

关中盆地潜水含水层脆弱性评价^{*}

姜桂华, 王文科, 杨泽元

(长安大学 环境科学与工程学院, 陕西 西安 710061)

[摘要] 以关中盆地潜水为研究对象, 分析了含水层脆弱性的影响因素, 建立了含水层脆弱性评价指标体系及评价标准, 结合GIS技术, 用模糊迭代自组织数据分析技术(模糊ISODATA聚类方法)对含水层脆弱性进行了评价。结果表明, 含水层脆弱区(易污染区)主要出现在沿渭河两岸及其较大支流的漫滩和低阶地, 以及黄土台塬的洼地。评价结果与2001年地下水水质调查情况基本吻合, 说明所建立的指标体系和评价标准合理。

[关键词] 潜水含水层; 脆弱性评价; 模糊ISODATA聚类; 关中盆地

[中图分类号] X824

[文献标识码] A

[文章编号] 1671-9387(2004)10-0111-05

关中盆地位于陕西省中部, 面积约20 000 km², 属半干旱地区。该地区水资源紧缺, 环境脆弱, 地下水是当地工农业生产和城乡居民用水的重要支撑。近年来, 当地地下水水质日趋恶化, 水污染日益严重。

地下水脆弱性评价是保护地下水资源的重要手段, 也是地下水环境研究的一个热点问题, 已引起国内外有关专家和学者的极大关注, 并开展了大量研究^[1~9]。其中, 美国环境保护署1987年提出的DRASTIC方法应用较广泛, 在国内大连等城市的地下水脆弱性评价中得到了应用。从总体上讲, 已有的一些研究和方法主要是针对小区域或局部区域(如城市), 而对包气带的吸附和自净能力的影响考虑不够。

本研究根据关中盆地的具体特点, 综合考虑地质、地貌和水文地质等自然影响因素和人为影响因素, 利用模糊迭代自组织数据分析技术, 并结合GIS技术, 对地下水脆弱性进行了评价, 以期为防止和保护区域地下水污染提供依据。

1 脆弱性评价指标

含水层脆弱性是指潜水系统在自然和(或)人类活动的影响下引起污染的难易性(程度)。其内涵包括系统在自然状态下的抗污性和系统抵抗外在条件的变化, 如人类活动干扰产生污染的能力。造成地下水脆弱的原因有先天的自然背景因素(即自然因素), 也有人类活动干扰所带来的负面积累(即人为

因素)。自然因素造就了地下水系统脆弱的基本骨架, 而人类活动的不合理干扰则加剧和激化了地下水系统脆弱性的发展。因此, 地下水脆弱是自然因素和人为因素相互作用、相互叠加的结果。

1.1 自然因素

自然因素包括地形地貌、地质条件和水文地质条件等方面。

1.1.1 地形地貌 主要影响污染物质由地表向地下水迁移和积累的过程。研究区内按地貌类型主要分为山前洪积平原、河流冲积平原、黄土台塬。根据地形和坡度, 山前洪积平原又可分为洪积扇前缘和洪积扇后缘; 河流冲积平原可分为漫滩、低阶地和高阶地; 黄土台塬分为洼地、一级黄土台塬、二级黄土台塬。相对而言, 山前洪积平原地势较高, 地形切割强烈, 水平方向水循环交替迅速, 污染物不易在地下水中集聚积累; 河流冲积平原地势平缓, 水平方向水循环交替作用弱, 垂直方向渗透性较强, 污染物易迁移进入地下水而积累起来; 黄土台塬地势平缓, 水平方向径流缓慢, 垂直方向渗透性弱, 污染物不易进入地下水中。但在黄土台塬的洼地中, 由于地势低, 可汇集周边的污染物, 含水层易被污染。

1.1.2 地质条件 主要考虑研究区的地层岩性和结构。黄土台塬岩性主要是黄土或黄土状土, 介质颗粒细, 且比较致密, 污染物向下迁移性较弱; 山前洪积扇顶部和河流漫滩以砂砾石、砂为主, 颗粒粗, 渗透性强, 污染物迁移性较强; 洪积扇中部及边缘地带, 由细砂及砂质粘土组成, 土壤粘粒含量增高, 渗

