

## 几种地下水脆弱性评价方法之比较<sup>\*</sup>

付 强,刘仁涛,盖兆梅

(东北农业大学 水利与建筑学院,哈尔滨 150030)

**摘 要:**地下水脆弱性研究是保护地下水环境工作的基础。对地下水脆弱性进行评价,可为合理地保护、开发和利用地下水资源,实现地下水资源的可持续利用提供有益参考。应用熵权系数法、基于 RA GA 的投影寻踪模型以及多目标模糊模式识别模型等几种模型对三江平原地下水脆弱性进行评价,得出评价结果。将结果进行横向比较,分析几种评价方法各自的优缺点,为地下水脆弱性的评价提供新的思路和方法。

**关键词:**地下水脆弱性;熵权系数法;投影寻踪;多目标模糊模式识别

中图分类号:P641.2

文献标识码:A

文章编号:1005-3409(2008)06-0046-03

## Comparison Three Methods of Groundwater Vulnerability Evaluation

FU Qiang, LIU Ren-tao, GAI Zhao-mei

(College of Water Conservancy and Building Engineering, Northeast Agricultural University, Harbin 150030, China)

**Abstract:** The research of groundwater vulnerability is the basic work to protect the groundwater. For sustainable utilizing groundwater resource, evaluating groundwater vulnerability is necessary. Useful reference to protect, exploit and utilize groundwater resource are provided rationally. Three methods are applied to evaluate the groundwater vulnerability in Sanjiang Plain. They are the entropy weight coefficient model, the projection pursuit classification model based on RA GA and the multipurpose fuzziness mode identify model. The satisfied results are acquired. After comparing the results each other, their advantages and disadvantages are analyzed, which offer new ways and methods for evaluating groundwater vulnerability.

**Key words:** groundwater vulnerability; entropy weight coefficient model; projection pursuit classification model; multipurpose fuzziness mode identify model

地下水脆弱性研究是保护地下水环境工作的基础。通过地下水脆弱性研究,评价地下水的脆弱程度,可以警示人们在开采和利用地下水资源的同时,采取有效的措施保护地下水资源。

地下水脆弱性的概念是 1968 年法国的 Margat<sup>[1]</sup>首次提出的。地下水脆弱性反映地下水系统遭受污染的潜在可能性,由于牵涉到太多的复杂因素,加之目前尚有待于提高的研究水平,至今尚没有明确的定义。2002 年,长安大学姜桂华<sup>[2]</sup>给出的定义是:地下水脆弱性是地下水系统在自然条件或(和)人为活动的影响下产生潜在不良后果的可能性或倾向性。

对三江平原地下水脆弱性的评价和研究,可揭示人类行为特别是农业活动与地下水污染之间的关系。区分和圈定地下水不同程度脆弱区,可为地下水资源管理与保护提供科学依据,对三江平原国土整治、地下水的合理开发和利用、地下水资源的保护和科学管理,乃至国民经济发展具有重要的理论和实际意义。同时对其它地区也具有指导和示范作用。

应用熵权系数法、基于 RA GA 的投影寻踪模型以及多

目标模糊模式识别模型等几种模型对三江平原地下水脆弱性进行评价,得出评价结果。将结果进行横向比较,分析几种评价方法各自的优缺点,为地下水脆弱性的评价提供新的思路和方法。

### 1 评价模型简介

#### 1.1 熵权系数法评价模型

熵权系数法<sup>[3-6]</sup>是根据熵的概念和性质,把多目标决策评价各待选方案的固有信息和决策者的经验判断的主观信息进行量化和综合,进而建立基于熵的多目标决策评价模型,为多目标决策提供依据。熵权系数法评价模型建模步骤如下:

设有  $n$  个待评价的样本,每个样本有  $m$  个评价指标,则根据实测数据构造评价指标特征值矩阵  $X_{ij}$ ,并按照各评价指标的分级标准,将  $X_{ij}$  转化成定额矩阵  $X_{ij}$ :

$$X_{ij} = \begin{bmatrix} X_{11} & X_{12} & \dots & X_{1n} \\ X_{21} & X_{22} & \dots & X_{2n} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ X_{m1} & X_{m2} & \dots & X_{mn} \end{bmatrix} \quad (i = 1, 2, \dots, m; j = 1, 2, \dots, n)$$

<sup>\*</sup> 收稿日期:2008-01-25

基金项目:国家自然科学基金(30400275);黑龙江省攻关项目(黑龙江省青年科学基金, QC04C28)

