

DOI :10.3880/j. issn. 1006-7647. 2009. 02. 007

基于复合权重- GIS 的下辽河平原地下水脆弱性评价

曾庆雨¹, 田文英², 王言鑫¹

(1. 辽宁师范大学城市与环境学院, 辽宁 大连 116029 ; 2. 辽宁省水文水资源勘测局, 辽宁 沈阳 110003)

摘要 在传统的 DRASTIC 模型基础上, 结合下辽河平原的实际情况, 从水质和水量两方面考虑, 建立下辽河平原地下水脆弱性评价指标体系。通过层次分析法(AHP)与熵权法确定评价指标在满足主客观条件下的综合权重。结合 GIS 的地图计算功能对该地区的地下水脆弱性进行评价, 同时用硝酸盐氮的质量浓度对评价结果进行了验证。评价结果表明下辽河平原 50.39% 的地区地下水脆弱性较高, 并且相对于脆弱性低的地区有较高的硝酸盐氮浓度。

关键词 地下水脆弱性 ; GIS ; 下辽河平原 熵权 水量评价 水质评价

中图分类号 :TV211.1+2 **文献标识码** :A **文章编号** :1006-7647(2009)02-0023-04

Groundwater vulnerability assessment in Lower Liaohe River Plain based on GIS Model with Co-Weights//Zeng Qing-yu¹, Tian Wen-ying², Wang Yan-xin¹ (1. College of Urban and Environmental Sciences, Liaoning Normal University, Dalian 116029, China ; 2. Hydrographic and Water Survey Bureau of Liaoning Province, Shenyang 110003, China)

Abstract : On the basis of the traditional DRASTIC model, and according to the water quality and water quantity of the Lower Liaohe River Plain, a groundwater vulnerability assessment index system for the Lower Liaohe River Plain is constructed. Considering the objective and subjective conditions, the comprehensive weight of the assessment index is determined with the analysis hierarchy process (AHP) and entropy weight method. Combined with the mapping calculation function of GIS technology, the groundwater vulnerability of this area is evaluated. The nitrate nitrogen concentration is applied to test the results of the vulnerability assessment. The results showed that 50.39% of the Lower Liaohe River Plain has higher vulnerability, in the form of higher nitrate nitrogen concentration than the areas with lower vulnerability.

Key words : groundwater vulnerability ; GIS ; the Lower Liaohe River Plain ; entropy weight ; water quantity evaluation ; water quality evaluation

地下水脆弱性 (groundwater vulnerability) 这一术语是 1968 年法国的 Margat 首次提出的^[1]。目前比较公认的定义是 1993 年美国国家科学委员会给出的定义^[2] 地下水脆弱性是指污染物到达最上层含水层之上某特定位置的倾向性与可能性。在地下水脆弱性评价中应用最广泛的方法是由美国环保署 (EPA) 于 1987 年提出的 DRASTIC 模型^[3]。

国外在地下水脆弱性研究中普遍使用 GIS 技术, 而我国 GIS 技术引入较晚, 目前国内相关的研究主要有 2004 年, 郑西来等^[4] 应用 MapInfo 的地图查询运算能力对山东省青岛市大沽河地下水库进行了脆弱性评价 ; 2007 年, 张保祥等^[5] 利用 DRASTIC 方法对泰国清迈盆地的地下水脆弱性进行了定量评价并利用 ArcView GIS 绘制了地下水脆弱性分区图 ; 2008 年, 卞建民等^[6] 以吉林西部通榆县为例, 借助 GIS 技术绘制脆弱性分区图 ; 张少坤等^[7] 建立了基

于 GIS 与熵权的 DRASCLP 模型, 对三江平原地下水脆弱性进行了研究。综上, 我国在地下水脆弱性方面的研究中主要应用 GIS 软件的可视化制图功能, 并且在权重体系的确定上单一采用主观或客观权重。鉴于此, 笔者采取权重体系由主、客观权重联合确定, 根据下辽河平原地区的实际情况, 从水量、水质两方面考虑建立适合其特点的指标体系。应用 GIS 的地图计算功能得到脆弱性指数分区图, 并利用其统计功能得到各指标与该地区硝酸盐氮浓度的相关性, 生成后验概率图, 通过综合分析可以判定该评价方法具有一定的合理性。

