

DRASTIC 地下水防污性能评价因子赋权

左海凤,魏加华,王光谦

(清华大学水沙科学与水利水电工程国家重点实验室,北京 100084)

摘要 针对目前使用最为广泛的 DRASTIC 评价方法中出现的,在评分标准改变的情况下,依然沿用 DRASTIC 评价权重或仅是参考 DRASTIC 权值重新定性定权的问题,采用三标度的层次分析法,力求减少人的主观判断可能造成的决策失误,给出基于我国制定的地下水防污性能评分标准的评价因子权重,其计算结果与 DRASTIC 权重值存在差异,进一步强调了介质的的重要性,定量确定了以土壤介质、包气带介质及含水层介质为主要影响因素,弱化了净补给量的影响,有利于提高评价结果的可靠性。

关键词 地下水,DRASTIC,三标度法,权重因子,评分标准

中图分类号:P641 文献标识码:A 文章编号:1004-693X(2008)02-0022-04

Method of determining factor weights for groundwater vulnerability assessment

ZUO Hai-feng, WEI Jia-hua, WANG Guang-qian

(State Key Laboratory of Hydrosience and Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

Abstract: After a discussion of the problems in the widely used DRASTIC model, that the factor weights were still determined by DRASTIC or determined qualitatively according to the weights used by the model when rating standards changed, the analytic hierarchy process (AHP), based on the three-demarcation method, was used to diminish decision-making mistakes from subjective judgment and to calculate weights based on the rating standard used in assessment by the Chinese government of groundwater vulnerability to pollution. The resulting weights are different from those of the DRASTIC model, and the importance of media is emphasized. The main factors, such as soil media, vadose zone media and aquifer media, are determined quantitatively. The influence of net recharge is abated, which can help improve the reliability of assessment.

Key words: groundwater; DRASTIC; three-demarcation method; weight value; rating standard

地下水防污性能(groundwater vulnerability to pollution)从不同的研究角度出发,亦被翻译为“地下水易污染性”、“地下水脆弱性”、“地下水敏感性”等,可分为天然防污性能(intrinsic vulnerability)和特殊防污性能(specific vulnerability),其中地下水天然防污性能是指在一定的地质与水文地质条件下,人类活动产生的所有污染物进入地下水的难易程度^[1],体现了区域的本质属性。地下水防治性能评价是防止地下水污染、保护地下水环境的前提与基础性工作,可为各级部门进行地下水污染控制与修复,进行地下水资源管理等各方面工作提供科学依

据。目前,国内外地下水防污性能评价方法大约有 30 多种,其中以 DRASTIC 评价方法的应用最为广泛,已在美国、欧盟及其他一些国家的地下水防污性能编图工作中发挥了重要作用^[2]。DRASTIC 方法于 1996 年引入我国,我国学者根据研究区实际情况,对 DRASTIC 评价方法进行了各种尝试性改进,各评价因子的等级分量标准也存在不同^[3-8]。在评价因子评分标准改变的情况下,评价指标权重将随之发生变化,照搬美国 DRASTIC 模型权重值不尽合理。为此,本文依据 2005 年中国地质调查局发布的《地下水污染调查评价规范》附件 D 中地下水系统防污

染性能评价因子的等级分量标准 ,运用基于三标度的层次分析法为 DRASTIC 各评价因子指标赋权。

1 DRASTIC 评价方法概述

DRASTIC 模型是美国环境保护署于 1987 年由 Aller 等^[9]提出 ,从众多复杂的地下水防污性能影响因素中主要考虑了地下水埋深、净补给量、含水层介质、土壤介质、地形坡度、包气带影响、水力传导系数等 7 项因子 ,各因子评分范围为 1~10 ,按照对防污性能影响大小给予权重值(表 1) ,其中对地下水污染最有影响的指标权重为 5 ,影响最小的指标权重为 1。

表 1 DRASTIC 评价因子权重

评价因子	权重值	评价因子	权重值
地下水埋深(D)	5	地形坡度(T)	1
净补给量(R)	4	包气带影响(I)	5
含水层介质(A)	3	水力传导系数(C)	3
土壤介质(S)	2		

