

DOI:10.13476/j.cnki.nsbdtk.2020.0027

张弘杰,王梓墉,魏琼芝,等.粒子追踪迹线长度的灵敏度分析及地下水源地保护区划分[J].南水北调与水利科技(中英文),2020,18(2):62-69. ZHANG H J, WANG Z Y, WEI Q Z, et al. Sensitivity analysis of particle tracking trace length and division of groundwater source protection area; An example of Ganhezi well field[J]. South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology, 2020, 18(2): 62-69. (in Chinese)

粒子追踪迹线长度的灵敏度分析及 地下水源地保护区划分

——以甘河子地下水水源地为例

张弘杰^{1,2}, 王梓墉^{1,2}, 魏琼芝^{1,2}, 赵宝惠^{1,2}, 马心远^{1,2}, 王然^{1,2}, 束龙仓^{1,2}

(1. 水文水资源与水利工程科学国家重点实验室, 南京 210098; 2. 河海大学 水文水资源学院, 南京 210098)

摘要:地下水水源地的供水安全对保障居民安全用水和保护地下水具有重要意义,合理地划分地下水水源地保护区,对水源充分利用和水质保护有着重要作用。以甘河子地下水水源地为计算背景,采用数值模拟的方式建立水源地地下水流模型,基于 Morris 方法,对渗透系数和有效孔隙度对粒子追踪迹线长度的影响进行局部和全局灵敏度分析。利用 ArcMap,分别对根据局部、全局灵敏度计算出的粒子追踪迹线长度进行一级、二级地下水源地保护区初步划分,作为日后根据当地实际情况进行多方协调、最终确认保护区范围的基础,并分析不同分析方法、不同影响因素对保护区面积的模拟结果的影响。结果显示:全局灵敏度与局部灵敏度并非简单线性关系,并且相同条件下,有效孔隙度对于粒子追踪迹线长度和地下水源地保护区范围的影响程度均大于渗透系数。根据局部、全局灵敏度划分的一级、二级地下水源地保护区面积大小关系均为:局部灵敏度(参数为渗透系数) $>$ 全局灵敏度 $>$ 局部灵敏度(参数为有效孔隙度)。

关键词:粒子追踪迹线长度;灵敏度分析;保护区划分;渗透系数;有效孔隙度

中图分类号:TV214 文献标志码:A 开放科学(资源服务)标识码(OSID):



Sensitivity analysis of particle tracking trace length and division of groundwater source protection area: An example of Ganhezi well field

ZHANG Hongjie^{1,2}, WANG Ziyong^{1,2}, WEI Qiongzhi^{1,2}, ZHAO Baohui^{1,2}, MA Xinyuan^{1,2}, WANG Ran^{1,2}, SHU Longcang^{1,2}

(1. State Key Laboratory of Hydrology-Water Resources and Hydraulic Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China; 2. College of Hydrology and Water Resource, Hohai University, Nanjing 210098, China)

Abstract: The water supply safety groundwater source area is of great significance for ensuring resident's safe water use and protecting groundwater. Rational division of groundwater source area protection zone plays an important role in making full use of water source and water quality protection. Taking the groundwater source of Ganhezi as the calculation background, the groundwater flow model of the water source area was established by numerical simulation. Based on Morris method, the influence of permeability coefficient and effective porosity on particle tracking trace length were analyzed locally and globally. Using ArcMap, the primary and two-level groundwater source protected areas were divided for particle tracking trace lengths and cal-

收稿日期:2019-03-17 修回日期:2019-07-11 网络出版时间:2019-10-14

网络出版地址: <http://kns.cnki.net/kcms/detail/13.1334.TV.20191012.1532.010.html>

基金项目:国家自然科学基金(41572210);河海大学大学生创新训练项目(2018102941026)

作者简介:张弘杰(1998—),男,吉林延边人,主要从事地下水数值模拟及开发利用方面研究。E-mail: hoomjay@163.com

通信作者:束龙仓(1964—),男,安徽无为,人,教授,从事地下水资源评价与管理、地下水数值模拟等研究。E-mail: lcschu@hhu.edu.cn

culated according to local and global sensitivity. This was the basis for multiparty coordination and final recognition of the scope of protected areas according to the local actual situation in the future. The influence of different methods and different influence factors on the simulation results of the area of the protected area were also analyzed. The results showed that: the relationship between global sensitivity and local sensitivity was not a simple linear relationship, while under the same conditions, the effect of effective porosity on particle tracking trace length and protection area was greater than that of permeability coefficient. According to the local and global sensitivity, the area size relationship of primary and two groundwater source protected areas were: Local sensitivity (parameter was permeability coefficient) > Global sensitivity > Local sensitivity (parameter was effective porosity).