^{*} [收稿日期] 2004-03-04

[基金项目] 教育部高等学校骨干教师资助计划项目; 国家“973”项目(G1999043606)

[作者简介] 姜桂华(1968-), 女, 江西崇仁人, 讲师, 博士, 主要从事水污染防治研究。

透性变差,不利于污染物的迁移。渭河上游冲积层主要为砂和砂砾石,透水性极强,极有利于污染物的渗透和迁移;渭河中下游及泾河、洛河形成的冲积平原,岩性颗粒较细,以细砂或细砂夹粘土为主,透水性较弱。总体上说,地层岩性越粗,含水层表现就越脆弱。

地层结构是指地层岩性的组合情况。研究区地层组合可划分为单一结构、双层结构和多层结构。单一结构又可分为单一的砂卵砾石层、单一的砂层和单一的黄土地层。双层结构是指上细下粗的二元结构地层。多层结构是指中细砂、粉砂、亚粘土或粘土组成的多层岩性结构。

1.1.3 水文地质条件 包括包气带的厚度、垂向饱和和渗透系数及含水层的净补给量、导水系数、水质矿化度等因子。包气带的厚度决定了污染物进入含水层的时间长短,垂向饱和和渗透系数控制着污染物随载体向地下水迁移的速率。包气带厚度越薄,垂向饱和和渗透系数越大,则污染物进入含水层就越快。含水层净补给量是指每年单位面积渗入地表并到达含水层的总水量(这里主要是指降水的补给,以补给模数表示)。净补给量越大,伴随水进入含水层的污染物就越多。含水层的导水系数反映了含水层介质的水力传导性,导水系数越大,污染物在含水层中的迁移范围越广。地下水水质矿化度(这里是指在原生环境中形成的)反映了地下水自然条件下的水质背景和抗污染性。矿化度越高,表明地下水水质越差,抵抗污染的能力越弱。

1.2 人为因素

人类对土地的利用状况不同,造成其地下水受

污染的程度和范围不同,因此选择土地利用状况作为影响地下水脆弱性的一个因素。根据关中盆地的情况,土地可分为耕地、居住地和其他用地等利用状况。居住地的潜水因废水和污水的排放而最易造成水质污染,耕地次之,荒地、坡地、湿地等其他用地的地下水被污染的可能性较小。

综上所述,以地貌类型、地层岩性、地层结构、地下水位埋深、包气带垂向饱和和渗透系数、含水层水力传导系数、含水层净补给模数、地下水水质矿化度、土地利用状况等 9 个指标作为地下水脆弱性的评价指标体系。

2 指标分级标准

根据各评价指标在研究区内的变化范围,将地下水的固有脆弱性划分为强脆弱(I,极易污染)、较强脆弱(II,易污染)、中等脆弱(III,较易污染)、弱脆弱(IV,不易污染)、不脆弱(V,难污染)5个等级。所有指标的评分值取值在 1~10,定性指标按不同脆弱性等级直接给出[1,10]范围内的一个评分值(如表 1)。对于定量指标,为了克服各指标的单位 and 量级所产生的差异,先对各指标的数据进行正规化处理,使指标数据压缩在[1,10]内,如果指标值越大,地下水越脆弱,则按降半梯形公式: $10 \times (\text{实际值} - \text{最小值}) / (\text{最大值} - \text{最小值})$ 计算评分值区间;如果指标值越大,地下水越不脆弱,按升半梯形公式: $10 \times [1 - (\text{实际值} - \text{最小值}) / (\text{最大值} - \text{最小值})]$ 计算,得出评分值区间。典型评分值是指评分值区间两端点的平均值,由此得出指标分级及评分标准如表 2。

