

石门沟水源地的地下水脆弱性评价

吴存, 冯民权, 李小牛

(西安理工大学 西北水资源与环境生态教育部重点实验室, 陕西 西安 710048)

摘要: 对石门沟水源地地下水系统进行了脆弱性评价, 以期为该区域地下水资源的合理利用和科学管理提供技术支持。采用参数系统法中的 DRASTIC 指标, 对研究区进行分区并对评价因子评分, 通过构建矩阵进行运算得出脆弱性指数。结果发现, 石门沟水源地地下水系统的脆弱性指数介于 100~128 之间, 为低脆弱性和中等脆弱性。将整个研究区划分为两类 6 个区域, 其脆弱性呈现由东北向西南逐次减弱的趋势。研究表明, 岩溶发育地区的地下水脆弱性较其它岩性地区偏弱。地下水系统的脆弱性由含水层固有属性因子决定, 但人为外部因素的改变也会对其造成极大的影响。

关键词: 地下水脆弱性; DRASTIC 方法; 石门沟水源地; 指标体系

文献标识码: A

文章编号: 1000-288X(2011)03-0251-04

中图分类号: X523

Evaluation of Groundwater Vulnerability in Shimengou Water Source Area

WU Cun, FENG Min-quan, LI Xiao-niu

(Key Laboratory of Northwest Water Resources and Environmental Ecology of the Education Ministry, Xi'an University of Technology, Xi'an, Shaanxi 710048, China)

Abstract: We assessed the vulnerability of the groundwater system of Shimengou, in order to provide scientific support for rational utilization and managements of the groundwater resources of the area. The study area was divided and then scored for each evaluation factor using indexes of depth of water, net recharge, aquifer media, soil media, topography, impact of the vadose zone, and hydraulic conductivity of the aquifer (DRASTIC). The vulnerability index was calculated through building matrix. Results showed that the groundwater vulnerability index was between 100 to 128 in the study region, which was between the low and medium range. The study region was divided into six sub-regions in two groups, and the vulnerability showed a decreasing trend from northeast to southwest. In general, groundwater vulnerability in the karst area is less severe than that of other lithologic areas. Groundwater vulnerability is determined by intrinsic attributes of aquifer, but it can be affected by external factors exerted by the human activities.

Keywords: vulnerability of groundwater; DRASTIC; Shimengou groundwater source area; index system

“地下水脆弱性”这一术语最早于 1968 年由法国水文地质学家 Margat^[1] 提出, 但在其后的 20 a 余间, 有关“地下水脆弱性”的概念基本上处于不确定的模糊状态, 许多学者从不同的角度给予定义。以 1987 年为界可分为 2 个发展阶段: 在 1987 年以前, 有关地下水脆弱性的概念多是从水角度给“地下水脆弱性”以不同的定义。大体说来, “地下水脆弱性”概念主要是从水文地质本身的内部要素(如地下水埋深、地下水的平均流速、表层沉积物的渗透性等)这一角度来定义的。在 1987 年的“土壤与地下水脆弱性国际会议”上, “地下水脆弱性”的定义有了新的突破, 学者们认为在考虑水文地质内部因素的同时, 应该兼顾人

类活动和污染源等外部因素对地下水脆弱性的影响^[2]。美国国家科学研究委员会^[3]于 1993 年给予地下水脆弱性如下定义: 地下水脆弱性是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。同时, 该委员会将地下水脆弱性分为两类: 一类是本质脆弱性, 指在天然状态下含水层对污染所表现出的内部固有的敏感性, 它不考虑污染源或污染物的性质和类型, 是静态、不可变和人为不可控制的; 另一类是特殊脆弱性, 即地下水对特定污染源或人类活动所表现的敏感性, 它与污染源和人类活动有关, 是动态、可变和人为可控制的^[4]。目前国内外的学者都倾向于美国国家科学研究委员会的主张。

地下水脆弱性评价的主要方法有水文地质背景值法、参数系统法、相关分析与数值模型法等。参数系统法中的 DRASTIC 评价标准在目前地下水脆弱性评价中应用最为广泛。它由美国环境保护局于 1987 年提出^[9], 先后应用于美国各地的地下水脆弱性评价工作中, 取得了良好的效果。我国从 20 世纪 90 年代开始引进该方法, 近年来在全国多处得到应用^[69]。

