



DOI: 10.13476/j.cnki.nsbdtqk.2017.06.016

李迎龙, 李海明, 谢新民, 等. 基于GMS的沧县地区浅层地下水控制性管理水位研究[J]. 南水北调与水利科技, 2017, 15(6): 108-114. LI Y L, LI H M, XIE X M, et al. Study on the controlled management water level of shallow groundwater in Cangxian area based on GMS[J]. South to North Water Transfers and Water Science & Technology, 2017, 15(6): 108-114. (in Chinese)

基于GMS的沧县地区浅层地下水控制性管理水位研究

李迎龙^{1,2}, 李海明^{1,2}, 谢新民³, 董旺泉^{1,2}, 葛亚超^{1,2}, 王 焱^{1,2}

(1. 天津科技大学 滨海地下水利用与保护研究室, 天津 300457; 2. 天津市海洋资源与化学重点实验室, 天津 300457; 3. 中国水利水电科学研究院, 北京 100038)

摘要: 由于地下水的超采, 已在沧县地区引发一系列环境地质问题。通过确定地下水控制性管理水位, 来控制地下水的开采量, 实现沧县地区浅层地下水资源的可持续利用。根据沧县地区浅层水位观测井的观测资料, 分析了沧县地区浅层地下水位动态特征, 发现地下水位呈周期性变化。在充分了解沧县地区水文地质条件的基础上, 利用GMS软件建立沧县地区地下水水流模型。在现有的开采基础上, 预测不同频率降水量情景下沧县地区浅层地下水控制性管理水位, 并确定其阈值。四种情景下沧县地区浅层地下水控制性管理水位阈值分别为: -6.40~7.00 m、-4.30~7.30 m、-4.70~7.10 m、-4.50~7.00 m。最终确定沧县地区浅层地下水控制性管理水位阈值为-6.40~7.30 m。

关键词: 水位动态; 数值模拟; 控制性管理水位; 阈值; 沧县地区

中图分类号: P641 文献标识码: A 文章编号: 1672-1683(2017)06-0108-07

Study on the controlled management water level of shallow groundwater in Cangxian area based on GMS

LI Yinglong^{1,2}, LI Haiming^{1,2}, XIE Xinmin³, DONG Wangquan^{1,2}, GE Yachao^{1,2}, WANG Ye^{1,2}

(1. Laboratory of Coastal Groundwater Utilization & Protection, Tianjin University of Science & Technology, Tianjin 300457, China; 2. Tianjin Key Laboratory of Marine Resources and Chemistry, Tianjin 300457, China
3. China Institute of Water Resources and Hydropower Research, Beijing 100038, China)

Abstract: Due to the over exploitation of groundwater, a series of environmental and geological problems have been triggered in Cangxian area. This paper was intended to determine the controlled management level of groundwater as a way to control the exploitation quantity of groundwater and to realize sustainable utilization of the shallow groundwater resources in Cangxian area. Based on the observation data from the shallow water level observation wells in Cangxian area, we analyzed the dynamic characteristics of shallow groundwater level in Cangxian area, and found a periodical change of the groundwater level. Based on a substantial understanding of the hydrogeological conditions in Cangxian area, we developed a groundwater flow model of Cangxian area with the GMS software. On the basis of the current exploitation situation, we predicted the controlled management level of shallow groundwater in Cangxian area under 4 different precipitation frequency scenarios, and determined the threshold value. The threshold values under the 4 scenarios were -6.40~7.00 m, -4.30~7.30 m, -4.70~7.10 m, -4.50~7.00 m respectively. The controlled management water level threshold of the shallow groundwater in Cangxian area was finalized to be -6.40~7.30 m.