作者简介:付强(1973-),男,辽宁锦州人,教授,博士生导师,主要从事农业水土资源系统分析、节水灌溉及农业系统工程建模与优化技术研究。E-mail: fuqiang@neau.edu.cn

计算第  $i$  个评价指标下第  $j$  个待评价样本的评价指标特征值比重  $p_{ij} = X_{ij} / \sum_{j=1}^n X_{ij}$ ; 计算第  $i$  个评价指标的熵  $e_i = - \frac{1}{m} \sum_{j=1}^n p_{ij} \ln p_{ij}$ ; 计算第  $i$  个评价指标的权重  $a_i = (1 - e_i) / \sum_{i=1}^m (1 - e_i)$ ; 计算各样本的综合评价价值  $W_j = \sum_{i=1}^m a_i p_{ij}$ ; 按  $W_j$  由大到小,对各个样本进行优劣排序。

1.2 基于 RAGA 的投影寻踪模型

投影寻踪模型<sup>[4,7]</sup>是用来处理和分析高维数据的一种探索性数据分析的有效方法,该方法主要有以下几个特点:成功地克服了高维数据的“维数祸根”带来的严重困难;排除了与数据结构和特征无关的或关系很小的变量的干扰;使用一维统计方法解决高维问题<sup>[8]</sup>。基于 RAGA 的投影寻踪建模步骤如下:

步骤 1:构造投影指标函数  $Q(a)$ :

把  $p$  维数据  $\{x^*(i, j) | j = 1 \sim p\}$  综合成以  $a = \{a(1), a(2), a(3), \dots, a(p)\}$  为投影方向的一维投影值

$$z(i) = \sum_{j=1}^p a(j) x(i, j) \quad (i = 1, 2, \dots, n) \tag{1}$$

然后根据  $\{z(i) | i = 1 \sim n\}$  的一维散布图进行分类。投影指标函数可以表达成:

$$Q(a) = S_z D_z$$

式中:  $S_z$  ——投影值  $z(i)$  的标准差;  $D_z$  ——投影值  $z(i)$  的局部密度,即:

$$S_z = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n [z(i) - E(z)]^2}, \quad D_z = \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n [R - r(i, j)] \cdot u[R - r(i, j)]$$

式中:  $E(z)$  ——序列  $\{z(i) | i = 1 \sim n\}$  的平均值;  $R$  ——局部密度的窗口半径,其值可以根据试验来确定,一般可取值为  $0.1 S_z$ ;  $r(i, j)$  ——样本之间的距离,  $r(i, j) = |z(i) - z(j)|$ ;  $u(t)$  ——单位阶跃函数,当  $t \geq 0$  时,其值为 1,当  $t < 0$  时其函数值为 0。

步骤 2:优化投影指标函数

通过求解投影指标函数最大化问题来估计最佳投影方向,即:最大化目标函数  $\max Q(a) = S_z \cdot D_z$

约束条件  $s. t. : \sum_{j=1}^p a^2(j) = 1$ ,这是一个以  $\{a(j) | j = 1 \sim p\}$  为优化变量的复杂非线性优化问题,此外应用基于实数编码的加速遗传算法(RAGA)来解决其高维全局寻优问题。

步骤 3:优劣排序

把由步骤 2 求得的最佳投影方向  $a^*$  代入式(1)后可得各样本点的投影值  $z^*(i)$ 。按  $z^*(i)$  值从大到小可将样本从优到劣进行排序。

1.3 多目标模糊模式识别模型

下式即为可应用于若干区段含水层脆弱性评价的多目标模糊模式识别模型<sup>[4,9]</sup>:

$$u_i = \frac{1}{1 + \left[ \frac{\sum_{j=1}^m (w_j \cdot |r_{ij} - 1|)^p}{\sum_{j=1}^m (w_j \cdot r_{ij})^p} \right]^{2/p}} \tag{2}$$

根据最大隶属度原则,可得到所有区段含水层脆弱性相对隶属度的优劣排序:相对隶属度值越大,含水层越容易受

到污染,即含水层越脆弱;反之,相对隶属度值越小,含水层越不容易受到污染,即含水层越不脆弱。

2 模型应用

以三江平原作为研究区域,对 6 大分区的地下水脆弱性进行评价。首先在传统的 DRASTIC 指标体系基础上,结合三江平原实际情况,建立三江平原地下水脆弱性评价指标体系。目前,最成熟的地下水脆弱性评价指标体系当属美国环保署(EPA)于 1987 年提出的 DRASTIC 模型<sup>[10]</sup>。该模型在庞大的地下水脆弱性评价指标体系中选取 7 个最主要的要素作为评价指标,它们是:地下水埋深( $D$ )、含水层的净补给( $R$ )、含水层的介质类型( $A$ )、土壤介质类型( $S$ )、地形坡度( $T$ )、渗流区介质类型( $I$ )及含水层水力传导系数( $C$ )。

