

DOI:10.3969/j.issn.1004-6933.2014.06.003

改进的 DRASTIC 地下水脆弱性评价模型及应用

张 珍¹,温忠辉¹,鲁程鹏¹,束龙仓¹,刘 波¹,朱 伟²

(1. 河海大学 水文水资源与水利工程科学国家重点实验室,江苏 南京 210098;
2. 环境保护部南京环境科学研究所,江苏 南京 210042)

摘要:针对 DRASTIC 模型存在的不足,综合考虑研究区水文地质特征和人类活动的影响,提出改进的地下水脆弱性指标体系,分别采用层次分析法(AHP)、熵权法及 AHP-熵权法对各指标赋权,建立改进的 DRASTIC 地下水模型。应用基于上述3种方法改进的模型对南京市江宁区中部地区地下水脆弱性进行评价,3种模型得到的脆弱性指数整体均呈现由中部向东北、西南方向逐渐降低的趋势,但不同模型中同一脆弱性区的面积有所差异;通过线性相关分析验证模型评价结果。结果表明,基于 AHP-熵权法改进的 DRASTIC 模型评价结果较其他两种模型更客观真实地反映了研究区的实际情况。
关键词:地下水;脆弱性评价;改进的 DRASTIC 模型;层次分析法;熵权法;敏感性分析
中图分类号:P641.8 **文献标志码:**A **文章编号:**1004-6933(2014)06-0013-06

A modified DRASTIC model for assessment of groundwater vulnerability and its application

ZHANG Zhen¹, WEN Zhonghui¹, LU Chengpeng¹, SHU Longcang¹, LIU Bo¹, ZHU Wei²
(1. State Key Laboratory of Hydrology-Water Resources and Hydraulic Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China;
2. Nanjing Institute of Environmental Sciences, MEP, Nanjing 210042, China)

Abstract: A modified groundwater vulnerability assessment index system is proposed, with consideration of the deficiencies of the DRASTIC model, and the hydrogeological features and human activities in the study area. In order to establish this modified DRASTIC model, the indices of the system were weighted with the analytic hierarchy process (AHP) method, the entropy weight method, and the AHP-entropy weight method. Modified models based on the three methods described above were applied to assessment of the groundwater vulnerability in the central area of the Jiangning District, in Nanjing City. The vulnerability indices obtained from the three models exhibited a decreasing trend from the central area towards the northeastern and southwestern areas, and the area with the same level of vulnerability varied in different models. The model results were verified with linear correlation analysis. The results show that the modified DRASTIC model based on the AHP-entropy weight method can better describe the actual status of the study area than the other two models.
Key words: groundwater; vulnerability assessment; modified DRASTIC model; AHP; entropy weight method; sensitivity analysis

近年来,随着城市工业化和现代化进程的加快,我国正面临着十分严峻的环境污染问题。作为支撑国民经济和社会发展的资源之一,地下水资源正面临着污染日趋严重和供水需求日益增长的双重矛盾。1968年法国学者Margat首次提出“地下水脆弱性”^[1]这一术语,此后许多学者从不同的角度定义“地下水脆弱性”,并用多种方法对其进行评价^[2-3]。在众多评价方法中,应用最广泛的是美国环

基金项目:国家自然科学基金(41172203;41201029;41301017);高等学校博士学科点专项科研基金(20120094120019);中国博士后科学基金面上资助(2013M540410)
作者简介:张珍(1990—),女,硕士研究生,研究方向为地下水数值模拟及开发利用。E-mail:978750482@qq.com
通信作者:鲁程鹏,讲师。E-mail:luchengpeng@hhu.edu.cn

境保护署于1987年提出的 DRASTIC 模型^[4]。该模型能够客观评价地下水脆弱性的前提条件是:各地区的地质、水文地质条件等均具有相似性^[5]。但事实上不同地区的含水层性质等往往具有显著差异性,这使得 DRASTIC 模型的应用具有一定的局限性^[6]。因此,建立一个科学合理的地下水脆弱性评价模型并依据模型的评价结果对人类活动进行警示或约束,对地下水环境的保护至关重要。本文以江苏省南京市江宁中部地区为研究区域,针对 DRASTIC 模型存在的不足,并结合研究区实际,对传统 DRASTIC 模型评价的指标选取和权重确定进行改进,以期获得更加科学可靠的评价结果。