Key words: trace length; particle tracking; sensitivity analysis; division of protected areas; permeability coefficient; effective porosity

地下水资源不仅是重要的供水水源,还是生态系统维持水系统的良性循环的重要支撑^[1]。科学利用地下水资源,能有效缓解快速增长的用水需求。近年来,地下水的大规模开采和地表水的严重污染已经造成了严重的地下水污染问题^[2]。因此,科学划分地下水饮用水水源地保护区,对于保障居民饮水安全、防止地下水污染以及保护水源地生态环境都具有重要意义^[3]。

目前,地下水水源地保护区的划分方法主要有:解析法^[4]和数值法^[5-6]。相比于解析法,数值法具有更高的仿真度,目前已经成为求解复杂水文地质条件下地下水流和溶质运移问题的重要手段^[7-8]。灵敏度分析是数值法的重要步骤,除传统的局部灵敏度分析外,束龙仓等^[9]将全局灵敏度分析引入地下水问题中。但目前,在地下水问题中使用全局灵敏度分析的研究较少,且鲜有研究对局部灵敏度和全局灵敏度两种分析方法进行对比分析。在计算过程中,参数的灵敏度可通过联立方程进行求解,但是计算比较复杂,目前一些国外的软件(如GMS, Visual MODFLOW等)可以用来解决这个问题^[10]。本文采用数值法进行分析,利用Visual MODFLOW进行计算,通过对渗透系数 K 和有效孔隙度 n_e 对粒子追踪迹线长度的局部灵敏度和全局灵敏度进行对比分析,探讨 K 、 n_e 对保护区划分范围的影响,分析局部灵敏度和全局灵敏度两种分析方法在解决地下水问题中的异同。

1 研究方法

1.1 灵敏度分析

灵敏度分析包括局部灵敏度分析和全局灵敏度分析。局部灵敏度分析常用来检验单个影响因子的变化对地下水数值模拟结果的影响,具有操作容易等优点,但忽略了各个影响因子之间的相互作用对最终结果的影响^[11]。全局灵敏度分析在计算过程

中不仅考虑了各影响因子的不同取值对灵敏度计算的影响,还考虑了各个影响因子间共同作用的总灵敏度^[12]。本文对粒子追踪迹线长度分别采用局部灵敏度分析和全局灵敏度分析,并对比二者的异同。不仅得出了总灵敏度,还通过对比找到了灵敏度最大的影响因子。

利用局部灵敏度分析时,每次仅改变1个影响因子的数值。局部灵敏度分析有因子变化法和偏差变化法2种变化方式。(1)因子变化法,将待分析的影响因子数值增加或减小1个单位幅度,如5%;(2)偏差变化法,将待分析的影响因子数值增加或减小1个标准偏差^[13]。数学意义上灵敏度可理解为,某一设计变量 x 的某一微小变化所引起的设计函数 $F(x)$ 的变化程度。在某一设计点 X^k 处,设计函数 $F_j(X)$ 对设计变量 x_i 的灵敏度可由式(1)计算得到

$$S_{ji} = \frac{\partial F_j(X)}{\partial x_i} \Big|_{x=x^j} \quad (j=1, 2, \dots, m; i=1, 2, \dots, n) \quad (1)$$

式中: $|S_{ji}|$ 为函数 $F_j(X)$ 对变量 x_i 的灵敏程度。其中 $|S_{ji}|$ 的值越大,表示变量 x_i 越灵敏,对函数的影响也越大^[14]。

由于不同参数的单位不同,不同参数的灵敏度就失去了可比性。因此,束龙仓等^[9]将式(1)进行了归一化

$$S_{ij_N} = \frac{\partial F_j(X)/F_j(X)}{\partial x_i/x_i} = \frac{\partial F_j(X)}{\delta} \frac{1}{F_j(X)} \quad (2)$$

式中: δ 表示参数的变化范围; $F_j(X)$ 为定值。由此,参数的灵敏度只与函数的变幅和参数变幅的比值有关。本文中,灵敏度只与粒子追踪迹线长度改变量和参数改变量的比值有关。

全局灵敏度分析,充分考虑了参数共同作用对于数值模拟结果的影响,因此全局灵敏度分析的结果更接近实际。目前全局灵敏度分析的方法主要有:Morris法^[15]、多元回归法^[16]、傅里叶幅度灵敏

度检验法(FAST)^[17]。本文采用 Morris 法,选取适当参数,对甘河水源地进行数值模拟,模拟计算粒子追踪迹线长度和对应的保护区面积。对粒子追踪迹线长度进行灵敏度分析,并作出相应探讨。

Morris 在 1991 年提出 Morris 法,通过每次只改变某 1 个参数的取值轮流计算各参数对于整体的基本影响,有效地对数值模型中各参数的重要性进行排序^[18]。Morris 法首先对参数进行取值,设地下水数值模型中有 a 个参数,每个参数有 b 个取样点, c 个参数分别在对应的 b 个取样点上取值,得到向量 $\mathbf{X}=[x_1, x_2, \dots, x_a]$,构造 $c \times a$ ($c=a+1$) 阶矩阵

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & \cdots & 0 \\ 1 & 0 & 0 & \cdots & 0 \\ 1 & 1 & 0 & \cdots & 0 \\ 1 & 1 & 1 & \cdots & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 1 & 1 & 1 & \cdots & 1 \end{bmatrix}$$

