

奚旭,张新长,孙才志,等.不确定性条件下的下辽河平原地下水脆弱性评价及空间分布软区划[J].地理科学,2017,37(9):1-9.[Xi Xu, Zhang Xinchang, Sun Caizhi et al. Assessment and Soft Zoning of Groundwater Vulnerability in the Lower Reach of the Liaohe River Plain Under Uncertainty Condition. Scientia Geographica Sinica, 2017, 37(9): 1-9.] doi: 10.13249/j.cnki.sgs.2017.09.017

不确定性条件下的下辽河平原地下水脆弱性评价及空间分布软区划

奚旭¹,张新长¹,孙才志²,鲍建腾³

(1.中山大学地理科学与规划学院,广东广州 510275;2.辽宁师范大学城市与环境学院,辽宁大连 116029;3.江苏省水利厅,江苏南京 210029)

摘要:建立地下水脆弱性评价的DRASTIC模型,辨析各个参数的不确定性特征,采用随机模拟方法同时对随机性参数和模糊性参数模拟赋值。分别对模糊性参数和脆弱性指数统计值设立具有概率分布意义的置信水平和百分位,得到多重地下水脆弱性的指数区间,在此基础上,分别绘制地下水脆弱性的保守分布图和冒险分布图,并对研究区地下水脆弱性分布状况进行分析。结果表明:①以模糊区间形式表示的地下水脆弱性评价结果,能反映多种不确定因素综合影响下的地下水脆弱性客观实际情况,可提供更多可靠性方面的信息;②以软区划方式制作地下水脆弱性分布图,保留了不确定性客观存在的事实,可给予决策者更多参考信息和调整余地;③地下水脆弱性软区划分布图显示:保守分布的脆弱性程度总体要高于冒险分布,置信水平选择越高,冒险分布与保守分布的空间分布差异越接近,且与最大可能性分布情况越接近;④研究区地下水脆弱性分布具有明显的空间集聚现象,地下水高脆弱性区域主要集聚在下辽河平原中部和南部地区,低脆弱性区域一般分布在下辽河平原东、西两侧地区。

关键词:下辽河平原;地下水脆弱性;不确定性;置信水平;软区划

中图分类号:TV 211.1+2 **文献标识码:**A **文章编号:**1000-0690(2017)09-10

受城市化、工业、农业、矿业等活动的影响,世界各国各地区普遍面临不同程度的地下水环境污染与破坏问题,从而对生态环境以及人们的生产生活造成巨大损失。地下水脆弱性研究作为地下水污染防治的基础工作由此展开,成为近年来水文地质领域的热点研究方向。

自1968年Margat首次提出地下水脆弱性这个概念以来,其概念与研究方法不断得到丰富与发展^[1,2],通过对地下水脆弱性的计算分析,可识别出研究区地下水易污染的高风险区,为人们提供地下水污染治理或土地规划利用的决策依据^[3]。地下水系统是个非常复杂的综合体,存在诸多不确定性因素,如何在不确定性因素影响下尽可能精确地获取地下水脆弱性评价结果一直是研究重点。在国外,诸多学者利用实测氮元素资料对

DRASTIC模型的计算结果进行了校正,确保结果的合理性^[4-6];根据各参数深度建立地下水脆弱性的三维分布图^[7],多模型运用分析人为因素和自然因素^[8]的影响使结果更接近实际情况等。中国学者在国外研究基础上,分析了DRASTIC模型的不足之处,从理论上丰富并改进了评价方法^[9-11],如模糊集与信息熵理论的引入,丰富了DRASTIC指标权重确定的理论依据不足^[12,13];敏感性分析的运用遴选了主要影响因子^[14];空间分异规律的分析则探讨了形成机理^[15]。

由以上成果可知,目前大多数研究侧重提高评价精度和方法科学性。然而不确定性因素是客观存在的,地下水系统内部结构的不均一性以及外部影响因素的复杂性决定了地下水脆弱性分布的不稳定性^[16],因此,传统方法下取参数均值得到

收稿日期:2016-09-01;**修订日期:**2017-06-07

基金项目:国家自然科学基金项目(41431178,41671453)、广东省自然科学基金项目(2016A030311016)资助。[Foundation: National Natural Sciences Foundation of China (41431178, 41671453), Natural Sciences Foundation of Guangdong Province (2016A030311016).]

作者简介:奚旭(1990-),江苏溧阳人,博士研究生,主要从事水资源评价与GIS应用研究。E-mail: xixu2013@163.com

区域地下水脆弱性的唯一值及唯一硬性区划是具有局限性的。鉴于此,本次研究运用软计算^[17]思想对下辽河平原进行地下水脆弱性研究。在流域分区基础上,通过建立 DRASTICH 模型对各分区进行地下水脆弱性评价,评价过程中通过蒙特卡洛法随机模拟各类不确定性参数值,设定具有概率分布意义的模糊参数置信水平和区域污染潜势的脆弱性指数的百分位,得到不同置信水平、不同百分位下的脆弱性指数区间。在此基础上绘制地下水脆弱性的冒险分布图和保守分布图,并对研究区地下水脆弱性的空间分布状况进行分析。研究成果可提供更多不确定性信息与可靠性信息,能为决策者在制定管理方案时提供调节余地,提高决策的科学性与有效性。

下辽河平原是辽宁省最重要的工农业生产基地和经济发展中心,同时也是东北地区最缺水、水资源供需矛盾最具有代表性和典型性的地区^[18],目前地下水资源在该区的总供水量中一直占65%左右,过度开发与污染排放造成了大量的环境水文地质问题^[19],亟需制定切实可行的地下水管理与保护方案。对该区进行地下水脆弱性评价及区划研究可为土地利用规划、地下水污染防治以及地下水源保护区建立等提供决策依据。

