

引用格式:孙才志,陈雪姣,陈相涛.下辽河平原浅层地下水脆弱性评价[J].地球信息科学学报,2016,18(2):238-247. [Sun C Z, Chen X J, Chen X T. 2016. The assessment of shallow groundwater vulnerability in the lower reaches of Liaohe river plain. Journal of Geo-information Science, 18(2):238-247.] DOI:10.3724/SP.J.1047.2016.00238

下辽河平原浅层地下水脆弱性评价

孙才志,陈雪姣,陈相涛

辽宁师范大学城市与环境学院,大连 116029

The Assessment of Shallow Groundwater Vulnerability in the Lower Reaches of Liaohe River Plain

SUN Caizhi*, CHEN Xuejiao and CHEN Xiangtao

College of Urban and Environmental science, Liaoning Normal University, Dalian 116029, China

Abstract: Considering the limitations of DRASTIC model and the effect of uncertainties on the groundwater resource evaluation, combining with RS technology, a DRASTICL model based on fuzzy pattern recognition was established. The model was applied to assess the groundwater vulnerability in the lower reaches of Liaohe River Plain. The sub-watershed information was extracted by DEM using the hydrologic analysis tool of ArcGIS. According to the uncertainty characterization of the parameters, the stochastic and fuzzy parameters were simulated under different α -cuts of the triangular fuzzy parameters by Monte Carlo. According to the simulation under different α -cuts by the DRASTICL model based on the fuzzy pattern recognition and the cumulative distribution, the different groundwater vulnerable values under different α -cuts and percentiles were obtained. In order to analyze the groundwater uncertainty and vulnerability, the groundwater vulnerability distribution map under different α -cuts of the lower reaches of Liao River Plain was visualized by ArcGIS. Finally, the sensitivity analysis was used to identify the actual contribution of each parameter making to the simulation results. The results show that: (1) the fuzzy pattern recognition model generates a continuous vulnerability index and describes the groundwater vulnerability of contamination transit continuously from the easiest to the most difficult by the nonlinear form. (2) Adding the parameter of land use type could better reflect the groundwater vulnerability degree, which is higher in the paddy field area than in the dry land. (3) This study deals with the uncertainty issues of parameters effectively from three categories: different alpha levels, different percentiles, and different sensitivity coefficients. This article reflects the vulnerability degree of groundwater in different regions and under different possibilities and combines the subjectivity of decision makers with the objectivity of the actual hydrogeological condition for the research region, which has great significance to local groundwater development and protection.

Key words: the lower reaches of Liaohe River Plain; groundwater vulnerability; uncertainty; sensitivity coefficient

*Corresponding author: SUN Caizhi, E-mail: suncaizhi@lnnu.edu.cn

摘要: 以下辽河平原为研究对象,在DRASTIC模型基础上,结合RS技术建立了DRASTICL(DRASTIC land use type)模型。利用ArcGIS的水文分析工具对DEM影像进行子流域划分与数据提取。通过对参数进行不确定性表征,对三角模糊参数设定不同 α 截集,在此基础上将随机参数和模糊参数进行蒙特卡罗模拟。将不同 α 截集下模拟结果代入模糊模式识别模型,根据累积分布规律,选取不同百分位,从而得出不同 α 截集与不同百分位地下水脆弱性取值。结合ArcGIS数据可视化表达,得出不同 α 截集下下辽河平原浅层地下水脆弱性分布图,以此辨析下辽河平原浅层地下水不确定性与脆弱性程度。最后运用灵敏度分析辨别各参数对模拟结果的实际贡献程度。结果表明:(1)模糊模式识别模型用非线性的形式充分反映参数连续性变化对模拟结果产生的影响。(2)加入土地利用类型参数,结果更能反映人类活动影响地下水脆弱程度。(3)不同 α 水平、不同百分

收稿日期 2015-07-09;修回日期:2015-09-29.

基金项目 教育部高等学校学科点专项科研基金项目(20122136110003)。

作者简介 孙才志(1970-),男,博士后,教授,博士生导师,主要从事地下水资源评价与管理研究。

E-mail: suncaizhi@lnnu.edu.cn

位、与不同灵敏度系数3个层次的分析有效处理了参数不确定性问题,为制定相关政策提供更加准确的参考依据,对今后本地区的地下水环境开发利用和保护具有重要意义。

关键词: 下辽河平原;地下水脆弱性;不确定性;灵敏度系数

1 引言

近年来,随着人口增长迅速,工业化、城市化水平不断提高,对水资源的需求量不断增加。同时,粗放的经济发展方式以及不合理的开发利用地下水,导致地下水污染问题日益突出且污染类型多样,不仅对人类身体健康和经济社会发展造成严重危害,还使地下水资源面临严重危机^[1]。但是,水文地质条件的复杂性与地下水边界的不确定性使地下水监测复杂且成本较高。因此,对地下水脆弱性做出合理有效的评价是地下水资源保护的重要前提,也是地下水污染风险管理的重要环节。

“地下水脆弱性”一词,自1968年Margat首次提出以来,其概念、评价指标体系和研究方法一直在不断地丰富和完善^[2-3]。当前评价地下水脆弱性广泛采用的是1985年美国环境保护署提出的DRASTIC模型^[4]。结合GIS技术,DRASTIC模型已在许多国家和地区都取得了丰硕的研究成果^[5-7]。但是,DRASTIC模型在评价原理、方法与结果上均有不同程度的缺陷^[8],因此,众多学者在后续研究与应用中对此模型进行了不同程度的改进。在国外,Thirumalaivasan等^[9]以DRASTIC模型为基础,运用层次分析法确定各参数权重,并将DRASTIC模型中的参数根据研究区实际情况做出修改;Afshar等^[10-11]运用模糊数学理论对DRASTIC做出改进,并与传统DRASTIC模型的计算结果进行对比,结果显示模糊识别模型能以非线性的形式反映地下水脆弱性随参数变化的连续性,结果更加可靠。Al-Adamat等^[12]在评价过程中将DRASTIC模型中的水力传导系数剔除,在保留其余6个参数的基础上结合GIS技术,对约旦玄武岩地区进行了地下水脆弱性评价与风险分析。中国地下水脆弱性评价研究起于20世纪90年代,并且发展迅速。一方面利用DRASTIC模型对许多地区地下水脆弱性进行了评价^[13-15],另一方面对DRASTIC模型进行了改进。王国利等^[16]建立了多目标模糊识别模型,并且给出了描述含水层易污染性的习惯性语言;陈守煜等^[17]提出了确定指标权重的语气算子比较法;孟宪萌和束龙仓等^[18]将熵值法引入DRASTIC模型中提升了权重的合理性;孙才志等^[19]将蒙特卡罗法与 α 截集技

