

DOI:10.16030/j.cnki.issn.1000-3665.2019.01.05

第二松花江干流傍河开采潜力评价

崔瑞娟¹, 冶雪艳^{1,2}, 杜新强^{1,2}, 王丽雪^{1,3}, 陆向勤¹

(1. 吉林大学新能源与环境学院, 吉林 长春 130026; 2. 吉林大学地下水资源与环境教育部重点实验室, 吉林 长春 130026; 3. 济南市环境研究院, 山东 济南 250102)

摘要: 在第二松花江傍河开采适宜性评价的基础上, 根据研究区的地质和水文地质条件, 建立了水文地质概念模型及相应的数学模型, 建立了基于 Visual MODFlow 的地下水流数值模型; 以地下水水位降深不大于含水砂层厚度的 1/3 为准则, 通过使预测流场与允许降深条件下的流场尽量接近, 给出了第二松花江干流傍河开采条件下的地下水允许开采量。结果表明: 现状年条件下区域地下水资源开采强度较小, 而傍河开采条件下各适宜区地下水开采潜力巨大, 在多年平均降水保证率条件下, 地下水允许开采量可达 $140 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$; 适度规模傍河开采可引起地表水与地下水转化关系的变化, 但不会对河流生态功能产生不利影响。

关键词: 第二松花江; 傍河取水; 地下水数值模型; 允许开采量

中图分类号: P641.8

文献标识码: A

文章编号: 1000-3665(2019)01-0035-08

Potential evaluation of river bank infiltration along the Second Songhuajiang River

CUI Ruijuan¹, YE Xueyan^{1,2}, DU Xinqiang^{1,2}, WANG Lixue^{1,3}, LU Xiangqin¹

(1. College of New Energy and Environment, Jilin University, Changchun, Jilin 130026, China;

2. Key Laboratory of Groundwater Resources and Environment, Ministry of Education, Jilin University, Changchun, Jilin 130026, China; 3. Environmental Research Institute, Jinan, Shandong 250102, China)

Abstract: Based on the evaluation of the suitability for river bank infiltration along the Second Songhuajiang River and the basic geologic and hydrogeological conditions of the study area, the hydrogeological conceptual model and the corresponding mathematical model are established, and the numerical model of groundwater flow based on Visual MODFLOW is formulated. The drawdown of groundwater level of 1/3 of less than the aquifer thickness is taken as the criterion. By making the predicted groundwater flow field as close as possible to the flow field under the conditions of the permissible drawdown, the allowable exploitation quantity of groundwater under the condition of RBF along the Second Songhua River is obtained. The results show that under the conditions of the current year, the exploitation intensity of groundwater resources is small. However, under the condition of exploitation near the river, the groundwater exploitation potential of each suitable area is as high as $140 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$, and the allowable exploitation of groundwater is large under the annual precipitation frequency. The interaction of groundwater-surface water will be influenced, but there will be no side effects on the ecological function of the river.

Keywords: Second Songhua River; river bank filtration; numerical modeling; allowable yield

收稿日期: 2018-05-21; 修订日期: 2018-07-10

基金项目: 国家水污染控制与治理重大专项(2014ZX07201010)

第一作者: 崔瑞娟(1993-), 女, 研究生, 硕士, 主要从事地下水数值模拟方面研究。E-mail: cuirj@jlu.edu.cn

通讯作者: 冶雪艳(1978-), 女, 副教授, 主要从事地下水资源评价与管理研究。E-mail: yexy@jlu.edu.cn

傍河水源地以其富水性强、埋藏浅、水量稳定、水质优良、易集中开采和便于管理等优点在许多国家普遍应用并成为重要的取水方式之一,国内外有大量的大、中型城市建立了傍河水源地,且傍河开采获得的水资源占总饮用水的比例逐渐增大。例如,瑞士约 80% 的饮用水来自傍河取水^[1],法国、芬兰、匈牙利、荷兰、斯洛伐克傍河取水占日常生活饮用水的比例分别达 50%、48%、40%、7% 和 45%^[2],德国柏林有 75% 的饮用水来自傍河取水^[3]。此外,印度^[4-5]、埃及^[6] 和韩国^[7] 等国家傍河取水工程的应用也非常普遍。中国东北的一些城市在 1930 年就建立了一批傍河取水工程^[8],目前中国大型傍河水源地已有 300 多个^[9],仅沿黄河及其支流分布的省会城市和一些工业基地内就有约 50 个傍河水源地^[10-11]。傍河取水主要通过激发并增大河水对含水层的入渗补给^[10],以实现地表水与地下水资源的联合利用,通常情况下,傍河水源地所开采出的地下水资源量大部分来自于袭夺地表水资源量^[11]。

第二松花江流域(丰满以下)是吉林省经济最繁荣、发展最强劲的地区,是东北地区主要的工业集中地和商品粮生产基地。吉林市、松原市等大、中城市工、农业生产和生活用水均以开发利用地下水为主,地下水供水占城市供水总量的 60% 左右^[12]。由于区域整体上地下水资源并不十分丰富,研究如何通过傍河取水实现地下水与地表水的联合调度具有十分重要的意义。本次研究基于课题前期研究成果^[12-13],在已筛选出的傍河取水适宜区内,设计合理的地下水开采方案,采用地下水数值模拟技术评价各傍河取水适宜区的地下水开采潜力。