1 研究区与数据处理

1.1 研究区概况

下辽河平原位于辽宁省的中南部,辽北平原丘陵之间,倾向辽东湾。其地理位置为120°42'E~124°45'E, 40°43'N~43°27'N之间,南北长约240 km,东西宽120~140 km,总面积约 $2.65 \times 10^4 \text{ km}^2$ 。下辽河平原东部为长期缓慢上升的辽东低山丘陵区,西临间断性掀斜上升隆起区——辽西低山丘陵区,北接康法低山丘区,南濒渤海湾,总平原地势低平,由北至南缓倾,平均海拔低于50 m,辽河、浑河、太子河、大凌河、小凌河、绕阳河汇集本区注入渤海,是区域地表水和地下水的汇集中心。平原内行政区包括阜新市、铁岭市、沈阳市等9市22县,是东北老工业基地城市的集中区,工农业发达,人类活动强烈。

1.2 流域分区

流域分区是在考虑河流径流情势、水资源分布特点、自然地理条件的相似性和流域的完整性基础上对研究区进行细分,以流域为单元进行综

合管理是实现资源开发与环境保护相协调的最佳途径^[20],所以以子流域为评价单元的地下水脆弱性研究具有重要实践意义。

基于 ArcGIS 的水文分析模块,用试误法筛选适当阈值对 DEM 数据提取水系。在平原地区内,河流流动的随机性比较大,人工挖掘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存在偏差。通过采用主干河道和平原水系约束法,建立流域河网及拓扑关系,利用 ArcMap 中水文分析模块进行小流域自动划分,初步划分形成1024个小流域。由于部分小流域面积过小,在数据较少的情况下无法获取水文地质参数的变化特征,且过多小流域会增加信息的冗余度,因此在基于同一流域的基础上对小流域进行合并调整,最后形成68个子流域作为基本研究单元(图1)。

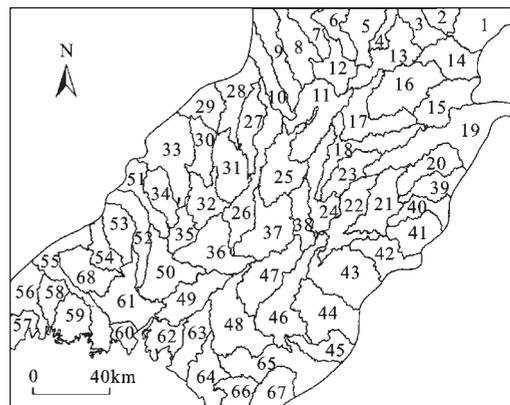


图1 下辽河平原流域分区

Fig.1 Watershed zoning of lower reach of the Liaohe River Plain

1.3 数据来源及处理

选取下辽河平原所跨市、县(区)、流域以及水文地质单元的相关指标数据进行计算分析。水文地质参数数据主要来自《辽宁省水资源》^[21]、《辽宁省国土资源地图集》^[22]、DEM数据以及监测点实测资料等。

土地利用类型数据以2010年9月25日的 Landsat TM 影像为基础数据,根据国家级土地利用的一级分类标准,将研究区的景观划分为耕地、林地、草地、水域、建设用地和未利用地6种类型。利用 ENVI 软件,选择 TM 4, 3, 2 波段进行假彩色合成,对遥感影像进行几何纠正和图像增强,根据

野外考察及相关资料,利用最大似然法进行监督分类,最后根据研究区的土地利用现状图对分类后影像进行修正,得到2010年下辽河平原的土地利用分布图(图2)。

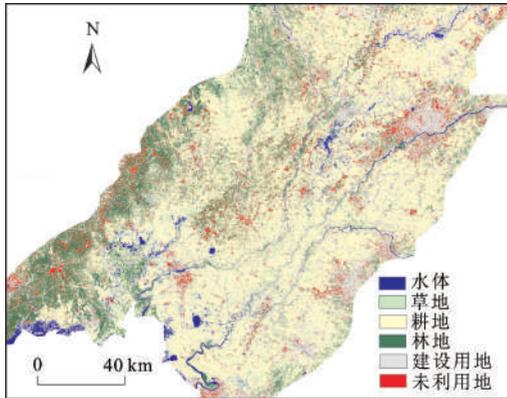


图2 下辽河平原土地利用类型

Fig.2 Land use type of lower reach of the Liaohe River Plain

2 研究方法

2.1 地下水脆弱性评价方法—DRASTIC模型

影响地下水脆弱性的因素包括自然因素和人为因素,本次研究在DRASTIC模型基础上加入人为影响因子(H)形成DRASTICH模型。DRASTIC模型^[23]是国际上应用最广泛的地下水脆弱性计算模型,该模型由7项水文地质参数组成:地下水位埋深(D)、净补给量(R)、含水层介质类型(A)、土壤介质类型(S)、地形坡度(T)、渗流区介质类型(I)以及含水层水力传导系数(C)。参数的数值大小由3部分组成:权重、范围和评分,每项参数对地下水脆弱性的影响程度不同被赋予固定权重值,分别为5、