术结合有效处理了参数不确定性问题,评价结果更加符合客观实际;还有许多学者^[20-22]根据研究区地下水环境的固有属性,建立了相应指标体系与权重体系。

上述评价方法与模型的改进,拓展了地下水脆弱性研究的理论与实践,提升了评价结果的准确性与科学性。但仍存在一定不足,DRASTIC模型属于线性模型,同一级别内不同属性值评分相同,忽略了指值连续变化对地下水脆弱性的影响;地下水系统中存在诸多不确定性因素^[23],大部分学者都是用传统数学方法求得各地区参数均值,并未客观反映实际情况。因此,本文在DRASTIC模型基础上,建立了DRASTICL模型。首先,对参数进行不确定表征,对三角模糊参数设定不同 α 截集,在此基础上将随机参数和模糊参数进行蒙特卡罗模拟。其次,将不同 α 截集下模拟结果代入模糊模式识别模型,根据累积分布规律,选取不同百分位,从而得出不同 α 截集与不同百分位下地下水脆弱性取值,结合GIS数据可视化表达,得出不同 α 截集下辽河平原地下水脆弱性分布图,以此辨析下辽河平原地下水不确定性与脆弱性程度。最后,运用灵敏度分析辨别各参数对模拟结果的实际贡献程度。本研究进一步改进了DRASTIC模型,并且反映了由参数不确定性引起的评价结果的变化,用非线性方式更加精确地表达了参数连续变化对脆弱性指数产生的影响,对下辽河平原地区今后制定合理有效的地下水开发利用与保护措施具有重要意义。

2 研究区概况及研究方法

2.1 研究区概况

下辽河平原是辽宁省最大的冲击平原,位于辽宁省中南部,千山山脉以西,医巫闾山之东,铁岭-法库以南至渤海海滨。东西宽约120~140 km,南北长约240 km,面积约 $2.65 \times 10^4 \text{ km}^2$ 。地理坐标为东经 $121^\circ 03' \sim 123^\circ 50'$,北纬 $40^\circ 43' \sim 42^\circ 20'$ 之间(图1)。本区气候类型属于温带半湿润季风气候,多年平均气温 $7.1 \sim 8.9^\circ \text{C}$;多年平均降水量自东南向西北递减,由700~750 mm降至550 mm。该区作为区域沉降中心,地表水系受地形影响呈辐射状流经本区

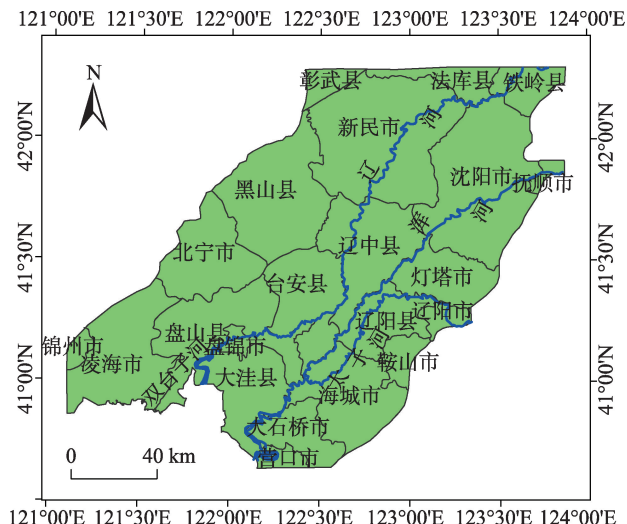


图1 下辽河平原地理位置图

Fig. 1 The geographic location map of the lower reaches of Liaohe River Plain

汇入辽东湾。地下水类型主要为孔隙水、孔隙裂隙层间水、裂隙溶洞水。行政区包括铁岭市、沈阳市、抚顺市、辽阳市、鞍山市、营口市、盘锦市、锦州市和阜新市9个城市的全部或部分区域,人口密度大,是辽宁省工农业生产核心区。地下水开发利用程度高,同时不合理的开发利用方式导致了海水倒灌、地下漏斗、地下水污染等一系列的生态环境问题。

2.2 流域单元划分

流域单元的划分能突出不同流域的异质性,是实现流域精细化管理的重要基础。它要求同一子流域单元应具有河流水文特征、自然地理条件等方面的一致性。在下辽河平原地下水脆弱性评价的过程中,进行流域单元划分是提升评价结果准确性的重要组合部分。

本文基于ArcGIS的水文分析模块(Hydrology),将分辨率为30 m的DEM数据,以试误法筛选适当门槛值提取水系。由于平原地区河流流动的随机性大,人工开挖的河流渠道改变了河流的自然分布状态,因此,由DEM所提取的流域自然水系与实际河网不相符合。由此采用主干河道和平原水系约束法解决这一问题,即对研究区主干河道和平原河网进行数字化。通过流域河网及拓扑关系的建立,利用ArcGIS中水文分析模块(Hydrology)进行小流域自动划分。但小流域过多会增加研究信息的冗余度,为此对小流域进行合并调整形成子流域,并以子流域作为研究的基本单元。初步形成1024个小流域,最后合并成68个子流域(图2)。