上述矩阵中,每一列均代表一个参数。其中,0 表示参数不发生改变,1 表示参数发生改变。由矩阵可知,相邻 2 行中只有 1 个参数的数值不同,把相邻 2 行作为 1 组。将每行参数分别带入到模型中进行数值模拟,可分别输出结果,对比每组相邻 2 行对应的结果之差就可得出每组中唯一不同的那个参数的灵敏度。将矩阵 \mathbf{A} 中的 a 组参数分别带入模型中进行计算,即可得到 a 个参数的灵敏度。另外,间隔 1 行作为 1 组(如第 1 行和第 3 行),组内只有某 2 个参数的取值不同,分别将组内 2 行参数输入模型中进行模拟,输出结果对比结果之差就可得出这 2 个参数的联合灵敏度。同样考虑间隔 2 行作为 1 组(如第 1 行和第 4 行),该组内只有 3 个参数取值不同,对比该组中 2 行的参数所对应的数值模拟结果之差,即可得出 3 个参数的联合灵敏度。以此类推,可得出任意个参数的联合灵敏度,对比第 1 行和最后 1 行即可得出总灵敏度^[9]。

1.2 保护区划分

目前,地下水水源地保护区划分方法主要有数值模拟法^[19]、经验值法^[20]、解析模型法^[21]等。本文采用数值模拟法,利用 Visual MODFLOW 和 ArcMap 进行模拟,分别对根据局部灵敏度和全局灵敏度计算得到的粒子追踪迹线长度(100、1 000 d)模拟计算得到相应的保护区面积(一级、二级)。作为日后根据当地实际情况进行多方协调、最终确认保护区范围的基础。

数值模拟法求解过程较为复杂,目前常借助一

些软件进行求解,如 Visual MODFLOW、Processing MODFLOW for Windows、FEFLOW 等^[1]。本文结合韩京龙^[5]、肖杰等^[6]研究成果,利用 Visual MODFLOW 的 MODPATH 模块对水质点进行示踪模拟,计算不同分析方法(局部、全局灵敏度分析)、不同影响因子(K 、 n_e)、不同时刻(100、1 000 d)示踪粒子运动的迹线长度,再利用 ArcMap 建立缓冲区,模拟计算得到初步的保护区面积。根据 100 d 示踪粒子运动的迹线长度计算得到一级保护区面积,根据 1 000 d 示踪粒子运动的迹线长度计算得到二级保护区面积^[22]。分别计算出不同分析方法(局部、全局灵敏度分析)、不同影响因子(K 、 n_e)的一级、二级保护区面积。对比同一级别不同分析方法计算得到的保护区面积,探讨局部、全局灵敏度分析对保护区面积划分的影响。通过对比两种不同影响因子(K 、 n_e)计算得到的同一级别的保护区面积,探究不同影响因子(K 、 n_e)在保护区面积划分工作中对于结果的影响。

2 研究实例

2.1 研究区概况

甘河水源地位于乌鲁木齐市西南方向,地处乌拉泊—柴窝堡盆地西段的南山山前一乌拉泊洼地,大西沟冲积平原北部。地表高程 1 130~1 250 m,地势南高北低,平均地形坡度为 19%。甘河子地区属于典型大陆气候,温差大,降水少,蒸发强烈,年平均降水量 203.9 mm,年平均蒸发量 2 543.4 mm。由于年平均蒸发量远大于年平均降水量,地下水是当地重要的饮用水来源。保证地下水不受污染,对于当地的饮水安全有着重要意义。

研究区域南部存在潜水含水层,埋深 15~150 m,透水性较好;在结构单一的潜水含水层北部,承压含水层呈多层结构分布,埋深 5~300 m;含水层上部为卵砾石层,砾石、砂砾石或砂层主要分布在含水层下部^[23-24]。甘河子地区地下水补给来源有地表水渗漏、农田灌溉下渗和降水入渗等;地下水排泄主要通过蒸发蒸腾、人工开采和侧向流出等。研究区域自南向北含水层介质粒径逐渐减小,透水性逐渐降低,径流条件变差^[25]。

2.2 灵敏度分析结果

采用因子变化法进行分析,综合分析前人研究成果^[26-29],并结合当地资料,选取渗透系数 K 、有效孔隙度 n_e 分别进行灵敏度分析。

采用一组人工调参得到的参数最优值作为初始

值,保持其他参数不变,将 K 和 n_e 分别增加或减少 5%、15%、25%、35%,模拟 100 d 和 1 000 d 的粒子追踪迹线长度。利用公式(2)进行局部灵敏度的计算。将 K 、 n_e 一起增加或减少 5%、15%、25%、35%,采用 Morris 法计算全局灵敏度。本次研究区域的岩性是中粗砂夹卵砾石, K 与 n_e 成正相关关系^[29]。因此在全局灵敏度计算中, K 和 n_e 同时增大或减小,使得数值模拟与实际情况相符。

100 d 和 1 000 d 灵敏度计算结果见表 1。由表 1

表 1 K 、 n_e 对粒子追踪迹线长度的灵敏度
Tab. 1 K 、 n_e sensitivity to particle tracking trace length