4、3、2、1、5、3;根据参数对地下水防污性能的作用大小可以分为不同的范围并赋予相对脆弱性评分值(表1,表2)。考虑到研究区为地势平坦的平原地区,水文地质条件较为稳定,人类活动复杂且集中,在资料不全的情况下可用土地利用/覆盖的遥感影像来反映人类活动情况^[24],足以突出人类活动的影响程度。由于人类活动对地下水环境影响比较大,且不同的活动方式和活动强度影响力各不相同,参照DRASTIC模型的评分标准以及文献^[24],对该指标赋予相对权重值3,并对不同类型的土地利用赋予脆弱性评分值(表2)。各项参数脆弱性评分值加权叠加得到地下水脆弱性综合指数(Vulnerability Index, VI):

$$VI = D_w D_r + R_w R_r + A_w A_r + S_w S_r + T_w T_r + I_w I_r + C_w C_r + H_w H_r \quad (1)$$

式中: w 表示权重, r 表示评分。

2.2 蒙特卡罗法(Monte Carlo)

蒙特卡罗法又称随机模拟方法,它是以概率和统计理论方法为基础,利用计算机模拟程序快速产生随机数(或更常见的伪随机数),来解决一些很难用数学运算或其他方法求解的计算问题,具有独特的优越性和适用性^[25]。

本次研究将蒙特卡罗法与地下水脆弱性评价相结合,求解不确定条件下的地下水脆弱性指数,主要包括以下几个步骤:①分析各个参数的不确定性特征并依次确定所服从的概率分布的函数形式;②通过参数样本数据的统计特征,利用计算机模拟程序进行足够多次的仿真实验,将每次随机模拟产生的伪随机数代入公式1,可得到多组地下水脆弱性指数值;③每个研究单元均可得到足够多个的地下水脆弱性指数值,从而得到不确定性问题的某种规律,用于下一步分析。蒙特卡罗法

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

Table 1 Ranks and rating for aquifer buried depth, topographic slope, hydraulic conductivity of aquifer

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(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

Table 2 Ranks and rating for aquifer media, soil media, impact of the vadose zone media and land use type

含水层介质类型		土壤介质类型		渗流区介质类型		人为影响因子	
分类	评分	分类	评分	分类	评分	分类	评分
块状页岩	2	非胀缩或非凝聚性粘土	1	承压层	1	未利用地	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	粘土质亚粘土	3	变质岩/火成岩	4	草地	5
冰碛物	5	粉砂质亚粘土	4	灰岩	6	水域	6
层状砂岩、灰岩及页岩	6	亚粘土	5	砂岩	6	建筑	8
块状砂岩	6	砂质亚粘土	6	层状灰岩、页岩、砂岩	6	耕地	10
块状灰岩	6	胀缩或凝聚性粘土	7	含较多粉砂和粘土的砂砾	6		
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		

的关键步骤在于伪随机数的产生,常见的一维分布模型有正态分布、对数正态分布、指数分布、均匀分布等。

3 不确定性分析与脆弱性评价

在地下水脆弱性评价过程中存在诸多不确定性因素,如各参数的空间异质性、资料不足或数据短缺、评价模型与自然状况间的偏差、人们认知的局限等^[16,26],在众多不确定因素影响下,评价结果容易与客观实际相脱节。本次研究在收集储备较多数据基础上,主要对两方面的不确定性问题进行处理:①参数的不确定性。主要体现在空间分布的随机性或模糊性;②评价结果的不确定性。由参数的不确定性可知评价结果的模糊性,也可理解为人们认知的局限性。针对以上问题,在分析参数的不确定性类型的基础上,结合样本数据,用概率密度函数或三角模糊数表征其分布特征,并用蒙特卡罗法结合 DRASTICH 模型同时对所有参数进行足够多次随机模拟。通过设定 α 截集,得到不同置信水平下模糊性参数的分布区间,模拟统计后得到不同置信水平下的地下水脆弱性指数的累积分布曲线,并根据污染潜势不同,设定脆弱性指数百分位,可得到不同置信水平、不同百分位下地下水脆弱性指数区间。

3.1 参数的不确定性分类与表征

1) 随机性参数。水文地质参数 D 、 T 、 C 数据大多通过有限的勘探获得,这些参数的真实性和代表性受勘探点在空间分布上的限制^[26],不同时间、地点的数据很可能不同,具有明显离散随机

性,因此将这些参数视为具有某种统计性质的随机变量。研究表明,一个变量如果受到大量微小、独立的随机因素影响,则这个变量一般服从正态分布^[27],地下水埋深的大小受水文地质条件、土壤条件、开采强度等诸多因素影响,各勘探点具有明显独立性,因此将 D 视为正态分布;由于研究区为平原地区,山地面积很少,因此地形坡度的变化较小,将 T 视为均匀分布;含水层水力传导系数则引用此前多位学者的研究结果,一般呈现为对数正态分布^[28,29]。根据样本数据,表3中列出各随机性参数的分布特征(限于篇幅,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。在同一流域分区内,介质类指标 (A 、 S 、 I) 具有相似的形成背景,同时具有空间异质性。受水文地质形成过程中的连续作用,它们在空间分布上具有连续性和渐变性,因此认为这3个指标的模糊性特征大于随机性,视为模糊性参数。从图3中可以看出,不同的土地利用方式 (H) 较为集中,连续分布较随机性更明显,因此同样将土地利用方式视为模糊性指标。通过已获取的介质类型与土地利用方式,可根据表2中的分级评分标准将各个分区内 A 、 S 、 I 、 H 的分布特征进行量化(模糊化)处理,每个分区可得到 A 、 S 、 I 、 H 的脆弱性评分最小值、最可能值和最大值(表3)。

3) 确定性参数。净补给量数据一般为区域内年均入渗量,很少考虑补给分布、强度与持续时间,点数据极少,且较其他参数难以获得,因此将净补给量定为确定性参数。本次研究将已获取的水文地质分区内的净补给量数据作为属性值导入各