1 傍河取水适宜性

1.1 研究区概况

研究区为第二松花江干流平原区,总面积约 6 331.65 km²,河流全长约 330 km。降水时空分布不均匀(图 1),自东南向西北由约 700 mm 递减到约 440 mm。降水量年内分布不均,主要集中在 7—8 月,降水量占全年降水量的 70% ~ 80%。多年平均蒸发强度自东部、东南部由 1 200 ~ 1 500 mm 向西部、西北部增大为 1 500 ~ 2 000 mm。

1.2 傍河取水适宜区域

王丽雪等^[12-13]从水量、水质、地表水与地下水交互作用强度以及地下水资源开发利用条件 4 方面,建立傍河取水适宜性评价指标体系(表 1),依据

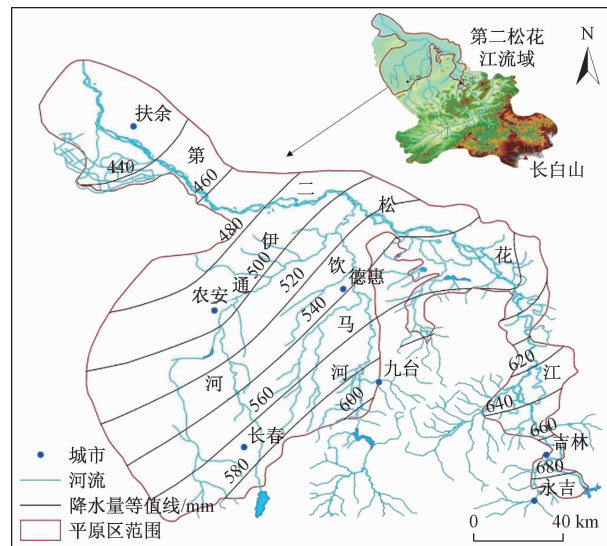


图 1 研究区位置与降水量分布图

Fig. 1 Location of the study area and precipitation distribution

专家打分方法,制定各评价指标的权重及评分标准。根据建立的评价指标体系,通过相应指标的分数与相应指标权重的乘积加权求和得到傍河取水的适宜性指数(式 1),根据傍河取水适宜性指数值,将评价区域傍河取水适宜性划分 I ~ V 共五个等级(图 2)。其中,傍河取水适宜性等级为 I ~ II 级的区域,水质良好,满足生活饮用水要求,水量补给充足,地表水与地下水之间水力联系密切,傍河取水在水量和水质方面可靠保证,地下水资源开发利用条件适宜,为傍河取水的最优适宜区。

表 1 傍河取水适宜性评价指标体系

Table 1 Index system of the suitability evaluation of RBF

评价指标类别	评价指标名称 X	指标权重 W
水量	地下水 含水层渗透系数 K	0.10
	含水层厚度 M	0.10
	地表水 断面径流量 Q	0.10
水质	地下水 地下水现状水质级别 G	0.15
	地表水 地表水现状水质级别 S	0.15
地表水与地下水交互作用强度	水力坡度 I	0.05
	地表水可能的影响带宽度 L	0.15
	河床层渗透性 R	0.10
地下水资源开发利用条件	地下水埋藏深度 D	0.10

$$A = X_K W_K + X_M W_M + X_Q W_Q + X_G W_G + X_S W_S + X_I W_I + X_L W_L + X_R W_R + X_D W_D \quad (1)$$

式中: A ——傍河取水适宜性指数;

X ——相应指标的分数;

W ——相应指标的权重。

由图 2 可见,研究区内最优傍河取水适宜区共

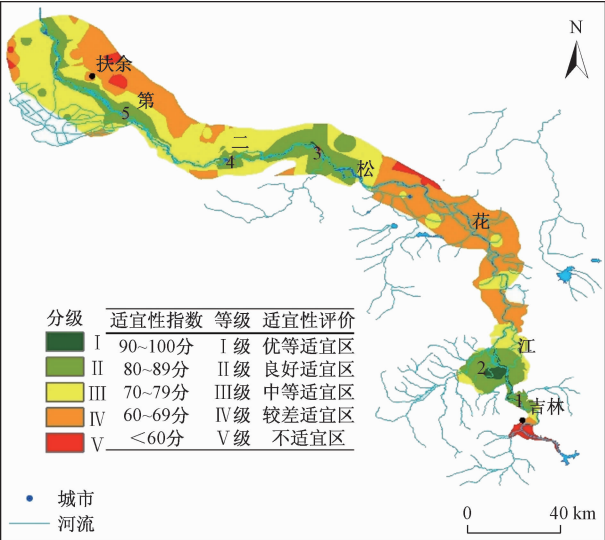


图 2 傍河取水适宜性分区图(引用自文献 [12], 有修改)