1 地下水脆弱性评价模型的改进

传统 DRASTIC 模型原理简单,应用广泛,但该模型属于经验性方法,在应用过程中存在很多不足。例如 DRASTIC 模型忽略了单指标的负效应,如含水层渗透系数越大,地下水污染的可能性越大的看法就显得比较片面,而未考虑渗透系数大使水流交替加快的稀释作用增强,即稀释作用越强,地下水越不易受污染^[7],因此可增加含水层富水性等指标,以改进这一不足;评价指标体系及指标权重固定不变等。2007 年孟宪萌等^[8]将信息论引入模型,建立基于熵权的改进模型,并在济宁市地下水评价应用中取得良好效果;2012 年王占辉等^[9]基于层次分析法改进的 DRASTIC 模型对邢台市山前倾斜平原区孔隙水脆弱性进行评价。本文结合地下水脆弱性的研究进展,针对模型不足并结合研究区实际情况,在指标体系构成和指标权重方面对 DRASTIC 模型进行改进。

1.1 指标体系的改进

考虑到研究区无包气带介质类型资料,在传统 DRASTIC 指标体系的基础上,以与其密切相关的包气带渗透系数代替,该数据通过野外渗水试验测定;增加了潜水含水层饱和厚度(以下简称含水层厚度)、土地利用类型、含水层富水性等 3 个指标,建立符合研究区实际的指标体系。其中含水层厚度和含水层富水性指标用以反映稀释作用对地下水脆弱性的影响,土地利用类型用以反映人类活动对地下水脆弱性的影响。传统 DRASTIC 各指标含义见参考文献^[10],本文仅对增加的 3 个指标加以说明。

1.1.1 含水层厚度

含水层厚度决定地下水储水空间大小,厚度越大,地下水储水空间及相应的储水量越大,地下水对污染物的稀释能力越强,因此地下水脆弱性也就越低。反之,含水层厚度越小,地下水稀释能力越弱,地下水脆弱性就越高^[11]。

1.1.2 土地利用类型

人类活动是加剧地下水环境恶化的重要因素,而土地利用是人类活动的重要形式之一。而土地利用类型的不同,降水入渗对地下水的补给过程和进入地下水的污染物类型及其迁移过程也不相同,因此土地利用类型是反映人类活动对地下水脆弱性影响的重要因素^[12]。参考 GB/T21010—2007《土地利用现状分类》,并结合研究区实际用地情况,土地利用类型主要包括工业用地、科教用地、住宅用地、商服用地、交通用地、林地、草地、耕地等 8 种类型,考虑到研究区内工业园区众多,将工业用地进一步细化为高新技术及先进制造业用地、一般制造业用地。

1.1.3 含水层富水性

含水层富水性是指一定降深、一定口径下的单井出水量。含水层富水性反映了含水层的储水量、渗透性和导水能力。一般而言,含水层富水性越大,表明含水层导水能力越强,污染物在含水层中的迁移扩散速度越快,污染物浓度越容易被稀释,地下水越不易受到污染;另外,在良好的补给条件下,含水层富水性越大,地下水系统就能更好地抵御补给量剧烈减少或开采量剧烈增大等突发变化,地下水量波动就越小,地下水脆弱性越低。综上所述,含水层富水性越强,地下水脆弱性越低;反之,地下水脆弱性越高^[13]。

1.2 指标权重确定方法

评价指标的权重确定方法很多,大体可分为两类:主观赋权法和客观赋权法。主观赋权法依靠决策者的专业知识和实践经验来判断各指标的相对重要程度并打分,据此确定各指标的权重。该方法虽然克服了传统 DRASTIC 模型中指标权重值固定不变的缺点,但由于不同专家的价值观和偏好的差异性,使得各指标权重的确定具有一定的主观随意性。客观赋权法通过指标本身的信息确定指标权重,避免了主观因素的干扰,但未考虑各指标对地下水脆弱性评价结果的贡献程度,以致评价结果可能会与研究区的实际情况不符。综合考虑主观赋权法和客观赋权法的优缺点,本文将层次分析法(analytic hierarchy process, AHP)和熵权法相结合,提出一种综合赋权法,即 AHP-熵权法,以获得更加科学合理的评价指标权重系数集。