表 1 定性指标评分标准

Table 1 Rating criterions for quality indexes

分级 Rating	强脆弱 Very high	较强脆弱 High	中等脆弱 Medium	弱脆弱 Low	不脆弱 Very low
分值 Score	10	8	6	4	1
地貌类型 Geomorphical types	河漫滩, 洪积扇后缘 River floodplain, rearward of piedmont plain	洼地, 砂丘, 低阶地 Depression, dune, lower terrace	洪积扇前缘, 高阶地 Foreside of piedmont plain, high terrace	一级黄土台塬 First order loess tableland	二级黄土台塬 Second order loess tableland
地层岩性 Stratum lithology	砂卵砾石 Gravel and sands	中粗砂 Coarse and medium sands	粉细砂 Fine and silt sands	黄土, 亚砂土 Loess, sub sands	粘土, 亚粘土 Clay, sub clay
地层结构 Stratum structure	单一砂卵砾石层 Single layer of gravel and sands	单一砂层 Single layer of sands	单一黄土层 Single layer of loess	双层结构 Double layers	多层结构 Multi-layers
土地利用状况 Land use	居住地 Living land	耕地 Cultivation land		其他用地 Land for other use	

表 2 定量指标分级评分标准

Table 2 Ranges and rating criterions for quantity indexes

指标 Index	数值类型 Value type	分级 Rating				
		强脆弱 Very high	较强脆弱 High	中等脆弱 Medium	弱脆弱 Low	不脆弱 Very low
水位埋深 The depth to the water table	原始值/ m Original range	≤ 5	5~ 10	10~ 20	20~ 40	> 40
	正规化处理值 Unitary range	10	10~ 8 57	8 57~ 5 71	5 71~ 1	1
	典型评分 Typical rating	10	9 29	7 14	3 33	1
包气带垂向饱和和渗透系数 Vertical saturated permeability in aeration zone	原始值/ $(m \cdot d^{-1})$ Original range	≥ 75	75~ 10	10~ 5	5~ 0 05	$< 0 05$
	正规化处理值 Unitary range	10	10~ 7	7~ 6	6~ 1	1
	典型评分 Typical rating	10	8 5	6 5	3 5	1
含水层导水系数 Transmissivity of aquifer	原始值/ $(m^2 \cdot d^{-1})$ Original range	≥ 800	800~ 600	600~ 300	300~ 100	< 100
	正规化处理值 Unitary range	10	10~ 7 14	7 14~ 2 86	2 86~ 1	1
	典型评分 Typical rating	10	8 57	5	1 93	1
含水层净补给模数 Net recharge modulus of aquifer	原始值/ $(\times 10^4 m^3 \cdot hm^{-2} \cdot 年^{-1})$ Original range	≤ 5	5~ 10	10~ 20	20~ 40	> 40
	正规化处理值 Unitary range	10	10~ 8 57	8 57~ 5 71	5 71~ 1	1
	典型评分 Typical rating	10	9 29	7 14	3 33	1
地下水矿化度 Groundwater total solid	原始值/ $(g \cdot L^{-1})$ Original range	≥ 5	5~ 3	3~ 2	2~ 1	< 1
	正规化处理值 Unitary range	10	10~ 5	5~ 2 5	2 5~ 1	1
	典型评分 Typical rating	10	7 5	3 75	1 2	1

3 脆弱性评价与结果分析

将研究区剖分成 905 个小单元, 在由MAPGIS 开发的评价系统中用模糊迭代自组织数据分析技术 (Interactive Self-Organizing Data Analysis Technique, 简称模糊 ISODATA 聚类) 进行评价。评价效果以划分系数和平均模糊熵 2 个指标检验, 划分系

数以接近 1 为最好, 平均模糊熵以接近 0 为最好。

经过评价计算得出划分系数为 0 89, 平均模糊熵为- 0 21, 最大误差为 0 008 22。脆弱性分区见图 1。从整体上来看, 关中盆地地下水脆弱性表现为从西向东脆弱性越来越强, 范围逐渐增大; 由南北山前到盆地中心脆弱性由弱变强。