防污性能指数为

$$D_I = D_w D_r + R_w R_r + A_w A_r + S_w S_r + T_w T_r + I_w I_r + C_w C_r$$

式中 :下标 w 为因子权重值 ; r 为因子评分值。 D_I 值越低 ,防污性能越好 ,反之越差。根据计算结果 ,区域地下水系统防污染性能评价结果可划分为 3 个等级 ,重点地区可划分为 5 个等级(表 2)。

表 2 地下水系统防污性能分级

D_I	防污性能级别	地下水防污性能评价	D_I	防污性能级别	地下水防污性能评价
100~80	I	很差	20~40	IV	较好
80~60	II	较差	<20	V	很好
40~60	III	中等			

2 基于我国评分标准的 DRASTIC 评价因子赋权

2.1 计算方法

在地下水防污性能的 7 项评价因子中 , D 、 R 、 T 、 C 因子为数值分类 ; A 、 R 、 I 因子为介质分类 ,属于典型的定性定量相结合的问题 ,因此可以运用层次分析法对这样一个多准则评价体系进行统一处理。

层次分析法(AHP)是由美国著名运筹学家 Saaty^[10] 教授于 20 世纪 70 年代中期创立的 ,其本质是一种定性定量结合的多目标决策分析方法。该方法充分利用人的经验和判断 ,把人的思维过程数学化 ,将定性问题量化处理 ,实现了定量指标与定性指标的统一 ,对目标(或因素)结构复杂同时缺少必要数据的情况更为实用。运用层次分析法解决问题的基本步骤如图 1 所示。

首先确定了层次结构模型后 ,构造判断矩阵成

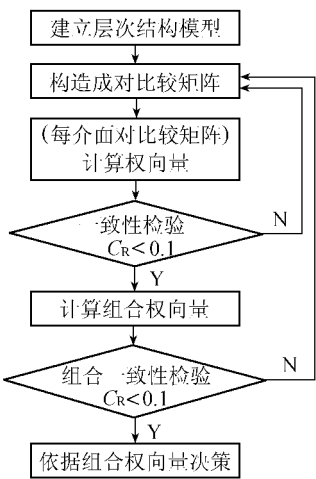


图 1 层次分析法基本步骤

为 AHP 的关键技术 ,为了将定性判断矩阵中的每个元素定量化 ,其中非常重要的一步就是标度的采用 ,标度是定量人们定性判断的一种尺度 ,是反映人们判断意识的一种定量表现。传统的 Saaty 九标度法(表 3)标度定义的“稍”与“较”、“非常”与“绝对”及等级之间中值的确定 ,在实际操作中 ,决策者对其内在逻辑关系的比较难以把握 ,常常会给出一致性较差的判断矩阵 ,同时存在调整判断矩阵的盲目性。

表 3 九标度判断值

标度 a_{ij}	定义
1	因素 i 与因素 j 相同重要
3	因素 i 比因素 j 稍重要
5	因素 i 比因素 j 较重要
7	因素 i 比因素 j 非常重要
9	因素 i 比因素 j 绝对重要
2, 4, 6, 8	因素 i 与因素 j 的重要性的比较值介于上述两个相邻等级之间
倒数	因素 j 与因素 i 比较得到判断值为 a_{ij} 的互反数 $a_{ji} = 1/a_{ij}$

左军^[11]提出用“重要”“同样重要”及“不重要”的三标度法来判断同一层次各因素的相对重要程度 ,符合人们头脑中的实际标度系统 ,进一步减小了判断的主观性 ,其主要过程为 :首先建立一个三标度的直接比较矩阵 $B = (b_{ij})_{n \times m}$

$$b_{ij} = \begin{cases} 2 & \text{因素 } i \text{ 比因素 } j \text{ 重要} \\ 1 & \text{因素 } i \text{ 和因素 } j \text{ 同样重要} \\ 0 & \text{因素 } i \text{ 没有因素 } j \text{ 重要} \end{cases}$$