1.2.1 层次分析法确定权重

层次分析法是主观赋权法的一种,它以模糊聚类分析和模式识别为理论基础,基于专家评分确定指标权重,具体过程见文献^[14]。

1.2.2 熵权法确定权重

熵权法是客观赋权法的一种。在信息论中,熵反

映了信息的无序化程度,常被用来度量信息量的大小。指标的熵值越小,表明该指标携带的信息越多,对决策结果的影响越大,其权重也较大;反之,指标熵值越大,该指标携带的信息越少,相应权重也就越小。熵权法确定评价指标权重的过程见文献[8]。

1.2.3 AHP-熵权法确定权重

鉴于主观权重和客观权重各自的优缺点,为对地下水脆弱性进行科学评价,本文综合考虑主客观因素,利用熵权法求得的客观权重对层次分析法求得的主观权重进行修正,从而得到较为可靠的指标权重。假定熵权法求得的权重向量为 $S=(S_i)_{1 \times n}$,层次分析法求得的权重向量为 $P=(P_i)_{1 \times n}$,则基于AHP-熵权法的综合权重向量 W 计算公式为

$$W=(W_i)_{1 \times n} \tag{1}$$

$$W_i=\frac{P_iS_i}{\sum_{i=1}^n P_iS_i} \tag{2}$$

式中: n 为指标总数; W_i,P_i,S_i 分别为第 i 个指标的综合权重、层次分析法权重和熵权法权重, $i=1,2,\cdots,n$ 。

2 研究区概况

南京市江宁区中部地区位于长江下游南岸,介于北纬 $30^{\circ}38' \sim 32^{\circ}13'$,东经 $118^{\circ}31' \sim 119^{\circ}04'$ 之间,总面积约 329.0 km^2 。该区地处北亚热带湿润性季风气候区,气候温和,雨水充沛,多年平均降水量约为 1045 mm 。研究区地貌自南向北可分为三带:①西南部低山丘陵;②中部的黄土岗地和少数低山突起的平原;③东北部低山丘陵,东西部低山丘陵向中部有明显倾斜。

研究区地下水类型分为松散岩类孔隙水、基岩裂隙水和碳酸岩类岩溶水。其中松散岩类孔隙水主要分布于研究区中部的秦淮河漫滩区,区内第四系冲积层厚度一般在 $15 \sim 25\text{ m}$ 之间,中心部位可达 $20 \sim 30\text{ m}$,含水层岩性以粉砂、粉细砂为主,单井最大涌水量 $100 \sim 500\text{ m}^3/\text{d}$;基岩裂隙水在全区均有分布,区内基岩主要为中生界侏罗系火山碎屑岩,局部地段有酸性侵入岩、闪长斑岩、二长花岗岩等,属宁芜中生界侏罗系火山岩沉积盆地,地下水空间分布不均,水量大小不均;碳酸盐岩岩溶水主要分布在研究区西北侧,含水层岩性为角砾状灰岩,单井最大涌水量大于 $2000\text{ m}^3/\text{d}$ 。研究区地理位置见图 1。