结合三江平原实际情况,建立三江平原地下水脆弱性评价指标体系。由于三江平原地势平坦,地形坡度变化极小,对地下水脆弱性的影响不大,所以在传统的 DRASTIC 指标体系基础上,去掉了地形坡度这项指标。又由于原指标体系中的渗流区介质类型这一指标在三江平原很难收集到数据,所以也不包含在新指标体系中。另外,考虑到三江平原以农业为主,所以增加土地利用率( $L$ )和人口密度( $P$ )这两项对地下水脆弱性影响较大的指标。综上,建立三江平原地下水脆弱性评价指标体系:DRASCLP。根据相关性分析,该评价指标体系较为合理。在以上评价指标体系中, $A$  和  $S$  为定性指标,其定额值根据文献[11]及三江平原实际情况给定,其余 5 项指标为定量指标,由实测获得,相关数据见表 1。

表 1 三江平原地下水脆弱性评价指标实测值

分 区	D/ m	R/ mm	A	S	C/ (m·d <sup>-1</sup> )	L/ %	P/ (人·km <sup>-2</sup> )
萝北地区	5.3	15.79	8	10	15.33	85.83	83.82
同抚地区	6.5	16.10	7	9	24.65	72.11	42.59
挠力河地区	6.0	14.15	8	9	12.60	86.49	26.63
安邦河地区	2.6	6.42	7	10	2.15	77.68	315.55
倭肯河地区	2.3	13.81	7	8	10.20	85.03	143.48
穆棱河地区	3.5	4.05	7	10	1.28	87.67	80.55

将表 1 中的实测数据按文献[11]转化为相应的定额值,得到三江平原地下水脆弱性评价指标体系的定额值矩阵见表 2。

表 2 三江平原地下水脆弱性评价指标体系的定额

分 区	D	R	A	S	C	L	P
萝北地区	7	6	8	10	4	9	6
同抚地区	7	6	7	9	4	7	6
挠力河地区	7	6	8	9	4	9	3
安邦河地区	9	3	7	10	1	7	9
倭肯河地区	9	6	7	8	2	9	8
穆棱河地区	9	1	7	10	1	9	6

2.1 熵权系数法对三江平原地下水脆弱性的评价

由熵权系数法得到各样本的综合评价价值

$$W_j = (7.1403, 6.5698, 6.5694, 6.5677, 6.9973, 6.1383)$$

根据综合评价,得出了三江平原各地区中,萝北地区地下水最容易受到污染,以下依次为倭肯河地区、同抚地区、挠力河地区、安邦河地区和穆棱河地区。

## 2.2 投影寻踪模型对三江平原地下水脆弱性的评价

在 RAGA 过程中,选定父代初始种群规模为  $n=400$ ,交叉概率  $p_c=0.80$ ,变异概率  $p_m=0.80$ ,优秀个体数目选定为 20 个,  $a=0.05$ ,加速次数为 20 (实算加速次数为 8),得出密度窗宽  $R=11.057$ ,最大投影指标值为 821.585 6,各个评价指标的最佳投影方向:

$a^*=(0.0317, 0.4333, 0.1615, 0.0189, 0.4350, 0.2020, 0.7449)$   
各个地区综合评价的投影值:

$z^*=(11.3152, 10.7301, 10.0539, 7.0867, 11.0341, 5.5340)$

将  $z^*(i)$  从大到小排列,可得各地区地下水脆弱性的优劣排序,同熵权系数法评价结果完全吻合。

## 2.3 多目标模糊模式识别模型评价三江平原地下水脆弱性

将表 1 中的数据代入式 (2),计算各分区对地下水脆弱性的隶属度,计算结果见表 3。

表 3 多目标模糊模式识别模型各分区  
对地下水脆弱性的隶属度及脆弱性排序

分区	脆弱性特征值	脆弱性排序	描述性语言
萝北地区	0.8832	2	极脆弱
同抚地区	0.6411	3	脆弱
挠力河地区	0.5487	4	较脆弱
安邦河地区	0.0307	5	不脆弱
倭肯河地区	0.8920	1	极脆弱
穆棱河地区	0.0028	6	不脆弱

