

# 几种地下水易污性评价方法在徐州张集地区的应用

毛媛媛<sup>1</sup>, 张雪刚<sup>2</sup>

(1. 南京大学环境学院, 江苏 南京 210093; 2. 河海大学水资源环境学院, 江苏 南京 210098)

**摘要:**选择 GOD 法、DRASTIC 法、SINTACS 法及 SI 法 4 种易污性评价方法用于徐州张集地区的地下水易污性评价, 应用 GIS/ARCINFO 输出张集地区的地下水易污性指标图。不同易污性评价方法对张集地区裂隙岩溶地下水的易污性评价得到了不同的结论, 经分析, SI 法更适用于张集地区的实际情况。具体应用时, 要根据评价地区的实际条件, 并和评价地区污染监测情况结合, 选择合适的易污性评价方法评价地下水的易污性。

**关键词:**地下水; 易污性评价方法; 张集地区

**中图分类号:** X523      **文献标识码:** A      **文章编号:** 1006-7647(2006)04-0046-04

**Comparative analysis of several assessment methods of groundwater vulnerability applied to Zhangji area of Xuzhou City**/MAO Yuan-yuan<sup>1</sup>, ZHANG Xue-gang<sup>2</sup>(1. School of the Environment, Nanjing University, Nanjing 210093, China; 2. College of Water Resources and Environment, Hohai University, Nanjing 210098, China)

**Abstract:** Four different methods, i. e. GOD method, DRASTIC method, SINTACS method, and SI method, were applied to assessment of groundwater vulnerability to pollution in Zhangji area of Xuzhou City, and the map for groundwater vulnerability was drawn by use of GIS/ARCINFO. Different results about vulnerability of fissured-karstic aquifer in Zhangji area were obtained by use of different methods, and it is concluded that SI method is the most suitable method for this area. As a result, it is suggested that rational assessment methods of groundwater vulnerability should be selected based on the practical situation and real-time monitoring data of pollution of the areas to be assessed.

**Key words:** groundwater; assessment method of groundwater vulnerability; Zhangji area

目前,地下水的污染问题已成为公众普遍关注的问题之一。经济社会的发展和工业化进程的加剧,产生了越来越多的地下水环境问题。据调查监测结果,我国约有一半的城市市区地下水污染严重,地下水水质下降。同时地下水的污染呈现由点到面、由城市向农村扩展的趋势,由地下水污染造成的缺水城市和地区日益增多。由于地下水污染的治理和地下水环境的恢复是一个漫长、艰难的过程,解决地下水污染的最有效的方法是防止地下水污染。近年来,地下水易污性评价方法已经在世界许多国家和地区得到了广泛应用,评价结果为地下水污染的防治、地下水资源的合理开发利用及管理决策提供了科学的支持和依据。

地下水的易污性定义为由含水层固有属性决定的地下水对污染的敏感程度<sup>[1]</sup>。含水层的固有属性指含水层的渗透系数、孔隙度、水力梯度及含水层的补给量等。地下水易污性评价的方法主要可分为确定性方法、概率法、随机法和经验方法。易污性评价

的结果在很大程度上取决于资料的情况,目前广泛使用的方法是经验评分法。本文着重介绍几种广泛应用的地下水易污性评价的经验评分方法,并将其应用于徐州张集地区。

## 1 地下水易污性评价的经验评分方法

地下水易污性评价的经验评分方法一般是选择评价区域水文地质、地貌和其他易于表达的含水层特性作为易污性评价指标,按照各指标的评分标准进行评分,并赋予各指标相应的权重值。各因子的评分标准从相应的表格中得到。最后,将各评价指标的评分乘以其权重值后相加得到含水层的地下水易污性指标值。对某一评价地区,其易污性评价指标  $P$  通常表示为

$$P = \sum_{i=1}^m w_i R_i \tag{1}$$

式中:  $R_i$  为含水层指标  $i$  的评分;  $w_i$  为含水层指标  $i$  的权重;  $m$  为评价指标个数。

根据得到的易污性评价指标值评价含水层受污染的敏感程度(高或低),易污性指标值越高,地下含水层越容易受到污染。易污性评价结果用 GIS 图形显示。

地下水易污性的经验评分方法由于简单实用,目前在地下水的易污性评价中得到广泛应用。易污性经验评分方法很多,以下简略介绍 GOD 法、DRASTIC 法、SINTACS 法及 SI 法 4 种目前广泛应用的经验方法。