石门沟水源地位于山西省汾阳市杏花村汾酒厂北部, 该水源地是杏花村汾酒公司工业及厂区生活主要供水水源, 该水源地水质的优劣, 对于保证汾酒的质量具有极其重要的意义。石门沟水源地地下水属于郭庄泉域岩溶水系统北部陈台—石盘山岩溶水亚系统, 岩溶含水层的特殊性导致污染物极易进入地下含水层, 并在岩溶管道中快速运移, 与其它岩性含水层相比, 岩溶含水层的保护面临更大的挑战。本文采用 DRASTIC 地下水脆弱性评价方法, 对石门沟水源地地下水系统做出评价, 为该地下水资源的合理利用和科学管理提供技术支持。

1 评价指标体系的确定

DRASTIC 方法选择地下水埋深 (depth of water), 净补给量 (net recharge), 含水层介质 (aquifer media), 土壤介质 (soil media), 地形坡度 (topography), 非饱和带影响 (impact of the vadose zone) 和水力传导系数 (hydraulic conductivity of the aquifer) 7 个因子构成评价指标体系。

该方法的指标由 3 部分组成: 权重、范围(类别)和评分。(1) 权重。每个 DRASTIC 评价参数根据其地下水防污性能的影响作用大小被赋予一定的权重, 权重值大小为 1~5, 最重要的评价参数取 5, 最不重要的评价参数取 1(见表 1)。(2) 范围(类别)。对每个 DRASTIC 评价参数来说, 根据其地下水防污性能的作用大小可分为不同的范围(类别)。(3) 评分。每个 DRASTIC 评价参数其评分取值范围为 1~10, 分别对应于每一评价参数的变化范围(类别, 见表 2)^[10]。

表 1 DRASTIC 各评价参数的权重值

评价参数	地下水位埋深	净补给量	含水层介质	土壤岩性	地形坡度	非饱和带介质	含水层水力传导系数
权重	5	4	3	2	1	5	3

表 2 DRASTIC 指标的范围(类别)和评分

名称	范围	评分	名称	类型	评分
地下水位埋深 D/m	0~1.5	10	含水层介质 A	块状页岩	2
	1.5~4.5	9		变质岩、火成岩	3
	4.5~9.0	7		风化变质岩、火成岩	4
	9.0~15.0	5		冰渍层	5
	15.0~22.5	3		层状砂岩、灰岩及页岩	6
	22.5~30	2		砂、砾石	8
	>30	1		玄武岩	9
净补给量 R/mm	<50	1	土壤岩性 S	岩溶发育的灰岩	10
	50~100	3		薄层或无、砾石	10
	100~175	6		砂层	9
	175~250	8		泥炭层	8
	>250	9		涨缩性黏土	7
				砂质壤土	6
地形坡度 $T/\%$	<2	10	非饱和带 介质 I	壤土	5
	2~6	9		粉砂壤土	4
	6~12	5		黏壤土	3
	12~18	3		承压层	1
	>18	1		粉土、黏土、页岩	3
含水层水力 传导系数 $C/(m \cdot d^{-1})$	<4.1	1		变质岩、火成岩	4
	4.1~12.2	2		层状砂岩、灰岩及页岩、	
	12.2~28.5	4		砂岩、灰岩、砂砾石	6
	28.5~40.7	6		砂及砾石	8
	40.7~81.5	8		玄武岩	9
	>81.5	10		岩溶发育的灰岩	10

按照各评价指标数值的大小或种类的不同划分不同的范围或类别,并赋予各自的评分。将7项指标评分进行加权和运算确定 DRASTIC 脆弱性指数 DI。

$$DI = \sum_{i=1}^n w_{ij} \times R_{ij} \quad (1)$$

式中: w_{ij} ——第 i 个子系统中第 j 个评价指标的权重; R_{ij} ——第 i 个子系统中第 j 个评价指标评分值。地下水脆弱性指数的范围在 23 ~ 226 之间, DI 值越大,说明该区域地下水脆弱性越弱,越容易受到污染。评价结果采用等间距方法分为 5 个等级:极低脆弱性、低脆弱性、中等脆弱性、高脆弱性和极高脆弱性。

2 石门沟水源地地下水脆弱性评价

2.1 研究区概况

石门沟水源地位于山西省汾阳市杏花村汾酒厂北部 5 km 的黄土台塬的沟谷中,属于郭庄泉域岩溶水系统北部陈台—石盘山岩溶水亚系统,亚系统内岩溶水的补给、径流和排泄具有相对的独立性。该水源地为该地区工业和生活主要供水水源,年开采岩溶地下水为 $2.50 \times 10^6 \text{ m}^3$ 。根据石门沟水源地钻孔资料,15 a 以来水位累计下降 81.86 m,年均水位下降速率为 5.46 m。地下水的补给以降水直接入渗为主。