Fig.2 Suitablity distribution of RBF

分为 5 部分,地理位置分布如下:吉林市龙潭区附近,吉林市下游段乌拉街附近,陶赖昭附近,黄鱼圈附近,靠近松原市。上述傍河取水适宜区普遍具有以下特征:含水层厚度较大、渗透性强;地下水位埋深相对较浅,接受大气降水入渗及地表水入渗补给的能力强;河床渗透性较好,有利于河水与地下水的 水量交换。

2 傍河取水适宜区地下水数值模拟模型

2.1 水文地质概念模型

2.1.1 边界条件概化

研究区外部边界全部概化为流量边界。其中,研究区西部边界 AB、东北部边界 BC 为流域地表水资源二级分区界线,即分水岭,概化为零流量边界;西南部边界 AC 为山区与平原区的分界线,平原区地下水接受山区地下水的侧向径流补给概化为通用水头边界。研究区内部主要发育的第二松花江干流概化为河流边界(第三类边界条件)(图 3)。

2.1.2 含水层与水力特征概化

主要含水层为第四系松散岩类孔隙介质,主要由全新统沉积物组成,主要含水岩性为中粗砂及砂砾石,各地段富水性及水文地质差异较大,概化为非均质各向同性含水介质。第四系松散层厚度一般在 10 ~ 50 m,其中第二松花江上游、中下游沿岸地段厚约 50 m,伊通河及饮马河沿岸地段厚度约 30 m。地下水天然水力坡度较小(约为 0.4‰),地下水流可概化为符合达西定律的二维潜水非稳定层流。

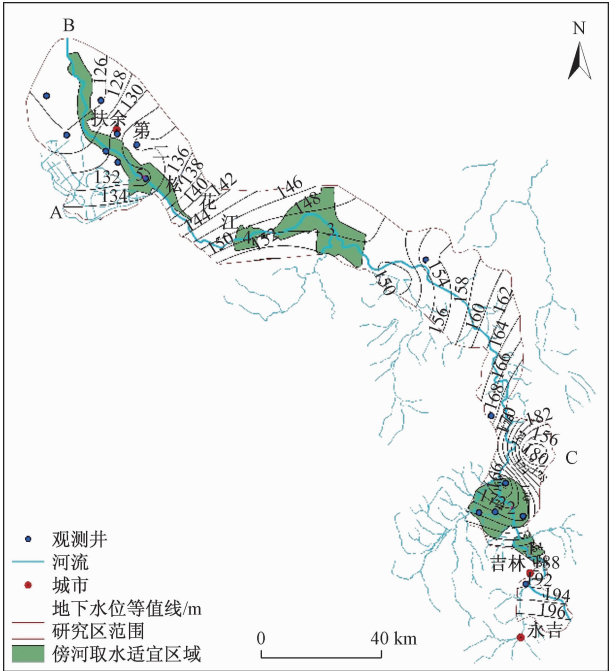


图 3 水文地质概念模型图

Fig.3 Conceptual hydrogeological model

2.2 数学模型

$$\left\{\begin{aligned} &\frac{\partial}{\partial x}\left[K(H-B)\frac{\partial H}{\partial x}\right]+\frac{\partial}{\partial y}\left[K(H-B)\frac{\partial H}{\partial y}\right]+\varepsilon \\ &= \mu \frac{\partial H}{\partial t}(x,y) \in D, t \geq 0 \\ &K(H-B)\frac{\partial H}{\partial n}|_{\Gamma_2}=q(x,y,t)(x,y) \in \Gamma_2, t \geq 0 \\ &q(x,y,t)|_{\Gamma_3}=\frac{K_1 W}{m_1}(H_R-H)(x,y) \in \Gamma_2, t \geq 0 \\ &H(x,y,t)|_{t=0}=H_0(x,y)(x,y) \in D \end{aligned}\right. \quad (2)$$

式中: K ——潜水含水层渗透系数/($\text{m}\cdot\text{d}^{-1}$);
 μ ——潜水含水层给水度;
 H ——地下水位高程/m;
 B ——含水层底板标高/m;
 ε ——源汇项/($\text{m}\cdot\text{d}^{-1}$);
 H_0 ——初始地下水位/m;
 q ——边界上单位宽度的地下水补给(或排泄)量/($\text{m}\cdot\text{d}^{-1}$);
 K_1 ——河床弱透水层渗透系数/($\text{m}\cdot\text{d}^{-1}$);
 m_1 ——河床弱透水层厚度/m;
 H_R ——河水位/m;
 W ——河流宽度/m;
 x,y ——坐标/m;
 D ——研究区范围;

t ——时间;
 n ——法线方向;
 Γ_2, Γ_3 ——二类及三类边界。

2.3 模型的识别与验证

基于适宜区内的观测井数据,分别选择时段 2011 年和 2012 年进行模型的识别与验证,研究区空间离散

为 11 014 个计算单元格,单元格长为 780 m,宽为 737 m,每个单元格面积为 0.574 km^2 。时间离散以 5 d 为 1 个时段,每个模拟期有 69 个时段。将模拟得到的观测井地下水位值及地下水位动态变化趋势与实际观测结果的一致性作为识别与验证的标准,得到识别与验证结果见图 4、图 5。