表3 参数的不确定性表征

Table 3 Uncertain characterization of parameters

指标	不确定类型/分布特征		所选分区编号及区内参数不确定性分布特征值					
			5	11	19	39	47	58
$D(m)$	随机性/	a	4.55	5	7.22	6.97	3.17	3.60
	正态分布	s	1.62	1.15	5.55	2.58	1.70	2.99
$R(mm)$	确定值	a	138	150	355	80	420	285
A	模糊性/	a_1	7	7	6	7	5	7
	三角分布	a_2	8	8	8	8	6	8
		a_3	9	9	9	9	7	9
S	模糊性/	a_1	3	3	3	3	4	3
	三角分布	a_2	5	5	5	5	5	5
		a_3	10	10	9	10	10	10
$T(\%)$	随机性/	a	0.47	0.53	1.42	1.48	0.50	0.98
	均匀分布	s	0.26	0.40	1.57	1.30	0.24	1.09
I	模糊性/	a_1	1	1	1	1	1	1
	三角分布	a_2	3	1	1	3	5	3
		a_3	10	8	10	10	10	10
$C(m/d)$	随机性/对	a	2.19	3.41	3.89	3.74	3.12	4.79
	数正态分布	s	0.27	0.12	0.49	0.71	1.64	0.81
H	模糊性/	a_1	1	1	1	1	1	1
	三角分布	a_2	10	3	8	10	10	3
		a_3	10	10	10	10	10	10

注:表中 a 表示平均值, s 表示标准差; A (含水层介质类型)、 S (土壤介质类型)、 I (渗流区介质类型)和 H (土地利用方式)的数值 a_1 、 a_2 、 a_3 为脆弱性等级评分的最小值、最可能值和最大值。

个流域分区内,根据表1中的分级与评分标准,可得到各个子分区净补给量的地下水脆弱性评分值。

3.2 随机模拟过程

根据表3,将各子流域分区的不确定性特征值输入蒙特卡罗模拟程序,设定10 000次随机模拟,每个分区均可得到10 000个地下水脆弱性指数值,公式如下:

$$VI_i = (D_w D_{r_i}) + (R_w R_{r_i}) + (A_w A_{r_i}) + (S_w S_{r_i}) + (T_w T_{r_i}) + (I_w I_{r_i}) + (C_w C_{r_i}) + (H_w H_{r_i}) \quad (2)$$

式中: $i=1,2,\dots,10\ 000$ 。三角模糊数在一定区间内分布,根据概率分布的可能性,通过取不同水平的 α 截集,即置信水平,可得不同可能性情况下地下水脆弱性指数的累积分布曲线。在每个 α 截集下,三角模糊数具有下限值和上限值,可得到地下水脆弱性指数的在这一 α 截集下的下限分布值 $VI_i^{\alpha\text{下限}}$ 和上限分布值 $VI_i^{\alpha\text{上限}}$ 。为反映不同可能性情况下地下水脆弱性指数的不确定性,本次研究中三角模糊数分别取 $\alpha=0.5$ 、 $\alpha=0.7$ 以及 $\alpha=1$ 进行随机模拟。

3.3 评价结果分析

模糊性参数通过取不同置信水平,得到不同取值区间,在公式2基础上,连同随机性参数以及确定性参数一起随机模拟赋值,生成不同置信水平下地下水脆弱性指数的积累分布曲线(图3,限于篇幅,文中仅以编号为1的子流域单元为例,其他分区类似)。

由图3可以看出,地下水脆弱性指数呈三角模糊分布。类似模糊性参数根据信任度取不同置信水平,决策者可根据研究区土地利用方式或污染潜势不同,在累积分布曲线上取不同百分位,得到不同百分位下地下水脆弱性指数的区间值。因此,本次的不确定性条件下的地下水脆弱性评价具有两次分层,评价结果为不同置信水平、不同百分位下地下水脆弱性指数的三角模糊分布(图4),决策者可根据实际情况选择置信水平,表4中以50%和95%的百分位为例,统计出代表性分区在不同置信水平与不同百分位下地下水脆弱性的指数区间。