该水源地总面积 353.0 km²,其中碳酸盐岩裸露面积 102.0 km²,碳酸盐岩被松散层及碎屑岩类覆盖或埋藏面积 174.0 km²,变质岩分布面积 77.0 km²。岩溶地下水位埋深 203 ~ 234 m,水位标高 623 m 左右。水源区地形由东北往西南逐渐降低。

含水层主要为奥陶系碳酸盐岩溶水含水岩组,岩质主要为灰岩,中间夹有少量石膏、页岩。最大单位涌水量 18.6 L/(s·m),渗透系数 6 ~ 10 m/d,属于岩溶裂隙发育、富水性强的含水层。在该亚系统内,还有上覆地层的松散岩类孔隙水含水岩组,碎屑岩类裂隙水含水岩组,下伏地层的火成岩、变质岩裂隙水含水岩组。除火成岩外,含水层岩性以灰岩、豹皮灰岩、泥质灰岩、竹叶状灰岩、鲕状灰岩为主,白云岩次之;寒武系底部的砂岩页岩为隔水层。

2.2 研究区地下水脆弱性指数

此次评价以 DRASTIC 方法的 7 个参数构建评价体系。根据研究区水文地质实际状况和地貌地形,将研究区由东北向西南分为 10 个区^[11](见图 1),赋予 7 个指标不同的评分值。

研究区确定的 7 个指标参数中,非饱和带介质权重为最大值 5,非饱和带介质决定地下水流动的速度,进而影响水流中的扩散、弥散、吸附等作用。研究区内非饱和带介质主要为砂岩、灰岩、砂砾石,岩溶发

育的灰岩大量分布,中间夹杂粉土、黏土、页岩,评分值均比较大,因而在此次评价中,非饱和带介质对整个评价影响最大。地下水埋深也是最主要因子,因研究区地下水埋深为 203 ~ 234 m,远超过评分最大范围 30 m,其评分为 1,虽然其权重值为最大值 5,但对整个评价的影响很小。净补给量影响权重值为 4,对地下水系统的脆弱性评价有利弊两方面的影响。研究区地下水的补给以降水直接入渗为主,多年平均降雨量为 492.9 mm,属于半干旱地区,地下水因外界补给偏少水量增加缓慢,单从地下水量来看,脆弱性趋向增大;但另一方面,因为研究区岩溶发育,地面和土壤中的污染物极容易随补给水进入含水层并在含水层内运移,外界补给水为污染物的主要载体,补给量越大,对于地下水污染的潜在趋势就越大,脆弱性就越高,而研究区降水偏少,污染物随补给水渗入地下的风险较小。含水层介质和含水层水力传导系数反映的是含水层的储水性、渗透性和水力传输性能,其性能和系数越大,污染物的运移速度越快,则地下水系统越脆弱。研究区含水层水力传导系数为 6 ~ 10 m/d,评分为 2,因为含水层中有大量岩溶发育的灰岩存在,岩溶含水层具有显著的不均匀性和补给的二元特性(外源水和内源水),特殊的入渗(点状与面状结合)和孔隙介质(管道与裂隙并重),污染物常常随入渗水进入含水层,因而这 2 个因子对地下水脆弱性影响较大。土壤岩性和地形坡度均反映的是覆盖含水层的外部土层的状况,研究区土壤多为砂质土,地形高差很大,坡度大多大于 15%,加之两者权重值均很小,对整个评价影响较小。本次评价主要针对含水层在天然状态下固有脆弱性进行,其脆弱性程度主要决定于水文地质条件,研究区的植被覆盖条件和人工对地下水开采等其它外部因素一概不做考虑。

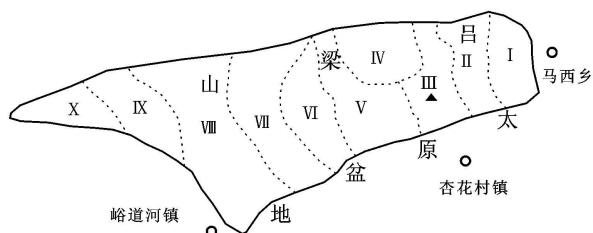


图 1 石门沟水源地分区示意图

由公式(1),可通过构造 2 个矩阵计算出结果。由权重值构成的 1×7 阶矩阵:

$$w_j = [5 \quad 4 \quad 3 \quad 2 \quad 1 \quad 5 \quad 3]$$

由研究区划分的 10 个区及 7 个指标不同的评分值,构成一个 7×10 阶矩阵:

$$R_{ij} = \begin{bmatrix} D & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ R & 8 & 8 & 8 & 8 & 9 & 9 & 9 & 9 & 8 & 8 \\ A & 10 & 10 & 10 & 6 & 6 & 6 & 4 & 4 & 10 & 10 \\ S & 8 & 8 & 8 & 6 & 6 & 6 & 6 & 4 & 6 & 4 \\ T & 5 & 3 & 3 & 3 & 1 & 1 & 1 & 3 & 3 & 3 \\ I & 3 & 3 & 6 & 6 & 6 & 10 & 10 & 6 & 6 & 6 \\ C & 2 & 2 & 2 & 2 & 2 & 2 & 2 & 2 & 2 & 2 \end{bmatrix}$$