1.1 GOD 法

GOD 法易污性指标是由 Foster<sup>[2]</sup>于 1987 年提出的,是基于以下 3 个因素的评分。GOD 法易污性指标值为

$$P_{GOD} = GOD \tag{2}$$

式中:G 为地下水存在的状况,即非承压水、半承压水和承压水等;O 为含水层的固结状况和岩性特征;D 为地下水埋深。

$P_{GOD}$ 最大值为 1,代表含水层的易污性最高,最小值为 0.0016,代表含水层易污性最低。 $P_{GOD}$ 为 0 时表示无含水层。

1.2 DRASTIC 法

DRASTIC 法于 1987 年由美国环境保护署<sup>[3]</sup>提出,目前在北美和欧洲都得到了广泛应用。1996 年欧盟与中国合作,使 DRASTIC 法在大连和广州地区的地下水易污性评价中得到了成功的应用<sup>[4]</sup>。DRASTIC 法包括 7 项水文地质参数,参数权重的赋值分为标准和农田喷洒农药两种情况。本文采用标准 DRASTIC 法,其地下水易污性指标值为

$$P_{DRASTIC} = 5D + 4R + 3A + 2S + T + 5I + 3C \tag{3}$$

式中:D 为地下水埋深;R 为地下水的净补给量;A 为含水层岩性;S 为土壤介质类型;T 为地形情况,通常用地表坡度表示;I 为渗流区的影响;C 为含水层渗透系数。

标准 DRASTIC 法易污性指标的最小值为 26,最大值为 226。一般在 50~200 之间。

1.3 SINTACS 法

SINTACS 法是 1990 年由 Civita 等提出的<sup>[5]</sup>,是在 DRASTIC 法的基础上,结合意大利的水文地质条件,对其评分进行修正后的一种方法,对较小区域的地下水易污性评价更为适用。SINTACS 是意大利语对应于 DRASTIC 法中 7 项参数的第一个字母的缩写。因子的权重值根据评价地区的水文地质条件不同采用不同的数值,通常,对裂隙岩存在的地下水含水层,其易污性指标值为

$$P_{SINTACS} = 5S + 5I + 5N + 5T + 2A + 2C + 2X \tag{4}$$

式中:S 为地下水埋深;I 为地下水的净补给量;N 为渗流区的影响;T 为土壤介质类型;A 为含水层岩性;C 为含水层渗透系数;X 为地形情况。

1.4 SI 法

SI 法<sup>[6]</sup>也是基于 DRASTIC 法的地下水易污性评价方法,包含 5 项水文地质参数:

$$P_{SI} = 0.186D + 0.212R + 0.259A + 0.121T + 0.222L \tag{5}$$

式中:D,R,A,T 与 DRASTIC 法中的定义相同,L 为土地利用情况。

前 4 项参数评分与 DRASTIC 法相同,但对每项 DRASTIC 法评分乘以因子 10。因子 L 的评分值参照 SI 法中土地利用的评分表确定,评分范围从 0~100。

$P_{SI}$ 指标的最小值为 0,最大值为 100。

计算得到评价地区的地下水易污性指标后,根据易污性评价标准(见表 1)评价地下水易污性。

表 1 不同评价方法的易污性评价标准

| 易污性 | GOD 法               | 标准 DRASTIC 法       | SINTACS 法          | SI 法             |
|-----|---------------------|--------------------|--------------------|------------------|
| 低   | $0 < P < 0.1$       | $P < 80$           | $P < 80$           | $P < 30$         |
| 较低  | $0.1 \leq P < 0.3$  | $80 \leq P < 120$  | $80 \leq P < 140$  | $30 \leq P < 50$ |
| 一般  | $0.3 \leq P < 0.5$  | $120 \leq P < 160$ | $140 \leq P < 186$ | $50 \leq P < 60$ |
| 较高  | $0.5 \leq P < 0.7$  | $160 \leq P < 199$ | $186 \leq P < 210$ | $60 \leq P < 70$ |
| 高   | $0.7 \leq P \leq 1$ | $P \geq 199$       | $P \geq 210$       | $P \geq 70$      |