3 评价指标选取及分级

3.1 指标体系构成

研究区改进的地下水脆弱性指标体系构成见图 2。

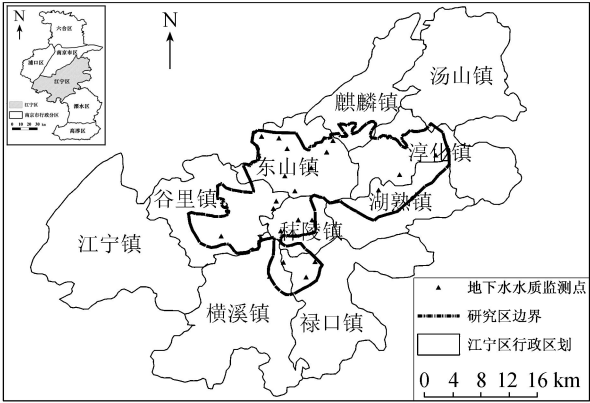


图 1 研究区地理位置示意图

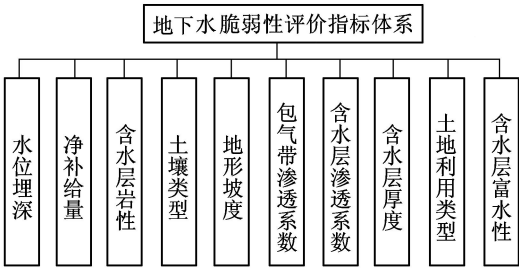


图 2 改进的地下水脆弱性评价指标体系构成

3.2 指标分级及评分

由于传统 DRASTIC 模型中各指标的分级设置存在不合理之处,因此为保证评价结果的可靠性,本文参照传统 DRASTIC 模型中各评价指标的分级标准,结合研究区地下水环境的实际情况,对各指标的数值或属性进行重新分级和评分,具体如表 1 所示。

参照表 1,对研究区地下水脆弱性评价指标进行评分,基于 ArcGIS10.0 平台,采用 Kriging 空间插值方法得到各指标的区域得分情况。

3.3 指标权重确定

根据研究区地下水脆弱性指标体系构成,分别采用 AHP、熵权法和二者相结合的 AHP-熵权法对各指标赋权,得到 10 项评价指标的权重集(表 2)。

4 地下水脆弱性评价结果分析

4.1 脆弱性指数分级

利用 ArcGIS 的空间分析等功能,将各指标按其相应权重进行叠加求和。基于 AHP、熵权法、AHP-熵权法改进的 3 种模型的脆弱性指数最小值均为 4.0,但最大值有所差别,分别为 8.3、7.0、8.1。目前尚无统一的地下水脆弱性评价结果分级标准,因此本文根据国内外研究现状,并结合研究区脆弱性指数计算结果,将其划分为 4 个等级:低脆弱区(4.0~5.0)、较低脆弱区(5.0~6.0)、较高脆弱区(6.0~7.0)、高脆弱区(>7.0)。据此分级,绘制出地下水脆弱性分级图(图 3)。

表 1 地下水脆弱性评价指标分级及评分标准

水位埋深		净补给量		含水层岩性		土壤类型		地形坡度	
分级/m	评分	分级/(mm·a ⁻¹)	评分	分级	评分	分级	评分	分级/%	评分
<2	10	65~138	2	粉细砂	2	粉质黏壤土	2	<1	10
2~3	9							1~2	9
3~4	8	138~169	4	粉砂	4	粉质壤土	4	2~3	8
4~5	7							3~4	6
5~6	6	169~241	6	砂岩	6	壤土	6	4~5	4
6~7	5							>5	2
7~8	4	241~411	8	火山岩	8	沙壤土	8		
8~9	3								
9~15	2	>241	10	灰岩	10	壤砂土	10		
>15	1								

包气带渗透系数		含水层渗透系数		含水层厚度		土地利用类型		含水层富水性	
分级/(m·a ⁻¹)	评分	分级/(m·a ⁻¹)	评分	分级/m	评分	分级	评分	分级/(m ³ ·d ⁻¹)	评分
<1	1	0.1~1	1	<20	10	商服、交通过地	4	<10	8
1~1.5	2	1~2	2	20~23.4	9	草地、林地、耕地	5		
1.5~2	3	2~4	4	23.4~25.2	8	科教用地	6	10~100	6
2~2.5	4	4~6	6	25.2~26.2	7	高新技术及先进制造业用地	7		
2.5~3	5	6~8	8	26.2~26.7	6			100~500	4
3~3.5	6	8~10	10	26.7~27.7	5	住宅用地	8		
3.5~4	7			27.7~29.4	4	一般制造业用地	9	500~1000	2
4~4.5	8			29.4~32.9	3				
4.5~5	9			32.9~39.4	2				
>5	10			>39.4	1				

表 2 地下水脆弱性评价指标权重

方法评价	权重									
	水位埋深	净补给量	含水层岩性	土壤类型	地形坡度	包气带渗透系数	含水层渗透系数	含水层厚度	土地利用类型	含水层富水性
AHP	0.280	0.245	0.050	0.069	0.022	0.110	0.083	0.033	0.054	0.054
熵权法	0.087	0.052	0.056	0.141	0.129	0.096	0.106	0.077	0.109	0.147
AHP-熵权法	0.278	0.145	0.031	0.109	0.032	0.119	0.100	0.029	0.067	0.090