时间	参数	增加或减少的幅度							
		-35%	-25%	-15%	-5%	5%	15%	25%	35%
100 d	n_e	-1.44	-1.33	-1.13	-0.94	-0.86	-0.86	-0.82	-0.73
	K	0.59	0.56	0.54	0.50	0.48	0.46	0.44	0.42
	n_e+K	-0.59	-0.60	-0.52	-0.42	-0.40	-0.45	-0.47	-0.42
1 000 d	n_e	-1.55	-1.38	-1.15	-1.04	-0.92	-0.87	-0.82	-0.75
	K	0.61	0.55	0.55	0.51	0.43	0.44	0.43	0.40
	n_e+K	-0.59	-0.60	-0.53	-0.49	-0.53	-0.50	-0.48	-0.43

n_e 和 K 共同作用时即为本次研究的全局灵敏度。结合表 1 可见,由 Morris 法计算出的全局灵敏度,在数值上不等于局部灵敏度的简单线性加和。 n_e 与 K 共同作用造成的迹线长度变化趋势与 n_e 单独作用时相同,这说明 n_e 在影响粒子追踪迹线长度上占据主导作用,这与上述局部灵敏度分析结果一致,因此在实际应用中应重点考虑 n_e 对于迹线长度的影响。

若用 L 表示迹线长度, $V_{\text{真实}}$ 表示水质点的真实流速, t 表示时间则

$$L = V_{\text{真实}} \times t \quad (3)$$

$$V_{\text{真实}} = \frac{V_{\text{达西}}}{n_e} \quad (4)$$

式中: $V_{\text{达西}}$ 为达西理想流速; n_e 为有效孔隙度。将式(4)带入式(3)中得到

$$L = \frac{V_{\text{达西}}}{n_e} \times t \quad (5)$$

$$V_{\text{达西}} = K \times J \quad (6)$$

式中: K 为渗透系数; J 为水力坡度。将式(6)带入式(5)中得到

$$L = J \times \frac{K}{n_e} \times t \quad (7)$$

由式(7)可知,在补给、开采等条件不变时,迹线长度与 K 成正相关关系,与 n_e 成负相关关系,这与上述结论相符。而 J 的取值与 K 、 n_e 、给水度 μ 等参数均有关,因此 K 和 n_e 对于 L 的影响不是简单的

可知,粒子追踪迹线长度与有效孔隙度 n_e 成负相关关系;与渗透系数 K 成正相关关系。随着 n_e 的增加,迹线长度呈缩短趋势;随着 K 的增加,迹线长度呈现伸长趋势。相同变幅下, $|S_{n_e}| > |S_K|$,即相比于 K , n_e 更敏感。相同变幅下,同一个参数的局部灵敏度,1 000 d 的数值略大于 100 d。本次研究中有效孔隙度 n_e 对于迹线长度的影响大于渗透系数 K (表 1),并且 n_e 与 K 造成的迹线长度变化趋势相反。

线性关系。而 K 和 n_e 的取值共同改变时,由于二者的相互影响和对 J 的作用,使得二者在全局灵敏度分析中相互制约。

根据太沙基公式

$$K = 2 \times n_e^2 \times d_{10}^2 \quad (8)$$

式中: K 为渗透系数; d_{10} 为土颗粒的有效粒径(粒径分布曲线上纵坐标为 10% 时所对应的土颗粒粒径)。

由式(8)可知,改变 n_e 时,若保持 K 不变,则将引起 d_{10} 与 n_e 同等幅度的改变,因此将引起水力坡度等影响因子的变化,进而对粒子迹线长度造成一定影响。但在保持 n_e 不变时,若改变 K 的大小,则将造成 d_{10} 按照 K 的 1/2 次幂的变幅发生改变,并对粒子追踪迹线长度造成相应的影响。因此在 K 和 n_e 单独作用并发生相同变幅时, n_e 对粒子迹线长度的影响大于 K 。

为更直观地比对局部灵敏度和全局灵敏度,根据表 1 绘制了图 1。由图 1 可明显看出,100 d 和 1 000 d 的灵敏度差异不大,全局灵敏度的点据处于 K 和 n_e 的局部灵敏度点据之间,全局灵敏度的点据更靠近 n_e 的点据这与上述结论相符。并且,全局灵敏度随参数改变的变化趋势小于局部灵敏度,局部灵敏度线性加和得到的数值小于全局灵敏度,说明参数间的相互作用将削减某一参数单独作用对迹线长度的影响,这也证明了实际应用中全局灵敏度比局部灵敏度更接近实际。