以上 4 种地下水易污性评价方法原则上在所有地区都可以应用,主要根据评价地区的资料情况及水文地质状况,选择合适的评价方法。

2 张集地区的水文地质条件及易污性评价参数确定

2.1 张集地区地下含水层的水文地质条件

张集地区地下水水源地总面积为 360 km<sup>2</sup>,位于徐州市东南铜山县张集镇境内,距徐州市中心 25 km,属于淮河流域。废黄河是区内主要河流,自西北至东南穿过整个地区。沿废黄河两岸的山前或山间盆地,分布着一些人工水库,库底多为裸漏可溶岩,渗漏强烈。水源地内总体地势西北高、东南低,北部及南部边界地区有部分丘陵区,山峰海拔标高 60~237 m,其余地区为平原区,高程为 28~30 m。水源地多年平均降水量为 830 mm,降雨入渗系数为 0.24~0.38。

地下含水层主要由孔隙含水层和岩溶含水层组成。以黄泛冲积为主要成因的第四系砂土、粉土、黏性土广泛分布在平原区,厚度一般小于 40 m,是孔隙水储存的地方。水源地的沉积地层以震旦系和寒武系的碳酸盐岩为主,并在低山丘陵区裸露。在构造

作用和各种外动力地质作用下,形成了许多溶洞、裂隙和断裂,为岩溶水的赋存提供了空间。区域内沿废黄河自西北至东南的废黄河断裂带,地下水富集,是区内地下水主要开采区域。

本次评价选择水源地的灰岩裂隙岩溶含水层为研究区域,评价范围覆盖整个水源地,面积 360 km<sup>2</sup>。裂隙岩溶含水层在地貌上分为两部分,一部分是裸露和半裸露的岩溶丘陵,主要分布在废黄河以北地区及南部边界区域,面积约 170 km<sup>2</sup>;另一部分为浅埋于第四系松散土层下的隐伏岩溶区,面积约 190 km<sup>2</sup>。

### 2.2 易污性评价主要参数的确定

易污性评价方法中需确定的主要参数有:地下水埋深、地下水补给量、地形坡度、渗透系数、土地利用情况等。根据张集地区的水文地质情况,建立区域的地下水数学模型<sup>[7]</sup>,确定区域内裂隙岩溶含水层的地下水参数。

a. 地下水埋深。水源地内大部分地区裂隙岩溶地下水埋深小于 30 m,西部和东部边界的部分区域为 30~45 m,北部山丘区部分区域地下水埋深较大,最大为 160 m。

b. 地下水补给量。评价区域裂隙岩溶水的补给主要来源于 3 个方面:①水源地南、北两侧丘陵区的降雨直接入渗;①山间盆地中的水库及傍河地段的地表水渗漏;③覆盖在其上的第四系孔隙水的越流补给。根据模型计算结果,裂隙岩溶水的补给量为 225~375 m<sup>3</sup>/d,其中沿废黄河断裂带补给量较大,为 325~375 m<sup>3</sup>/d。

c. 地形坡度。建立区域的数字高程模型,在 ARCINFO 中用 SLOPE 命令计算得到水源地的地形坡度图。水源地内地势平坦,大部分地区坡度小于 2%,北部和南部山丘区部分区域坡度较大,最大坡度为 30%。

d. 渗透系数。含水层渗透系数变化较大,大部分区域渗透系数小于 6.5 m/d,沿废黄河断裂带渗透系数较大,最大为 299 m/d。

e. 土地利用。水源地内现有耕地面积 180 km<sup>2</sup>,占总面积的 50%。农业种植以稻、麦为主。废黄河故道沿岸分布着大面积的水稻田,是水稻的主要种植区。区内有 5 个镇,80 个行政村,零散地分布在整个区域。