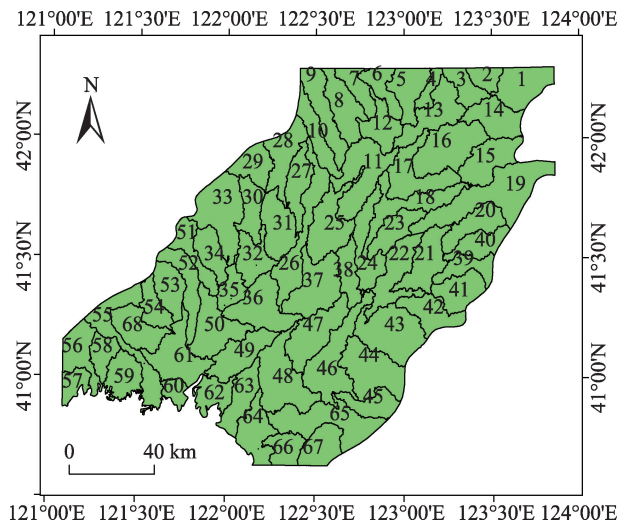


图2 下辽河平原流域分区图

Fig. 2 Watershed partition of the lower reaches of Liaohe River Plain

2.3 数据来源与指标体系的构建

2.3.1 数据来源

本文选取下辽河平原所跨市、县(区)的水文地质参数数据进行计算分析。数据来源于《辽宁省统计年鉴》、《辽宁省水资源公报》、《辽宁省国土资源地图集》、《辽宁国土资源》、《辽宁省水文地质图集》、《辽宁省水资源》、DEM提取数据以及多年监测点实测数据等资料。

土地利用类型数据以2013年8月的Landsat-8 TM影像为基础,参考国家土地利用一级分类标准及研究区实际的土地利用状况,利用ENVI 4.7软件将下辽河平原的土地利用类型划分为水田、旱地、林地、草地、水域、建设用地和未利用土地7种。最后,根据研究区的土地利用现状对分类后影像进行修正,得到2013年下辽河平原的土地利用分布图(图3)。

2.3.2 指标体系构建

地下水系统是一个复杂的自然和人类共同作用的开放系统,人类活动的强度直接影响地下水脆弱性的程度。因此,为反映人类活动对地下水脆弱性的影响,本研究在DRASTIC模型指标基础上添加了土地利用类型(L)指标,构成DRASTICL模型。DRASTIC模型是1985年由美国环境保护署提出,分别取7个参数的首字母为代表,D(地下水位埋深)、R(净补给量)、A(含水层介质类型)、S(土壤介质类型)、T(地形坡度)、I(渗流区介质类型)、C(含水层水力传导系数)。DRASTIC模型由3部分构成:指标分级、评分和权重。参照DRASTIC分级标

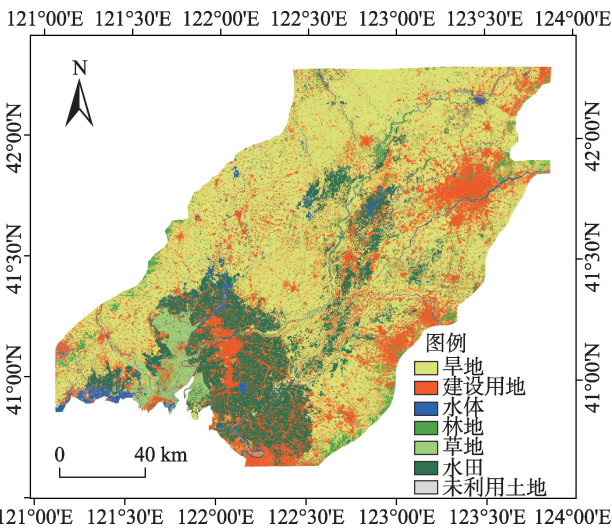


图3 下辽河平原土地利用类型

Fig.3 The land use type of the lower reaches of Liaohe River Plain

准对土地利用类型赋予不同的分值,得到 DRASTI-CL 模型分级与各指标评分值(表 1、2)。

2.4 研究方法

2.4.1 模糊模式识别

在 DRASTIC 模型中,样本指标根据数值范围被确定为不同的等级,即使不同数值,也有可能划分为同一等级。例如,地下水位埋深介于 4.6~9.1 m 之间(表 1),评分均为 7,不能反映地下水位埋深连续变化对评价结果的影响。地下水脆弱性评价可以视为含水层对易污染程度的识别问题,假设最难受到污染的含水层表示为 0,最易受污染的含水层表示为 1。根据表 1 和表 2 可以得到样本对易污染程度的二级模式标准特征值(表 3)。表 3 中 1 级表示最易受污染的含水层参数标准特征值,2 级表示最难受污染的含水层参数标准特征值。

设有 n 个待识别样本和 m 个指标特征值,则该样本集二级模糊模式识别模型为(式(1)):

$$u_{ij} = \left[1 + \frac{\sum_{i=1}^m (w_i r_{ij} - w_i)^2}{\sum_{i=1}^m (w_i r_{ij})^2} \right]^{-1} \tag{1}$$

表 1 地下水位埋深、净补给量、地形坡度、含水层水力传导系数分级与评分

Tab.1 The ranges and ratings for the depth to groundwater table, net recharge, topography and hydraulic conductivity

D(地下水位埋深)		R(净补给量)		T(地形坡度)		C(含水层水力传导系数)	
分级 / m	评分	分级 / mm	评分	分级 / (%)	评分	分级 / (m/d)	评分
0~1.5	10	0~51	1	<0.5	10	0~4.1	1
1.5~4.6	9	51~102	3	0.5~1	9	4.1~12.2	2
4.6~9.1	7	102~178	6	1~1.5	5	12.2~28.5	4
9.1~15.2	5	178~254	8	1.5~2	3	28.5~40.7	6
15.2~22.9	3	>254	9	>2	1	40.7~81.5	8
22.9~30.5	2					>81.5	10
>30.5	1						

表 2 含水层介质类型、土壤介质类型、渗流区介质类型、土地利用方式的分级与评分

Tab. 2 The ranges and ratings for the aquifer media, soil type, impact of vadose zone and land use type

A(含水层介质类型)		S(土壤介质类型)		I(渗流区介质类型)		L(土地利用方式)	
分类	评分	分类	评分	分类	评分	分类	评分
块状页岩	2	非胀缩或非凝聚性黏土	1	承压层	1	未利用	1
变质岩/火成岩	3	垃圾	2	粉砂/粘土	3	林地	3
风华变质岩/火成岩	4	粘土质亚黏土	3	变质岩/火成岩	4	草地	5
冰碛物	5	粉砂质亚黏土	4	灰岩	6	水域	6
层状砂岩、灰岩及页岩	6	亚黏土	5	砂岩	6	建筑	8
块状砂岩	6	砂质亚黏土	6	层状灰岩、页岩、砂岩	6	旱地	9
块状灰岩	6	胀缩或凝聚性黏土	7	含较多粉砂和粘土的砂砾	6	水田	10
砂砾石	8	泥炭	8	砂砾	8		
玄武岩	9	砂	9	玄武岩	9		
岩溶灰岩	10	薄层或裸露土壤、砾	10	岩溶灰岩	10		