1 研究区概况

1.1 自然地理概况

研究区位于辽宁省辽河中下游地区, 位于东经 121° ~ 123° 50'、北纬 40° 30' ~ 42° 20', 面积约

2.99 万 km²(见图 1)。地处温带半湿润半干旱季风气候区,多年平均气温为 7.1 ~ 8.9 ℃,多年最高气温为 35 ~ 38.3 ℃,多年最低气温为 - 24.7 ~ - 33.7 ℃。降水量由东南部的 700 ~ 750 mm 向西北部递减为 500 ~ 550 mm,降水主要集中于 6 ~ 9 月,该时段降水量约占全年降水量的 72% ~ 77%。主要地表水系有辽河-双台子河水系、浑河-太子河水系以及大小凌河水系。

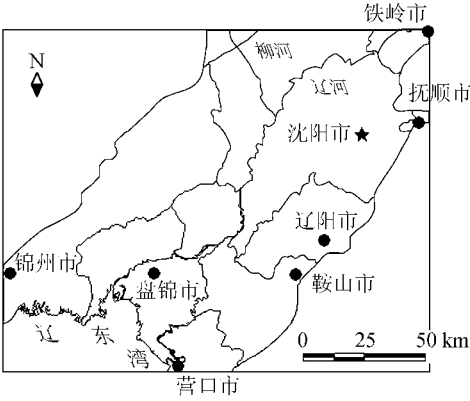


图 1 研究区地理位置示意图

该区是辽宁省的地理和经济发展中心,也是最重要的商品粮基地,在辽宁省的国民经济中处于举足轻重的地位。该区仅占辽宁省总面积的 20.49%,但却集中了辽宁省 57.82% 的人口、60.68% 的农业、59.70% 的工业和 51.90% 的大型重型企业(2005 年)。水资源问题已经成为制约该区经济发展的重要‘瓶颈’因素。因此探究该区地下水脆弱性具有重要意义。

1.2 研究区水文地质概况

下辽河平原作为中新世断陷盆地的区域沉降中心,堆积了厚达 6000 ~ 8000 m 的新生界陆相碎屑沉积,在其基础上堆积而成的区域第四系是区内最主要的地层。第四系松散沉积物按其成因可进一步分为冲洪积层含水岩组、冲积层含水岩组、冲积海积层咸水含水岩组、冲积冲洪积含水岩组和坡洪积层含水岩组。在垂直方向上划分为I,II,III,IV4 个含水组,其地

质时代分别相当于全新统(Q₄)、上更新统(Q₃)、中更新统(Q₂)、下更新统(Q₁)。各含水组在水平方向上分布于东西部山前倾斜平原、中部冲积平原和南部滨海平原 4 个水文地质单元。由于浅层地下水系统是深层地下水系统污染物的重要载体和主要的水量补给通道与补给源,加之资料限制,本次研究所选择的目标含水层为研究区内的浅层地下水系统。

2 指标体系的确定

地下水脆弱性的概念主要是针对污染而言,即只偏重水质,忽略水量。因此在以往的研究中建立的指标体系主要是针对水质部分,而针对水量部分的研究甚少。本文结合研究区的实际情况,分别从水质、水量两方面出发建立指标体系。在水质上表现为地下水污染问题,在水量上表现为水量变化引起的一系列水环境负效应问题。

根据下辽河平原的水文地质条件及资料收集情况,选择含水层厚度、天然总补给量作为水量方面的评价指标,保护层(含水层上覆弱透水层)、天然总补给量、土壤类型、土壤有机质含量、地形坡度、含水层渗透系数作为水质方面的评价指标。各评价指标等级划分及其评分见表 1。

3 权重体系的确定

在以往的地下水脆弱性研究中,普遍单纯地使用主观权重或客观权重,这样得到的评价结果具有一定的片面性。鉴于此,笔者应用层次分析法(AHP)得到主观权重、应用熵权法得到客观权重,建立优化决策模型得到综合权重。这样得到的权重能够比较全面地反应下辽河平原地区各指标对于地下水脆弱性的影响程度。由于 AHP 比较通用,在此不再赘述。