### 3 张集地区地下水易污性评价及分析

利用确定的张集裂隙岩溶含水层的各项水文地质参数,用 4 种不同方法分别计算分析得到地下水易污性指标,在 ARCINFO 中绘制相应的易污性指标图,见图 1~4。



图 1 GOD 法易污性评价示意图



图 2 DRASTIC 法易污性评价示意图



图 3 SINTACS 法易污性评价示意图



图 4 SI 法易污性评价示意图

从图 1~4 可见,4 种方法对张集地区裂隙岩溶地下水的易污性评价得出了不同的结果。GOD 法的评价结果表明张集大部分地区( 75.0% )属于地下水低易污区,只有少部分地区地下水易污性为较高( 8.8% )和高( 6.6% )。DRASTIC 的评价结果与其相近,低和较低易污性地区占 63.9%,较高和高易污性地区占 8.6%。而 SINTACS 法评价结果表明,只有 2.0%地区是地下水低易污区,一般易污性地区占 48.8%,较高和高易污性地区分别占 19.2%和 30.0%。SI 法的评价结果总体上与 SINTACS 法接近,低易污性地区仅占 6.4%,较高和高易污性地区分别占 39.2%和 30.7%。如果将较低和低易污性作为低易污性,较高和高易污性作为高易污性,这样将易污性评价指标分为 3 类:低易污性、一般易污性和高易污性。表 2 列出了不同方法评价的张集地区裂隙岩溶水 3 类易污性地区所占的比例。

表 2 张集地区裂隙岩溶水易污性评价结果

| 易污性 | 面积比/% |              |           |      |
|-----|-------|--------------|-----------|------|
|     | GOD 法 | 标准 DRASTIC 法 | SINTACS 法 | SI 法 |
| 低   | 75.0  | 63.9         | 2.0       | 6.4  |
| 一般  | 9.6   | 27.5         | 48.8      | 23.7 |
| 高   | 15.4  | 8.6          | 49.2      | 69.9 |

以上方法在其他地区的应用也得到了不同的地下水易污性评价结果<sup>[8]</sup>,这主要与评价方法采用的因子、评分权重及评分标准有关,尤其是各因子的评分权重在很大程度上影响到区域地下水易污性指标。表 3 是标准化后 DRASTIC 法、SINTACS 法及 SI 法评价因子的评分权重对比。GOD 法由于评价因子较少,这里不做比较。

表 3 标准化后的不同评价方法各评价因子的评分权重

| 评价方法         | 评价因子权重 |      |      |      |      |      |      |      |
|--------------|--------|------|------|------|------|------|------|------|
|              | D      | R    | A    | S    | T    | I    | C    | L    |
| 标准 DRASTIC 法 | 0.22   | 0.17 | 0.13 | 0.09 | 0.04 | 0.22 | 0.13 |      |
| SINTACS 法    | 0.19   | 0.19 | 0.08 | 0.19 | 0.08 | 0.19 | 0.08 |      |
| SI 法         | 0.19   | 0.21 | 0.26 |      | 0.12 |      |      | 0.22 |

注:L 为土地利用情况,其他评价因子含义同式(3)。

比较标准 DRASTIC 法和 SINTACS 法各因子的权重,最大的区别是标准 DRASTIC 法中含水层岩性和渗透系数的权重值( 0.13 )较 SINTACS 法高( 0.08 );而 SINTACS 法中土壤特性权重较大,为 0.19,标准 DRASTIC 法为 0.09。SI 法中赋予含水层岩性因子最大权重 0.26。由于各因子权重不同,造成不同的地下水易污性评价结果。

实际上,由于不同评价体系采用的评价因子、权重及评价标准不同,并不能简单地比较其易污性评价结果。比较以上方法在张集地区的地下水易污性评价结果,发现其易污性绝对指标虽然不同,但易污性相对高的区域分布是基本一致的。因此,可以利

用易污性相对高低的概念,对地区内不同区域的地下水易污性作出评价。

具体应用时,可结合评价地区的实际情况,判断对地区地下水易污性影响较大的因素,从而选择合适的的评价方法,评价其地下水易污性。根据张集地区的水文地质条件,对地下水易污性影响最大的因子是含水层岩性和地下水埋深,对照表 3 中几种方法评价因子的权重赋值,SI 法更准确地反映了这一情况。评价结果也证明,SI 法的评价结果沿废黄河断裂带地下水易污性指标较高,说明这一区域较易被污染。由于废黄河断裂带的存在,同时由于地表大面积的水稻种植,区域的地下水补给量很大,因此其地下水易污性指标较高是合理的。