Key words: dynamics of water level; numerical simulation; controlled management water level; threshold; Cangxian area

地下水是中国北方地区的重要饮用水源。随着经济的不断发展, 对于地下水的开采也逐年加剧。地

收稿日期: 2016-12-27 修回日期: 2017-06-03 网络出版时间: 2016-11-15
网络出版地址: <http://kns.cnki.net/kcms/detail/13.1334.TV.20171115.1040.017.html>
基金项目: 国家自然科学基金(41372231; 40872156); 中央分成水资源费项目(1261430112066)

Fund: National Natural Science Foundation of China (41372231; 40872156); Central Water Resources Program (1261430112066)

作者简介: 李迎龙(1988-), 男, 河南洛阳人, 主要从事环境矿物材料与生态修复方面的研究。E-mail: 605707074@qq.com

通讯作者: 李海明(1971-), 男, 山西吕梁人, 教授, 博士, 主要从事地下水资源可持续利用与污染控制的研究。E-mail: lhm99044@163.com

下水的超采不仅导致了地下水位的下降,而且引发了一系列的环境地质问题^[1]。针对地下水严重超采的现状,国家实行最严格的水资源管理制度^[2],明确提出“严格地下水管理和保护。加强地下水动态监测,实行地下水取水总量控制和水位控制”。2015年开始实施的《河北省地下水管理条例》在全国地方性法规中首次确立了地下水水量水位“双控”制度。另一方面,各学者也积极探索水量和水位控制管理的实施途径与方法^[3,4],特别是闫学军等^[5]提出并开发了基于GMS的地下水水位-水量“二元”指标管理新模式。

地下水位的变化是地下水资源量变化的直观反映,将其与地下水取水总量同时作为地下水的控制指标相对于仅把取水总量作为地下水的管理控制指标更加合理。近几年国外多用建模的思路来对地下水资源管理进行研究^[6]。Yeh W W G^[7]综述了地下水建模与管理的优化方法,Theodossiou N P等^[8]研究了非线性模拟和优化模型在地下水含水层管理中的应用。Gabor Bekesi等^[9]根据地下水位对开采的响应,限制性的分配利用地下水资源。Mohamed El Alfy^[10]利用地下水数值模拟探究地下水开采的最优方案。Gaur S等^[11]研究了人工神经网络和粒子群算法在地下水管理中的应用。国内对于地下水资源管理的研究集中于地下水控制性管理水位及管理模型的实用性。谢新民等^[12]对地下水控制性关键水位进行了研究,提出不同类型地下水红蓝线水位的分析成果。方樟等^[13]以河南省安阳市为例,利用地下水流数值模拟的方法研究了平原区地下水控制性管理水位。吴鸣等^[14]、李平等^[15]、周念清等^[16]分别探索了遗传算法在地下水管理中的应用。

本文基于GMS软件建立沧县地区地下水水流模型,研究不同水平年情景下,沧县地区浅层地下水控制性管理水位及其阈值,以便为沧县地区浅层地下水的合理开采提供监管依据。

1 沧县地区水文地质条件

1.1 研究区概况

沧县位于华北平原东部,属海河流域南系下游^[17],全境介于北纬 $38^{\circ}05'$ 至 $38^{\circ}33'$,东经 $116^{\circ}27'$ 至 $117^{\circ}09'$ 之间。沧县地势低平,由西南向东北缓缓倾斜。该地区属温带半湿润大陆性季风气候,沧县多年平均(1981-2005)蒸发量 $1\,028.90\text{ mm}$,多年平均降雨量 553.30 mm ,降水量年际变化较大,年内分配不均匀,水资源先天不足^[18-19]。沧县地下水主要赋存于第四系松散岩层的砂土和亚沙土空隙中,其水文地质剖面见图1,多年平均(1980-2005)地下水

资源量为 1.92 亿 m^3 ,地下水资源严重短缺。沧州市地势自西南向东北略倾斜,全区属冲积、湖积、海积地形地貌,该区基底构造地处华北断陷,地质构造较复杂。由于连续超采已形成一系列环境地质问题,如形成地下水降落漏斗、地面沉降等^[20-21]。