3.1 熵权法确定客观权重

1948 年,申农(Shannon)提出了信息熵的概念。其定义为^[8] 熵是系统不确定性的一种度量,当系统

表 1 指标等级划分及评分

含水层		天然总补给量		保护层		土壤有机质		土壤		地形		渗透系数	
厚度/ m	评分	范围/ mm	评分	描述	评分	质量 分数/%	评分	类别	评分	坡度/ %	评分	范围/ (m·d ⁻¹)	评分
		0 ~ 51	10	基岩裸露	10	< 1.0	10	基岩	10	< 0.05	10	0 ~ 5	1
0 ~ 20	9	51 ~ 102	9	厚度薄	9	1.0 ~ 1.5	9	砂	9	0.05 ~ 0.10	9	5 ~ 10	2
20 ~ 60	8	102 ~ 178	8	厚度中等	7	1.5 ~ 2.0	7	亚砂土	7	0.10 ~ 0.15	5	10 ~ 20	4
60 ~ 100	7	178 ~ 254	6	厚,但不稳定	5	2.0 ~ 2.5	5	亚黏土	5	0.15 ~ 0.20	3	20 ~ 30	6
100 ~ 140	6	254 ~ 600	3	厚,自净能力中等	3	2.5 ~ 3.0	3	黏土	4	> 0.20	1	30 ~ 40	8
140 ~ 180	5	> 600	1	厚,自净能力强	1	> 3.0	1	亚黏土含砾 黄土状亚砂土	3			> 40	10
180 ~ 220	4												
220 ~ 280	3												
> 280	1												

注:当含水层介质为基岩时,其相应的指标评分为 10。

可能处于 n 种不同状态且每种状态出现的概率为 $p_i (i = 1, 2, \cdots, n)$ 时,该系统的熵为

$$E = - \sum_{i=1}^n p_i \ln p_i \tag{1}$$

其中 p_i 满足 $0 \leq p_i \leq 1, \sum_{i=1}^n p_i = 1$ 。

用熵权法计算客观权重,有关方法的详细描述见文献[8]。

3.2 综合权重的计算

设样本个数 $i = 1, 2, \cdots, n$, 并设各样本评价指标个数 $j = 1, 2, \cdots, m$, 令主观权重向量 $\omega = (\omega_1, \omega_2, \cdots, \omega_m)^T$, 客观权重向量为 $\mu = (\mu_1, \mu_2, \cdots, \mu_m)^T$, 综合权重向量为 $W = (w_1, w_2, \cdots, w_m)^T$ 。所有样本指标的主、客观赋权下的决策结果的偏差越小越好,为此建立最小二乘法优化决策模型如下[9] :

$$\begin{cases} \min H(W) = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m \{[(\omega_j - w_j) x'_{ij}]^2 + [(\mu_j - w_j) x'_{ij}]^2\} \\ \sum_{j=1}^m w_j = 1 \\ w_j \geq 0 \quad (j = 1, 2, \cdots, m) \end{cases}$$

式中 x'_{ij} 为各指标特征值经归一化后的值。

4 应用 GIS 进行地下水脆弱性评价

GIS 具有支持空间数据获取、管理、分析、建模和显示的功能,目前已广泛应用于环境评价、生态保护、城市规划等领域,GIS 技术与各种数学模型的结合是地下水脆弱性评价的一个最主要的发展方向[10]。

4.1 GIS 在权重计算中的应用

应用 GIS 计算权重的具体步骤是 :①根据具体情况及获得的数据资料建立空间数据库,同时利用 GIS 的图形矢量化功能绘制各个指标的图形。②进行各个指标在各个评价单元上的评分,得到研究区各个指标的评分图。③在可视化环境下以平均分布的原则在研究区内选择 205 个样本点。④提取各个指标的评分值,从而计算综合权重,结果见文献[11]。

4.2 GIS 在地下水脆弱性指数计算中的应用

应用 GIS 软件的地图计算功能,把各个指标评分图对应的权重进行加权计算,得到的计算结果即为脆弱性指数分布,如图 2、图 3 所示。

由图 2 看出 地下水水量脆弱性较高的地区主要分布在东部、西北部山前平原以及平原周围的低山丘陵区,原因主要是这些地区含水层厚度较薄,天然总补给量较少 ;水量脆弱性低的地区主要分布在辽中平原地区,原因主要是该地区天然总补给量大,资源丰富,对污染物浓度有稀释作用。由图 3 看出 :