4 结 语

不同地下水易污性经验评分方法对张集地区裂隙岩溶地下水的易污性评价得出了不同的结论。由于不同评价体系采用的评价因子、权重及评价标准不同,不能简单地比较其易污性评价结果。具体应用时,可以利用易污性相对高低的概念,结合评价地区的实际情况,并和实际污染监测情况结合,判断对地区地下水易污性影响较大的因素,从而选择合适的的评价方法,评价其地下水易污性。

实际上,地下水易污性评价的经验评分方法虽然简单实用,但由于在评价过程中将评价指标划分为不同的级别和范围,按照评分标准对其进行评分,因此其评分并不能真实地反映评价指标的连续变化。这也是地下水易污性经验评分方法在实际应用中存在的明显不足。根据含水层易污性具有模型性的本质特征,可用模糊优选方法对其进行评价<sup>[9]</sup>,从而得到更准确的评价结果。

参考文献:

[ 1 ] LOBO-FERREIRA J P, CABRAL M. Proposal for an operational definition of vulnerability for the European community's atlas of groundwater resources [ R ]. Brussels: Meeting of the European Institute for Water, Groundwater Work Group, 1991.

[ 2 ] FOSTER S S D. Fundamental concepts in aquifer vulnerability, pollution risk and protection strategy [ C ] // Proceedings and Information No. 38 of the International Conference. Delft, The Netherlands: TNO Committee on Hydrological Research, 1987: 69-86.

[ 3 ] ALLER L, BENNET T, LEHR J H, et al. DRASTIC: a standardized system for evaluating ground water pollution potential using hydrogeologic settings [ R ]. Washington, DC: U. S. Environmental Protection Agency, 1987.

( 下转第 86 页 )

区排涝工程(泵站、水闸)、江都抽水站、万家寨引黄入晋调水工程、东深供水改造工程等。总体来说,这些系统的计算机监控、通信硬件配置比较先进合理,但传感器、执行机构(如叶片安放角调节机构)的可靠性以及基于运行调度理论的专用调度软件在一定程度上制约了系统的自动化水平。因此除了进一步提高传感器、执行机构的可靠性以外,重点应根据实时数据进行安全、优化调度专用软件的开发研究,进一步提高梯级泵站调水工程运行调度的自动化水平,根据调水需求,结合工程实际情况形成安全、优化的调度决策,进而实现操作控制全过程的自动化。

参考文献:

[1] 杨开林. 电站与泵站中的水力瞬变及调节[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 1999.

[2] 杨开林, 时启燧, 董兴林. 引黄入晋输水工程充水过程的数值模拟及泵站充水泵的选择[J]. 水利学报, 2000(5): 76-80.

[3] 练继建, 王俊, 万五一, 等. 变时步的特征线法计算复杂输水系统的水力过渡过程[J]. 水利水电技术, 2003, 34(9): 12-14.

[4] 杨开林, 白正裕. 调水渠网非恒定流的线性变换求解方法[J]. 水利学报, 2004(3): 35-41.

[5] 杨开林. 明渠结合有压管调水系统的水力瞬变计算[J]. 水利水电技术, 2002, 33(4): 5-11.

[6] 王家亮, 覃杰. 东深供水改造工程中的流量平衡控制[J]. 水利水电技术, 2003, 34(8): 44-46.

[7] 邱锦春, 杨文容, 刘梅清, 等. 梯级泵站水道系统过渡过程计算分析[J]. 中国农村水利水电, 2003(5): 61-63.

[8] 马文正, 丘传忻, 贺贵明. 泵站运行的优化调度[J]. 水利学报, 1993(3): 35-41.

[9] 刘超. 泵站经济运行[M]. 北京: 水利电力出版社, 1995.

[10] 高占义, 窦以松, 黄林泉, 等. 大禹渡梯级泵站优化调度研究[J]. 水利学报, 1990(5): 1-10.

[11] 汪安南, 伍杰. 大型轴流泵站最优运行方式探讨[J]. 农田水利与小水电, 1993(11): 36-38.

[12] 陈守伦, 芮钧, 徐青, 等. 泵站日优化运行调度研究[J]. 水电能源科学, 2003, 21(3): 82-83.

[13] 刘正祥, 蒋丽娟, 张平燕. 动态规划、模拟技术在多级泵站优化调度中的应用[J]. 灌溉排水, 2000, 19(2): 62-68.

[14] 程芳, 陈守伦. 泵站优化调度的分解协调模型[J]. 河海大学学报: 自然科学版, 2003, 31(2): 136-139.