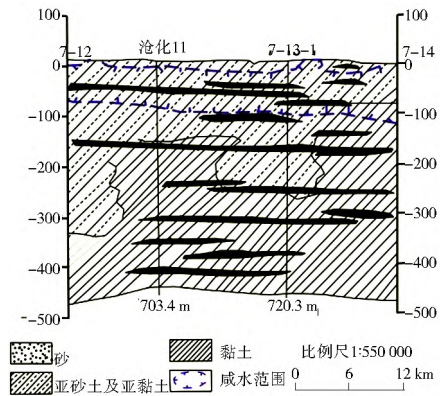


图1 沧县水文地质剖面

Fig. 1 The hydrogeological profile

1.2 研究区范围及行政分区

整个研究区(即沧县地区)包括沧县及沧州市区。为了方便研究,且根据河北省沧州地区地下水管理的需求,在县级行政分区与水文地质分区的基础上,划县级行政区地下水管理亚区或单元,并以此作为县级行政区地下水管理的最小基本单元。共分为4个区:运西Ⅰ区、运西Ⅱ区、运东Ⅰ区、运东Ⅱ区,其分区见图2。



图2 沧县行政分区

Fig. 2 The administrative districts of Cangxian county

1.3 含水层空间分布

研究区地下水为第四系孔隙水,分为四个含水组。第一含水组为浅层地下水,底板埋深约为 40.00 m 。运西地区大部分为淡水,运东地区大部分为咸水;运西全区及运东Ⅰ区含水层岩性主要以粉砂为主,运东Ⅱ区主要以黏砂为主。第二含水组为弱承压水,运西上部为咸水,下部为淡水,到运东逐渐变成全咸水;含水层岩性以粉细砂为主,见有细

砂。第三含水组为深层承压水,底板埋深 220.00~420.00 m;含水层岩性以细砂为主,见有中细砂和粉砂。第四含水组系湖积形成,含水层岩性主要以细砂为主,见有粉细砂。

1.4 浅层地下水补、径、排条件

沧县地区浅层地下水以孔隙水为主。地下水的补给以降水入渗和地表入渗为主,其次为地下水回灌及侧向径流补给;主要排泄方式为潜水蒸发和人工开采,天然状态下地下水的流向与地形倾斜相一致,即由西南流向东北,由于开采影响,地下水流向开采区。

1.5 地下水位动态特征

1.5.1 地下水位年际动态分析

沧县地区的浅层观测井共有 11 眼,其分布见图 3。沧县地区地下水位年际变化有一定的周期性,可以分为两个阶段。一是前一年的 6 月到 9 月,地下水位有一个短暂的上升期;二是从 9 月到下一年的 6 月,地下水位处于下降期。2012 年浅层地下水年

平均水位为 4.21 m,比 2011 年上升 1.36 m;2012 年末平均水位 4.67 m,比 2011 年同期上升了 0.56 m。2013 年浅层地下水年平均水位为 4.78 m,比 2012 年上升了 0.57 m;2013 年末平均水位 4.83 m,比 2012 年同期上升了 0.16 m,浅层地下水位动态变化曲线见图 4。



图 3 观测井分布

Fig. 3 The distribution of observation holes

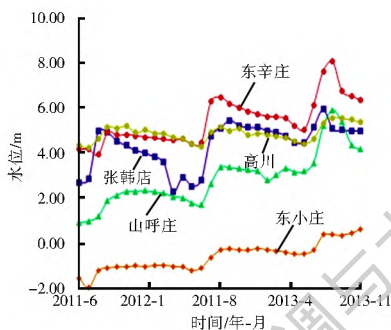
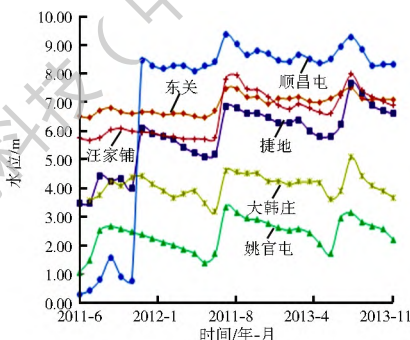


图 4 沧县地区浅层地下水水位动态变化曲线

Fig. 4 The dynamic change curve of shallow groundwater level in Cangxian area



1.5.2 地下水位年内动态分析

沧县地区地下水位年内变化均有一定的周期性,可以分为三个阶段。一是水位下降期,从 1 月到 6 月水位逐渐下降,6 月水位最低。二是水位上升期,从 6 月到 9 月水位逐渐升高,9 月水位最高。三是水位下降期,从 9 月到 12 月水位再次下降。水位上升的幅度大于水位下降的幅度,水位逐步恢复。