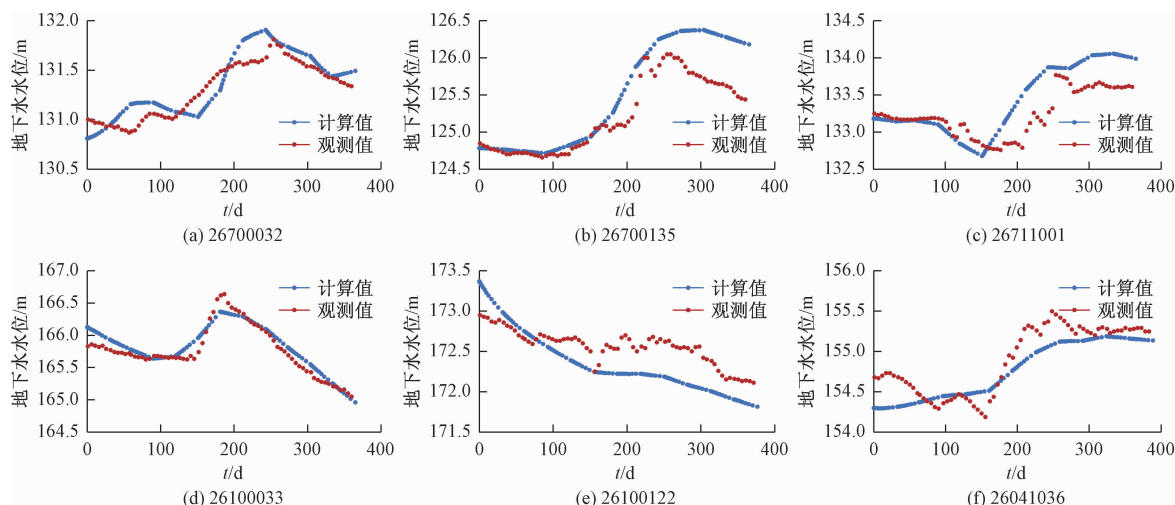


图 4 识别期观测孔地下水水位拟合图

Fig. 4 Fitting curves of groundwater levels at the observation wells in the calibration period

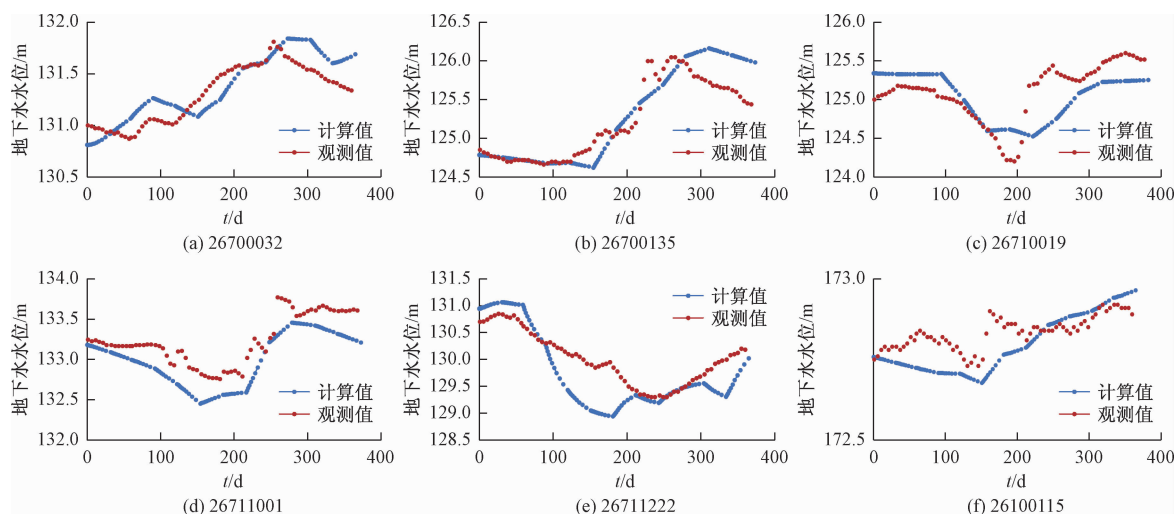


图 5 验证期观测孔地下水水位拟合图

Fig. 5 Fitting curves of groundwater levels at the observation wells in the verification period

由于模拟区域较大,识别和验证所用观测孔数量有限,为了进一步验证模型的可靠性,通过计算地下水存储变化量及地下水水量均衡对模型识别期与验证期的水量均衡状态进行验证^[14]:

(1) 利用 Visual MODFLOW 中的 Zone budget 模块统计地下水数值模型中的源汇项并计算水量均衡结果(表 2);

(2) 根据模拟期实测的地下水位动态变幅,计算地下水储存量的变化量:

$$Q_i = \frac{\mu_i \cdot F_i \cdot \Delta H_i}{\Delta t} \quad (3)$$

式中: Q_i ——每个给水度分区在均衡期内含水层储存变化量/ $(10^4 \text{ m}^3 \cdot \text{d}^{-1})$;