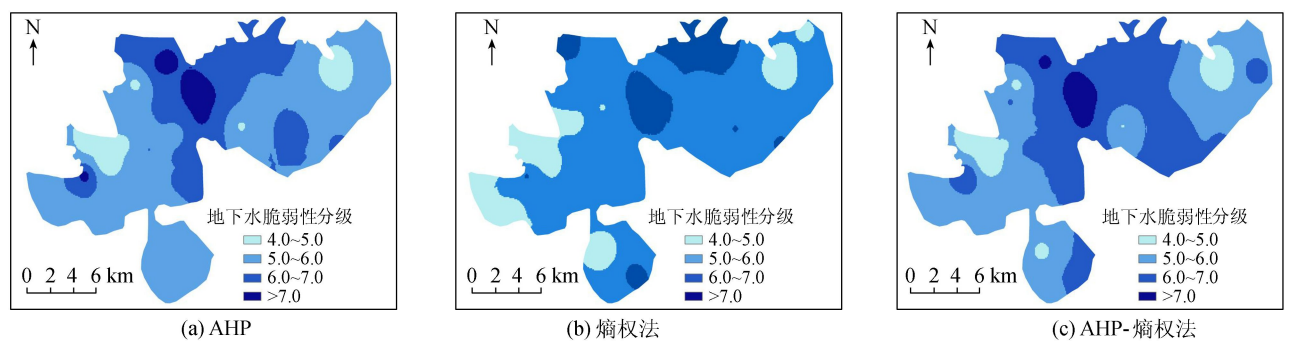


图 3 不同评价模型的地下水脆弱性分级图

4.2 评价结果分析

分析图 3 可知,3 种模型得到的脆弱性指数空间变化趋势均呈现由中部向东北、西南方向逐渐降低的趋势,这与研究区地势东西高中间低、地下水为从东、西向中间汇流,人类活动主要集中在研究区中部等实际情况相符。不同模型相同等级脆弱区的面积差异较大,利用 ArcGIS 统计 3 种模型的各等级脆弱区面积,结果如表 3 所示。

比较基于 AHP 改进的模型和基于 AHP-熵权

表 3 不同评价模型各级脆弱区面积统计

等级	AHP		熵权法		AHP-熵权法	
	面积/km ²	比例/%	面积/km ²	比例/%	面积/km ²	比例/%
低脆弱区	20.0	6.08	49.0	14.90	20.4	6.20
较低脆弱区	201.0	61.10	236.5	71.90	153.0	46.50
较高脆弱区	95.0	28.90	43.5	13.20	145.0	44.10
高脆弱区	13.0	3.92	0	0	10.6	3.20
总计	329.0	100	329.0	100	329.0	100

法改进的模型评价结果发现,两种模型的脆弱性指数范围基本一致,且两者的较高脆弱区和高脆弱区

均为土地开发利用最为集中及含水层富水性较强的地区,但后者的较高脆弱区和高脆弱区面积较前者有所增加。原因是基于 AHP-熵权法改进的模型不仅通过增加土地利用类型、含水层厚度、含水层富水性指标反映人类活动和稀释作用对地下水脆弱性的影响,而且采用主客观相结合的 AHP-熵权法对评价指标赋权,克服了层次分析法赋权的主观性,使地下水脆弱性评价结果较另外两种模型更为可靠。

4.3 评价结果验证

对研究区地下水进行水质评价,结果表明 NH₃-N 为主要污染物。为验证 AHP-熵权法改进模型评价结果较另外 2 种模型更为可靠,本文将基于 AHP、熵权法、AHP-熵权法模型得到的地下水脆弱性指数分别与 NH₃-N 质量浓度进行线性相关分析,NH₃-N 质量浓度监测数据由江宁区环境监测站于 2013 年 4 月测得。根据相关分析结果(图 4)可知,基于 AHP-熵权法改进的模型的地下水脆弱性指数与 NH₃-N 质量浓度的确定性系数值 R² 最大(0.369),层次分析法次之(0.343),熵权法最小(0.331),由此表明基于 AHP-熵权法改进的模型的地下水脆弱性指数与 NH₃-N 质量浓度相关性最高,即可验证基于该模型较其他两种模型更符合研究区实际。