从表 3 中可以看出,在三江平原各分区中,萝北地区和倭肯河地区地下水极脆弱,同抚地区地下水脆弱、挠力河地区地下水较脆弱,安邦河地区和穆棱河地区地下水不脆弱。

## 3 几种模型评价结果比较分析

### 3.1 熵权系数法

在熵权系数法综合评价模型中,各项指标的权重由样本数据计算得到,消除了人为确定权重的主观误差。将该模型应用于地下水脆弱性评价之中,对三江平原各地区的地下水脆弱性进行评价,得出三江平原各地区中,萝北地区地下水最容易受到污染,以下依次为倭肯河地区、同抚地区、挠力河地区、安邦河地区和穆棱河地区。

### 3.2 投影寻踪模型

(1) 投影寻踪模型将指标体系(高维数据)投影到一维子空间上,借助 RAGA 算法建立投影寻踪模型,经多次运算寻找最佳投影方向,形成评价指标值,按大小进行排序。避免了专家主观赋权的人为干扰,克服了传统方法的不足。投影寻踪模型对于地下水脆弱性评价具有较好的效果,为该方面研究提供了一条新的方法和思路。

(2) 从各评价指标的投影方向可以看出,人口密度对三江平原地下水脆弱性的影响最大,从原始数据可以看出,这是由于三江平原各地区人口分布不均衡造成的。其次是含水层净补给和含水层水力传导系数,这两项指标的数值和最

终脆弱性排序大体吻合,说明这两项指标在三江平原地下水脆弱性评价指标体系中占据主要地位。而这两项指标都和地下水水量有直接关系,是超采造成地下水漏斗现象的重要影响因素。因此,提醒有关部门在开发利用地下水资源过程中,尽量控制开采量,提高利用系数,采取有效措施保护地下水资源,实现地下水资源的可持续利用。

### 3.3 多目标模糊模式识别模型

用多目标模糊模式识别模型评价的结果排序为:倭肯河地区地下水最容易受到污染,以下依次为萝北地区、同抚地区、挠力河地区、安邦河地区和穆棱河地区。此结果与前两种方法的评价结果略有不同,这是由于多目标模糊模式识别模型与前两种方法的计算过程不同而产生的。在前两种方法中,均按照各指标的分级范围给出定额,使得指标大小的变化对地下水脆弱性的影响不能得到完全充分的反映。例如,对指标 C,挠力河地区的值为 12.60,同抚地区的值为 24.65,后者约是前者的 2 倍,但是两者却被划分为同一级别,赋予相同的定额 4。类似的问题也存在于其它指标中。而多目标模糊模式识别模型不需要进行这种划分,可反映指标的连续变化对地下水脆弱性的影响。因此,与前两种方法相比,多目标模糊模式识别模型的评价结果更符合实际情况。

## 4 结 论

采用投影寻踪模型评价三江平原各地区地下水脆弱性的结果排序与熵权系数法综合评价模型所得结果完全相同,说明两种方法均可应用于地下水脆弱性评价之中。相比而言,投影寻踪模型不但可以评价出不同分区地下水脆弱性的程度,同时还可以根据投影方向判断各评价指标的相对重要程度。我们可以据此对指标体系进行适当调整,去掉投影值相对很小的指标,并根据当地实际情况适当补充新的指标,重新进行评价分析,如此反复,直至各项指标的投影值大小趋于相对均衡为止。这正是投影寻踪模型优于熵权系数法模型之处。

地下水脆弱性评价具有很强的模糊性,这种模糊性在对指标特征值的级别划分并给不同级别赋予定额时得到反映,但该过程忽略了指标连续变化这一客观实际。例如,若地下水埋深介于 1.53~4.58 时定额均为 9,按熵权系数法和投影寻踪模型评价时,地下水埋深的实际变化对地下水性的影响得不到反映。而应用多目标模糊模式识别模型则不必进行指标分级,因而可真实地反映指标的连续变化对地下水脆弱性的影响。

### 参考文献:

- [1] Jaroslav V, Alexander Z, Hanover G F R. Guidebook on Mapping Groundwater Vulnerability [C]// Castany G, Groba E, Romijn E. International Contributions to Hydrogeology Founded. 1968, 16:186.
- [2] 姜桂华. 地下水脆弱性研究进展[J]. 世界地质, 2002, 21(1):33-38.