μ_i ——给水度;

F_i ——每个给水度分区的面积/ m^2 ;
 ΔH_i ——每个给水度分区均衡期初、末刻的水头差/ m ;
 Δt ——均衡的时间周期。

表 2 基于数值模型的识别期(2011 年)和验证期(2012 年)水量均衡

Table 2 Water budget in the identification period (2011) and the verification period (2012) based on groundwater numerical modeling / ($\times 10^4 \text{ m}^3 \cdot \text{d}^{-1}$)						
均衡项	补给		排泄		地下水存储变化量	
	识别期	验证期	识别期	验证期	识别期	验证期
大气降水入渗	99.11	72.20	95.72	79.95	3.39	-7.75
侧向径流	49.15	47.59	7.13	7.55	42.02	40.03
河流入渗	214.68	223.77	85.74	71.73	128.94	152.03
蒸发	0.00	0	112.27	112.88	-112.27	-112.88
总计					62.08	71.44

表 3 基于观测数据的识别期(2011 年)和验证期(2012 年)地下水存储变化量

Table 3 Change in water storage in the identification period (2011) and the verification period (2012) based on the observation data				
给水度	含水层体积变化/ ($\times 10^8 \text{ m}^3$)		地下水储量变化/ ($\times 10^4 \text{ m}^3 \cdot \text{d}^{-1}$)	
	识别期	验证期	识别期	验证期
0.01	11.43	0.87	0.32	0.24
0.03	-1.54	1.01	-1.29	0.84
0.05	-1.82	-3.12	-2.52	-4.33
0.30	-1.49	-1.74	-12.45	-14.48
0.40	3.81	5.36	42.33	59.52
0.05	0.50	-8.53	0.69	-11.85
0.08	1.31	8.48	2.92	18.85
0.06	6.02	7.94	10.03	13.24
0.21	1.94	0.44	11.33	2.56
0.06	1.76	1.43	2.93	2.38
0.12	2.19	1.93	7.32	6.42
0.20	0.43	1.36	2.37	7.56
总计	63.97		80.95	

(3)根据研究区内地下水的补给项及排泄项计算得到模拟期内研究区的地下水均衡状态(表 4)。研究区内的地下水补给项包括大气降水入渗补给量、灌溉回渗补给量、侧向径流补给量及河流渗漏补给量等,地下水排泄项包括地下水蒸发量、人工开采量、侧向径流排泄量及河流渗漏排泄量等。通过源汇项计算和统计,得到研究区在识别期与验证期的水量均衡表(表 4)。

表 4 基于源汇项计算的识别期(2011 年)和验证期(2012 年)地下水均衡量

Table 4 Water budget in the identification period (2011) and the verification period (2012) based on source/sink calculation / ($\times 10^4 \text{ m}^3 \cdot \text{d}^{-1}$)		
源汇项	识别期	验证期
大气降水入渗量	180.49	148.37
回灌入渗量	33.53	20.24
侧向径流量	76.48	79.49
河流入渗量	133.74	152.36
蒸发量	-145.08	-125.99
人工开采量	-211.11	-195.2
均衡差	68.05	79.27

采用基于地下水位动态观测数据计算得地下水存储变化量(表 3)及基于源汇项计算得到地下水均衡结果(表 4)与数值模型统计结果(表 2)对比,验证所建模型的可靠性。由表 2~4 可知,在识别期内,基于数值模型的水量均衡差为 $62.08 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$,基于实测地下位动态的含水层存储变化量为 $63.97 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$,基于源汇项计算的水量均衡差为 $68.05 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$,两种水量均衡方法与基于数值模型的水量均衡相比,均衡状态一致,均为正均衡,且均衡差量的相对误差较小,验证期也体现了相同的情况,可以证明建立的地下水数值模型在水量均衡的计算方面是合理、可靠的。

综合地下水位动态拟合以及水量均衡状态的验证,可进一步说明:本文所建立的地下水流数值模型对含水层结构、边界条件的概化、源汇项的处理及水文地质参数的选取较为合理,能够真实反映含水层的特征,可用于预测研究区地下水动态变化规律。

3 傍河开采潜力评价及影响分析

3.1 地下水允许开采量评价

在没有特别明确的生态水位指标情况下,通常将含水砂层厚度的 1/3 作为潜水地下水位降深的约束条件^[15]。以往研究中通常将平均含水层厚度作为计算基础,得到一个统一的水位降深值,这显然与真实地下水流场有出入,据此评价的地下水允许开采量也显得粗略。因此,本次研究以现状地下水流场为基础,按计算单元减去 1/3 的含水砂层厚度值,得到傍河取水适宜区允许降深下的曲面流场(图 6);本次研究中考考虑到实际生产实践中在 5 个适宜区同时建立傍河水源地的可能性较小,因此对 5 个傍河取水适宜区段分别进行单独模拟,通过在适宜区域内均匀布设抽水井,尽量使各开采井横向、纵向间距相等,井间距约为 1.5 km,根据研究区水文地质条件及地下水利用强度采用试算