1.5.3 地下水位变化与降水量关系

根据资料的完整性,选取东关、张韩店和捷地三个观测孔来研究地下水位变化与降水量的关系,其水位及降水资料从 2011 年 6 月-2013 年 12 月。地下水位的变化与降水有关,降水量越大,水位变化幅度也越大,但具有一定的滞后性,滞后期约为 1 个月。其关系见图 5。

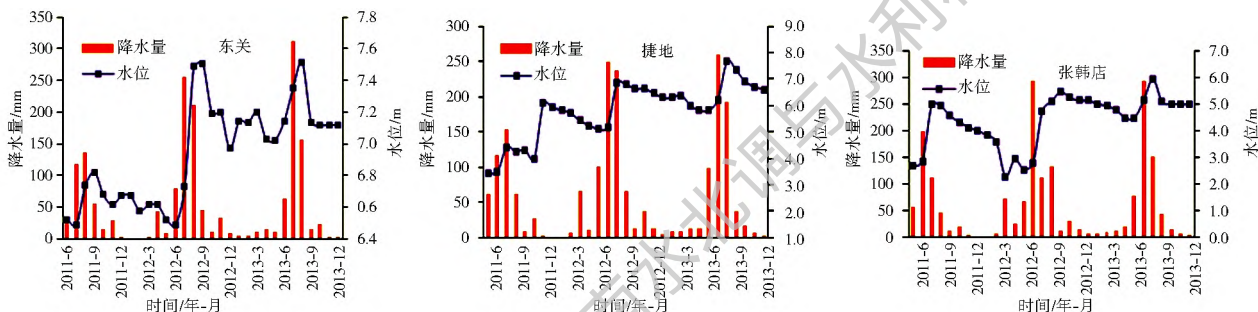


图 5 降水量与地下水位变化过程

Fig. 5 The change processes of precipitation and groundwater level

2 地下水数值模型的建立

根据沧县地区水文地质条件,结合地下水长期观测资料及地下水实际开采情况等,利用三维地下水流数值模拟软件GMS,将沧县地区潜水层概化为一个具有统一水力联系的地下水系统,将该系统概化为参数随空间变化、非均质的非稳定流地下水系统。

2.1 水文地质概念模型

2.1.1 模型范围及边界条件

整个研究区包括沧县全境及整个沧州市区,边界条件具体如下:(1)研究区AG、BC、EF段有河流经过,因此将其概化为定水头边界;(2)AB、CD、FG段,从2012年地下水位等值线分析,该边界与地下水位等值线基本垂直,可视为隔水边界;(3)DE段与研究区外有水量交换,因此将其概化为流量边界。模型范围及地下水位等值线见图6。



图6 模型范围及边界

Fig. 6 The scope and boundary of the model

2.1.2 水文地质参数分区及初值的确定

本次用于地下水流模型的水文地质参数主要分为两类:(1)用于计算地下水的源汇项参数,如降水入渗补给系数、灌溉田间入渗补给系数、潜水蒸发系数等;(2)含水层的水文地质参数,主要包括潜水含水层的渗透系数(k)、给水度(μ),渗透系数的参数分区如图7、图8所示。根据沧县地下水资源评价确定水文地质参数初值。

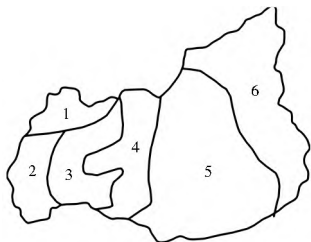


图7 渗透系数及给水度分区

Fig. 7 The permeability coefficient and specific yield zoning map

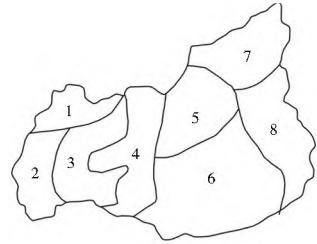


图8 给水度分区

Fig. 8 The specific yield zoning map

2.2 地下水流数值模型

2.2.1 数学模型

根据研究区水文地质条件,将研究区内水文地质概念模型概化为水平占主导,垂向运动较弱,参数随空间变化,非均质、非稳定地下水流系统。

2.2.2 地下水流数值模型的建立

(1) 空间剖分。

研究区面积为1 469.50 km²,长为55.89 km,宽44.80 km,进行网格剖分,共剖分为10 000个网格(100行×100列),其中活动单元格5 017个,见图9。

