
上游	1	65	18	6
	2	40	18	6
中游	3	40	18	6
	4	40	18	6
	5	40	18	6
下游	6	35	18	6

2.2.2 机井参数

根据《河南省人民胜利渠灌区节水改造研究成果报告》,确定灌区不同开发利用类型区的参数,见表3。

2.2.3 计算结果

根据式(2)、式(3),计算灌区每月各区所需灌溉井数,取各区12个月中所需机井数最大值作为灌区各分区规划井数,统计结果如表4所示。灌区规划井数与现有井数的比较结果统计如表5所示。

表4 灌区各分区各月所需井数眼

分区		1月	2月	3月	4月	5月	6月	7月	8月	9月	10月	11月	12月	最大值
上游	1	215	343	451	366	684	1298	1079	1452	893	238	376	232	1452
	2	446	595	895	543	1 176	231	1 485	984	572	481	481	442	1 485
中游	3	264	809	1 040	536	1 305	307	2 621	729	541	490	514	446	2 621
	4	718	827	1 320	849	1 649	798	2 311	1213	767	813	882	674	2 311
	5	352	563	587	740	1 180	999	2 835	1068	540	526	703	412	2 835
下游	6	468	695	1792	721	2228	807	3611	1452	684	421	665	456	3611

表5 灌区各分区井数

分区	上游1区	中游2区	中游3区	中游4区	中游5区	下游6区	合计
规划井数/眼	1 452	1 485	2 621	2 311	2 835	3 611	14 315
现有井数/眼	824	2 657	6 363	3 122	2 293	5 002	20 261
需增加井数/眼	628	/	/	/	542	/	1 170
需减少井数/眼	/	1 172	3 742	811	/	1 391	7 116

由表5可知,灌区现状规划机井数量为14 315眼,其中上游1区现有机井824眼,以渠灌为主,地下水利用较少,地下水埋深过浅,使该区域产生土壤次生盐碱化现象,根据优化后的机井数,需新增加628眼机井。中游2区、3区、4区需要增加渠水灌溉量,减少地下水的开采,改变该区域地下水位不断下降的趋势。中游2区现有机井2 657眼,需要关闭1 172眼;中游3区属于严重超采区,现有机井6 363眼,地下水位下降趋势明显,并且已经形成了地下水漏斗,为改变地下水位快速下降的趋势,需要增加引黄水量,减少地下水的开采量,需削减3 742眼机井;中游4区现有机井3 122眼,需要关闭811眼。中游5区现有机井数量2 293眼,需增加机井数量542眼。下游6区的地下水开采量较大,地下水埋深较大,现有机井5 002眼,需要增加渠水灌水量,并采取人工补源等措施,减少地下水的开采量,需削减1 391眼机井。

3 结论

1)目前灌区地下水位呈不断下降趋势,而削减灌区地下水开采量对地下水位的恢复有着明显的作用。随着地下水开采量削减幅度的增大,全灌区平均地下水位也在不断上升。根据对灌区不同情景模式预测结果进行比较,平水年间削减10%的地下水开采量,可以使灌区地下水位保持动态平衡。

2)全灌区井渠用水比例调整为1/0.78,上游调整为1/1.24,中游调整为1/0.85,下游调整为1/0.41,灌区规划机井数从原来的20 261眼调整为14 315眼,可以基本实现灌区地下水的采补平衡,显著改善灌区地下水水位严重下降的趋势。

3)建立的灌区适宜井渠用水比优化模拟模型将MODFLOW模型与ArcGIS进行嵌套,从区域层面模拟分析水资源调控效果,充分发挥了GIS的空间分析能力,既能扩大模型的功能,提高模型的精度,又能从整体上模拟地下水开发利用状况。

参考文献:

- [1] 齐学斌,樊向阳,李平,等.井渠结合灌溉类型区多水源联网优化调度模式研究[J].灌溉排水学报,2007,26(2):17-20.
- [2] 王振龙.淮北农灌区水资源利用线性规划模型[J].治淮,2003(5):25-27.
- [3] 于福荣,卢文喜,鲍新华,等.含有协变量的非线性地下水优化管理模型研究[J].人民长江,2011,42(5):39-42.
- [4] 雷霄.基于多目标规划的杨凌示范区水资源优化配置[J].水资源与水工程学报,2009,20(4):96-103.
- [5] 付银环,郭萍,方世奇,等.基于两阶段随机规划方法的灌区水资源优化配置[J].农业工程学报,2014,30(5):73-81.
- [6] 刘路广,崔远来.灌区地表水—地下水耦合模型的构建[J].水利学报,2012,43(7):826-827.
- [7] 陈晓楠,段春青,邱林,等.基于粒子群的大系统优化模型在灌区水资源优化配置中的应用[J].农业工程学报,2008,24(3):103-106.
- [8] 龙天渝,乔敦,安强,等.基于GIS和RULSE的三峡库区土壤侵蚀量估算分析[J].灌溉排水学报,2012,31(2):33-37.
- [9] 马明,刘洪禄,张久川,等.GIS技术在地下水资源评价研究中的应用[J].灌溉排水学报,2006,25(5):85-88.
- [10] LI P, LU W, JIN M, et al. Approach to the relation of mutual-feed joint-variation in groundwater management model[J]. Journal of Earth Science, 2012, 23: 349-358.
- [11] PARSAPOUR-MOGHADDAM P, ABED-ELMDOUST A, KERACHIAN R. A Heuristic Evolutionary Game Theoretic Methodology for Conjunctive Use of Surface and Groundwater Resources[J]. Water Resources Management, 2015, 29(11): 3 905-3 918.
- [12] 胡艳玲,齐学斌,黄仲冬,等.基于补排平衡法的井渠结合灌区机井数量研究[J].灌溉排水学报,2015,34(8):17-21.
- [13] 杨丽莉.引黄灌区经济生态系统水资源高效利用调控技术研究[D].郑州:郑州大学,2013.
- [14] 陈震.人民胜利渠灌区多水源灌溉应对干旱分析[D].北京:中国农业科学院,2013.
- [15] 马驰,石辉,卢玉东.MODFLOW在西北地区地下水资源评价中的应用——以甘肃西华水源地地下水数值模拟计算为例[J].干旱区资源与环境,2006,20(2):89-93.
- [16] 刘路广,崔远来,冯跃华.基于SWAP和MODFLOW模型的引黄灌区用水管理策略[J].农业工程学报,2010,26(4):9-17.
- [17] 水利部农业水利司.机井技术手册[S].北京:中国水利水电出版社,1995.

Appropriate Well-canal Irrigation Proportion in Irrigation District Based on MODFLOW and GIS

ZHANG Jiaying^{1,2}, QI Xuebin^{1,2}, MAGZUM Nurolla^{1,2}, LI Ping^{1,2}, HUANG Zhongdong^{1,2}, HU Yanling^{1,2}

(1. Farmland Irrigation Research Institute, Chinese Academy of Agricultural Sciences, Xinxiang 453002, China;

2. Agriculture Water and Soil Environmental Field Science Research Station of Xinxiang City,
Henan Province, Chinese Academy of Agricultural Sciences, Xinxiang 453002, China)

Abstract: In order to rationally use surface water and groundwater resources, improve the ecological environment of irrigation area and provide the basis for the realization of the most stringent water management, taking People's Victory Canal irrigation district as the research area, ArcGIS was used to analyze the People's Victory Canal irrigation district groundwater utilization status, and MODFLOW model was used to establish a fully irrigated three dimensional flow numerical simulation model. Eight different programs were set up to simulate the water level of the programs running in five years, and analyze the trends in groundwater level. The results showed that irrigation district ground water level showed a downward trend, reducing groundwater extraction played a significant role in the groundwater level recovery. In flat water year, reducing 10% of the groundwater exploitation, the well-canal irrigation proportion was 1/0.78, of which upstream was 1/1.24, midstream was 1/0.85, the downstream was 1/0.41, and the change well number from the original 20 261 eyes to 14 315 eyes could make the dynamic groundwater balance.

Key words: groundwater depth; the well-canal irrigation proportion; wells layout; model; GIS

责任编辑:刘春成