然后取直接比较矩阵 B 的行要素之和

$$r_i = \sum_{j=1}^n b_{ij}$$

找出最大排序指数 $r_{\max}$ 和最小排序指数 $r_{\min}$ 所对应的 2 个基点比较要素 $B_{\max}$ 和 $B_{\min}$,参照九标度判断值得到基点比较标度 d_m ,通过以下变换求得反映各因素间相对重要程度的间接判断矩阵

$$D = (d_{ij})_{n \times m}$$

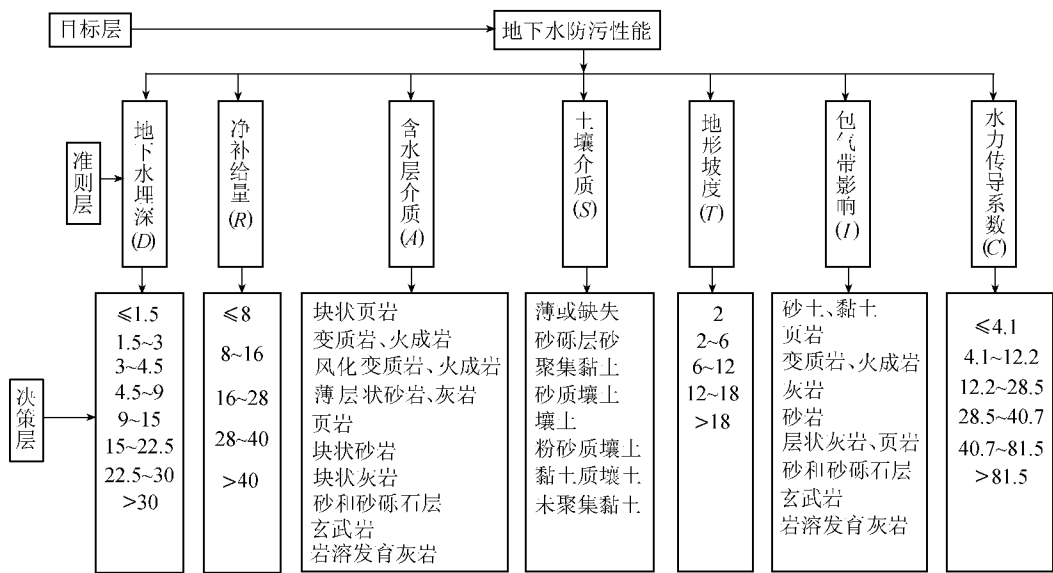


图2 地下水防污性能评价指标体系

$$d_{ij} = \begin{cases} \frac{r_i - r_j}{r_{\max} - r_{\min}}(d_m - 1) + 1 & r_i - r_j \geq 0 \\ \left[\frac{r_j - r_i}{r_{\max} - r_{\min}}(d_m - 1) + 1 \right]^{-1} & r_i - r_j < 0 \end{cases}$$

这样不仅降低了判断难度,使决策者易于接受和操作,而且可以保证易于得到具有足够满意一致性的判断矩阵。

2.2 计算步骤

2.2.1 构建地下水防污性能评价指标体系

依据 DRSTIC 模型及《地下水污染调查评价规范》制定的等级分量标准,可将地下水防污性能评价指标体系划分为由目标层、准则层、决策层组成的三级层次结构(图2),其中目标层包含1项元素,准则层包含7项元素,决策层包含52项元素。

2.2.2 单层次判断矩阵建立及一致性检验

按照上述三标度法的基本步骤,分别针对准则层的某因素,对决策层各因素两两比较,获得直接判断矩阵及间接判断矩阵,计算出决策层各评价因子的权值及判断矩阵的最大特征值 $\lambda_{\max}$ 、一致性指标 C_1 和平均一致性指标 R_1 ,最后求出随机一致性比值 C_R ,具体计算过程通过 matlab 编程实现。

一般情况下,当 $C_R \leq 0.1$,认为判断矩阵具有满意一致性;当 $C_R > 0.1$ 时,认为判断矩阵一致性偏差太大,需要重新调整判断矩阵,直到满足 $C_R \leq 0.1$ 为止。DRASTIC 各评价因子的层次单排序及一致性检验成果见表4。