[15] 金明宇, 徐青, 陈守伦. 大型引水工程梯级水位优化模型研究[J]. 水电自动化与大坝监测, 2004, 28(1): 67-69.

[16] 戴振伟, 朱兆通, 储训, 等. 多级泵站优化调度研究[J]. 排灌机械, 1997(3): 37-41.

[17] 杨鹏, 纪晓华, 史旺旺. 基于遗传算法的泵站优化调度[J]. 扬州大学学报: 自然科学版, 2001, 4(3): 72-74.

[18] 李世芳, 马树元. 梯级泵站扬程优化调度算法[J]. 水利水电工程设计, 2002, 21(2): 45-46.

[19] 朱满林, 杨晓东, 张言禾. 梯级泵站优化调度研究[J]. 西安理工大学学报, 1999, 15(1): 67-70.

[20] 刘德祥, 何忠人, 郑玉春, 等. 大岗坡一石台寺多级泵站群优化调度模型研究[J]. 水电能源科学, 1995, 13(4): 236-241.

(收稿日期: 2005-03-29 编辑: 高建群)

(上接第 49 页)

[4] 杨庆, 栾茂田, 崇金著, 等. DRASTIC 指标体系法在大连市地下水易污性评价中的应用[J]. 大连理工大学学报, 1999, 39(5): 684-688.

[5] CIVITA M. Unified legend for the aquifer pollution vulnerability Maps[R]. Bologna: Pitagora Edit, 1990.

[6] FRANCES A, PARALTA E, FERNANDES J, et al. Development and application in the Alentejo region of a method to assess the vulnerability of groundwater to diffuse agriculture pollution: the susceptibility index[R]. Lisbon: GeoSystem Center IST, 2001.

[7] 钱家忠, 吴剑锋, 董洪信, 等. 徐州市张集水源地裂隙岩溶水三维等参有限元数值模型[J]. 水利学报, 2003(3): 37-41.

[8] GOGU R C, HALLET V, DASSARGUES A. Comparison of aquifer vulnerability assessment techniques: application to the Neblon river basin (Belgium)[J]. Environmental Geology, 2003, 44: 881-892.

[9] 周惠城, 王国立, 杨庆. 基于 DRASTIC 的地下水易污性多目标模糊模式识别模型[J]. 水科学进展, 2000, 11(2): 173-179.

(收稿日期: 2005-05-30 编辑: 熊水斌)

(上接第 64 页)

4 结 语

专家数据系统属前人经验的总结, 如何利用和开发是人们所要讨论的课题。从实例分析看, 根据岩石膨胀特性的多个参数, 运用模糊综合评判方法对膨胀岩进行综合分类, 避免了单因素分类的不确定性。这种方法简便易行, 充分利用了人们对膨胀岩膨胀特性的认识, 便于在实际工作中为工程技术人员所采用。

参考文献:

[1] 王小军. 膨胀岩的判别与分类和隧道工程[J]. 水文地质工程地质, 1995, 50(2): 45-49.

[2] 文江泉, 韩会增. 膨胀岩的判别与分类初探[J]. 铁道工程学报, 1996(2): 231-237.

[3] 杨庆, 缪国华, 吴顺川. 膨胀岩三维膨胀本构关系的研究[J]. 岩石力学与工程学报, 1995, 14(6): 33-38.

[4] 张颖均, 王小军. 云台山隧道膨胀岩的膨胀特性[J]. 中国铁道科学, 1994, 15(2): 96-105.

[5] 张玉军, 唐仪兴. 李家窑膨胀岩膨胀性能的试验研究[J]. 岩土力学, 1999, 20(3): 5-40.

[6] KOMINE H, OGATA N. Observation of swelling of bentonite by new electron microscope[R]. Kamon: Institute of Environmental Geotechnics, 1996.

[7] 刘绍军. 岩土分类方法探讨[J]. 湖南水利, 1998(2): 19-21.

[8] 李胡生, 熊文林. 岩体力学参数的工程模糊处理[J]. 水利学报, 1994(1): 76-85.

[9] 曲永新. 对中国东部膨胀岩的研究[J]. 软岩工程, 1991(1/2): 45-54.

(收稿日期: 2005-04-20 编辑: 高建群)