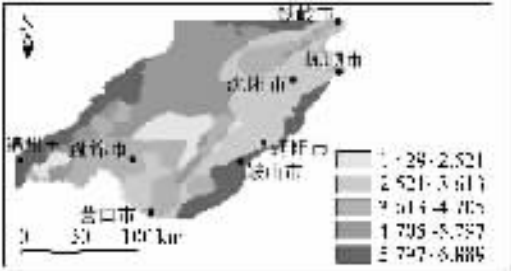


图 2 地下水水量脆弱性指数分布

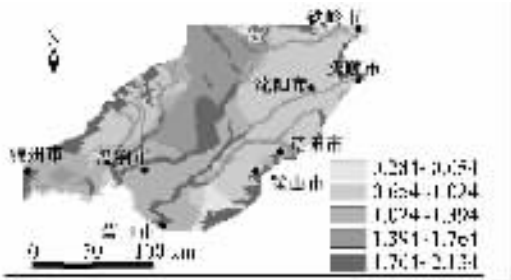


图 3 地下水水质脆弱性指数分布

地下水水质脆弱性较高的地区主要分布在基岩裸露的周边山区、平原中部地区,原因主要是这些地区缺少植被和隔水层的保护,地下水极易受到污染威胁[12]。水质脆弱性相对较低的地区主要为辽河冲积平原、冲洪积扇和山麓坡洪积平原,原因是这些区域保护层厚,地形坡度较大,防渗作用强。

综合考虑水量与水质 2 个方面,分别赋予权重均为 0.5,将水量脆弱性指数分布结果与水质脆弱性指数分布结果进行加权计算,得出地下水本质脆弱性指数分布结果,如图 4 所示。从计算结果中可以看出,地下水脆弱性指数最小值为 0.884,最大值为 4.548,将地下水按脆弱程度分成 5 个等级,脆弱性分区情况见表 2。从整体上看,下辽河平原 50% 以上的地区地下水脆弱性较高,说明下辽河平原地区的地下水比较容易受到污染。

5 模型检验

从研究区中抽取 20 个监测点的水样来分析该模型的结果,考虑到该地区肥料成分主要以硝酸盐为主,所以在水样中只考虑硝酸盐氮的质量浓度。该地区地下水硝酸盐氮质量浓度分布如图 5 所示。

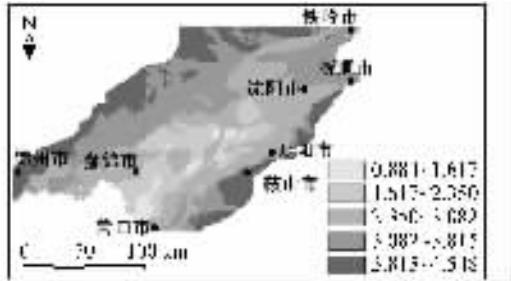


图 4 地下水本质脆弱性指数分布

表 2 地下水脆弱性指数

脆弱程度 分区	指数范围	面积/ km ²	面积 百分比/%	面积累计 百分比/%
高脆弱区	3.815 ~ 4.548	5955	19.92	19.92
较高脆弱区	3.082 ~ 3.815	9111	30.47	50.39
中等脆弱区	2.350 ~ 3.082	8693	29.07	79.46
较低脆弱区	1.617 ~ 2.350	4481	14.99	94.45
低脆弱区	0.884 ~ 1.617	1662	5.55	100.00

从图 4 和图 5 的对比可以看出,在沈阳、辽阳、鞍山以及该平原区西北部地下水脆弱性较高的地带,硝酸盐氮质量浓度比脆弱性低的地区高,因此,该评价方法具有一定的可靠性。

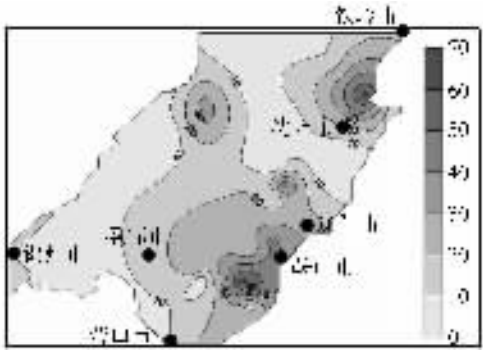


图 5 地下水硝酸盐氮质量浓度分布(单位:mg/L)