2.2.3 层次总排序及一致性检验

在获得层次单排序具有满意一致性的基础上,同理计算得出52项决策层对目标层的层次总排序,各评价因子权重统计及一致性检验成果见表5。

3 成果分析

将 DRASTIC 原权重值归一化后,与上述计算所得权重值相比较得到下列结果:DRASTIC 权重排序依次为 $D, I > R > A, C > S > T$;以中国地质调查局评分区间(或类别)及评分值为标准,新赋权重排序依次为 $S > I > A > D > C > T > R$,详见表6。

对比可知,两者存在差别,并且侧重有所不同,主要体现在以下几个方面:

a. 总体而言,依据我国评分标准所赋权重,强调了介质的的重要性,定量确定以土壤介质、包气带介质及含水层介质为主要影响因素,其次为地下水埋深。

b. 对比结果中土壤介质的权重区别较大。土壤介质是指包气带最上部,具有显著生物活动的部分,在 DRASTIC 方法中所涉及的土壤介质通常为距地表平均厚度 2 m 或小于 2 m 的地表风化层。土壤介质对地表入渗补给量具有显著影响,因此也对污染物垂直向包气带运移的能力具有显著影响,一般情况下,结构、构造、厚度和有机质及黏土含量等主要土壤参数具备缓解和降低污染的预防过滤功能,与包气带介质同样在地下水防污性能中占据重要地位,而在 DRASTIC 评价方法中其权重值仅为 9%,与包气带介质 22% 的权重差距较大,本文对土壤介质所赋权值为 19%,为 7 个评价因子权重之首,包气带介质权重为 18%,二者权值相近,权重分配也较为合理。

c. 弱化了净补给量的影响。净补给是指单位面积内渗入地表到达地下水位的水量。补给水是污染物向地下水运移的主要载体,一方面垂直传输污染物,另一方面又控制着污染物在包气带及饱水带

表 4 层次单排序及一致性检验成果								
层次	D		R		A		S	
	区间划分	权重	区间划分	权重	区间划分	权重	区间划分	权重
决策层	$D \leq 1.5$	0.2104	$R \leq 8$	0.1078	块状页岩	0.0571	薄或缺失	0.1728
	$1.5 < D \leq 3$	0.1757	$8 < R \leq 16$	0.1433	变质岩、火成岩	0.0673	砂砾层	0.1728
	$3 < D \leq 4.5$	0.1486	$16 < R \leq 28$	0.1867	风化变质岩、火成岩	0.0784	砂	0.1387
	$4.5 < D \leq 9$	0.1264	$28 < R \leq 40$	0.2422	薄层状砂岩、灰岩	0.1097	收缩或聚集的黏土	0.1201
	$9 < D \leq 15$	0.1075	$R > 40$	0.3200	页岩	0.1097	砂质壤土	0.1042
	$15 < D \leq 22.5$	0.0911			块状砂岩	0.1097	壤土	0.0902
	$22.5 < D \leq 30$	0.0767			块状灰岩	0.1097	粉砂质壤土	0.0778
	$D > 30$	0.0637			砂和砂砾石层	0.1651	黏土质壤土	0.0667
检验值	$\lambda_{\max}$	8.4293		5.1954		9.3049		9.468
	C_1	0.0613		0.0489		0.0381		0.0585
	R_1	1.41		1.12		1.46		1.46
	C_R	$0.0435 < 0.1$		$0.0436 < 0.1$		$0.0261 < 0.1$		$0.0401 < 0.1$