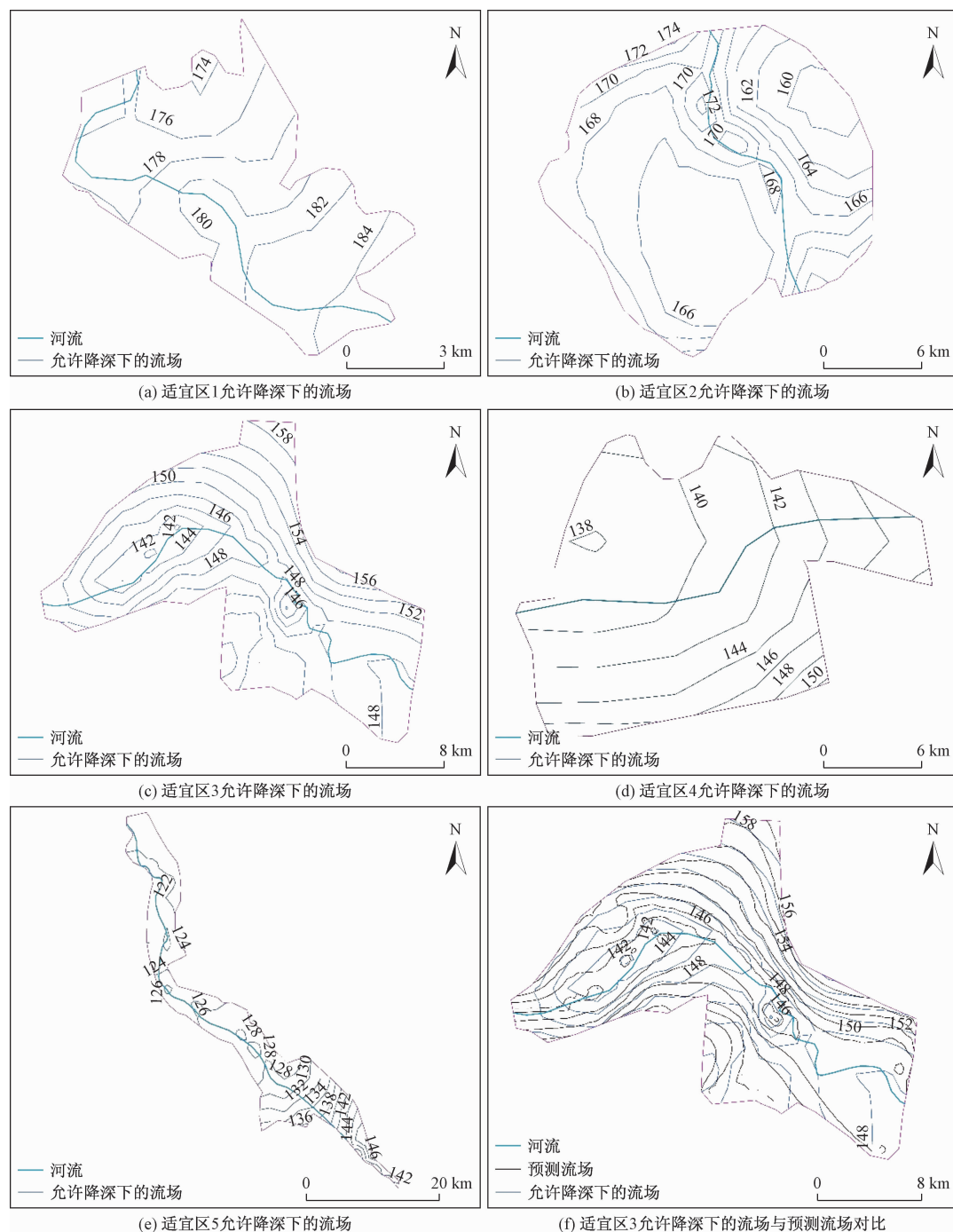


图6 傍河取水各适宜区流场图

Fig.6 Groundwater flow field in the suitable areas of RBF

法调整开采井位和单井开采量,使预测流场与现状年允许降深条件下的流场尽量接近(图6f)。由于各适宜区面积不同,因此开采井数有所差别,最终在适宜区1~5内分别布设开采井数46、239、316、51和273眼,并得到各傍河取水适宜区的地下水允许开采量(表5)。需要说明的是,本次设计的井间距和井数量仅为能够得到预期流场分布形态的一种模拟方案,实际布

井时需要结合抽水试验等资料进行调整。

3.2 开采潜力评价

地下水开采潜力可依据地下水开采潜力指数 p 及可增开采资源模数 q 进行评价^[16], $p > 1.2$ 表示开采潜力较大, $0.8 < p < 1.2$ 表示采补平衡, $p < 0.8$ 表示开采潜力不足; $q > 20$ 表示开采潜力较大, $10 < q < 20$ 表示开采潜力中等, $q < 10$ 表示开采潜力较小(式4、5);计