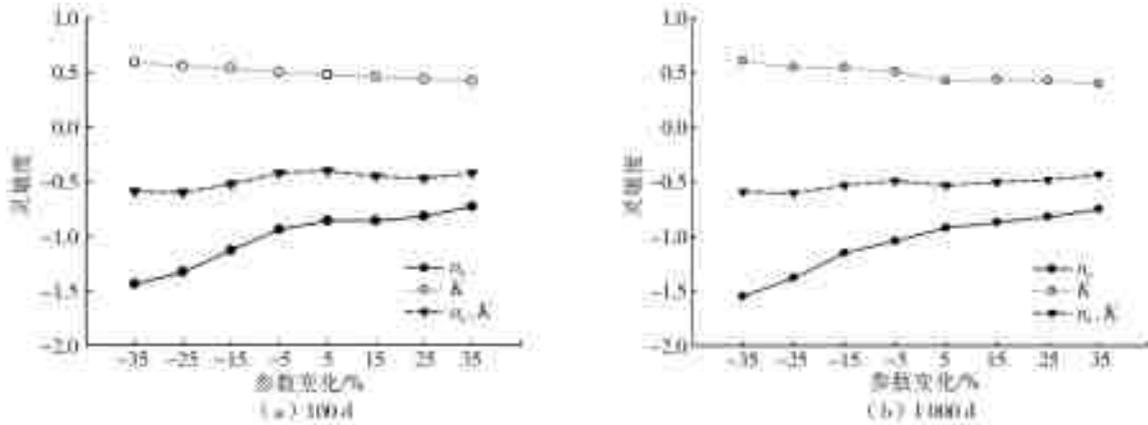


图 1 K, n_e 对粒子追踪迹线长度的灵敏度
Fig. 1 K, n_e sensitivity to particle tracking trace length

2.3 保护区划分结果分析

结合迹线长度,利用软件 ArcMap,模拟计算得到不同分析方法(局部、全局灵敏度分析方法)、不同影响因子(K, n_e)作用下的保护区面积,具体结果见表 2。为了更直观地分析保护区面积,绘制了参数改变±35%和参数不改变的保护区面积图,见图 2。

结合表 2 和图 1,一级和二级保护区面积均与 n_e 的变化趋势成负相关关系,与 K 的变化趋势成正相关关系,因此,根据局部、全局灵敏度划分的一级、二级地下水源地保护区面积大小关系均为:局部灵

敏度(参数为 K)>全局灵敏度>局部灵敏度(参数为 n_e)。这与上述灵敏度分析的结果一致。并且,全局灵敏度分析(n_e+K)计算得到的保护区面积随参数变化的变化趋势(负相关),同局部灵敏度分析(n_e)计算得到的保护区面积随参数变化的趋势(负相关)一致,因此 n_e 对于本次研究的保护区面积的影响占据主导地位。因此,在实际应用中应重点考虑 n_e 对于保护区划分的影响。迹线长度随时间增加而伸长,因此保护区面积随时间变化逐渐变大,由图 2 可清晰地观察到 1 000 d 的保护区面积明显大于 100 d 的。

表 2 不同参数变化情况下的保护区面积
Tab. 2 Protected area under different parameters

时间	参数	增加或减少的幅度								
		-35%	-25%	-15%	-5%	0%	5%	15%	25%	35%
100 d	n_e	18.22	16.20	14.23	12.52	11.76	11.05	9.70	8.39	7.49
	K	8.34	9.48	10.50	11.35	11.76	12.15	12.85	13.45	13.96
	n_e+K	14.70	13.97	12.96	12.10	11.76	11.43	10.67	9.90	9.40
1 000 d	n_e	217.97	186.08	158.22	138.41	130.90	124.17	111.51	100.68	93.13
	K	99.89	109.91	118.54	126.93	130.90	134.71	141.90	148.61	154.99
	n_e+K	161.99	152.67	142.99	134.18	130.90	127.75	120.73	113.89	109.54

3 结 语

结合研究区域实际情况,通过局部灵敏度和全局灵敏度分析,得出在研究区域内有效孔隙度 n_e 对于粒子追踪迹线长度和保护区划分的影响大于渗透系数 K ,并且 n_e 与粒子追踪迹线长度和保护区面积的变化趋势成负相关关系, K 与粒子追踪迹线长度和保护区面积的变化趋势成正相关关系。 n_e 对于本次研究的结果影响占据主导地位,全局灵敏度和保护区面积随参数改变的变化趋势,均同 n_e 保持一致,因此在实际应用中应重点考虑 n_e 对于保护区划

分结果的影响。相同变幅下,同种参数的 1 000 d 的灵敏度在数值上略大于 100 d。通过对比局部灵敏度和全局灵敏度的结果可知,Morris 法计算的全局灵敏度,在数值上不等于局部灵敏度简单线性加和。全局灵敏度随参数改变的变化趋势小于局部灵敏度,参数间的共同作用将削弱某一参数单独作用时对粒子追踪迹线长度的影响,全局灵敏度在实际应用中更接近实际。