层次	T		I		C	
	区间划分	权重	区间划分	权重	区间划分	权重
决策层	$T \leq 2$	0.3200	砂土、黏土	0.0566	$C \leq 4.1$	0.0859
	$2 < T \leq 6$	0.2422	页岩	0.0667	$4.1 < C \leq 12.2$	0.1099
	$6 < T \leq 12$	0.1867	变质岩、火成岩	0.0778	$12.2 < C \leq 28.5$	0.1378
	$12 < T \leq 18$	0.1433	灰岩	0.1016	$28.5 < C \leq 40.7$	0.1920
	$T > 18$	0.1078	砂岩	0.1016	$40.7 < C \leq 81.5$	0.2086
			层状灰岩、砂岩、页岩	0.1016	$C > 81.5$	0.2658
			砂和砂砾石层	0.1403		
			玄武岩	0.1628		
检验值	$\lambda_{\max}$	5.1954		9.3940		6.4522
	C_1	0.0489		0.0493		0.0904
	R_1	1.1200		1.4600		1.2600
	C_R	$0.0436 < 0.1$		$0.0337 < 0.1$		$0.0718 < 0.1$

表 5 层次总排序各评价因子权重统计
及一致性检验成果

评价因子	D	R	A	S	T	I	C
权重	0.158	0.0936	0.1672	0.1889	0.0999	0.1797	0.1125

注：检验值 $\lambda_{\max} = 54$; $C_1 = 0.06$; $R_1 = 1.7068$; $C_R = 0.0352 < 0.1$ 。

表 6 评价因子权重计算成果对比							
评价因子	地下水埋深 (D)	净补给量 (R)	含水层介质 (A)	土壤介质 (S)	地形坡度 (T)	包气带影响 (I)	水力传导系数 (C)
DRASTIC 权重	0.22	0.17	0.13	0.09	0.04	0.22	0.13
新赋权重	0.16	0.09	0.17	0.19	0.10	0.18	0.11

的弥散和稀释作用。补给量越大 ,地下水受到污染的可能性就越大 ,但当补给量足够大以至使污染物被稀释时 ,地下水受污染的潜势将不再增大而是减小 ,同时净补给量的获得难度大 ,精度低 ,对评价结果的可靠性存在较大影响。DRASTIC 评价方法对净补给的评分没有考虑污染物稀释因素 ,并且权值为 17% ,仅次于地下水埋深和包气带影响并高于土壤介质和含水层介质影响 ,显然不合理。根据本文计算结果 ,净补给量权值仅为 9%。

4 结 语

评价因子的相对权重反映了各个参数在地下水防污性能中的“贡献”大小 ,权重越大 ,表明该因子对地下水防污性能的相对影响越大。评价因子权重的分配 ,直接影响到评价的结果 ,是地下水防污性能评价中的关键技术。按照我国制定的地下水防污性能评分标准 ,本文得出适用于我国实际情况的评价因子权重 ,相对比较合理 ,所得评价结果将趋于可靠可信。本文权重赋值 ,是针对一般的情况 ,在进行具体研究时 ,建议参考研究区特定的地质、水文地质条件 ,对评价区间有所取舍 ,以减小无关因素对评价结果的干扰 ,建立适宜于当地的地下水防污性能评价指标体系 ,进行评价因子的重新赋权 ;同时采用 DRASTIC 方法进行评价 ,利用实地资料进行检验及对比分析 ,以进一步论证评价成果的可靠性。

参考文献：

[1] 钟佐 . 地下水防污性能评价方法探讨[J]. 地学前缘 , 2005 ,12(S1) :6-14.

(下转第 33 页)

采用遥感和 GIS 技术对水库水环境信息进行测算 , 能够简便迅速地反映出水库水环境的变化特征 , 可用于水库水利监测和管理 , 并能够实时有效地对库区水环境的变化进行动态监测及分析预报 , 体现了遥感和 GIS 技术在水库水资源的测算中的技术优势。为区域水资源的监测评价与可持续利用 , 拓展了更新的技术空间。目前 , 资源环境调查中有关地物面积信息的提取方法发展较快 , 今后可以考虑进一步把 RS 和 GIS 方法结合起来形成更加精确的水域面积提取方法来进行精确测算 , 不仅能提高水库水利信息化的水平 , 为数字水库的建设奠定基础 , 而且能为有关决策者提供科学合理的决策依据。

参考文献：

[1] HUFFMAN G J , ADLER R F , MORRISSEY M M. Global precipitation at 1 degree daily resolution from multi-satellite observation[J]. Journal of Hydrometeorology , 2000 , 2(1) : 36-50.

