

# 娘子关泉域岩溶水脆弱性模糊综合评价

赵春红, 梁永平, 卢海平, 王维泰

(中国地质科学院岩溶地质研究所/国土资源部、广西壮族自治区岩溶动力学重点实验室, 广西 桂林 541004)

**摘要:**地下水脆弱性评价是区域地下水资源管理和保护的重要手段之一, 针对娘子关泉域岩溶水的特殊性, 基于欧洲脆弱性评价方法, 选择包气带厚度、入渗补给量、包气带岩性、岩溶含水层的导水性能(泉水响应)四个因子, 采用模糊综合评价法评价地下水脆弱性, 并且绘制地下水脆弱性分区图。评价结果表明, 极易污染区主要分布在娘子关泉群出露的地区, 即泉源处; 极难污染区主要分布在盂县—阳泉—平定—昔阳—和顺一带以西地区, 寿阳县大部分地区。评价结果在合理制定保护娘子关泉域方面具有一定的参考价值。

**关键词:**地下水脆弱性; 模糊综合评价; 脆弱性分区; 娘子关泉域

中图分类号: X82; P641.134

文献标识码: A

文章编号: 1000-0852(2013)05-0052-06

娘子关泉群位于山西省阳泉市平定县娘子关镇附近, 出露于桃河与温河汇集地段; 泉域岩溶水汇水面积 7 436 km<sup>2</sup>, 多年平均流量达 11.08 m<sup>3</sup>/s, 是阳泉市最重要的供水水源, 在维持城市供水、工农业生产和能源基地建设发挥着不可替代的支撑性作用。娘子关泉域是我国北方, 乃至世界上干旱、半干旱区最大的岩溶泉域之一, 泉域边界相对完整, 岩溶水资源循环独立, 不仅具有“煤在楼上, 水在楼下”的“煤—水”共存的我国北方岩溶水资源的独特结构特点, 而且其发育规模和循环条件都具有我国北方岩溶泉域系统的典型特点。随着泉域内煤矿等工矿企业以及水资源的大规模开采, 岩溶水逐渐恶化, 如何合理有效的开发与保护岩溶水已经成为一个亟待解决的问题, 而地下水脆弱性评价是区域地下水资源管理和保护的重要手段之一。本文在“欧洲方法”的基础上, 采用模糊综合评价法, 对娘子关泉域岩溶水系统进行脆弱性评价。

## 1 研究区概况

娘子关泉域位于山西太行山隆起区, 处于阜平隆起南部、赞皇隆起西侧和沁水拗陷东北端。地层形态特

征为 NE 翘起, WS 倾伏的簸箕状向斜构造。泉域内地层岩性由老到新主要有: 太古界变质岩; 元古界滹沱群变质岩及长城系石英砂岩、页岩; 下古生界寒武—奥陶系碳酸盐岩; 上古生界石炭系, 二叠系煤系地层; 中生界三叠系碎屑岩; 新生界第三系及第四系松散岩类及玄武岩, 详见图 1。

泉域内主要含水层组为: (1) 寒武系下部以紫红色页岩、泥岩夹白云岩为主, 是泉域内稳定的隔水岩层; 中上部是厚层鲕状灰岩, 白云质灰岩、粗晶白云岩及竹叶状灰岩, 岩溶裂隙发育, 为含水层组; (2) 下奥陶统为含燧石结核的白云岩及泥质白云岩, 为含水层组, 娘子关泉群主要出露于下奥陶统白云岩中; (3) 中奥陶统碳酸盐岩, 以质纯灰岩、斑状白云质灰岩为主夹三层膏溶角砾岩, 为补给娘子关泉群的主要含水层组。

## 2 评价思路与方法

目前有关地下水脆弱性评价应用最多的是美国环境保护署(EPA)于 1987 年提出的 DRASTIC 法<sup>[1]</sup>, 该方法主要是针对于第四系松散岩类孔隙水的, 没有考虑岩溶含水层的非均质性等特殊性的, 因此不适用于岩溶