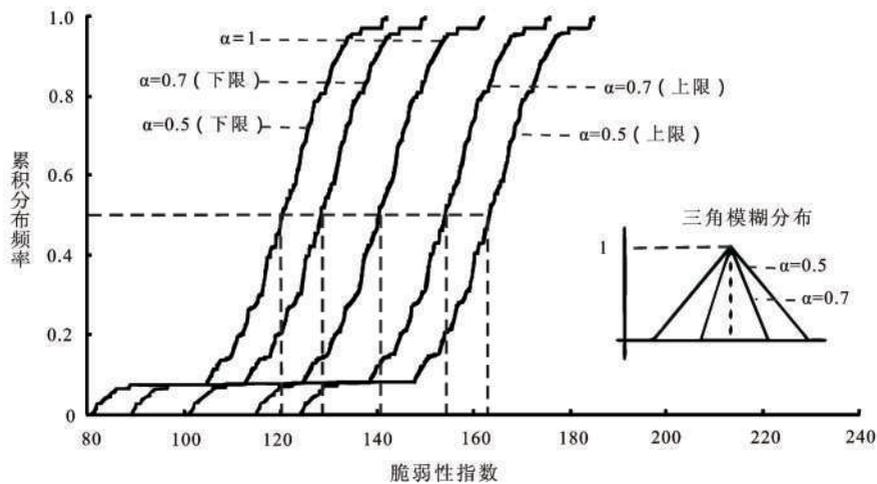


图3 地下水脆弱性指数累积分布曲线

Fig.3 Cumulative distribution curve of groundwater vulnerability index

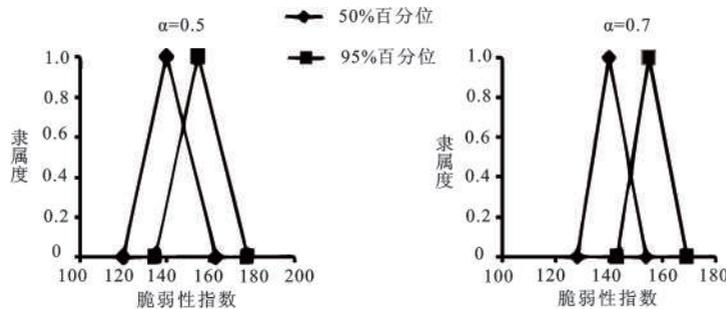


图4 不同置信水平、不同百分位下地下水脆弱性指数的三角模糊分布

Fig.4 Triangular fuzzy distribution of groundwater vulnerability index under different possibility level and different percentage

结合图4和表4可以得出:对模糊性参数信任度越小,即 α 取值越小,则模糊性参数区间范围越大,不确定性程度越高,脆弱性指数的隶属区间越宽, α 取值越大,脆弱性指数的变化范围逐渐变小;研究区的污染潜势越大,则百分位取值应该越大,脆弱性指数大小随之增大。这种分层方法可在研究区的不确定性与实际污染潜势基础上,根据主观判断得到计算结果,能反应不确定性、信任度与脆弱性程度等多方面的信息,因此取得的结果更合理,更符合客观实际,具有实际应用意义。

4 地下水脆弱性分布软区划及合理性分析

4.1 地下水脆弱性分布软区划

软区划是以带有层结构的形式表述地下水脆弱性分布的区划方式,相对分布唯一性的硬区划方式,软区划提供了更多分布的可能性。由上述

步骤可知,各子流域分区的地下水脆弱性指数均为区间数,通过 α 截集技术与百分位计算使评价结果具有层次性^[30,31]。为直观表示不同可能性情况的地下水脆弱性的分布,可根据不同置信水平计算得到的脆弱性指数下限区间和上限区间,绘制地下水脆弱性分布软区划图(图5)。

从图5中保守分布图由上限区间的模糊期望值可看出,冒险分布根据下限区间的模糊期望值得到,在 $\alpha=1$ 时,可得到地下水脆弱性的最大可能性分布。地下水脆弱性保守分布图的脆弱性程度总体上要高于冒险分布图,保守分布图的区域差异较冒险分布图要明显;0.5水平上的保守分布图的脆弱性程度总体上要高于0.7水平上的保守分布图,而0.5水平上的冒险分布图的脆弱性程度总体上要低于0.7水平上的冒险分布图。

图中区划结果显示,下辽河平原地下水脆弱性的总体分布特点是:在0.5水平上,保守分布图

表4 各研究分区不同置信水平、不同百分位下地下水脆弱性指数区间

Table 4 Groundwater vulnerability index interval of every research area under different possibility level and different percentage

置信水平	百分位(%)	5	11	19	39	47	58
$\alpha=0.5$	50	(139,185)	(132,173)	(139,185)	(133,179)	(162,179)	(153,199)
	95	(149,195)	(140,181)	(156,202)	(147,193)	(178,223)	(163,209)
$\alpha=0.7$	50	(148,176)	(135,160)	(145,173)	(145,173)	(171,199)	(158,185)
	95	(158,186)	(142,167)	(162,190)	(162,190)	(188,215)	(168,196)
$\alpha=1$	50	162	139	154	155	188	165
	95	171	146	172	169	204	175