表3 参数二级标准特征值

Tab. 3 Standard values of two levels with regard to each parameter

参数	D / m	R / mm	A	S	T / (%)	I	C / (m/d)	L
1级	0	254	10	10	0	10	81.5	10
2级	30.5	0	2	1	2	1	0	1

式中： u_{ij} 为地下水脆弱性指数； w_i 为指标权重； r_{ij} 为样本 j 指标 i 对最易污染的隶属度， $j=1,2,\cdots,n$ ， $i=1,2,\cdots,m$ 。具体计算过程见文献[11]。据此模型， $0\leq u_{ij}\leq 1$ ，且其值越大，表示样本 j 的脆弱性程度越高。

2.4.2 三角模糊数与 α 截集

设模糊变量 $\tilde{A}=(a_1,a_2,a_3)$ ，设 a_1,a_2 和 a_3 分别为模糊变量 \tilde{A} 的最小值、最可能值和最大值，且 $a_1<a_2<a_3$ ，则定义 $\tilde{A}=(a_1,a_2,a_3)$ 为三角模糊变量，其隶属函数可表示为式(2)^[24]。

$$(\mu_{\tilde{A}})=\begin{cases} (x-a_1)/(a_3-a_1), & a_1\leq x\leq a_2 \\ (a_3-x)/(a_3-a_2), & a_2\leq x\leq a_3 \\ 0, & x<a_1\text{或}x>a_3 \end{cases} \quad (2)$$

式中： x 为区间 $[a_1,a_3]$ 中的可能变量。在地下水脆弱性评价中，各参数具有非负性，即 $a_1>0$ ，则 \tilde{A} 为正三角模糊函数。

由于隶属函数区间的大小，代表了不同的可信度水平。设 α 为可信度水平， $\alpha\in[0,1]$ ，则模糊函数 \tilde{A} 可以转化为不同 α 水平下的区间数(式(3))。

$$\tilde{A}^\alpha=[a_1^\alpha,a_2^\alpha]=[(a_2-a_1)\alpha+a_1, -(a_3-a_2)\alpha+a_3] \quad (3)$$

式中： \tilde{A}^α 即为三角模糊数的 α 截集。 α 越大可信度水平越高，隶属区间越小，三角模糊数不确定程度越低。当 $\alpha=1$ 时，则模糊变量即为确定的最可能的值。

2.4.3 确定权重

如何给各指标赋予合理的权重是模糊综合评价中的关键^[25]。在 DRASTIC 模型中，各指标的权重为定值，并不能反映不同研究区实际指标对地下水脆弱性的贡献程度，评价结果缺乏客观性^[26]。鉴此，本文将层次分析法与熵值法相结合，通过层次分析法求出主观权重 α_i ，熵值法求出客观权重 β_i ，在此基础上求出复合权重 ω_i 。由于层次分析法比较常用在此不再赘述。熵最初是一个热力学概念，由德国物理学家 R. C. Lausius 在 1865 年提出，美国工程师 C. E. Shannon 在 1948 年将其首次引入信息论中^[27]。在信息论中，某项指标熵值越大表示信息的无序化程度越高，对决策的贡献度越大，从而权

重也越大。近年来熵已经在模糊数学领域广泛应用，在多目标模糊综合评价中起着关键作用。有关熵权的计算方法见参考文献[28]。

复合权重确定公式如式(4)所示。

$$\omega_i=\frac{\alpha_i\beta_i}{\sum_{i=1}^m\alpha_i\beta_i} \quad (4)$$

式中： m 为指标个数。权重计算结果见表 4。

表4 各参数权重

Tab. 4 Weights for each parameter

参数	D / m	R / mm	A	S	T / (%)	I	C / (m/d)	L
α_i	0.246	0.153	0.053	0.089	0.035	0.246	0.089	0.089
β_i	0.126	0.151	0.036	0.033	0.135	0.132	0.115	0.272
ω_i	0.237	0.177	0.015	0.023	0.036	0.249	0.078	0.185

3 下辽河平原地下水脆弱性评价结果与分析

3.1 参数不确定表征

地下水系统是个多变量相关的系统，具有众多不确定性因素。目前，地下水系统不确定性主要分为随机性、模糊性和灰色性^[29]。本次研究根据各参数不确定性特点，将参数分为随机性参数、模糊性参数与确定性参数。

(1)随机性参数。埋深(D)、坡度(T)、含水层水力传导系数(C)，这3类参数值大多通过勘探实验获得，监测结果往往随时间地点的不同而不同，具有明显的随机性。研究表明，一个变量如果受大量微小的、独立的、随机因素的影响，那么这个变量一般是一个正态变量^[30]。地下水埋深受水文地质条件、土壤、地质构造、地形坡度、开采量与补给量等多种因素的影响，因此可将其视为正态分布；由于研究区以平原为主，山地较少，地形起伏不大，因此可将地形坡度(T)视为均匀分布；为降低误差，在参考以往研究成果^[31]的基础上，可将含水层水力传导系数设为对数正态分布。表5中列出各随机性指标的分布特征，限于篇幅，对参考文献^[19]中下辽河平原水文地质分区，各流域选取一个代表性子流域单元为例，其他分区类似。

(2)模糊性参数。模糊性参数包括含水层介质类型(A)、土壤介质类型(S)、渗流区介质类型(I)以及土地利用类型(L)。这4个参数在一定范围内分布具有连续性，但是在整个流域内又具有过渡性，这种在中介过渡时表现的亦此亦彼性即可视为模

糊性。为方便随机模拟,根据表2中的分级评分标准将各个分区内 A 、 S 、 I 、 L 的分布特征进行三角模糊化处理,每个分区可得到各参数脆弱性等级评分的平均值 a 。最小值 a_1 、最可能值 a_2 、最大值 a_3 和标准差 s (表5)。