应用 ArcView GIS 的证据权方法^[13]分析各指标与硝酸盐氮质量浓度的相关性并生成后验概率图,如图 6 所示。含水层厚度、天然总补给量、土壤有机质含量、地形坡度、渗透系数、保护层、土壤类型与硝酸盐氮质量浓度的相关系数分别为:0.217 9, 0.346 7, - 0.327 0, 0.583 9, 0.325 2, - 0.861 2, 0.461 5。可以看出,保护层、地形坡度及土壤类型 3 项指标对硝酸盐氮质量浓度的影响较大。原因主要是如果地表上覆的介质决定了硝酸盐离子通过该介质到达地下水的难易程度,地形坡度影响着地表污染物渗透至含水层中的浓度。将图 5 与图 6 进行对比可以看出,后验概率较高的地区正是硝酸盐氮质量浓度比较高的地区。这说明后验概率分布图能较好地反映研究区内不同区域的地下水系统对硝酸盐氮的脆弱性程度。

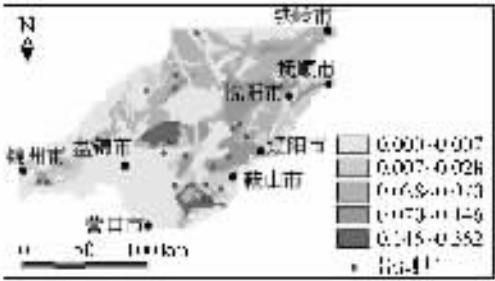


图 6 后验概率图

6 结 语

从水量、水质 2 个方面对下辽河平原地区地下水脆弱性进行评价,结果证明下辽河平原地区 50.39% 的区域地下水脆弱性较大,硝酸盐氮质量浓度高的地区地下水本质脆弱性普遍偏高,说明该评价方法得出的结果具有一定的合理性。由各指标与硝酸盐氮质量浓度的相关性分析结果看出,保护层、地形坡度及土壤类型这 3 项指标对地下水的硝酸盐氮质量浓度影响较大。该研究将地下水水量指数与水质指数进行加权计算,得出地下水本质脆弱性指数及其在该区的分布图,这里的权重仅为参考值,在实际应用中可以根据当地情况进行赋值,本文旨在提出该种思路。

参考文献:

[1] VRBA J, ZAPOROZEC A. Guidebook on mapping groundwater vulnerability [M]. Hanover: Heise, 1994: 131.

[2] National Research Council (U.S.). Ground water vulnerability assessment—predicting relative contamination potential under conditions of uncertainty [M]. Washington D. C.: National Academy Press, 1993: 204.

[3] ALLER L, BENNET T, LEHR J H, et al. A standardized system for evaluating ground water pollution potential using hydro geological settings [M]. Oklahoma: U. S. Environmental Protection Agency, 1987.

[4] 郑西来,李涛,贾丽华. 基于 MapInfo 的大沽河地下水库脆弱性评价[J]. 中国海洋大学学报, 2004, 36(6): 1023-1028.

[5] 张保祥,万力, JADE J. DRASTIC 地下水脆弱性评价方法及其应用——以泰国清迈盆地为例[J]. 水资源保护, 2007, 23(2): 38-42.

[6] 卞建民,李立军,杨坡. 吉林省通榆县地下水脆弱性研究[J]. 水资源保护, 2008, 24(3): 4-7.

[7] 张少坤,付强,张少东,等. 基于 GIS 与熵权的 DRASCLP 模型在地下水脆弱性评价中的应用[J]. 水土保持研究, 2008, 15(4): 134-137.

[8] 刘仁涛,付强,李国良,等. 基于熵权的 DRASTIC 模型及其在地下水脆弱性评价中的应用[J]. 农业系统科学与综合研究, 2007, 23(1): 74-77.

[9] 孙才志,迟克续. 大连市水资源安全评价模型的构建及其应用[J]. 安全与环境学报, 2008, 8(1): 115-118.

[10] 孙才志,潘俊. 地下水系统脆弱性的概念、评价方法与研究前景[J]. 水科学进展, 1999, 1(4): 444-449.

[11] 杨俊. 下辽河平原地下水脆弱性研究[D]. 大连: 辽宁师范大学, 2008.

[12] 范庄立会. 丽江城市水资源评价[J]. 水资源保护, 2008, 24(2): 65-69.

[13] 苏红旗,葛艳,刘冬林. 基于 GIS 的证据权重法矿产预测系统(EWM) [J]. 地质与勘探, 1999, 35(1): 44-46.

(收稿日期 2008-09-22 编辑 高建群)