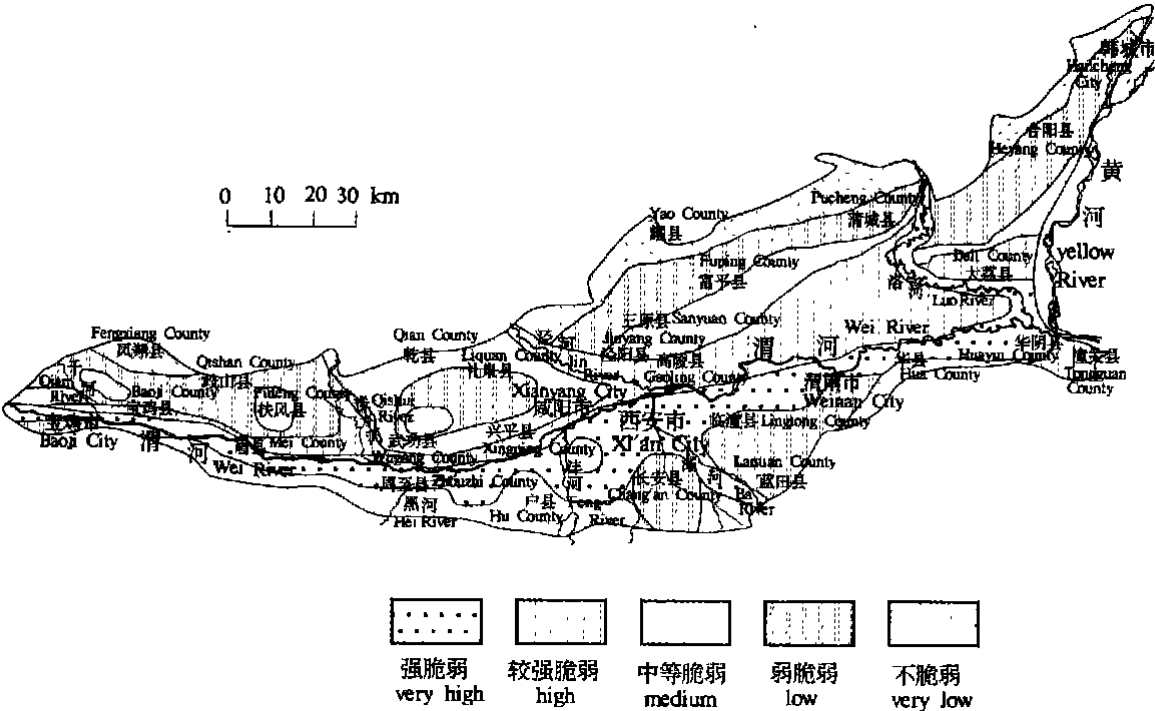


图 1 关中盆地含水层脆弱性评价结果

Fig 1 The results of groundwater vulnerability assessment in Guanzhong basin

3.1 强脆弱(极易污染)区

主要分布在沿渭河两岸及泾河和洛河等较大支流的漫滩和低阶地上。该区的包气带厚度薄, 地下水水位一般 $\leq 5\text{ m}$, 包气带为单一的砂卵砾石或中粗砂层, 垂向渗透系数 $> 75\text{ m/d}$, 透水性极强, 有利于地表污染物的渗透和迁移, 包气带自净化能力弱。地下水补给强度(补给模数 $20\sim 40\text{ 万 m}^3/(\text{km}^2 \cdot \text{年})$)大。同时, 这一带又是人类活动较为强烈的地区, 排污、过量施肥和污水灌溉等污染现象很严重。综合考虑各因素后认为, 该区为强脆弱区, 是地下水重点保护区。

3.2 较强脆弱(易污染)区

主要位于渭河两岸及渭河中下游的渭河、泾河和洛河形成的冲积平原, 可归纳为 3 个区: (1) 关中盆地的西部(以泾河和西安为界, 以下同)渭河阶地。在这些地区, 潜水埋深较浅($5\sim 10\text{ m}$), 包气带土层为亚砂土及砂层, 具有上细下粗双层结构, 细颗粒层较薄。包气带透水性较强(渗透系数 $10\sim 75\text{ m/d}$), 自净能力较弱。这一带也是工农业污染较为严重的地区, 在各影响因素的综合作用下属较强脆弱区。