表5 参数的不确定性表征

Tab. 5 The uncertainty characterization of parameters

参数不确定性分布特征值								
参数	不确定类型/ 分布特征	评分 值	2	11	19	28	42	61
D/m	随机性/ 正态分布	a	5.625	5	7.222	5.679	10.418	3
		s	2.642	1.146	5.553	3.206	6.491	0.935
R/mm	确定值	a	40	150	355	150	285	200
A	模糊性/ 三角分布	a_1	7	7	6	7	5	5
		a_2	8	8	8	8	8	6
		a_3	9	9	9	9	9	7
S	模糊性/ 三角分布	a_1	3	3	3	3	3	4
		a_2	5	5	5	5	5	5
		a_3	10	10	9	10	10	10
$T/(%)$	随机性/ 均匀分布	a	0.381	0.532	1.417	0.626	1.670	0.358
		s	0.215	0.396	1.573	0.561	2.820	0.197
I	模糊性/ 三角分布	a_1	1	1	1	1	1	1
		a_2	3	1	1	3	1	6
		a_3	10	8	10	10	10	8
$C/(m/d)$	随机性/对数 正态分布	a	3.067	3.410	3.888	3.279	3.131	3.614
		s	0.448	0.117	0.485	0.282	0.784	0.435
L	模糊性/ 三角分布	a_1	1	1	1	1	1	3
		a_2	9	9	8	9	8	5
		a_3	10	10	10	10	10	10

(3)确定性参数。净补给量(R)数据由于其观测点少,观测周期长,一般取区域内入渗量的年平均数,因此可将其视为确定性参数。

3.2 不确定性分析与脆弱性评价

模糊性参数与随机性参数一起进行蒙特卡罗模拟赋值,设定模拟次数5000次。将不同 α 截集下的模拟结果代入式(1),设定脆弱性值由小到大排列,则在每个 α 截集下得出5000个脆弱性值。为保证结果的可靠性,以及为决策者提供评价依据,将不同 α 截集下脆弱性值依次累积,累积百分位越大,则脆弱性取值越大,当累积率为百分之百时,相应脆弱性指数则为最大值。根据累积分布规律,得出不同 α 截集与不同百分位下的地下水脆弱性指数。表6为所选分区不同 α 截集、不同百分位下地下水脆弱性指数。

表6 所选分区不同可能性水平、不同百分位下地下水脆弱性指数

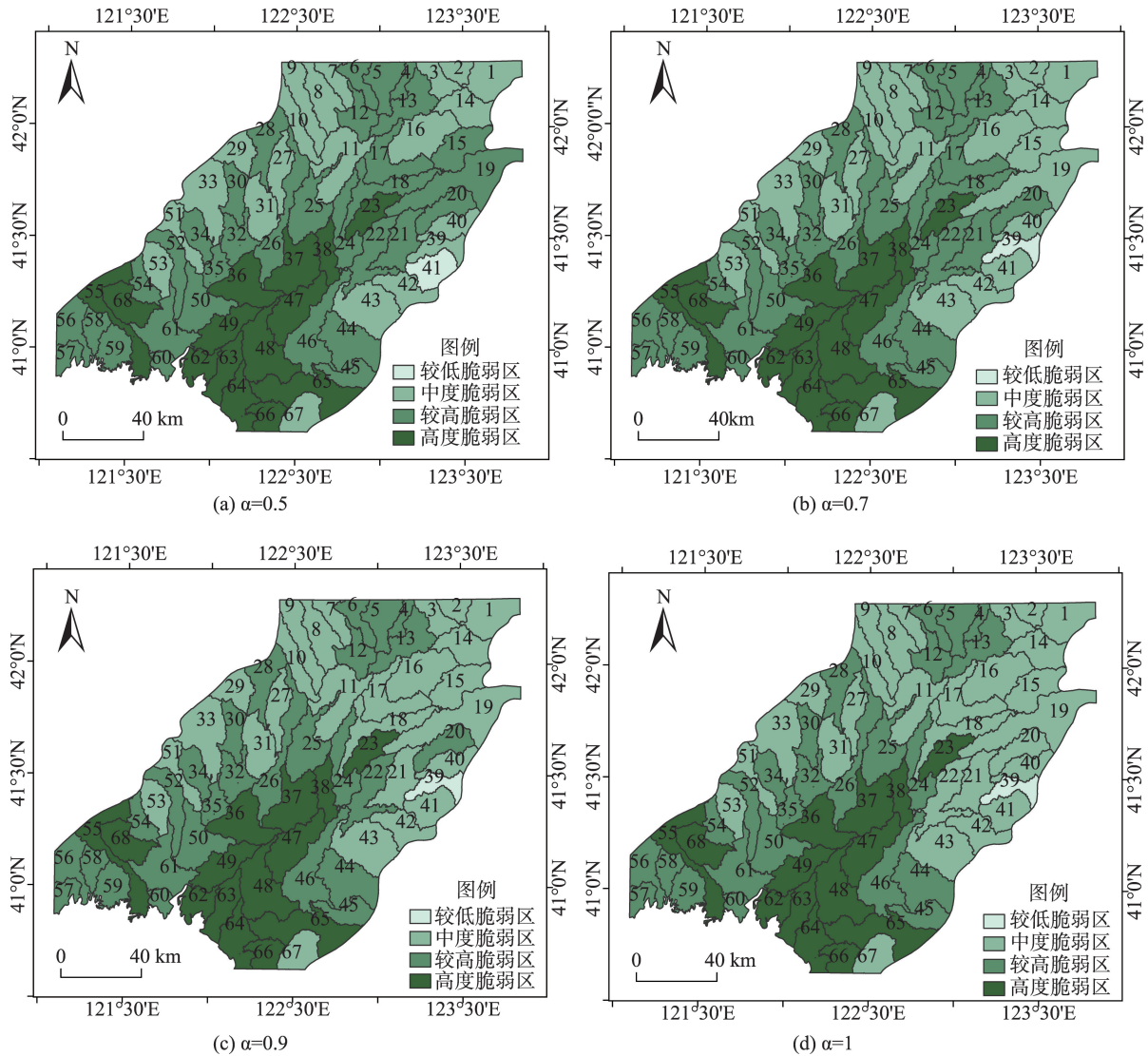
Tab. 6 The groundwater vulnerability index of the selected district with different probability levels and percentiles