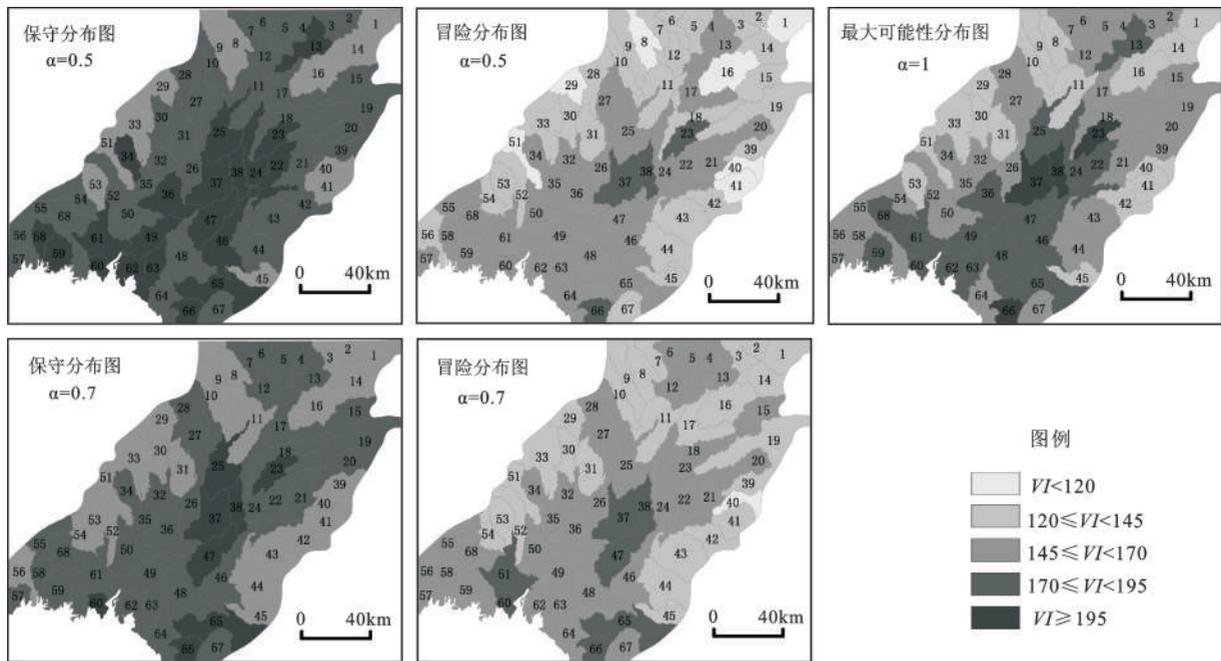


图5 下辽河平原地下水脆弱性软区划分布

Fig.5 Soft zoning of groundwater vulnerability distribution of the lower reach of the Liaohe River Plain

显示下辽河平原中部以及南部滨海地区的脆弱性程度较高,脆弱性指数在195以上;东、西部山前倾斜平原地区的脆弱性程度较低,脆弱性指数一般为[120,145),部分区域达到[170,195)。冒险分布图显示下辽河平原的东、西部两侧以及北部地区的脆弱性程度要低于其他区域,脆弱性指数一般在[120,145)之内;在0.7水平上,保守分布图与冒险分布图的区域差异比较接近,保守分布图中,下辽河平原的中部部分地区以及西南部部分地区地下水脆弱性程度达到195以上,相较0.5水平的保守分布图,地下水脆弱性指数大于195以及在[170,195)内的区域减少,脆弱性指数在[145,170)内的相对脆弱性程度较低的区域增多;冒险分布图显示下辽河平原的东、西部两侧以及北部地区

以较低脆弱性为主,脆弱性指数区间一般为[120,145),中部以及南部以较高脆弱性为主,脆弱性指数区间一般为[145,170)。

4.2 评价结果合理性分析

利用地下水脆弱性大小与地下水中氮元素浓度成正比关系这一原理,对本次地下水脆弱性的评价结果进行检验分析。最大可能性分布的空间分异相较其他情况下的分布要明显,因此以最大可能性分布图为底图,标出研究区中31个监测井的地理位置(图6),根据监测井2010年的实测氮元素(氨氮、硝酸盐氮与亚硝酸盐氮浓度之和)浓度资料,与对应点的地下水脆弱性指数进行线性分析(图7)。

可以看出,氮元素浓度较高的点一般分布在

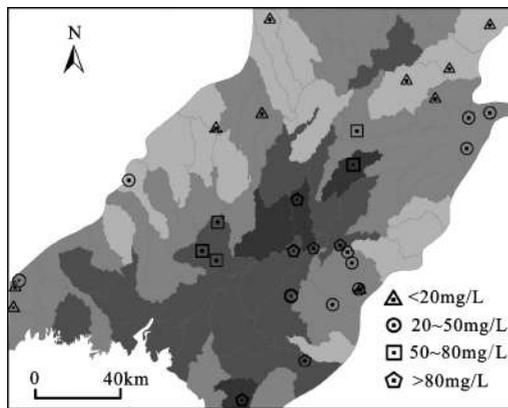


图6 监测点氮元素浓度与地下水脆弱性分布

Fig.6 The corresponding of nitrogen concentration

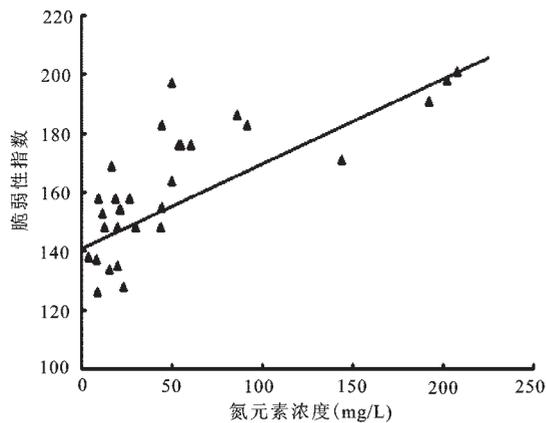


图7 氮元素浓度对应脆弱性评分散点图

Fig.7 The scatter plot of nitrogen concentration and groundwater vulnerability

地下水脆弱性指数较高的地区,浓度较低的点一般分布在地下水脆弱性指数较低的地区(图6),可见本次地下水脆弱性评价结果与监测井的实测氮元素浓度数据具有线性关系。将两组数据通过SPSS线性相关性检验,得到图7中拟合趋势线的 R^2 为0.75,在0.01水平上显著性相关,两者之间具有较强线性关系。综上可得,本次研究提出的计算方法具有较高的科学性。

5 结论

1) DRASTICH模型相较传统DRASTIC模型考虑的因素更全面,综合自然与人为影响因子的评价结果更具参考价值,通过氮元素浓度进行合理性检验,得到较好的线性拟合性,表明研究方法和评价结果具有一定科学性。

2) 不确定性评价过程中, α 的取值取决于使用者的信任程度。不确定性越大,则信任度越低, α 取值越小,模糊性参数取值区间越大,则地下水脆弱性指数区间范围越大;不确定性越小,则信任度越高,取较大 α 值,模糊性参数取值区间越小,得到的地下水脆弱性指数区间范围也越小; α 取1时,保守分布与冒险分布合二为一,形成传统的地下水脆弱性区划图。百分位的取值取决于研究区的污染潜势,人类活动越强烈,百分位可取值越大,则脆弱性指数越大。