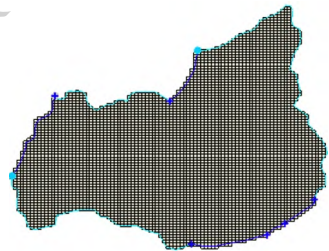


图9 网格剖分示意图

Fig. 9 The sketch map of mesh generation

(2) 定解条件。

初始水位:以2012年1月地下水位资料为基础,采用反距离加权插值法获取含水层初始水位。

(3) 源汇项处理。

主要的补给项有:降水入渗补给、侧向补给、灌溉补给等;主要的排泄项有:人工开采、蒸发及侧向排泄等。采用达西定律确定边界侧向补给、排泄量;根据降水量乘以降水入渗补给系数,得到降水入渗补给量;灌溉入渗补给量、蒸发排泄量的确定方法与降水入渗补给量确定方法相同;开采量以井的形式输入模型。

2.2.3 模型的识别和验证

本次模拟采用2012年1月1日至2012年12月31日的实测地下水位数据对模型进行识别,采用2013年1月1日至2013年12月31日实测地下水位数据对模型进行验证。在研究区内选取11个观测孔,对模型进行识别及验证,发现计算值与观测值

在 $Y = X$ 直线附近,说明计算值与观测值相当,观测孔拟合结果见图 10。

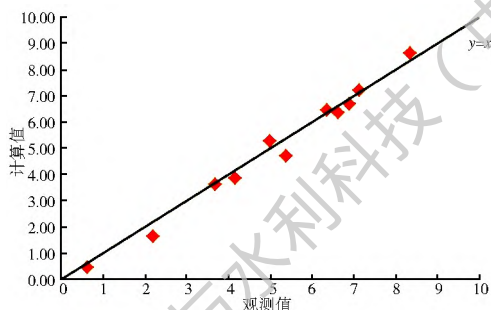


图 10 观测孔水位拟合图

Fig. 10 The fitting of observation hole water level

根据观测孔计算值与观测值的拟合结果可知,有超过 80% 的观测孔误差范围在 0.5 m 之内,说明该模型的精度较高,可以用来预测。

3 各分区控制性管理水位及阈值

3.1 不同降水典型水平年的确定

利用沧县地区 1987–2013 年共 34 年资料进行频率分析,采用经验频率线求得不同典型年的降水量频率。在降水保证率为 20% 时视为丰水年,代表年份为 2010 年;在降水保证率为 50% 时视为平水年,代表年份为 1998 年;在降水保证率为 75% 时视为枯水年,代表年份为 2007 年。

3.2 压采

为减缓沧县地区地下水的过度开采,沧县采取逐步压采地下水的措施。要求 2015 年地下水的开采量控制在 0.77 亿 m^3 ,2020 年地下水的开采量控制在 0.62 亿 m^3 ,2030 年地下水的开采量减少到 0.42 亿 m^3 。由于仅有压采总量的资料,本次预测根据 2013 年各乡镇开采量,按比例将压采后开采量分配到各乡镇,最终分配到各开采井。

3.3 不同情景设计

利用已建立的地下水流模型,以 2014 年 1 月地下水流域作为初始流场,预测期为 2015 年 1 月 1 日到 2030 年 1 月 1 日。通过对不同情景下的地下水流场的预测,得到不同情景下代表性监测点的地下水位,作为该情景下地下水控制性管理水位。

情景一:选取对供水最不利的降水量连续特枯水年组 332.40 mm,把对应的 2002 年降水量逐月资料带入输入模型计算。地下水在 2015–2030 年按照沧县压采方案逐步减少开采量。在各开采量的基础上预测 2015–2030 年地下水位的变化情况。