可信度 水平 α	百分位 /(%)	2	11	19	28	42	61
0.5	50	0.540	0.566	0.618	0.652	0.571	0.771
	75	0.590	0.615	0.679	0.731	0.634	0.811
	95	0.660	0.681	0.782	0.792	0.738	0.860
0.7	50	0.514	0.543	0.611	0.625	0.539	0.768
	75	0.554	0.571	0.649	0.666	0.594	0.794
	95	0.608	0.614	0.717	0.752	0.678	0.830
0.9	50	0.502	0.528	0.589	0.608	0.523	0.763
	75	0.530	0.541	0.628	0.637	0.576	0.779
	95	0.570	0.560	0.664	0.675	0.626	0.799
1	50	0.515	0.524	0.582	0.620	0.517	0.779
	75	0.538	0.534	0.615	0.649	0.561	0.788
	95	0.565	0.544	0.649	0.672	0.610	0.800

为比较不同 α 水平下的下辽河地下水脆弱性分布状况,分别选取当 $\alpha=0.5$ 、 $\alpha=0.7$ 、 $\alpha=0.9$ 、 $\alpha=1$ 时的模拟结果平均值代表不同地区的脆弱性指数,运用ArcGIS数据可视化功能,对模拟结果进行可视化表达,从而获得下辽河平原不同 α 截集地下水脆弱性分布图(图4)。根据对最易污染的隶属程度,将模拟结果划分为不同脆弱程度,分别为:低脆弱区[0-0.2]、较低脆弱区(0.2-0.4]、中度脆弱区(0.4-0.6]、较高脆弱区(0.6-0.8]、高度脆弱区(0.8-1]。

通过模糊模式识别模型与 α 截集相结合,各分区脆弱性指数在不同 α 截集下,以非线性形式在0-1之间连续分布,越接近1则脆弱性程度越大。由表6可看出,同一 α 截集下,百分位越大,脆弱性程度越高,因此地下水污染态势比较严峻的地区应选取较大的百分位。例如,表6中分区61和分区19的脆弱性程度相对较高,因此,在实际制定相应对策时,选取较大百分位情况下评价结果更加合理。

根据表6可知,随着 α 的增大,脆弱性指数变化范围变小,说明三角模糊数的区间也越来越小,不确定程度变低。当 $\alpha=1$ 时,三角模糊数即为最可能值,此时只考虑随机因素对脆弱性的影响。不同地区,在同一 α 截集不同百分位下,与同一百分位不同 α 截集下,脆弱性指数的变化幅度不同,变化幅度较大的地区不确定性程度较高。因此,不确定性程度较大的地区评价地下水脆弱性应选取较低的 α 截集。例如,通过对比表6中各分区不同 α 截集与不同百分位下脆弱性指数变化幅度,可知分区19不确定程度较高,在实际工作中选取 $\alpha=0.5$ 更科学。

图4 下辽河平原不同 α 截集地下水脆弱性分布图Fig. 4 The groundwater vulnerability distribution map under different α cuts of the lower reaches of Liaohe River Plain

从图4可看出,地下水脆弱性程度整体上随着 α 的增大而变小;高度脆弱区主要分布在中部台安平原、南部滨海平原和大小凌河冲击扇地区。从图3可知,上述地区土地利用类型以水田为主,是辽宁省重要的水稻生产基地。水田比旱田粮食产量高的同时,化肥农药的渗透量也相应增加,对水环境的污染较之旱地更为严重。南部滨海平原地区地下水埋藏较浅,多数在1~2 m之间,局部地区甚至小于1 m,对外界污染物反应较为敏感。大小凌河冲击扇地区,含水层岩性多为砾石、粗砂,渗透系数较大,外界污染物运移速度快,脆弱性高。台安平原位于下辽河平原中部,地势低洼,地下水位埋深小于3 m,污染物容易在此聚集。较低脆弱区主要分布在东部太子河冲击扇部分地区,该区地形坡度

较大,降水渗透量较小。在 $\alpha=0.5$ 水平上,较高脆弱区范围较广,主要分布在下辽河平原两侧山前冲击平原地区;中度脆弱区分布在山前冲击平原两侧辽河冲击扇地区;在 $\alpha=0.7$ 水平上,高脆弱区分布与 $\alpha=0.5$ 水平上分布一致,较高脆弱区在浑河冲击扇地区转为中度脆弱区,范围缩小;在 $\alpha=0.9$ 与 $\alpha=1$ 水平上较高脆弱区范围在中部与东部冲积平原区进一步缩小,脆弱性程度降低。

通过结合表6可知,与高脆弱区相比,中度脆弱区的东北部和西北部山前冲积平原区高度脆弱区、及高度脆弱区两侧的地下水脆弱性指数在不同 α 水平情况下变化幅度较小,说明上述地区不确定性程度低,相应选取 $\alpha=0.9$ 更合理。同时,高度脆弱区、较高脆弱区和较低脆弱区分别选取95%、75%和

50%百分位下地下水脆弱性值,更加符合实际情况。东部浑河冲积扇地区,不确定程度较大,脆弱性程度由较高脆弱度到较低脆弱度变化,因此,选取 $\alpha=0.5$ 、75%百分位。根据当地脆弱性程度与不确定程度来选择相应 α 水平与百分位,评价结果更科学合理。

3.3 灵敏度分析

虽然将不确定性参数进行随机模拟可以获得较为接近实际水文地质条件的数据,但是由于不同参数对模拟结果的贡献程度不同,为分清主次参数,进一步提高脆弱性评价的精确性,为今后实际工作提供参考,需对以上参数进行灵敏度分析。本文运用局部灵敏度分析中的因子变换法,按照子流域,对模型中的各参数逐一进行了灵敏度分析,并求得子流域的平均值。具体计算方法参考文献[32]、[33]。随机参数 D 、 T 、 C ,灵敏度分析初始值选取区域内观测点的平均值;三角模糊性参数 A 、 S 、 I 、 L 初始值选取最可能值;各参数的变化幅度分别为增大和减小10%;分析其中一个参数时,其他参数保持不变。表7为参数分别增大和减小10%的灵敏度分析结果。