收稿日期: 2013-03-18

基金项目: 国土资源部公益性行业科研项目“中国北方岩溶区地下水环境问题成因机制与保护对策研究”(200811022); 中国地质调查局地质调查项目“北方岩溶区水文地质环境地质调查示范”(1212011220940); 国家重点基础研究发展计划(973 计划)项目(2011CB201001); 中国地质科学院岩溶地质研究所基本科研业务费项目(201302)

作者简介: 赵春红 (1986-), 女, 河南项城人, 研究实习员, 硕士, 主要从事岩溶水文地质调查与研究、水资源评价等工作。

E-mail: zhaochunhong@karst.ac.cn

通讯作者: 梁永平 (1962-), 男, 山西平遥人, 研究员, 长期从事北方岩溶地下水调查与研究。 E-mail: lyp0261@karst.ac.cn

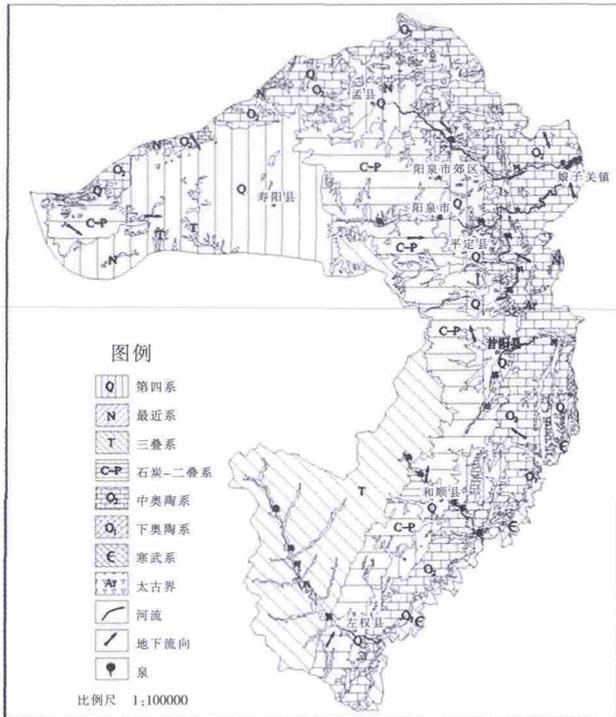


图1 娘子关泉域地质略图  
Fig.1 The geological condition in the Niangziguan spring area

地区的脆弱性研究<sup>[2]</sup>。针对岩溶含水层的脆弱性评价,欧洲学者提出欧洲评价标准,即“欧洲方法”<sup>[3]</sup>,在“源—路径—目标”概念模型的基础上,主要考虑上覆地层(O)、径流特征(C)、降水条件(P)和岩溶网络(K)四个因子,详细考虑了岩溶含水系统的特性以及落水洞、竖井、漏斗等岩溶形态对地下水脆弱性的影响,但是岩溶的这些形态在我国西南地区比较典型,大气降水通常通过落水洞、竖井、漏斗等直接补给岩溶含水层;而在我国北方,岩溶水以相对独立单元进行循环,构成一系列规模不等的岩溶水系统<sup>[4]</sup>,岩溶含水介质比较均匀,以溶蚀裂隙和局部的岩溶管道为主<sup>[5]</sup>;碳酸盐岩裸露型地区大气降水以面状形式补给地下水,覆盖型及埋藏型地区大气降水一般需要经过数百米甚至上千米的覆盖层,由上向下近活塞式补给岩溶含水层,因此针对娘子关泉域岩溶水系统,在欧洲方法的基础上,采用模糊综合评价法进行脆弱性评价。

### 3 评价因子的选取及级别划分

结合娘子关泉域岩溶水系统的水文地质条件,选择包气带厚度、垂直入渗补给量、包气带岩性及岩溶含水层导水性能四个因子,分别介绍如下。

#### 3.1 包气带厚度

包气带是指地面与地下水水面之间的部分,是地下水与地表水、大气圈以及植被生态系统相互联系的重要纽带,也是污染物进入含水层的必经途径。参考《山西省娘子关泉域岩溶水资源评价及其开发利用科研》报告,系统岩溶含水层包气带的垂直渗透系数为37 m/a,评价中按照在包气带中渗流时间,以1a、5a、10a、20a划分研究区包气带厚度,见表1。

表1 娘子关泉岩溶水系统包气带厚度分级表  
Table1 The thickness grading of the unsaturated zone in the Niangziguan spring karst water system