情景二:选取降水量连续枯水年组 448.20

mm,把对应的 2007 年降水量逐月资料带入模型计算。地下水在 2015–2030 年按照沧县压采方案逐步减少开采量。在各开采量的基础上预测 2015–2030 年地下水位的变化情况。

情景三:考虑地下水以丰补歉的调节功能,降水量取多年平均值 530.90 mm(平水年),把对应的 1998 年降水量逐月资料带入模型计算。地下水在 2015–2030 年按照沧县压采方案逐步减少开采量。在各开采量的基础上预测 2015–2030 年地下水位的变化情况。

情景四:连续丰水年组 639.40 mm,把对应的 2010 年降水量逐月资料带入模型计算。地下水在 2015–2030 年按照沧县压采方案逐步减少开采量。在各开采量的基础上预测 2015–2030 年地下水位的变化情况。

3.4 各分区地下水位阈值确定

(1) 情景一。研究区浅层地下水控制性管理水位整体上从西向东呈现出先降后升再降的趋势。浅层地下水控制性管理水位的最大值与最小值均出现在运东 0 区,其值分别为 7.00 m 和 -6.40 m。在黄递铺镇形成了局部的降落漏斗,见图 11。从地下水控制性管理水位阈值区间来看,情景一下沧县地区浅层地下水位阈值区间范围在 -6.40~7.00 m 之间。

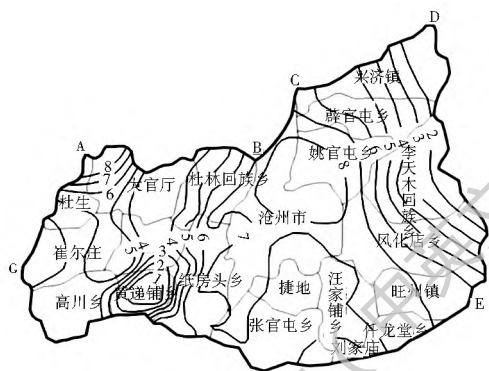


图 11 降落漏斗

Fig. 11 The chart of depression cone

(2) 情景二。研究区浅层地下水控制性管理水位整体上从西向东呈现出先降后升再降的趋势。浅层地下水控制性管理水位的最大值为 7.30 m,出现在运东 0 区。最小值为 -4.30 m,出现在运西 0 区。从地下水控制性管理水位阈值区间来看,情景二下沧县地区浅层地下水位阈值区间范围在 -4.30~7.30 m 之间。

(3) 情景三。研究区浅层地下水控制性管理水位整体上从西向东呈现出先降后升再降的趋势。浅

层地下水控制性管理水位的最大值为7.10 m,出现在运东 \hat{O} 区。最小值为-4.70 m,出现在研究区运西 \hat{O} 区。从地下水控制性管理水位阈值区间来看,情景三下沧县地区浅层地下水位阈值区间范围在-4.70~7.10 m之间。

(4)情景四。研究区浅层地下水控制性管理水位整体上从西向东呈现出先降后升再降的趋势。浅层地下水控制性管理水位的最大值为7.00 m,出现在运东 \hat{O} 区。最小值为-4.50 m,出现在研究区运东 \hat{O} 区。从地下水控制性管理水位阈值区间来看,情景四下沧县地区浅层地下水位阈值区间范围在-4.50~7.00 m之间。

4 结果与讨论

不同情景可以确定各自的地下水控制性管理水位,将所有情景整合在一起构成一个由最小值到最大值的区间即为地下水位阈值。沧县地区地下水控制性管理水位阈值为-6.40~7.30 m,各行政分区浅层地下水位阈值及水位埋深阈值见表1。

表1 各行政分区浅层地下水位阈值

Tab. 1 The shallow groundwater level threshold for each administrative district

分区	2015-2030年 水位阈值/m	2015-2030年 水位埋深阈值/m
运西 \hat{N} 区	-5.40~3.50	6.17~14.88
运西 \hat{O} 区	-6.30~2.80	6.00~15.80
运东 \hat{O} 区	-4.60~5.80	2.48~12.27
运东 \hat{O} 区	-6.40~7.30	2.15~11.60
沧县地区	-6.40~7.30	2.15~15.80