(下转第 52 页)

表 5 不同类型绿地植物正常生长所要求的有效土层厚度

植物类型	要求有效土层厚度/cm
草坪	20 - 30
一、二年生花卉	20 - 30
宿根花卉	30 - 50
小灌木	40 - 50
大灌木	60 - 70
小乔木	80 - 120
大乔木	100 - 150

表 6 土壤紧实度与植物生长发育之间的关系

土壤紧实度/kPa	植物发育状况
< 137.30	土壤松软易干燥,导致植物发芽受影响 坡度较大时,土壤容滑落 利于植物根系生长发育,适宜草本植物繁殖
黏性土 137.30 ~ 981.68 砂性土 137.30 ~ 1793.70	适宜木本植物栽种
黏性土 981.68 ~ 3700.18 砂性土 1793.70 ~ 3700.18	除了一部分木本植物之外,根系的生长发育受到影响
> 3700.18	根系的发育生长几乎是不可能的
软岩、硬岩	在岩石表面有龟裂的条件下,木本类植物的根系生长发育是可能的

### 3 结论

由于受到强烈人为活动的反复影响,使路域内部分土壤成为复杂的扰动土壤分布区。其中一些土壤是今后用于绿化或者生态防护的绿地土壤,结合本研究所调查区域路域土壤的障碍因素,它具有如下一些特点:

(1) 土壤物理性质差。

(2) 有机质和养分贫乏,pH 普遍偏高。

(3) 土壤成分复杂,侵入体多;路域堆积土壤中夹杂着特殊异质土层,如碎砖、变性水泥等,它们的特点是“杂物”多而细土少,对整个堆积土体的性质和肥力都有很大影响。

(4) 有效土层有限,植物扎根受限。

(5) 受施工垃圾的污染,施工过程中适用的石灰、煤渣、水泥、砾石、沥青混凝土等,往往对边坡土壤和中央隔离带土壤产生污染。

(6) 土壤重金属污染因素增多。由于公路路域(尤其是边坡土和中央隔离带)土壤具有如上一系列不良特征,所以实施绿化或者生态防护工程时必须采取土壤改良措施及其相应措施。

#### 参考文献:

- [1] 刘良梧,龚子同. 全球土壤退化评价[J]. 自然资源, 1995(1): 10-16.
- [2] 李玉和. 城市土壤形成特点肥力评价及利用与管理[J]. 中国园林, 1997, 13(3): 20-23.
- [3] 刘廷良,高松武次郎,佐濑浴之. 日本城市土壤的重金属污染研究[J]. 环境科学研究, 1996, 9(2): 47-51.
- [4] 崔晓阳,方怀龙. 城市绿地土壤及其管理[M]. 北京: 中国林业出版社, 2001.
- [5] 张甘霖,朱永官,傅伯杰. 城市土壤质量演变及其生态环境效应[J]. 生态学报, 2003, 23(3): 539-546.
- [6] 土壤环境质量标准(GB15618-1995).
- [7] 李天杰,宫室国,潘根兴,等. 土壤环境学[M]. 北京: 高等教育出版社, 1995: 97-138.
- [8] 付强,赵小勇. 投影寻踪模型原理及其应用[M]. 北京: 科学出版社, 2006: 11-28.
- [9] 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.
- [10] Alley L, Bennet T, Lehr J H. DRASTIC a Standardized System for Evaluating Groundwater Pollution Potential Using Hydrogeologic Settings[M]. U. S. Environmental Protection Agency, Ada, OK, EPA/600/2-87-036, 1987.
- [11] 陈守煜,王国利. 含水层脆弱性的模糊优选迭代评价模型及应用[J]. 大连理工大学学报, 1999, 39(6): 811-815.
- [3] 刘仁涛,付强,张艳梅,等. 三江平原地下水脆弱性评价的熵权系数法模型[J]. 水土保持研究, 2007, 14(6): 20-22.
- [4] 刘仁涛. 三江平原地下水脆弱性研究[D]. 哈尔滨: 东北农业大学, 2007: 31-50.
- [5] 付强. 数据处理方法及其农业应用[M]. 北京: 科学出版社, 2006: 83-323, 466-469.
- [6] Liu Rentao, Fu Qiang, GAI Zhaomei, et al. Entropy Weight Coefficient Model and Its Application in Evaluation of Groundwater Vulnerability of the Sanjiang Plain[J]. Journal of Northeast Agriculture University (English Edition), 2007, 14(4): 368-373.
- [7] 刘仁涛,付强,盖兆梅,等. 三江平原地下水脆弱性评价的投影寻踪模型[J]. 东北农业大学学报, 2008(2): 184-190.

(上接第 48 页)