包气带厚度/m	0~37	37~185	185~370	370~740	> 740
级别	5	4	3	2	1

包气带厚度愈薄,其级别越高,表示地下水环境越脆弱,越易遭受到污染。但是,在碳酸盐岩埋藏区,寒武—奥陶碳酸盐岩含水岩组的入渗补给为0,所以包气带的厚度大小对埋藏区没有影响,碳酸盐岩埋藏区不论包气带厚度为多薄,都属于极难污染区,划分级别时都属于1级。

#### 3.2 泉域内大气降水入渗补给量及河流渗漏补给量 (入渗补给量)

娘子关泉岩溶水系统主要补给来源有大气降水的面状入渗补给(包括碳酸盐岩裸露区的直接入渗补给和松散层覆盖区的间接入渗补给)、河流在碳酸盐岩区的线状渗漏补给以及水库点状渗漏补给。

降水入渗补给分为四种情况,第一为岩溶相对发育的中奥陶统碳酸盐岩裸露区,该区降雨入渗系数为0.2763;第二为岩溶发育相对较弱的下奥陶统和寒武系碳酸盐岩裸露区,该区降雨入渗系数为0.123;第三为碳酸盐岩覆盖区,该区降雨入渗系数为0.10;第四为碳酸盐岩埋藏区,对寒武—奥陶碳酸盐岩含水岩组的入渗补给为0<sup>[6]</sup>。根据研究区以往观测资料,计算各单位面积上大气降雨入渗补给量和河流线状渗漏补给。全区地表水库在碳酸盐岩裸露区存在渗漏的主要为大石门水库和油瓮水库,前人计算大石门水库的渗漏量为0.095m<sup>3</sup>/s,油瓮水库渗漏量在3000m<sup>3</sup>/d左右。

汇总以上补给,计算的系统内不同区岩溶水单位面积补给量(包括大气降雨入渗补给,河流渗漏、水库渗漏补给)从0~3256mm/a不等,考虑到不同补给量在系统内的分布面积,我们采用表2分级标准进行入渗补给量分级。

表2 娘子关岩溶水系统补给强度分级表  
Table2 The recharge intensity grading in the Niangziguan spring karst water system

补给量/mm·a <sup>-1</sup>	3256~200	150~200	100~150	50~100	0~50
模糊综合评价法级别	5	4	3	2	1

地表污染物一般随着大气降水,河流、水库渗漏补给地下水,入渗补给量越大,污染物进入含水层的可能性就越大,地下水环境也就越脆弱,其级别值越大。

### 3.3 包气带岩性

包气带岩性是对各种污染物在包气带内吸附能力的一种表征,影响因素包括岩性本身的吸附能力和对

地下水的传输速度两方面。泉域内岩性划分为河床—砂砾石层、中奥陶系碳酸盐岩裸露区—碳酸盐岩、下奥陶系—寒武系碳酸盐岩裸露区—碳酸盐岩、碳酸盐岩覆盖区—松散层、碳酸盐岩埋藏区—松散层及碎屑岩5种类型。总的来说,河谷—砂砾石层入渗最快,吸附能力最弱;碳酸盐岩裸露区入渗速度相对较快,吸附能力较弱;碳酸盐岩覆盖区传输速度慢,吸附相对强;碳酸盐岩埋藏区传输速度为0(对岩溶含水层)。因该指标为定性指标,分级中无法连续取值,因此各类指标取其中值,分级结果见表3。级别越大,表示对地下水的影响越大,该岩层越脆弱。

表3 娘子关岩溶水系统包气带岩性分级评分表  
Table3 The lithology grading of the unsaturated zone in the Niangziguan spring karst water system

包气带岩性	河谷—砂砾石层	中奥陶系碳酸盐岩裸露区—碳酸盐岩	下奥陶系—寒武系碳酸盐岩裸露区—碳酸盐岩	碳酸盐岩覆盖区—松散层	碳酸盐岩埋藏区—松散层及碎屑岩
级别	4.5	3.5	2.5	1.5	0.5