K 与粒子追踪迹线长度成正相关关系、 n_e 与粒子追踪迹线长度成负相关关系。因此,根据局部、全局灵敏度划分的一级、二级地下水源地保护区面积

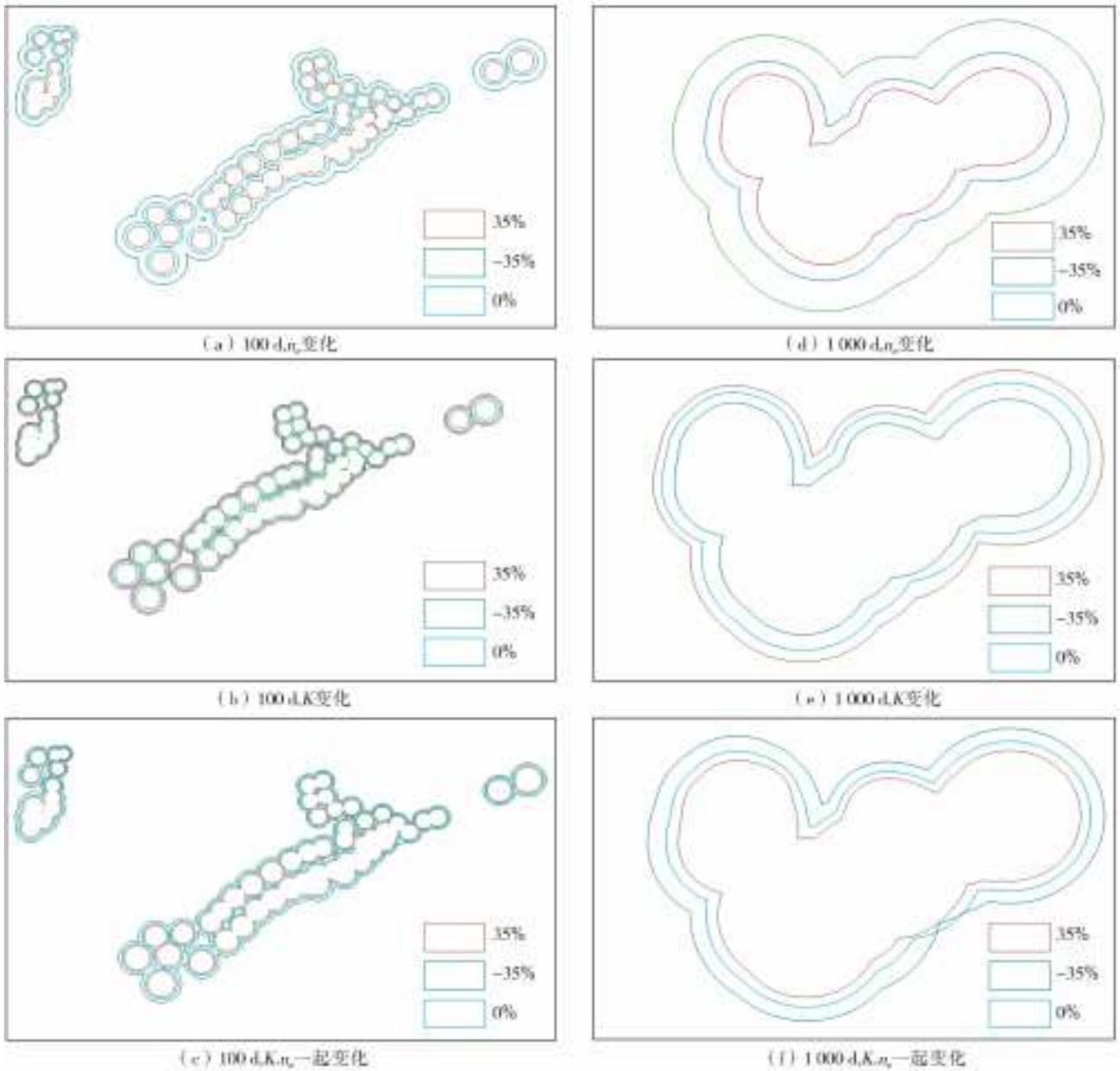


图2 不同参数变化情况下的保护区面积

Fig. 2 Protected area under different parameters

大小关系均为:局部灵敏度(参数为 K) $>$ 全局灵敏度 $>$ 局部灵敏度(参数为 n_e)。根据全局灵敏度计算得到的保护区面积随参数变化的变化趋势(负相关),同根据局部灵敏度(参数为 n_e)计算得到的保护区面积随参数变化的趋势(负相关)相同,证明 n_e 对于本次研究的保护区面积的影响大于 K 。保护区面积的研究结果与灵敏度分析的结果一致,再次证明了灵敏度分析在实际应用中的重要作用。目前解决地下水问题的数值模拟中,大多使用局部灵敏度分析,全局灵敏度分析较少,并且全局灵敏度分析的方法比较单一。由于资料限制,本文未对全局灵敏度分析的其他方法(如多元回归法、傅里叶幅度灵敏度检验法)进行研究与探讨。

参考文献(References):

- [1] 江广长,马腾. 地下水水源地保护区划分方法研究[J]. 安全与环境工程, 2016, 23(3): 36-39, 57. (JIANG G C, MA T. Partitioning method of the groundwater wellhead protection zone[J]. Safety and Environmental Engineering, 2016, 23(3): 36-39, 57. (in Chinese)) DOI:10.13578/j.cnki.issn.1671-1556.2016.03.006.
- [2] 钟秀,马腾,刘林,等. 地下水饮用水源地污染源风险等级评价方法研究[J]. 安全与环境工程, 2014, 21(2): 104-108. (ZHONG X, MA T, LIU L, et al. Method research on the risk level evaluation of contamination sources for drinking groundwater wellhead[J]. Safety and Environmental Engineering, 2014, 21(2): 104-108. (in Chinese)) DOI:10.3969/j.issn.1671-1556.2014.