算结果见表 7。

表 5 各傍河取水适宜区地下水允许开采量

Table 5 Permissible yield of groundwater of the suitable areas

评价指标	适宜区				
	1	2	3	4	5
现状开采强度/($\times 10^4 \text{ m}^3 \cdot \text{d}^{-1}$)	0.39	1.43	6.03	0.57	6.91
允许开采强度/($\times 10^4 \text{ m}^3 \cdot \text{d}^{-1}$)	15.10	44.30	22.32	9.78	52.73
地下水稳定最大降深/m	5.98	7.12	5.52	3.30	3.60

$$p = \frac{Q_{\text{可采}}}{Q_{\text{开采}}} \tag{4}$$

$$q = \frac{Q_{\text{可采}} - Q_{\text{开采}}}{F} \tag{5}$$

式中: p ——地下水开采潜力指数;
 q ——地下水可增允许开采模数($\times 10^4 \text{ m}^3 \cdot \text{km}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$);
 $Q_{\text{可采}}$ ——地下水可开采资源量/($\times 10^4 \text{ m}^3 \cdot \text{a}^{-1}$);
 $Q_{\text{开采}}$ ——地下水已开采资源量/($\times 10^4 \text{ m}^3 \cdot \text{a}^{-1}$);
 F ——评价区面积/ km^2 。

表 6 适宜区开采潜力评价

Table 6 Evaluation of exploitation potential of the suitable areas

区号	实际开采量/ ($\times 10^4 \text{ m}^3 \cdot \text{a}^{-1}$)	允许开采量/ ($\times 10^4 \text{ m}^3 \cdot \text{a}^{-1}$)	面积/ km^2	p	q	地下水 开采潜力
1	142.35	5 511.14	54.06	38.72	99.31	潜力较大区
2	521.95	16 170.96	279.7	30.98	55.95	潜力较大区
3	2 200.95	8 145.34	373.2	3.70	15.93	潜力中等区
4	208.05	3 568.61	60.2	17.15	55.82	潜力较大区
5	2 522.15	19 246.09	341.5	7.63	48.97	潜力较大区

由表 6 可见,5 个傍河取水适宜区的地下水开采潜力指数 p 最小为 3.70,大于 1.2,表明适宜区均为有开采潜力区,且 5 个适宜区中 4 个开采潜力较大,1 个开采潜力中等。说明各傍河取水适宜区开采潜力较大,可作为区域未来的供水水源地。

3.3 傍河开采对地表与地下水资源转化关系的影响

傍河开采条件下,适宜区 1、2 地表水与地下水的补排方向未发生改变,为地表水补给地下水,但补给强度较现状条件明显增大;适宜区 3、4,现状条件下以地下水补给地表水为主,傍河开采条件下变为局部近河地段地表水补给地下水,但总体上的补给强度已超过地下水向地表水的补给强度;适宜区 5 总体补排方向未发生改变,为地表水补给地下水,但补给强度明显增大。

表 7 傍河开采条件下河道侧渗量计算

Table 7 River lateral seepage under the condition of RBF
($\times 10^4 \text{ m}^3 \cdot \text{d}^{-1}$)

适宜区	上游		中游		下游
	1	2	3	4	5
区段河水径流量	3 671.23		4 273.97		4 575.34
现状年河流渗漏量	9.54	21.56	-175.02	-12.26	22.44
开采条件下河流渗漏量	26.94	54.87	4.33	3.62	31.82
河水渗漏增量					
占区段径流量比值/%	0.47	0.91	4.20	0.37	0.21

一般认为多年平均径流量的 10% 是河道生态流量的最低下限,低于该值,河流生态系统健康得不到保障,河流生态环境功能将遭到破坏^[17-18]。由表 7 可知,傍河开采条件下,各适宜区河流侧渗量占多年平均径流量的比值最大仅为 4.20%,因此,在本区内按上述允许开采量进行傍河取水,对河流生态环境功能不会产生不利影响。

4 结论

(1) 本文采用地下水流数值模拟方法,以地下水水位降深不大于含水砂层厚度的 1/3 为约束条件,基于平均布井的试算法调整预测流场并使其与允许降深下的流场相拟合,确定了多年平均条件下各适宜区的地下水允许开采量。

(2) 基于地下水流数值模拟模型的分析,傍河开采对地表水与地下水转化方向和转化强度有不同程度的影响,袭夺水量占河道多年平均径流量的 0.21% ~ 4.2%,不会对河道生态功能产生不利影响。

参考文献:

[1] TYAGI S D, RAJENDRA KIMOTHI P C, ADLAKHA, *et al.* Studies of river water quality using river bank filtration in uttarakhand, India[J]. Water Quality, Exposure and Health, 2013, 5(3): 139 - 148.

[2] HISCOCK K, GRISCHEK T. Attenuation of groundwater pollution by bank filtration[J]. Journal of Hydrology, 2002, 266(3): 139 - 144.

[3] SCHUBERT J J M C. Hydraulic aspects of riverbank filtration-field studies [J]. Journal of Hydrology, 2002, 266(3), 145 - 161.

[4] OJHA C S P. Simulating turbidity removal at a river bank filtration site in India using SCS-CN approach [J]. Journal of Hydrologic Engineering, 2012, 17(11): 1240 - 1244.