研究区浅层地下水控制性管理水位整体上自西向东呈现出先降后升再降的趋势。相对来说运西 \hat{O} 区与运东 \hat{O} 区的水位比运西 \hat{N} 区和运东 \hat{O} 区低。运西 \hat{O} 区水位较低,主要原因是浅层地下水的开采主要集中在该区域。

在压采总量确定的情况下,最终确定各行政分区地下水位管理阈值,该阈值可以用来监督管理沧县地区地下水开采情况。如果地下水位超出该阈值说明地下水超采,需采取相应措施严格限制地下水的开采。

5 结论

地下水位的变化具有周期性,其周期与降水的周期一致,且具有滞后性,滞后期月为1个月。沧县地区浅层地下水控制性管理水位阈值为-4.70~7.30 m。对于地下水位的监测不足,缺乏长期的水

位观测资料,建议增加地下水位监测点,对地下水进行长期的监测,尤其是降落漏斗区。未来研究的方向集中于地下水控制性管理体系的进一步完善。

参考文献(References):

- [1] 王仕琴,宋献方,王勤学,等.华北平原浅层地下水水位动态变化[J].地理学报,2008,63(5):435-445.(WANG S Q, SONG X F, WANG Q X, et al. Dynamic features of shallow groundwater in North China Plain[J]. Acta Geographica Sinica, 2008, 63(5): 435-445. (in Chinese)) DOI: 10.3321/j.issn:0375-5444.2008.05.002
- [2] 左其享,张保祥,王宗志,等.2011年中央一号文件对水科学研究的启示与讨论[J].南水北调与水利科技,2011,9(05):68-73.(ZUO Q T, ZHANG B X, WANG Z Z, et al. Revelation and discussion on water science research from the "2011 No. 1 Document by the Central Committee of the CPC"[J]. South to North Water Transfers and Water Science & Technology, 2011, 9(5): 68-73. (in Chinese)) DOI: 10.3724/SP.J.1201.2011.05.068.
- [3] 叶勇,谢新民.地下水控制性水位管理分区研究[J].黑龙江水专学报,2009,36(1):116-119.(YE Y, XIE X M. Study on the management subarea based on groundwater dominate water level[J]. Journal of Heilongjiang Hydraulic Engineering College, 2009, 36(1): 116-119. (in Chinese)) DOI: 10.3969/j.issn.2095-008X.2009.01.033.
- [4] 张远东,王策.地下水取水总量与水位双重控制刍议[J].中国水利,2014(9):7-9.(ZHANG Y D, WANG C. Dual control on total volume and level of groundwater consumption[J]. China Water Resources, 2014(9): 7-9. (in Chinese))
- [5] 闫学军,周亚萍,张伟,等.地下水开发利用水位水量“二元”指标管理模式研究[J].河北工业大学学报,2012,41(2):65-68.(YAN X J, ZHOU Y P, ZHANG W, et al. Study on the management modes of groundwater level-quality two indicators in exploitation[J]. Journal of Hebei University of Technology, 2012, 41(2): 65-68. (in Chinese)) DOI: 10.3969/j.issn.1007-2373.2012.02.015.
- [6] SINGH A. Groundwater resources management through the applications of simulation modeling: A review[J]. Science of the Total Environment, 2014, 499: 414-423. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2014.05.048.
- [7] YEH W W G. Optimization methods for groundwater modeling and management[J]. Hydrogeology Journal, 2015, 23(6): 1051-1065.
- [8] THEODOSSIOU N P. Application of non-linear simulation and optimisation models in groundwater aquifer management[J]. Water Resources Management, 2004, 18(2): 125-141.
- [9] BDKESI G, McGuire M, MOILER D. Groundwater allocation using a groundwater level response management method Gnargara groundwater system, Western Australia[J]. Water Resources Management, 2009, 23(9): 1665-1683.
- [10] El Alfy M. Numerical groundwater modelling as an effective tool for management of water resources in arid areas[J].