[2] ZHOU J. Wavelet transform method to merge land sat TM and

.....

(上接第 25 页)

[2] IBE K M , COLLIN M L , MELLOULA J. Assessment of groundwater vulnerability and its application to the development of protection strategy for the water supply aquifer in Owerri southern Nigeria[J]. Environmental Monitoring and Assessment 2001 , 67 : 323-360.

[3] 杨庆 奕茂田 . 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(2) : 4-9.

[4] 付素蓉 , 王焰新 , 蔡鹤生 , 等 . 城市地下水污染敏感性分析[J]. 中国地质大学学报 : 地球科学 , 2000 , 25(5) : 482-486.

[5] 刘淑芳 , 郭永海 . 区域地下水防污性能评价方法及其在河北平原的应用[J]. 河北地质学院学报 , 1996 , 19(1) : 41-45.

[6] 姜志群 , 朱元生 . 地下水污染敏感性评价中 DRASTIC 法

SPOT panchromatic data[J]. Remote Sensing , 1998 , 19(4) : 143-157.

[3] YESOU H. Merging SEASAT and SPOT study of geologic structure in a temperate agricultural region[J]. Remote Sensing and Environment , 1993 , 43 : 165-180.

[4] 都金康 , 黄永胜 , 冯学智 , 等 . SPOT 卫星影像的水体提取方法及分类研究[J]. 遥感学报 , 2001 , 5(3) : 114-119.

[5] 王学军 . 空间分析技术与地理信息系统的结合[J]. 地理研究 , 1999(3) : 70-73.

[6] 何延波 , 杨琨 . 遥感和地理信息系统在水文模型中的应用[J]. 地质地球化学 , 1999 , 21(2) : 99-103.

[7] 泰安市统计局 . 泰安市 2001 年统计年鉴[M]. 北京 : 中国统计出版社 , 2002.

[8] 莱芜市统计局 . 莱芜市 1999 年统计年鉴[M]. 北京 : 中国统计出版社 , 2000.

[9] 龚健雅 . 地理信息系统基础[M]. 北京 : 科学出版社 , 2001.

[10] 戴昌达 , 姜小光 , 唐伶俐 . 遥感图像应用处理与分析[M]. 北京 : 清华大学出版社 , 2004.

(收稿日期 : 2006-11-20 编辑 : 高渭文)

的应用[J]. 河海大学学报 : 自然科学版 , 2001 , 29(2) : 100-103.

[7] 王焰新 , 郭华明 , 阎世龙 , 等 . 浅层孔隙地下水系统环境演化及污染敏感性研究[M]. 北京 : 科学出版社 , 2004.

[8] 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.

[9] ALLER L. DRASTIC : a standardized system for evaluating groundwater pollution potential using hydrogeologic settings[R]. US Environmental Protection Agency , Ada , OK , EPA/600/2-87-036 , 1987 : 445.

[10] SAATY T L , BENNETT J P. A theory of analytical hierarchies applied to political candidacy[J]. Behavioral Science , 1977 , 22 : 237-245.

[11] 左军 . 层次分析法中判断矩阵的间接给出法[J]. 系统工程 , 1988 , 10(6) : 56-63.

(收稿日期 : 2006-12-15 编辑 : 高渭文)

· 简讯 ·

河海大学获 3 项国家科技奖

2007 年度国家科技奖励大会于 2008 年 1 月 8 日在北京人民大会堂举行 , 河海大学获得 3 项国家科技奖。其中王超教授主持的“不同水动力条件下污染物输移过程及系统耦合模型研究”获国家自然科学基金二等奖 , 吴中如院士领衔的“重大水工混凝土结构隐患病害检测与健康诊断研究”和河海大学参与的“紊流模拟技术及其在水利水电工程中的应用”均获国家科技进步二等奖。

另外 , 至目前有关单位已公布的评选结果中 , 河海大学已获得 2007 年度部、省级科技进步奖 16 项。

(本刊编辑部供稿)