### 3.4 岩溶含水层的导水性能

岩溶含水层的导水性能(以娘子关泉群为核心,1个水文年内抽水时泉水量削减度响应,简称为泉水响应)是指含水层对污染物质的传递,引入该因子的目的主要是根据一些重要开采区(泉水排泄区或重要水源地)污染保护评价需要而确定。娘子关泉水是研究区最重要的供水水源地,岩溶含水层的导水性能主要是围绕其对娘子关泉水的影响程度而进行的,因此,该因子按不同区内抽水对泉水量削减量进行划分。根据在泉点抽水,在1个水文年内其他地区泉水的削减率(% ,简称泉水响应)按100%、80%、50%、30%、10%划分为5个级别(表4)。同一时间内,某区内泉水削减率越大,表明地下水越脆弱,越易受到污染。

表4 娘子关泉域1个水文年泉水响应分级表  
Table4 The 1-year response grading of the Niangziguan spring area

泉水量减少比例/%	100~80	80~50	50~30	30~10	0~10
级别	5	4	3	2	1

## 4 评价结果划分

研究区内各因子对泉域地下水的影响程度不同,为了区分其对泉域地下水影响的差异性,将评价结果划分为5级,见表5。

表5 地下水脆弱性评价的污染难易程度与级别的对应关系  
Table5 The correspondence between the difficulty of the groundwater vulnerability assessment and the division-level

污染程度	极难污染	较难污染	稍难污染	较易污染	极易污染
级别	1	2	3	4	5

## 5 确定因子权重

把4项地下水脆弱性评价指标组成指标集:

$$D=(d_1, d_2, \dots, d_4)=(\text{包气带厚度, 入渗补给量, 包气带岩性, 泉水响应}) \quad (1)$$

式中: $d_j$ 为指标集中的指标; $j=1, 2, \dots, 4$ 。

首先研究指标集 $D$ 对重要性的二元比较定性排序。指标集 $D$ 中的元素 $d_k$ 与 $d_l$ 就“重要性”作二元比较,(1)若 $d_k$ 比 $d_l$ 重要,记定性标度 $e_{kl}=1; e_{lk}=0$ ;(2)若 $d_k$ 与 $d_l$ 同样重要,记 $e_{kl}=0.5; e_{lk}=0.5$ ;(3)若 $d_l$ 比 $d_k$ 重要,记 $e_{lk}=1; e_{kl}=0; k=1, 2, \dots, 4; l=1, 2, \dots, 4$ 。矩阵:

$$E = \begin{bmatrix} e_{11} & e_{12} & \dots & e_{14} \\ e_{21} & e_{22} & \dots & e_{24} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ e_{41} & e_{42} & \dots & e_{44} \end{bmatrix} = e_{kl} \quad (2)$$

为指标集 $D$ 对重要性作二元比较的定性排序标度矩阵。在二元比较过程中要求判断思维不出现矛盾,即要求逻辑判断的一致性,根据陈守煜<sup>[8]</sup>其一致性检验条件为:(1)若 $e_{hk} > e_{hl}$ ,有 $e_{kl}=0$ ;(2)若 $e_{hk} < e_{hl}$ ,有 $e_{kl}=1$ ;(3)若 $e_{hk}=e_{hl}=0.5$ ,有 $e_{kl}=0.5, k=1, 2, \dots, 4$ 。

若定性排序矩阵  $E$  通不过一致性检验条件,则说明判断思维过程自相矛盾,需重新调整排序标度  $e_{kl}$ 。权重  $\vec{w}$  是通过求矩阵  $E$  的特征向量后归一化处理而得。

$$\vec{w}=(w_1, w_2, \dots, w_4) \quad (3)$$

调查表明,研究区碳酸盐岩裸露区分布面积为 1 976.66km<sup>2</sup>,碳酸盐岩覆盖区分布面积为 721.37km<sup>2</sup>。区内由于不同层位的碳酸盐岩岩性、地理位置等不同,地表岩溶发育特征及强度具有较大差异。中奥陶统灰岩成分比例高,特别是峰峰组,上、下马家沟组底部泥质白云岩中石膏的膏溶作用,使得该层中地表和地下岩溶发育,为降水入渗和河流入渗提供了良好的通道。下奥陶统和上寒武统主要为白云岩,岩石可溶性相对于灰岩较弱,因此岩溶发育程度较低。中寒武统鲕状灰岩主要分布于市区外围的边缘山区,地形因素使得其入渗条件不能与中奥陶统相提并论。碳酸盐岩覆盖区由于上覆松散层的存在,降水对岩溶地下水的补给是间接进行的,其入渗机理与灰岩裸露区有着根本的区别。娘子关泉域岩溶地下水资源的补给来源见 3.2 节。