3) 结合保守分布图和冒险分布图,置信水平取值越高,保守和冒险的地下水脆弱性分布情况越接近,差异越小;置信水平取值越低,则保守和冒险的地下水脆弱性分布之间的差异越大。实际应用时,跟可根据不确定性程度和实际污染潜势有选择性的使用。

4) 研究区地下水脆弱性分布具有明显的空间集聚现象,地下水高脆弱性区域一般集聚在下辽河平原中部以及南部地区,需着重治理这些区域的地下水环境问题,低脆弱性区域一般分布在下辽河平原东、西两侧地区。

参考文献(References):

- [1] 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, 10(4): 444-449. [Sun Caizhi, Pan Jun. Concept and assessment of groundwater vulnerability and its future prospect. *Advances in Water Science*, 1999, 10(4): 444-449.]
- [2] Jaroslav V, Alexander Z. Guidebook on mapping groundwater vulnerability[M]// International Contributions to Hydrogeology Founded by G. Castany, E. Groba, E. Romijn. Hanover: Heise, 1994: 131.
- [3] 王焰心. 地下水污染与防治[M]. 北京: 高等教育出版社, 2007. [Wang Yanxin. *Groundwater contamination*. Beijing: Higher Education Press, 2007.]
- [4] Rupert M G. Calibration of the DRASTIC ground water vulnerability mapping method[J]. *Ground Water*, 2001, 39(4): 625-630.
- [5] Javadi S, Kavehkar N, Mousavizadeh M H et al. Modification of DRASTIC model to map groundwater vulnerability to pollution using nitrate measurements in agricultural areas[J]. *Journal of Agricultural Science and Technology*, 2011, 13(2): 239-249.
- [6] Li Ruopu, Merchant J W. Modeling vulnerability of groundwater to pollution under future scenarios of climate change and biofuels-related land use change: a case study in North Dakota, USA[J]. *The Science of the Total Environment*, 2013, 447: 32-45.

- [7] Ducci D, Sellerino M. Vulnerability mapping of groundwater contamination based on 3D lithostratigraphical models of porous aquifers[J]. *The Science of the Total Environment*, 2013, 447: 315-322.
- [8] Guler C, Kurt M A, Korkut R N. Assessment of groundwater vulnerability to nonpoint source pollution in a Mediterranean coastal zone (Mersin, Turkey) under conflicting land use practices[J]. *Ocean & Coastal Management*, 2013, 71: 141-152.
- [9] 杨庆, 栾茂田. 地下水易污性评价方法:DRASTIC 指标体系[J]. *水文地质工程地质*, 1999, 26(2): 4-9. [Yang Qing, Luan Maotian. Assessment method of groundwater vulnerability: Drastic index system. *Hydrogeology and Engineering Geology*, 1999, 26(2): 4-9.]
- [10] 鄂建, 孙爱荣, 钟新永. 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 Jian, Sun Airon, Zhong Xinyong. Inadequacies of DRASTIC model and discussion of improvement. *Hydrogeology and Engineering Geology*, 2010, 37(1): 102-107.]
- [11] 范琦, 王贵玲, 蔺文静, 等. 地下水脆弱性评价方法的探讨及实例[J]. *水利学报*, 2007, 38(5): 601-605. [Fan Qi, Wang Guiling, Lin Wenjing et al. New method for evaluating the vulnerability of groundwater. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2007, 38(5): 601-605.]
- [12] 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 Shouyu, Fu Guangtao, Zhou Huicheng et al. Fuzzy analysis model and methodology for aquifer vulnerability evaluation. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2002(7): 23-30.]
- [13] 李如忠, 汪明武, 金菊良. 地下水环境风险的模糊多指标分析方法[J]. *地理科学*, 2010, 30(2): 235-299. [Li Ruzhong, Wang Mingwu, Jin Juliang. Multi-variable fuzzy analysis method for groundwater environmental risk. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2010, 30(2): 235-299.]
- [14] 李定龙, 王宗庆, 杨彦. 基于综合方法的区域浅层地下水脆弱性评价——以常州市为例[J]. *环境化学*, 2013, 32(11): 2099-2108. [Li Dinglong, Wang Zongqing, Yang Yan. Regional shallow groundwater vulnerability assessment based on comprehensive approach: take Changzhou as an example. *Environmental Chemistry*, 2013, 32(11): 2099-2108.]
- [15] 孙才志, 左海军, 栾天新. 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 Caizhi, Zuo Haijun, Luan Tianxin. Research on groundwater vulnerability assessment of the lower liaohe river plain. *Journal of Jilin University(Earth Science Edition)*, 2007, 37(5): 943-948.]
- [16] 杜朝阳, 钟华平. 地下水系统风险分析研究进展[J]. *水科学进展*, 2011, 22(3): 437-444. [Du Chaoyang, Zhong Huaping. Advances in risk analysis of groundwater system. *Advances in Water Science*, 2011, 22(3): 437-444.]
- [17] Zadeh L A. Soft computing and fuzzy logic[J]. *IEEE Software*, 1994, 11(6): 48-56.
- [18] 刘卓, 刘昌明. 东北地区水资源利用与生态和环境问题分析[J]. *自然资源学报*, 2006, 21(5): 700-708. [Liu Zhuo, Liu Changming. The analysis about water resource utilization, ecological and environmental problems in Northeast China. *Journal of Natural Resources*, 2006, 21(5): 700-708.]
- [19] 孙才志, 刘玉兰, 杨俊. 下辽河平原地下水生态水位与可持续开发调控研究[J]. *吉林大学学报:地球科学版*, 2007, 37(2): 249-254. [Sun Caizhi, Liu Yulan, Yang Jun. Research on the ecological and sustainable groundwater table regulation in the Lower Liaohe River Plain. *Journal of Jilin University(Earth Science Edition)*, 2007, 37(2): 249-254.]
- [23] Aller L, Bennett T, Lehr J H et al. DRASTIC:A standardized system for evaluating groundwater potential using hydrogeological settings [R]. USEPA Report Ada Oklahoma: Environmental Research Laboratory, 1985.
- [24] 张保祥. 黄河流域地下水脆弱性评价与水源保护区划分研究[D]. 北京: 中国地质大学:北京, 2006. [Zhang Baoxiang. Groundwater vulnerability assessment and wellhead protection area delineation in Huangshuihe River Basin. Beijing:China University of Geosciences, 2006.]
- [25] 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, 34(5): 1-7. [Sun Caizhi, Xixu. Assessment of groundwater intrinsic vulnerability in the Lower Reaches of Liaohe River Plain under uncertain conditions. *Advances in Science and Technology of Water Resources*, 2014, 34(5): 1-7.]
- [20] 杨桂山, 于秀波, 李恒鹏, 等. 流域综合管理导论[M]. 北京: 科学出版社, 2004. [Yang Guishan, Yu Xiubo, Li Hengpeng et al. Introduction to integrated watershed management. Beijing: Science Press, 2004.]
- [21] 辽宁省水利厅. 辽宁省水资源[M]. 沈阳: 辽宁科学技术出版社, 2005. [LiaoNingShengShuiLiTing. Water resources in Liaoning. Shenyang: Liaoning Science and Technology Press, 2005.]
- [22] 辽宁省计划经济委员会. 辽宁省国土资源地图集[M]. 北京: 测绘出版社, 1987. [LiaoNingShengJiHuaJingJiWeiYuanHui. Land resources Atlas of Liaoning Province. Beijing: Surveying and Mapping Press, 1987.]
- [26] 于勇, 翟远征, 郭永丽, 等. 基于不确定性的地下水污染风险评价研究进展[J]. *水文地质工程地质*, 2013, 40(1): 115-123. [Yu Yong, Zhai Yuanzheng, Guo Yongli et al. Risk assessment of groundwater pollution based on uncertainty. *Hydrogeology and Engineering Geology*, 2013, 40(1): 115-123.]
- [27] 黄振平. 水文统计学[M]. 南京: 河海大学出版社, 2003. [Huang Zhenping. Statistical hydrology. Nanjing: Hehai University Press, 2003.]
- [28] Freeze A. A stochastic-conceptual analysis of one-dimensional groundwater flow in non-uniform homogeneous media[J]. *Water Resources Research*, 1975, 11(5): 725-741.
- [29] 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 Yan, Wu Jichun. Effect of the spatial variability of hydraulic conduc-