02. 022.
- [3] JOSE L E, MARIA V E, JORGE P, et al. Groundwater protection using vulnerability maps and wellhead protection area (WHPA): A case study in Mexico[J]. *Water Resources Management*, 2010, 24 (15): 4219-4236. DOI:10. 1007/s11269-010-9654-4.
- [4] 卢玉东, 李佩成, 尹光志, 等. 潜水非稳定井流变边界渗流模型的解析解与数值解[J]. *西安石油大学学报(自然科学版)*, 2007, 22(2): 82-84, 88(LU Y D, LI P C, YI G Z, et al. Analytic and numerical solutions of variable boundary seepage model of the unstable well flow in underground water flow[J]. *Journal of Xi'an Shiyu University(Natural Science Edition)*, 2007(2): 82-84, 88(in Chinese)) DOI: 10. 3969/j. issn. 1673-064X. 2007. 02. 021.
- [5] 韩京龙, 黄丽丽, 刘春玲, 等. 数值法在磐石市地下水水源地保护区划分的应用[J]. *东北水利水电*, 2013, 31(1): 29-30, 36, 72(HAN J L, HUANG L L, LIU C L, et al. Application of numerical method in protection zones division of groundwater source area in Panshi City[J]. *Water Resources & Hydropower of Northeast China*, 2013, 31(1): 29-30, 36, 72 (in Chinese)) DOI: 10. 3969/j. issn. 1002-0624. 2013. 01. 012.
- [6] 肖杰, 钱骏, 赵红梅, 等. 基于 MODFLOW 数值模拟法的地下水饮用水源保护区划分[J]. *四川环境*, 2013, 32(5): 83-87(XIAO J, QIAN J, ZHAO H M, et al. Division of groundwater protection areas of drinking water based on MODFLOW numerical simulation[J]. *Sichuan Environment*, 2013, 32(5): 83-87. (in Chinese)) DOI: 10. 3969/j. issn. 1001-3644. 2013. 05. 016.
- [7] 薛禹群, 吴吉春. 地下水数值模拟在我国: 回顾与展望[J]. *水文地质工程地质*, 1997, 24(4): 21-24. (XUE Y Q, WU J C. Numerical simulation of groundwater in China-Retrospect and prospect[J]. *Hydrogeology & Engineering Geology*, 1997, 24(4): 21-24 (in Chinese))
- [8] ANDERSON M P, WOESSNER W W. Applied groundwater modeling: simulation of flow and advective transport[M]. London: Academic Press Limited, 1992: 209213. DOI:10. 1111/gwat. 12464.
- [9] 束龙仓, 王茂枚, 刘瑞国, 等. 地下水数值模拟中的参数灵敏度分析[J]. *河海大学学报(自然科学版)*, 2007, 35(5): 491-495. (SHU L C, WANG M S, LIU R G, et al. Sensitivity analysis of parameters in numerical simulation of groundwater[J]. *Journal of Hohai University(Natural Science Edition)*, 2007, 35(5): 491-495 (in Chinese))
- [10] SALTELLI A, ANDERES T. H, HOMMA T. Sensitivity analysis of model output: an investigation of new techniques[J]. *Comput Statist Data Anal*, 1993, 15(1): 211-238. DOI:10. 1016/0167-9473(93)90193-W
- [11] 束龙仓, 刘佩贵, 刘波, 等. 傍河水源地数学模型的参数灵敏度分析——以辽宁省北票市某傍河水源地为例[J]. *工程勘察*, 2006(8): 29-31. (SHU L C, LIU P G, LIU B, et al. Analysis on Sensitivity of Parameters of the Mathematical Model for Riverside Well Field[J]. *Geotechnical Investigation & Surveying*, 2006(8): 29-31 (in Chinese))
- [12] 邱清盈, 冯培恩. 基于灵敏度信息的优化结果分析技术[J]. *浙江大学学报(工学版)*, 2000, 34(6): 603-607 (QIU Q Y, FENG P E. Analysis techniques for optimal solution based on sensitivity information[J]. *Journal of Zhejiang University(Engineering Science)*, 2000, 34(6): 603-607 (in Chinese)) DOI:10. 3785/j. issn. 1008-973X. 2000. 06. 003.
- [13] ARRIOLA L, HYMAN J M. Sensitivity analysis for uncertainty quantification in mathematical models[M]. *Mathematical and Statistical Estimation Approaches in Epidemiology*. 2009.
- [14] CROSETTO M, TARANTOLA S. Uncertainty and sensitivity analysis: tools for GIS-based model implementation[J]. *International Journal of Geographical Information Systems*, 2001, 15(5): 23. DOI: 10. 1080/13658810110053125.
- [15] MORRIS M D. Factorial sampling plans for preliminary computational experiments[J]. *Technometrics*, 1991, 33(2): 161-174. DOI:10. 1080/00401706. 1991. 10484804.
- [16] MCKAY M D, BECKMAN R J, CONOVER W J. A comparison of three methods for selecting values of input variables in the analysis of output from a computer code[J]. *Technometrics*, 1979, 21(4): 239-245. DOI:10. 2307/1271432.
- [17] CUKIER R I, FORTUIN C M, SHULER K E, et al. Study of the sensitivity of coupled reaction systems to uncertainties in rate coefficients: I. Theory[J]. *J Chem Phys*, 1973, 59(3): 3873-3878. DOI:10. 1063/1. 1680571.
- [18] 刘波, 金爱兵, 高永涛, 等. 基于 Morris 法的单裂隙岩体温度场参数灵敏度分析[J]. *采矿与安全工程学报*, 2016, 33(1): 152-157(LIU B, JIN A B, GAO Y T, et al. Parameter sensitivity analysis of temperature field in single fracture rock mass based on Morris[J]. *Journal of Mining & Safety Engineering*, 2016, 33(1): 152-157. (in Chinese)) DOI: 10. 13545/j. cnki. jmse. 2016. 01. 024.
- [19] 李国敏, 徐海珍, 黎明, 等. 地下水源地保护区划分方法与应用[M]. 北京: 中国环境科学出版社, 2011. (LI G Z, XU H Z, LI M, et al. Classification and application of groundwater source protected areas[M]. Beijing China Environmental Science Press, 2011. (in Chinese))
- [20] 李建新, 唐登银. 生活饮用水地下水源地保护区的划定