根据以上因素,影响研究区内某一点地下水遭受污染的难易程度,入渗补给量>包气带厚度>泉水响应>包气带岩性。根据以上方法计算权重向量为:

$$\vec{w}=(0.25, 0.6, 0.03, 0.12)$$

## 6 评价计算方法

本文根据陈守煜<sup>[7]</sup>的含水层脆弱性模糊分析评价模型,开展娘子关泉域地下水脆弱性评价。

根据上述选择的 4 个因子,各因子按模糊数学法划分的 5 个级别的指标特征值列于表 6。其中包气带岩性的级别特征列于表 7。

表6 五个级别4项指标的指标特征值  
Table6 The eigenvalue of the four indicators at the five levels

指标	级别				
	1	2	3	4	5
包气带厚度/m	740	370	185	37	0
入渗补给量/mm·a <sup>-1</sup>	0	50	100	150	200
包气带岩性	4.5	3.5	2.5	1.5	0.5
泉水响应/%	10	30	50	80	100

表7 包气带岩性的级别与特征值  
Table7 The level and eigenvalue of the unsaturated zone lithology

类型	河谷—砂砾石层	中奥陶系碳酸盐岩裸露区—碳酸盐岩	下奥陶系—寒武系碳酸盐岩裸露区—碳酸盐岩	碳酸盐岩覆盖区—松散层	碳酸盐岩埋藏区—松散层及碎屑岩
级别	4.5	3.5	2.5	1.5	0.5
特征值	0.5	1.5	2.5	3.5	4.5

将地下水脆弱性评价的样本集依据 4 个指标 5 个级别的指标标准特征值进行识别,则有 4×5 阶指标标准特征值矩阵:

$$Y=(y_{ih}) \quad (4)$$

式中: $y_{ih}$  为级别  $h$  指标  $i$  的标准特征值; $i=1,2,3,4$ ; $h=1,2,3,4,5$ 。

由表 6 可知有两种不同的指标类型:(1)指标标准特征值  $y_{ih}$  随级别  $h$  的增大而减小;(2)指标标准特征值  $y_{ih}$  随级别  $h$  的增大而增大。

现在来确定 5 个级别的指标标准特征值对模糊概念极难污染(1 级)的相对隶属度。无论对于第(1)、(2)类指标,均可确定等于指标的 5 级标准特征值对极难污染的相对隶属度为 0,等于指标的 1 级标准特征值对极难污染的相对隶属度为 1。对以上两类指标,其特征值介于 1 级与 5 级标准特征值之间者,对极难污染的相对隶属度可按线性变化确定。则级别指标标准特征值  $y_{ih}$  对极难污染的相对隶属函数公式为:

$$s_{ih} = \begin{cases} 0 & y_{ih}=y_{i5} \\ \frac{y_{ih}-y_{i5}}{y_{i1}-y_{i5}} & y_{i1}>y_{ih}>y_{i5}, \text{或 } y_{i1}<y_{ih}<y_{i5} \\ 1 & y_{ih}=y_{i1} \end{cases} \quad (5)$$

式中: $s_{ih}$  为级别  $h$  指标  $i$  的标准特征值对极难污染的相对隶属度; $y_{i1}$ 、 $y_{i5}$  分别为指标  $i$  的 1 级、5 级标准值。用相对隶属度函数公式(5)把指标标准特征值矩阵式(4)变换为极难污染的指标标准特征值的相对隶属度矩阵:

$$S=(s_{ih}) \quad (6)$$

设对地下水脆弱性进行评价的样本集特征值矩阵为:

$$X=(x_{ij}) \quad (7)$$

式中: $x_{ij}$  为样本  $j$  指标  $i$  的特征值; $i=1,2,\dots,4$ ; $j=1,2,\dots,n$ ; $n$  为样本数。类似地,对于第(1)、(2)类指标的相对隶属度公式为:

$$r_{ij} = \begin{cases} 0 & x_{ij} \leq y_{i5}, \text{或 } x_{ij} \geq y_{i1} \\ \frac{y_{ij}-y_{i5}}{y_{i1}-y_{i5}} & y_{i1}>x_{ij}>y_{i5}, \text{或 } y_{i1}<x_{ij}<y_{i5} \\ 1 & x_{ij} \geq y_{i1}, \text{或 } x_{ij} < y_{i5} \end{cases} \quad (8)$$