运算可得出脆弱性指数:

$$DI = (w_{ij} \times R_{ij}) \\ = (109 \quad 107 \quad 122 \quad 106 \quad 108 \quad 128 \quad 122 \\ 100 \quad 118 \quad 114)$$

由结果可看出,脆弱性指数介于 100~128,为低脆弱性和中等脆弱性,研究区地下水系统总体安全,抵御外界胁迫的自我保护能力较强。根据脆弱性运算结果,以低、中等脆弱性分界,可将整个研究区大致划分为两类 6 个区域(见图 2),且脆弱性呈现由东北向西南逐次减弱的趋势,这种趋势与城镇取水主要位于该水源地南部有关。本次评价主要针对含水层在天然状态下固有脆弱性进行,其脆弱性程度主要决定于水文地质条件,研究区的植被覆盖条件和人工对地下水开采等其它外部因素一概不做考虑。

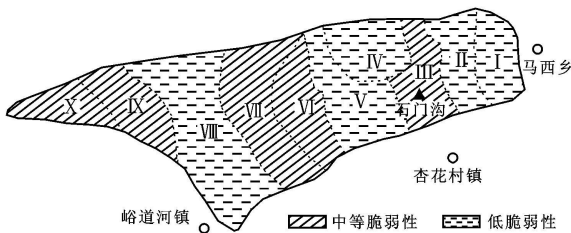


图 2 石门沟水源地地下水脆弱性等级评价分区图

3 结论

(1) 经过评价,石门沟水源地的地下水系统总体处于安全,脆弱性评价处于低脆弱性、中等脆弱性。在 7 个评价体系因子中,因研究区的非饱和带介质主要为岩溶发育的灰岩,评价权重为 5,评分为 10,均为最大值,对整个评价结果影响最大;同样原因,含水层介质的影响次之。因此,在岩溶发育地区,地下水系统脆弱性要比其它岩性地区偏弱。

(2) 研究区脆弱性呈现由东北向西南逐次减弱的趋势,经分析主要是由于当地取水口集中于东南

部,2009 年取水达 $2.50 \times 10^6 \text{ m}^3$,呈现超采状态,这对整个地下水系统影响较大。可见地下水的固有脆弱性虽由含水层固有属性因子决定,但人为外部因素的施加将极大影响系统的脆弱性。且随外部因素的增多和影响的加大,有可能整个系统的脆弱性由外部因素而决定,进而取代固有属性居于主导地位。

[参 考 文 献]

- [1] Jaroslav V, Alexander Z. Guidebook on Mapping Groundwater Vulnerability[C] //International Contributions to Hydrogeology Founded by Castany G, Groba E, Romijn E. 1994; 21-23.
- [2] Duijvenbooden W, van Waegengh H G. Vulnerability of soil and groundwater to pollutants[C] //Proceedings International Conference. Steasdrukkerij, Gravenhage, Netherlands, 1987.
- [3] National Research Council(U. S.). Groundwater vulnerability assessment-predicting relative contamination potential under conditions of uncertainty[C] //Committee on Techniques for Assessing Ground Water vulnerability. National Research Council, National Academy Press, Washington D C, 1993; 204-205.
- [4] 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.
- [5] 贺新春,邵东国,陈南祥,等.几种评价地下水环境脆弱性方法之比较[J].长江科学院院报,2005,22(3):17-24.
- [6] 杨维,王虎,李宝兰,等.应用 DRASTIC、AHP 对地下水脆弱性的评价比较[J].沈阳建筑大学学报:自然科学版,2007,23(3):489-492.
- [7] 严明疆,申建梅,张光辉,等.滹沱平原地下水资源脆弱性时变分析[J].水土保持通报,2006,26(5):46-48.
- [8] 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,2008,14(4):134-141.
- [9] 范琦,王贵玲,陈浩,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.
- [10] 张保祥,万力, Jade J 等. 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.
- [11] 山西省水资源研究所.山西金地煤焦有限公司赤峪煤矿 300 万 t/a 矿井开采对杏花村汾酒集团石门沟水源地影响补充分析报告[R].太原:山西省水资源研究所,2010.