(2) 东部的渭河、泾河形成的冲积平原阶地, 以及东部的蒲城到大荔的渭河、泾河和洛河等三河形成的冲积平原阶地。在这些平原阶地, 潜水埋深较浅($5\sim 10\text{ m}$)。由于处于渭河的中下游, 包气带土层为细颗粒的粉细砂及亚粘土的多层结构, 其包气带垂向渗透性中等($5\sim 10\text{ m/d}$)。由于地形平缓, 地下水水平方向径流滞缓, 地下水补给强度(补给模数 $\leq 5\text{ 万 m}^3/(\text{km}^2 \cdot \text{年})$)小, 垂向蒸发作用强烈。同时, 这些地区为农业生产区, 地下水水质较差(矿化度 $1\sim 3\text{ g/L}$), 在各因素的综合作用下属较强脆弱区。

(3) 东部的黄土台塬洼地。东部黄土台塬分布有许多洼地, 典型的有卤泊滩洼地。地下水埋深浅($5\sim 10\text{ m}$)。包气带土层为黄土或粘土, 水平方向透水性差。地势平缓低洼, 地下水交替循环弱, 有利于污染物的积累。含水层导水系数小($100\sim 300\text{ m}^2/\text{d}$), 地下水净补给强度(补给模数 $\leq 5\text{ 万 m}^3/(\text{km}^2 \cdot \text{年})$)小, 垂向蒸发作用强, 地下水水质差(矿化度 $3\sim 5\text{ g/L}$, 局部 $> 5\text{ g/L}$), 在各因素的综合作用下属较强脆弱区。

3.3 中等脆弱(较易污染)区

主要分布在渭河南岸和北岸的山前洪积扇后缘区和渭河及其较大支流的三级以上高阶地。这些地区包气带厚度中等(水位埋深 $10\sim 20\text{ m}$), 包气带岩性为含泥砂卵石、砂和砂质粘土的互层, 透水性中等

(渗透系数为 $5\sim 10\text{ m/d}$)。含水层渗透系数与饱和含水层厚度的乘积中等($600\sim 800\text{ m}^2/\text{d}$), 地下水补给强度(补给模数 $10\sim 40\text{ 万 m}^3/(\text{km}^2 \cdot \text{年})$)中等到较强, 渭河南岸水质好, 北岸水质中等, 在各影响因素的综合作用下属中等脆弱区。

3.4 弱脆弱(不易污染)区

分布在盆地内一级黄土台塬区。包气带较厚(水埋藏较深, 一般为 $20\sim 40\text{ m}$, 有的 $> 40\text{ m}$), 组成为黄土或黄土状土, 透水性较弱(渗透系数 $0.05\sim 5\text{ m/d}$), 包气带自净能力较强。含水层导水系数($100\sim 300\text{ m}^2/\text{d}$)小, 补给强度(补给模数 $\leq 5\text{ 万 m}^3/(\text{km}^2 \cdot \text{年})$)小, 水质较好(矿化度 $\leq 1\text{ g/L}$, 局部为 $1\sim 2\text{ g/L}$), 在各因素的综合作用下属弱脆弱区。

3.5 不脆弱(难污染)区

主要分布在渭河南、北岸山前洪积扇前缘以及北岸二级黄土台塬区。这些地区包气带厚度大(水位埋深 $\geq 40\text{ m}$), 山前洪积扇前缘包气带土层为粘性土夹薄层砂和砂砾石层, 包气带垂向透水性(渗透系数 $0.05\sim 5\text{ m/d}$)较弱, 自净能力较强。二级黄土台塬和黄土塬的包气带为黄土, 包气带垂向透水性(渗透系数 $\leq 0.05\text{ m/d}$)弱, 自净能力强。这些地区地下水补给强度(补给模数 $\leq 5\text{ 万 m}^3/(\text{km}^2 \cdot \text{年})$)小, 水质好(矿化度 $\leq 1\text{ g/L}$)。同时, 这些地区人类活动不太频繁, 在各因素的综合作用下属不脆弱区。