式中: $r_{ij}$  为样本  $j$  指标  $i$  的特征值对极难污染的相对隶属度。应用式(8),将矩阵  $X$  转化为指标相对隶属度矩阵:

$$R=(r_{ij})_{m \times n} \quad (9)$$

由矩阵  $R$  知样本  $j$  的 4 个指标相对隶属度:

$$\vec{r}_j=(r_{1j}, r_{2j}, \dots, r_{4j})^T \quad (10)$$

将  $\vec{r}_j$  中指标 1, 2, ..., 4 的相对隶属度  $\vec{r}_{1j}, \vec{r}_{2j}, \dots, \vec{r}_{4j}$  分别于矩阵  $S$  中的第 1, 2, ..., 4 行的行向量逐一进行比

较,可得  $r_j$  落入矩阵  $S$  的级别下限  $a_j$  与级别上限  $b_j$ 。

样本  $j$  与级别  $h$  之间的差异,用下式表示为:

$$d_{hj} = \left\{ \left[ \sum_1^4 w_i (r_{ij} - s_{ij}) \right]^2 \right\}^{\frac{1}{2}}, h = a_j, \dots, b_j \quad (11)$$

为了更完善地描述样本  $j$  与级别  $h$  之间的差异,计入以样本  $j$  归属于级别  $h$  的相对隶属度  $u_{hj}$  为权重。可得评价脆弱性的完整形式为:

$$u_{hj} = \begin{cases} 0 & , h < a_j, \text{ 或 } h > b_j \\ \left[ d_{hj}^2 \sum_{k=a_j}^{b_j} d_{kj}^{-2} \right]^{-1} & , d_{hj} \neq 0, a_j \leq h \leq b_j \\ 1 & , d_{hj} = 0, \text{ 或 } r_{hj} = s_{ih} \end{cases} \quad (12)$$

应用模型(12)可解得样本集归属于各个级别的最优相对隶属度矩阵为:

$$U^* = \begin{bmatrix} * & * & \dots & * \\ u_{11} & u_{12} & \dots & u_{1n} \\ * & * & \dots & * \\ u_{21} & u_{22} & \dots & u_{2n} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ * & * & \dots & * \\ u_{51} & u_{52} & \dots & u_{5n} \end{bmatrix} = (u_{hj}^*)_{5 \times n} \quad (13)$$

$h=1, 2, \dots, 5; j=1, 2, \dots, n$ 。应用级别特征值  $H$  的向量式:

$$\vec{H} = (1, 2, \dots, 5)(u_{hj}^*) = (H_1, H_2, \dots, H_n) \quad (14)$$

给出了样本集关于含水层污染程度的评价信息,  $H$  越大,脆弱性越高,越易污染。其中最小级别特征值  $H_{\min} = \min H_j$  对应的样本最难污染。