- 方法——英国的经验值法与实例[J]. 地理科学进展, 1999, 18(2): 153-157 (LI J X, TANG D Y. Methods of delineation of groundwater protection zones—the experienced method in England and a practical xample[J]. Progress in Geography, 1999, 18(2): 153-157. (in Chinese)) DOI: 10. 11820/dlkxjz. 1999. 02. 008.
- [21] 王旭东, 殷宗泽, 宰金珉. 有限区域地下水非稳定流解析解[J]. 南京工业大学学报(自然科学版), 2008, 30(2): 45-50 (WANG X D, YIN Z Z, ZAI J M. Analytical solution of unsteady groundwater flow in limited areas[J]. Journal of Nanjing Tech University(Natural Science Edition), 2008, 30(2): 45-50 (in Chinese)) DOI: 10. 3969/j. issn. 1671-7627. 2008. 02. 011.
- [22] 郭辉. 乌苏县甘河水源地建设及运行经验[J]. 新疆水利, 1994(3): 44-46. (GUO H. Construction and operation experience of Ganhezi water source in Wusu County[J]. Xinjiang Water Resources, 1994(3): 44-46 (in Chinese))
- [23] 董合干, 王栋, 王迎涛, 等. 新疆石河子地区棉田地膜残留的时空分布特征[J]. 干旱区资源与环境, 2013, 27(9): 182-186. (DONG H G, WANG D, WANG Y T, et al. Spatial and temporal distribution characteristics of mulch residues in cotton field in Shihezi, Xinjiang[J]. Journal of Arid Land Resources and Environment, 2013, 27(9): 182-186. (in Chinese)) DOI: 10. 13448/j. cnki. jalre. 2013. 09. 021.
- [24] 贾新台, 李国正. 新疆维吾尔自治区石河子市推行棉花膜下滴灌情况的考察报告[J]. 河北水利, 2003(1): 44-45. (JIA X T, LI G Z. Investigation report on cotton drip irrigation under film in Shihezi City of Xinjiang Uygur Autonomous Region[J]. Hebei Water Resources, 2003(1): 44-45. (in Chinese))
- [25] 董新光, 邓铭江. 新疆地下水资源[M]. 乌鲁木齐: 新疆科学技术出版社, 2005. (DONG X G, DENG M J. Groundwater resources in Xinjiang[M]. Urumqi Xinjiang Science and Technology Publishing House, 2005. (in Chinese))
- [26] 徐中平, 周训, 崔相飞, 等. 岩溶区地下水数值模拟研究进展[J]. 中国岩溶, 2018, 37(4): 475-483. (XU Z P, ZHOU X, CUI X F, et al. Research advances of numerical simulation of groundwater in karst areas[J]. Carsologica Sinica, 2018, 37(4): 475-483. (in Chinese)) DOI: CNKI: SUN: ZGYR. 0. 2018-04-001.
- [27] 刘伟, 胡华敏. 数值模拟法在地下水环境影响评价中的应用[J]. 西部探矿工程, 2019, 31(1): 105-108. (LIU W, HU H M. Application of numerical simulation in environmental impact assessment of groundwater [J]. West-China Exploration Engineering, 2019, 31(1): 105-108. (in Chinese)) DOI: 10. 3969/j. issn. 1004-5716. 2019. 01. 037.
- [28] 王军进, 张洪伟, 张国珍, 等. 地下水数值模拟方法的研究与应用进展[J]. 环境与发展, 2018, 30(6): 103-104, 106 (WANG J J, ZHANG H W, ZHANG G Z, et al. Development and application of groundwater numerical simulation methods[J]. Environment and Development, 2018, 30(6): 103-104, 106. (in Chinese)) DOI: 10. 16647/j. cnki. cn15-1369/X. 2018. 06. 060.
- [29] 徐世俊. 基于 Visual Modflow 的太子河流域地下水流数值模拟分析[J]. 水利规划与设计, 2018(5): 127-131. (XU S J. Numerical simulation analysis of groundwater flow in Taizi River basin based on Visual Modflow[J]. Water Resources Planning and Design, 2018(5): 127-131. (in Chinese)) DOI: 10. 3969/j. issn. 1672-2469. 2018. 05. 037.