表7 参数灵敏度系数

Tab. 7 Sensitivity coefficient of the parameters

参数	D / m	R / mm	A	S	T / (%)	I	C / (m/d)	L
增大10%	0.133	0.087	0.003	0.004	0.006	0.209	0.035	0.356
减小10%	0.131	0.088	0.003	0.004	0.006	0.169	0.035	0.385

从表7可看出,各参数的灵敏度系数绝对值由大到小的排序为 $L>D>I>R>T>S>C>A$ 。较之各参数权重,参数 L 的影响变大,说明模拟结果对三角模糊参数中土地利用类型的变化最灵敏,表明了人类对地下水环境的影响比较剧烈,而其余影响顺序基本一致。因此,在今后的土地利用规划中要结合当地的实际水文地质状况,注意保护地下水环境。

4 结论

本文在下辽河平原流域分区的基础上,建立了DRASTICL模型,将蒙特卡罗法和三角模糊的 α 截集技术相结合,最终将模拟数据代入模糊模式识别模型,通过以上计算,可以得出以下结论:

(1)运用复合权重法,将层次分析法的主观赋权与熵权法的客观赋权相结合,使权重更加符合研

究区实际情况。模糊模式识别模型用非线性的形式充分反映参数连续性变化对模拟结果产生的影响,将评价结果区间定义在[0-1]之间,越接近1脆弱程度越高,更加符合描述习惯,便于决策者根据易污染的程度制定相应政策。

(2)通过将土地利用类型与DRASTIC模型相结合,在原有本质脆弱性参数的基础上加入了人为影响因子,特别是下辽河平原是东北重要的水稻生产基地,而水田较早地对地下水环境的污染更为严重。通过加入这一参数,得出的评价结果更符合人类活动影响下的地下水脆弱性。

(3)本研究结果具有3个层次:不同 α 水平、不同百分位与不同灵敏度系数。有效处理了参数不确定性问题,可反映不同地区地下水脆弱性程度。为管理者制定决策提供了更多更准确的参考依据,对今后本地区的地下水环境开发利用和保护有重要意义。

(4)本研究虽然用现有的数据模拟出了精确的结果,但数据获取仍有一定的局限性,例如,获取的地下水数据信息的时空局限性、土地利用类型的时空变异性,都使得数据信息精确性和代表性不够强。此外,研究者知识的局限性也对模拟结果产生影响。

参考文献(References):

- [1] 王琼,谭秀益,陈峻峰,等.中国地下水污染现状分析及研究进展[J].环境科学与管理,2012,37(z1):52-56. [Wang Q, Tan X Y, Chen J F, et al. Current situation and research progress of groundwater pollution in China[J]. Environmental Science and Management, 2012,37(z1):52-56.]
- [2] 孙才志,潘俊.地下水脆弱性的概念、评价方法与研究前景[J].水科学进展,1999(4):444-449. [Sun C Z, Pan J. Concept and assessment of groundwater vulnerability and its future prospect[J]. Advances in Water Science, 1999,4: 444-449.]
- [3] 张昕,蒋晓东,张龙.地下水脆弱性评价方法与研究进展[J].地质与资源,2010(3):253-258. [Zhang X, Jiang X D, Zhang L. Methods and research progress of groundwater vulnerability assessment[J]. Geology and Resources, 2010, 3:253-258.]
- [4] Aller L, Bennet T, Lehr J H, et al. DRASTIC: A standardized system for evaluating ground water pollution potential using hydrogeological settings[M]. Oklahoma: U. S. Environmental Protection Agency, 1987.
- [5] Insaf S B, Mohamed M A, Hiyama T, et al. A GIS-based