- Hydrological Sciences Journal, 2014, 59(6): 1259-1274.
- [11] GAUR S, CH S, GRAILLOT D, et al. Application of artificial neural networks and particle swarm optimization for the management of groundwater resources[J]. Water Resources Management, 2013, 27(3): 927-941.
- [12] 谢新民, 柴福鑫, 颜勇, 等. 地下水控制性关键水位研究初探[J]. 地下水, 2007, 29(6): 47-50, 64. (XIE X M, CHAI F X, YAN Y, et al. Preliminary study on critical depth of groundwater table[J]. Ground Water, 2007, 29(6): 47-50, 64. (in Chinese)) DOI: 10.3969/j.issn.1004-1184.2007.06.015.
- [13] 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.
- [14] 吴鸣, 吴剑锋, 施小清, 等. 基于谐振子遗传算法的高效地下水优化管理模型[J]. 吉林大学学报(地球科学版), 2015, 45(5): 1485-1492. (WU M, WU J F, SHI X Q, et al. New harmonic oscillator genetic algorithm for efficient groundwater optimization and management[J]. Journal of Jilin University (Earth Science Edition), 2015, 45(5): 1485-1492. (in Chinese)) DOI: 10.13278/j.cnki.jjues.2015.05.203.
- [15] 李平, 卢文喜, 靳孟贵. 改进的模拟退火遗传算法在地下水管理中的应用[J]. 水文地质工程地质, 2011, 38(3): 9-13. (LI P, LU W X, JIN M G. Application of improved simulated annealing genetic algorithm to groundwater management[J]. Hydrogeology and Engineering Geology, 2011, 38(3): 9-13. (in Chinese)) DOI: 10.3969/j.issn.1000-3665.2011.03.002.
- [16] 周念清, 陈剑桥, 江思珉. 基于遗传算法的模式搜索法求解地下水管理模型[J]. 勘察科学技术, 2011(1): 18-21, 24. (ZHOU N Q, CHEN J Qi, JIANG S M. Pattern search method for solving groundwater management model based genetic algorithm[J]. Site Investigation Science and Technology, 2011(1): 18-21, 24. (in Chinese)) DOI: 10.3969/j.issn.1004-3946.2011.01.005.
- [17] 吕庆玉. 沧州市水资源多年特征分析及利用现状[J]. 地下水, 2014, 36(4): 157-160. (LYU Q Y. Multi year characteristics analysis and current utilization situation of water resources in Cangzhou city[J]. Ground Water, 2014, 36(4): 157-160. (in Chinese)) DOI: 10.3969/j.issn.1004-1184.2014.04.064.
- [18] 卞海彬. 沧州水资源现状及预测分析[J]. 水利科技与经济, 2011, 17(2): 57-58. (BIAN H B. Current situation and forecast of water resources in Cangzhou[J]. Water Conservancy Science and Technology and Economy, 2011, 17(2): 57-58. (in Chinese)) DOI: 10.3969/j.issn.1006-7175.2011.02.022.
- [19] 张可义, 张传河, 张雷. 沧州市水文特性分析[J]. 水利科技与经济, 2010, 16(11): 1211-1212. (ZHANG K Y, ZHANG C H, ZHANG L. Analysis of hydrological characteristics of Cangzhou City[J]. Water Conservancy Science and Technology and Economy, 2010, 16(11): 1211-1212. (in Chinese)) DOI: 10.3969/j.issn.1006-7175.2010.11.005.
- [20] 冯书仓. 沧州市地下水现状及地下水监测工作研究[J]. 中国水利, 2013(S2): 39-40. (FENG S C. Current situation of groundwater and research of its inspection work in Cangzhou City[J]. China Water Resources, 2013(S2): 39-40. (in Chinese)) DOI: 10.3969/j.issn.1000-1123.2013.z1.015.
- [21] 庞炳义, 王艳丽. 沧州市水资源现状与开发利用对策浅析[J]. 地下水, 2014, 36(3): 45-46. (PANG B Y, WANG Y L. Analysis on current situation and development of water resources in Cangzhou City[J]. Ground Water, 2014, 36(3): 45-46. (in Chinese))