综上所述, 关中盆地的含水层强脆弱区和较强脆弱区主要分布在渭河两岸及较大支流冲积平原的漫滩、低级阶地和黄土台塬的洼地。根据 2001 年关中盆地潜水水质调查结果可知^[10], 这些地区地下水中 NO_3^- 含量大多超过 100 mg/L (饮水标准为 90 mg/L), 属水质污染区, 检出最高浓度达 650 mg/L 。可见, 脆弱性评价结果与实际地下水污染情况基本吻合。

4 结 语

本研究基于关中盆地地质、地貌和水文地质条件, 具体分析了地下水系统脆弱性的影响因素, 选取地貌、包气带岩性、地下水水质等 9 个因子作为评价指标, 建立了关中盆地地下水脆弱性评价指标体系、指标评分标准和脆弱性分级标准, 利用模糊迭代自组织数据分析技术, 结合 GIS 技术对关中盆地地下水脆弱性进行了评价。评价结果表明, 在自然条件和人为因素的共同作用下, 关中盆地地下水脆弱区(容易污染区)主要出现在沿渭河两岸及较大支流的漫

滩、低阶地和黄土台塬的洼地。评价结果与 2001 年建立的指标体系和评价标准合理。研究结果对关中盆地潜水污染状况调查的结果基本吻合, 说明盆地的土地利用和水资源保护具有一定参考价值。

[参考文献]

- [1] 付素蓉, 王焰新, 蔡鹤生. 城市地下水污染敏感性分析[J]. 地球科学- 中国地质大学学报, 2000, 25(5): 482- 486
- [2] 郑西来, 吴新利, 荆 静. 西安市潜水污染的潜在性分析与评价[J]. 工程勘察, 1997, (4): 22- 25
- [3] 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
- [4] 王国利, 周惠成, 杨 庆. 基于DRASTIC 的地下水易污染性多目标模糊模式识别模型[J]. 水科学进展, 2000, 11(2): 173- 179
- [5] M áti-Sz nyi J, F üe L. Groundwater vulnerability assessment of the SW Trans-Danubian Central Range, Hungary[J]. Environmental Geology, 1998, 35(1): 9- 18
- [6] Evans B M, Myers W L. A GIS-based approach to evaluating regional groundwater pollution potential with DRASTIC[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 1990, 45(2): 242- 245
- [7] Ray J A, O'dell P W. DIVERSITY: A new method for evaluating sensitivity of groundwater to contamination[J]. Environmental Geology, 1993, 22: 345- 352
- [8] Soller C R, Berg R C. A model for the assessment of aquifer contamination potential based on regional geologic framework[J]. Environment Geological Science, 1992, 19(3): 205- 213
- [9] 雷 静, 张思聪. 唐山市平原区地下水脆弱性评价研究[J]. 环境科学学报, 2003, 23(1): 94- 99
- [10] 姜桂华, 王文科, 杨晓婷. 关中盆地地下水硝酸盐污染分析及防治对策[J]. 水资源保护, 2002, 68(2): 6- 8
- [11] 贾 嵘, 沈 冰. 水资源可持续开发利用与管理研究[J]. 西北农林科技大学学报(自然科学版), 2001, 29(4): 85- 89

Vulnerability assessment for unconfined aquifer in Guanzhong basin

JIANG Gui-hua, WANG Wen-ke, YANG Ze-yuan

(Environmental Science and Engineering College, Chang'an University, Xi'an, Shaanxi 710061, China)

Abstract Using unconfined water in Guanzhong basin as an object to study, the influencing factors of groundwater vulnerability were analyzed, and the assessment index systems and criterions were established, and groundwater vulnerability was evaluated by the fuzzy Interactive Self-Organizing Data Analysis Technique (fuzzy ISODATA) method together with GIS technology. The assessment results show that groundwater vulnerable (easy to be polluted) areas in guanzhong basin appear at the floodplains and the lower terraces of Weihe River and its large tributaries, the depressions of the loess tableland. The assessment results are in accordance with the actual groundwater quality situation in the year 2001, so it showed the assessment index systems and criterions established are reasonable.

Key words: unconfined aquifer; vulnerability assessment; fuzzy ISODATA; Guanzhong basin