## 7 评价结果

根据以上方法,计算出  $H$ ,按表5判断各级别特征值  $H$  值距离各级别的远近划分其隶属的级别及对应的污染程度,结果见图2。

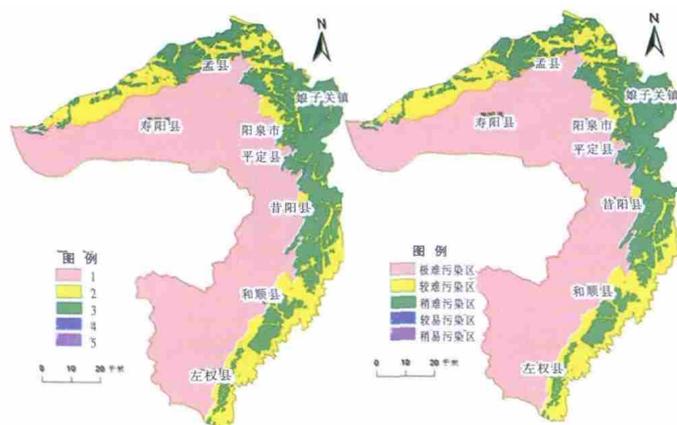


图2 模糊综合评价法分级及污染难易分区图

Fig.2 The levels and difficulty of the fuzzy evaluation method

由图2可以看出:极易污染区主要分布在娘子关镇娘子关泉群出露处,温河与桃河下游段即温河与桃河的交汇后(绵河段),面积4.89km<sup>2</sup>;该区为水源地,地势较低,且属于碳酸盐岩裸露区,与其他地区相比,污染物极易随地表水直接进入泉水,造成污染,属于地下水极易污染区;

较易污染区主要分布在泉群附近,温河、桃河、松溪河、南川河、清漳河西源渗漏段,大石门水库和油瓮水库库区,面积32.58km<sup>2</sup>;泉群附近岩性主要为下奥陶系灰岩,河流渗漏段岩性主要为河谷砂砾石层,底层为碳酸盐岩,为含水层高渗透性地区,且河流及水库单位面积上年均入渗补给量较大,污染物较易随地表水及水库水渗漏补给岩溶水,从而污染岩溶水。而且泉域内主要城市及工矿企业大都分布在各河流的中上游地区,大量污染物直接与雨水、地表水发生化学反应后形成多种污染物,在该区碳酸盐岩裸露地段向地下大量渗漏,该区地下水极易受到污染。

稍难污染区主要分布在孟县北部、孟县—阳泉—平定—昔阳—和顺一带以东地区,及清漳河西源、东源下游段附近,面积1433.74km<sup>2</sup>;岩性主要为中奥陶系碳酸盐岩,为碳酸盐岩裸露区,渗透性较强,大气降水及污染物可以直接进入岩溶水,使岩溶水极易受到污染。

较难污染区主要分布在阳泉市区、平定县周围,和顺县—左权县一带以东地区,面积1484.73km<sup>2</sup>;岩性主要为下奥陶系与寒武系碳酸盐岩及第四系松散层,为碳酸盐岩裸露区和覆盖区,渗透性相对于中奥陶系碳酸盐岩裸露区弱,且部分地区碳酸盐岩上覆第四系松散层,能在一定程度上减缓污染物的运移速度而且对污染物有一定的降解和吸附作用,从而减少进入岩溶水中的污染物含量,在一定程度上保护了岩溶水遭受污染。

极难污染区主要分布在孟县—阳泉—平定—昔阳—和顺一带以西地区,寿阳县大部分地区,面积4446.46km<sup>2</sup>;该区岩性主要为石炭—二叠系砂页岩,渗透性很低,能够较好地阻止污染物进入岩溶含水层,从而保护岩溶含水层;但是泉域内工矿企业与主要城市大都分布在此区,工业“三废”和生活污染是主要的污染源,虽然该区地下水极难污染,但是为污染源区,因此,在该区要处理好工业“三废”和生活污水等污染问题。

## 8 结论

本文在欧洲方法的基础上,选择包气带厚度、垂直入渗补给量、包气带岩性及岩溶含水层导水性能四个

因子,采用模糊综合评价法对娘子关泉域进行脆弱性评价,克服了 DRASTIC 方法以及欧洲方法在权重上的不足,以及针对岩溶区尤其是北方岩溶区脆弱性评价方面的不足,评价结果更符合实际情况。结果表明娘子关泉域易受污染的地区为娘子关泉群出露处以及温河、桃河、松溪河、南川河、清漳河西源渗漏段,大石门水库和油瓮水库库区。评价结果对制定合理的措施保护娘子关泉域以及合理开发地下水提供一定的参考。

参考文献:

- [1] Aller I, Bennet T, Lehr J H, Petty R J. DRASTIC: a standardized system for evaluating groundwater pollution potential using hydrogeologic settings [R]. U. S. EPA Report, 1987.
- [2] 徐慧珍,高赞东.岩溶地区地下水防污性能评价——PI 方法[J].新疆地质,2006 (03): 318-321.(XU Huizhen, GAO Zandong. Assessment of groundwater vulnerability in Karst areas using PI method [J]. Xinjiang Geology, 2006(03): 318-321. (in Chinese))
- [3] Francois Zwahlen, Robert Aldwell, B. Adams. COST action 620 vulnerability and risk mapping for the protection of carbonate (Karst) aquifers[R]2003.
- [4] 梁永平,王维泰. 中国北方岩溶水系统划分与系统特征[J].地球学报, 2010,(6): 860-868. (LIANG Yongping, WANG Weitai. The division and characteristics of Karst water systems in northern China [J]. Acta Geoscientica Sinica, 2010,(6):860-868. (in Chinese))
- [5] 王大纯,张人权,史毅虹,等.水文地质学基础[M].北京:地质出版社,2008. (WANG Dachun, ZHANG Renquan, SHI Yihong, et al. Basis of Hydrogeology[M]. Beijing Geological Publishing House,2008. (in Chinese))
- [6] 梁永平,霍建光,张江华,等.娘子关泉域岩溶地下水资源评价报告[R]. 阳泉: 阳泉市水利局,2004.(LIANG Yongping, HUO Jianguang, ZHANG Jianghua, et al. Karst groundwater evaluation in Niangziguan spring area [R].Yangquan: Shanxi Yangquan City Irrigation Works Bureau, 2004. (in Chinese))
- [7] 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 [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2002, (7):23-30. (in Chinese))
- [8] 陈守煜. 工程模糊集理论与应用[M]. 北京:国防工业出版社, 1998. (CHEN Shouyu. Application of Engineering Fuzzy Set Theory [M]. Beijing: National Defense Industry Press, 1998. (in Chinese))

## Fuzzy Evaluation of Karst Water Vulnerability in Niangziguan Spring Area

ZHAO Chunhong, LIANG Yongping, LU Haiping, WANG Weitai

(Institute of Karst Geology, Chinese Academy of Geological Sciences / Karst Dynamics Laboratory,  
Ministry of Land and Resources and Guangxi Zhuang Autonomous Region, Guilin, Guangxi 541004, China)

**Abstract:** Groundwater vulnerability assessment is one of the important means of local groundwater resource management and protection. Because of the particularity of the Niangziguan spring, this study selected the thickness of unsaturated zone, recharge intensity, lithology of the unsaturated zone and response of spring to the basis the European approach. It used fuzzy evaluation method to assess the groundwater vulnerability and produced the vulnerability map. The results show that the easily contaminated area is mainly distributed in the exposed areas of the Niangziguan spring, the extremely difficult to contaminated areas is mainly distributed in the west area of Yuxian-Yangquan-Pingding-Xiyang-Heshun, and some places of Shouyang County. The results has a certain reference value to establish reasonable protection for the Niangziguan Spring.

**Key words:** groundwater vulnerability; comprehensive fuzzy evaluation; vulnerability zoning; Niangziguan spring area

(上接第 87 页)

参考文献:

- [1] 贺国庆,李观义. 对现代水文的认识和实践[J]. 水文, 2007,(2). (HE Guoqing, LI Guangyi. Cognition and practice of modern hydrology [J]. Journal of China Hydrology, 2007,(2). (in Chinese))

## How to Construct Hydrology Management System for Xinjiang Production and Construction Corps

DU Deyan<sup>1,2</sup>, LI Xiangyang<sup>2</sup>, WANG Zhiyong<sup>2</sup>

(1. Water Resources Bureau of Xinjiang Production and Construction Corps, Urumqi 830000, China;

2. Bureau of Hydrology, YRCC, Zhenzhou 450004, China)

**Abstract:** This paper analyzed the current status and problems of the hydrological management inside the Xinjiang Production and Construction Corps, and expatiated the urgency and importance to construct the hydrology management system. It also suggested constructing the hydrological network and service system, strengthening the staff and business management in accordance with the state policy to assist Xinjiang, implementation of major hydrologic projects, and the opportunity of hydrology reform and development in Xinjiang, so as to promote the integrated hydrology management in the Xinjiang Production and Construction Corps.

**Key words:** Xinjiang Production and Construction Corps; industrial management; hydrology