- tivity in aquifer on the numerical simulation of groundwater. *Advances in Water Science*, 2005, 16(4): 482-487.]
- [30] 黄崇福. 自然灾害风险分析与管理[M]. 北京: 科学出版社, 2012. [Huang Chongfu. Risk analysis and management of natural disasters. Beijing: Science Press, 2012.]
- [31] E. Kentel· M. M. Aral. Probabilistic-fuzzy health risk modeling [J]. *Stochastic Environmental Research and Risk Assessment*, 2004(18): 324-338.

Assessment and Soft Zoning of Groundwater Vulnerability in the Lower Reach of the Liaohe River Plain Under Uncertainty Condition

Xi Xu¹, Zhang Xinchang¹, Sun Caizhi², Bao Jianteng³

(1. School of Geography and Planning, Sun Yat-sen University, Guangzhou 510275, Guangdong, China; 2. College of Urban and Environment Science, Liaoning Normal University, Dalian 116029, Liaoning, China; 3. Department of Water Resources of Jiangsu Province, Nanjing 210029, Jiangsu, China)

Abstract: Based on the DRASTICH model of groundwater vulnerability assessment, the uncertainty characteristics of each parameter were analyzed, and the stochastic simulation method was used to simulate both random parameters and fuzzy parameters. By setting the confidence level of the fuzzy parameters and the percentile of the vulnerability index, we obtain the confidence interval of the multiple groundwater vulnerability. On this basis, the soft zoning distribution of the groundwater vulnerability was plotted according to the expectation vulnerability index of upper limit fuzzy interval and the lower limit fuzzy interval. The results showed that: 1) The evaluation results of groundwater vulnerability in the form of the confidence interval can reflect the objective reality of the groundwater vulnerability under the influence of various uncertain factors, and provide more reliability than the conventional method; 2) The soft zoning distribution of groundwater vulnerability map, which preserves the fact that uncertainty is objective, can give decision maker more reference information; 3) The soft zoning distribution of groundwater vulnerability showed: the degree of vulnerability of the conservative distribution of the overall higher than the risk distribution, the higher the confidence level selection, adventure distribution and conservative distribution of the spatial distribution of the difference, and with the maximum possible; 4) The distribution of groundwater vulnerability in the study area was spatial agglomeration, high groundwater vulnerability areas were generally concentrated in the middle and the southern region of the lower Liaohe River Plain, low groundwater vulnerability areas were generally distributed in both east and west sides of the lower Liaohe River Plain.

Key words: lower reach of the Liaohe River Plain; groundwater vulnerability; uncertainty; possibility level; soft zoning