4.4 单参数敏感性分析

采用单参数敏感性分析法 (SPSA) [15] 对上述 10 项指标逐一进行敏感性分析。该方法通过计算有效权重并对其进行统计分析,进而比较有效权重与理论权重,确定指标对研究区地下水脆弱性的实际贡献程度。本文理论权重为基于 AHP-熵权法获得的权重系数,有效权重通过式 (3) 进行计算。

W_e = \frac{P_r P_w}{I_{DV}} \tag{3}

式中:W_e 为指标的有效权重;P_r、P_w 分别为指标评分及其权重;I_{DV} 为地下水脆弱性指数。

利用 ArcGIS 将研究区剖分成 50 m×50 m 的单元 137 883 个,根据式 (3) 分别计算出 10 项指标的有效权重,经统计分析得到其最小值、最大值、平均

值及标准差,具体结果见表 4。

表 4 单参数敏感性分析结果 %

参数名称	理论权重	敏感性有效权重			
		最小值	最大值	平均值	标准差
水位埋深	27.8	5.9	56.0	27.9	9.1
净补给量	14.5	4.1	24.2	13.0	4.1
含水层岩性	3.1	0.1	6.8	2.1	1.4
土壤类型	10.9	3.4	20.8	10.3	2.8
地形坡度	3.2	0.8	8.8	3.0	1.7
包气带渗透系数	11.9	1.9	32.1	14.3	6.0
含水层渗透系数	10.0	1.5	16.0	5.9	3.1
含水层厚度	2.9	1.0	18.0	6.4	3.3
土地利用类型	6.7	3.3	14.0	6.9	1.5
含水层富水性	9.0	2.7	20.0	10.2	2.7

从表 4 中可知,研究区地下水脆弱性对水位埋深最为敏感,对含水层岩性最不敏感。对比各指标的有效权重和理论权重发现,含水层岩性、含水层渗透系数、含水层厚度和含水层富水性的权重变化幅度较大,前二者的有效权重较其理论权重减小,后两者的有效权重较理论权重增大,由此可知,含水层厚度和含水层富水性对研究区地下水脆弱性实际影响程度比理论上更大,进一步证实了水流稀释作用的负效应不可忽略。

5 结 语

地下水的隐蔽性使得其脆弱性评价工作较为复杂。本文所提出的改进 DRASTIC 模型在传统模型基础上,新增了含水层厚度、土地利用类型和含水层富水性 3 个指标,使得评价指标体系更加合理;分别采用 AHP、熵权法和 AHP-熵权法对比分析了评价模型的合理性,并采用线性相关分析进行验证。结果表明:针对改进指标体系,采用主客观相结合的综合赋权法更加适合南京市江宁中部地区的地下水脆弱性评价;通过单参数敏感性分析,得到水位埋深对地下水脆弱性影响最大,含水层岩性对地下水脆弱性影响最小的结论。这不仅为地下水脆弱性评价提供了一种新思路,也对当地地下水开发利用与保护政策的制定具有重大意义。

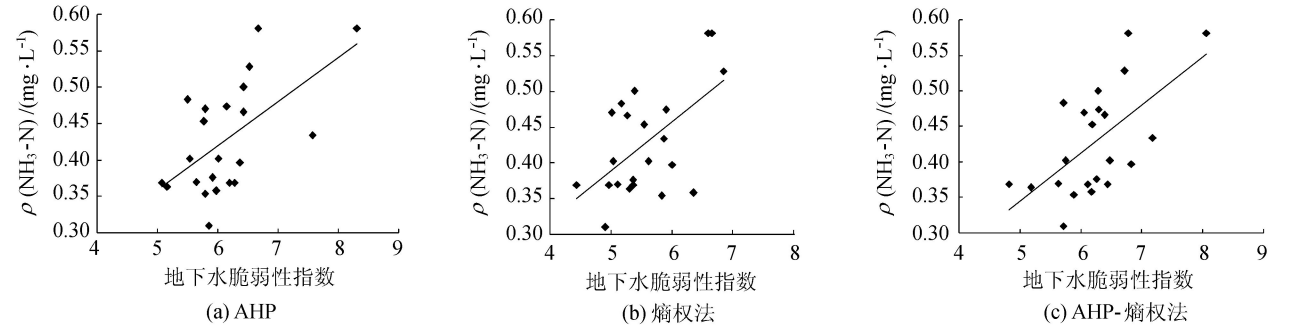


图 4 不同模型的地下水脆弱性指数与 NH₃-N 质量浓度相关情况

参考文献:

- [1] 张保祥,万力,JADE Julawong. 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. (ZHANG Baoxiang, WAN Li, JADE Julawong. Groundwater vulnerability assessment with DRASTIC method and its application in Chiangmai Basin in Thailand[J]. Water Resources Protection,2007,23(2):38-42. (in Chinese))
- [2] 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. (BIAN Jianmin, LI Lijun, YANG Po. Vulnerability of the groundwater environment in Tongyu County of Jilin Province [J]. Water Resources Protection, 2008, 24 (3): 4-7. (in Chinese))
- [3] 王万金,陈登齐. 西南岩溶区典型地下河流域地下水脆弱性评价[J]. 水资源保护,2012,28(4):45-49. (WANG Wanjin, CHEN Dengqi. Evaluation of frangibility of groundwater in a typical subterranean river basin inkarst area of Southwest China [J]. Water Resources Protection, 2012,28(4):45-49. (in Chinese))
- [4] ALLER L, BENNETT T, LEHR J H, et al. DRASTIC: A standardized system for evaluating groundwater pollution potential using hydrogeologic settings [R]. Washington: US EPA,1987.
- [5] 范琦,王贵玲,蔺文静,等. 地下水脆弱性评价方法的探讨与实例[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 [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2007, 38 (5): 601-605. (in Chinese))
- [6] 孙才志,林山杉. 地下水脆弱性概念的发展过程与评价现状及研究前景[J]. 吉林地质,2000,19(1):30-36. (SUN Caizhi, LIN Shanshan. Review of groundwater vulnerability concept and assessment [J]. Jilin Geology, 2000,19(1):30-36. (in Chinese))
- [7] 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 Airong, ZHONG Xinyong. Inadequacies of DRASTIC model and discussion of improvement [J]. Hydrogeology & Engineering Geology,2010,37(1):102-107. (in Chinese))
- [8] 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 Xianmeng, SHU Longcang, LU Yaoru. Modified DRASTIC model for groundwater vulnerability assessment based on entropy weight [J]. Journal of Hydraulic Engineering,2007,38(1):94-99. (in Chinese))
- [9] 王占辉,姜正义,徐素娟,等. 邢台山前倾斜平原区孔隙水脆弱性评价[J]. 水资源保护,2012,28(2):50-53. (WANG Zhanhui, JIANG Zhengyi, XU Sujuan, et al. Assessment of vulnerability of pore water in piedmont sloping plain in Xingtai City [J]. Water Resources Protection,2012,28(2):50-53. (in Chinese))
- [10] 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. Evaluation method for groundwater vulnerability to pollution: DRASTIC index system[J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 1999, 26(2):4-9. (in Chinese))
- [11] 杨俊. 下辽河平原地区地下水脆弱性研究[D]. 大连: 辽宁师范大学,2008.
- [12] 王甜甜. 吉林省中部地下水污染风险评价[D]. 长春: 吉林大学,2011.
- [13] 严明疆. 地下水系统脆弱性对人类活动响应研究[D]. 北京: 中国地质科学院,2006.
- [14] 陈南祥,董贵明,贺新春. 基于 AHP 的地下水环境脆弱性模糊综合评价[J]. 华北水利水电学院学报,2005,26(3):63-66. (CHEN Nanxiang, DONG Guiming, HE Xinchun. Fuzzy comprehensive evaluation of groundwater environmental vulnerability based on AHP [J]. Journal of North China Institute of Water Conservancy and Hydroelectric Power,2005,26(3):63-66. (in Chinese))
- [15] BABIKER I S, MOHAMED M A 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.

(收稿日期:2014-06-07 编辑:徐娟)