- DRASTIC model for assessing aquifer vulnerability in Kakamigahara Heights, Gifu Prefecture, central Japan[J]. *Science of the Total Environment*, 2005,345:127-140.
- [6] Hamza M H, Added A, Rodrlguez R, *et al.* A GIS-based DRASTIC vulnerability and net recharge reassessment in an aquifer of a semiarid region[J]. *Journal of Environmental Management*, 2007,84:2-19.
- [7] Lynch S D, Reynder S G, Schulze R E. A DRASTIC approach to groundwater vulnerability in South Africa[J]. *South Africa Journal of Science*, 1997,93(2):59-65.
- [8] 鄂建,孙爱荣,钟新永,等.DRASTIC模型的缺陷与改进方法探讨[J]. *水文地质工程地质*, 2010,37(1):102-107. [E J, Sun A R, Zhong X Y. Inadequacies of DRASTIC model and discussion of improvement[J]. *Hydrogeology and Engineering Geology*, 2010,37(1):102-107.]
- [9] Thirumalaivasan D, Karmegam M, Venugopal K. AHP-DRASTIC: Software for specific aquifer vulnerability assessment using DRASTIC model and GIS[J]. *Environmental Modelling & Software*, 2003,18:645-656.
- [10] Afshar A, Marino M A, Ebtehaj M, *et al.* Rule-based fuzzy system for assessing groundwater vulnerability[J]. *Journal of Environmental Engineering ASCE*, 2007,133(5):532-540.
- [11] Pathak D R, Hiratsuka A. An integrated GIS based fuzzy pattern recognition model to compute groundwater vulnerability index for decision making[J]. *Journal of Hydro-environment Research*, 2010,51:63-77.
- [12] Al-Adamat R A N, Foster I D L, Baban S M J. Groundwater vulnerability and risk mapping for the basaltic aquifer of the Azraq basin of Jordan using GIS, remote sensing and DRASTIC[J]. *Applied Geography*, 2003,23:303-324.
- [13] 杨庆,栾茂田,崇金著,等.DRASTIC指标体系法在大连市地下水易污性评价中的应用[J]. *大连理工大学学报*, 1999(5):684-688. [Yang Q, Luan M T, Chong J Z, *et al.* Study of application of DRASTIC index to assessment of groundwater vulnerability to pollution of Dalian city[J]. *Journal of Dalian University of Technology*, 1999,5:684-688.]
- [14] 张泰丽,冯小铭,刘红樱,等.DRASTIC评价模型在台州市浅层地下水脆弱性评价中的应用[J]. *资源调查与环境*, 2007(2):138-144. [Zhang T L, Feng X M, Liu H Y, *et al.* Application of DRASTIC model to groundwater vulnerability assessment in Taizhou plain area[J]. *Resources Survey and Environment*, 2007,2:138-144.]
- [15] 李辉,何江涛,陈鸿汉.应用DRASTIC模型评价湛江市浅层地下水脆弱性[J]. *广东水利水电*, 2007(1):48-52. [Li H, He J T, Chen H G. Assessment of shallow groundwater vulnerability in Zhanjiang city by using DRASTIC Model[J]. *Guangdong Water Resources and Hydropower*, 2007,1:48-52.]
- [16] 王国利,周惠成,杨庆.基于DRASTIC的地下水易污染性多目标模糊模式识别模型[J]. *水科学进展*, 2000(2):173-179. [Wang G L, Zhou H C, Yang Q. A multi-objective fuzzy pattern recognition model for assessing groundwater vulnerability based on the DRASTIC system[J]. *Advances in Water Science*, 2000,2:173-179.]
- [17] 陈守煜,伏广涛,周惠成,等.含水层脆弱性模糊分析评价模型与方法[J]. *水利学报*, 2002(7):23-30. [Chen S Y, Fu G T, Zhou H C, *et al.* Fuzzy analysis model and methodology for aquifer vulnerability evaluation[J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2002,7:23-30.]
- [18] 孟宪萌,束龙仓,卢耀如.基于熵权的改进DRASTIC模型在地下水脆弱性评价中的应用[J]. *水利学报*, 2007,38(1):94-99. [Meng X M, Shu L C, Lu Y R. Modified DRASTIC model for groundwater vulnerability assessment based on entropy weight[J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2007,38(1):94-99.]
- [19] 孙才志,奚旭.不确定条件下的下辽河平原地下水本质脆弱性评价[J]. *水利水电科技进展*, 2014(5):1-7. [Sun C Z, Xi X. Assessment of groundwater intrinsic vulnerability in the lower reaches of Liaohe River Plain under uncertain conditions[J]. *Advances in Science and Technology of Water Resources*, 2014,5:1-7.]
- [20] 雷静,张思聪.唐山市平原区地下水脆弱性评价研究[J]. *环境科学学报*, 2003,23(1):94-99. [Lei J, Zhang S C. Study on the groundwater vulnerability assessment in Tangshan plain area[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2003,23(1):94-99.]
- [21] 马金珠,高前兆.干旱区地下水脆弱性特征及评价方法探讨[J]. *干旱区地理*, 2003,26(1):44-49. [Ma J Z, Gao Q Z. Groundwater vulnerability and its assessing method in the arid land of NW China[J]. *Arid Land Geography*, 2003,26(1):44-49.]
- [22] 孙才志,左海军,栾天新,等.下辽河平原地下水脆弱性研究[J]. *吉林大学学报(地球科学版)*, 2007,37(5):943-948. [Sun C Z, Zuo H J, Luan T X, *et al.* Research on groundwater vulnerability assessment of the lower Liaohe River Plain[J]. *Journal of Jilin University: Earth Science Edition*, 2007,37(5):943-948.]
- [23] 束龙仓,朱元生.地下水资源评价中的不确定性因素分析[J]. *水文地质工程地质*, 2000,27(6):6-8. [Shu L C, Zhu Y S. The analysis of uncertainty in the evaluation of groundwater resources[J]. *Hydrogeology and Engineering Geology*, 2000,27(6):6-8.]
- [24] Ronald E G, Robert E Y. A parametric representation of fuzzy numbers and their arithmetic operators[J]. *Fuzzy Sets and Systems*, 1997,91(2):185-202.

- [25] 金菊良,魏一鸣,丁晶,等.基于改进层次分析法的模糊综合评价模型[J].水利学报,2004(3):65-70. [Jin J L, Wei Y M, Ding J, *et al.* Fuzzy comprehensive evaluation model based on improved analytic hierarchy process[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2004,3:65-70.]
- [26] 李绍飞,王勇,毛慧慧,等.一种改进的DRASTIC模型及其在地下水脆弱性评价中的应用[J].数学的实践与认识,2010,40(9):68-75. [Li S F, Wang Y, Mao H H, *et al.* A modified DRASTIC model and its application on assessment of groundwater vulnerability[J]. Mathematics in Practice and Theory, 2010,40(9):68-75.]
- [27] 邹志红,孙靖南,任广平,等.模糊评价因子的熵权法赋权及其在水质评价中的应用[J].环境科学学报,2005,25(4):552-556. [Zou Z H, Sun J N, Ren G P, *et al.* Study and application on the entropy method for determination of weight of evaluating indicators in fuzzy synthetic evaluation for water quality assessment[J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2005,25(4):552-556.]
- [28] 罗军刚,解建仓,阮本清,等.基于熵权的水资源短缺风险模糊综合评价模型及应用[J].水利学报,2008,39(9):1092-1097. [Luo J G, Xie J C, Ruan B Q, *et al.* Fuzzy comprehensive assessment model for water shortage risk based on entropy weight[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2008,39(9):1092-1097.]
- [29] 王文圣,张翔,金菊良,等.水文学不确定性分析方法[M].北京:科学出版社,2011. [Wang W S, Zhang X, Jin J L, *et al.* Uncertainty analysis method of hydrology[M]. Beijing: Science Publishing, 2011.]
- [30] 黄振平.水文统计学[M].南京:河海大学出版社,2003. [Huang Z P. Hydrology statistics[M]. Hohai University Publishing, 2003.]
- [31] 陈彦,吴吉春.含水层渗透系数空间变异性对地下水数值模拟的影响[J].水科学进展,2005,16(4):482-487. [Chen Y, Wu J C. Effect of the spatial variability of hydraulic conductivity in aquifer on the numerical simulation of groundwater[J]. Advances in Water Science, 2005,16(4):482-487.]
- [32] 束龙仓,朱元生,孙庆义,等.地下水允许开采量确定的风险分析[J].水利学报,2000(3):77-80. [Shu L C, Zhu Y S, Sun Q Y, *et al.* Risk analysis of groundwater allowable withdrawal evaluation[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2000,3:77-80.]
- [33] 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 M, Liu R G, *et al.* Sensitivity analysis of parameters in numerical simulation of groundwater[J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2007,35(5):491-495.]