- [5] SANDHU C, GRISCHEK T, KUMAR P, *et al.* Potential for riverbank filtration in India [J]. *Clean Technologies and Environmental Policy*, 2010, 13 (2):295-316.
- [6] GHODEIF K, GRISCHEK T, BARTAK R, *et al.* Potential of river bank filtration (RBF) in Egypt [J]. *Environmental Earth Sciences*, 2016, 75(8):671.
- [7] RAY C. Worldwide potential of riverbank filtration [J]. *Clean Technologies and Environmental Policy*, 2008, 10(3):223-225.
- [8] HU B, TENG Y, ZHAI Y, *et al.* Riverbank filtration in China: A review and perspective [J]. *Journal of Hydrology*, 2016, 541:914-927.
- [9] 王开章, 孔凡亮. 地下水水源地污染分析及可持续利用对策 [J]. *山东农业大学学报 (自然科学版)*, 2002, 33(4):464-470. [WANG K Z, KONG F L. Analysis of groundwater pollution and its sustainable strategy. [J]. *Shandong Agric University (Nat Sci)*, 2002, 33(4):464-470. (in Chinese)]
- [10] 曹剑峰, 冶雪艳, 姜纪沂, 等. 黄河下游悬河段地下水资源计算及开发潜力分析 [J]. *资源科学*, 2004 (2):9-16. [CAO J F, YE X Y, JIANG J X, *et al.* Calculation and exploitation potential analysis of groundwater resources in the lower reaches of the Yellow River [J]. *Resources Science*, 2004(2):9-16. (in Chinese)]
- [11] 廖资生, 林学钰, 石钦周, 等. 黄河下游傍河开采地下水的试验研究——以郑州北郊黄河滩地为例 [J]. *中国科学 (E 辑): 技术科学*, 2004 (增 1): 13-22. [LIAO Z S, LIN X Y, SHI Q Z, *et al.* Experimental research on groundwater exploitation in the vicinity of the Yellow River: A case study of the Yellow River beach in the northern suburbs of Zhengzhou [J]. *Science in China Series E: Technical Science*, 2004(Sup1):13-22. (in Chinese)]
- [12] 王丽雪. 第二松花江流域 (丰满以下) 傍河取水对区域水资源的影响分析 [D]. 长春: 吉林大学, 2017. [WANG L X. Analysis on the impact of water abstraction from the riverside in the second Songhua River Basin (below Fengman River) on regional water resources [D]. Changchun: Jilin University, 2017. (in Chinese)]
- [13] WANG L X, YE X Y, DU X Q. Suitability evaluation of river bank filtration along the Second Songhua River, China [J]. *Water*, 2016, 8(5):176.
- [14] 魏忠成, 杜新强, 侯嘉维, 等. 大区域地下水流数值模型的多指标校正方法——以那陵格勒河冲洪积扇地下水数值模型为例 [J]. *水利水电技术*, 2017, 48(12):7-13. [WEI Z C, DU X Q, HOU J W, *et al.* A multi-indexes calibration method for numerical model of large regional groundwater flow—a case of numerical model of groundwater flow in Nalinggele River Alluvial-proluvial Fan [J]. *Water Resources and Hydropower Engineering*, 2017, 48(12):7-13. (in Chinese)]
- [15] 刘玉珠, 高生, 王志超, 等. 关于抽水试验最大降深问题的探讨 [J]. *内蒙古水利*, 2011(1):26. [LIU Y Z, GAO S, WANG Z C, *et al.* Discussion on the problem of maximum depth reduction in pumping test [J]. *Inner Mongolia Water Conservancy*, 2011(1):126. (in Chinese)]
- [16] 郭学茹, 左锐, 王金生, 等. 傍河水源地地下水可持续开采量确定与开采方案分析 [J]. *北京师范大学学报 (自然科学版)*, 2013, 49(2/3):250-255. [GUO X R, ZUO R, WANG J S, *et al.* Determination of sustainable exploitation of groundwater and analysis of its mining scheme in the near water [J]. *Journal of Beijing Normal University (Natural Science)*, 2013, 49(2/3):250-255. (in Chinese)]
- [17] 杨涛, 李怀恩, 张亚平, 等. 渭河宝鸡市区段河道生态基流量初步研究 [J]. *水资源与水工程学报*, 2007, 18(5):17-22. [YANG T, LI H E, ZHANG Y P, *et al.* A preliminary study on the ecological basic flow in the urban section of Baoji, Weihe [J]. *Journal of Water Resources and Water Engineering*, 2007, 18(5):17-22. (in Chinese)]
- [18] 王喜华. 三江平原地下水-地表水联合模拟与调控研究 [D]. 长春: 中国科学院研究生院东北地理与农业生态研究所, 2015. [WANG X H. Study on joint simulation and regulation of groundwater and surface water in Sanjiang plain [D]. Changchun: Graduate University of Chinese Academy of Sciences (Northeast Institute of geography and agricultural ecology), 2015. (in Chinese)]

编辑: 张若琳