

三江平原地下水脆弱性评价的熵权系数法模型

刘仁涛¹, 付强¹, 张艳梅², 盖兆梅¹

(1. 东北农业大学 水利与建筑学院, 哈尔滨 150030; 2. 哈尔滨轴承集团公司, 哈尔滨 150036)

摘 要: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。结合三江平原实际情况, 在传统的 DRASTIC 模型基础上, 建立新的指标体系, 包括以下 7 项指标: 地下水埋深、含水层的净补给、含水层的介质类型、土壤介质类型、含水层水力传导系数、土地利用率和人口密度。根据相关性分析, 该评价指标体系较为合理。传统的评价方法, 如层次分析法或模糊数学方法, 不能排除主观确定权重的人为干扰, 评价结果往往带有一定程度的主观性误差。为了合理地对地下水脆弱性进行评价, 首次将熵权系数法模型应用于地下水脆弱性评价之中。该方法的权重通过计算过程得出, 排除了人为的主观性干扰, 为地下水脆弱性评价提供了一种新的方法。将该方法应用于三江平原的地下水脆弱性评价, 得到了满意的结果。该模型的评价结果与基于实数编码加速遗传算法的投影寻踪模型的评价结果完全相同, 说明熵权系数法可以应用于地下水性评价, 其评价结果可为有关决策部门提供参考。

关键词:地下水脆弱性; 熵权系数法模型; 指标体系

中图分类号: F323. 213 文献标识码: A 文章编号: 1005- 3409(2007)06-0020- 03

Entropy Weight Coefficient Model of Evaluation in Groundwater Vulnerability of the Sanjiang Plain

LIU Ren-tao¹, FU Qiang¹, ZHANG Yan-mei², GAI Zhao-mei¹

(1. College of Water Conservancy and Building Engineering, Northeast Agricultural University, Harbin 150030, China; 2. Harbin Bearing Group Company, Harbin 150036, China)

Abstract: For utilizing groundwater resource continually, groundwater vulnerability evaluation is necessary. Useful reference to protect, exploit and utilize on groundwater resource are provided rationally. It is the key to establish the indexes system with the suited method to evaluate the vulnerability of groundwater. According to the real condition of Sanjiang Plain, the indexes system is established based on the traditional DRASTIC model. The new system includes 7 indexes as followings: Depth of Water, Net Recharge, Aquifer Media, Soil Media, Conductivity of the Aquifer, Land Utilizing Ratio and Population Density. The related analysis appears that the system is rather reasonable. Because traditional methods, such as analytic hierarchy process and fuzzy mathematics theory, can't be avoided human interference in selection of weights, they could lead to an imprecise result. In order to evaluate the groundwater vulnerability reasonably, entropy weight coefficient method is applied for the first time, which provides a new way to groundwater vulnerability evaluation. The method is a model whose weights are insured by the calculation process, so the artificial disturbance can be avoided. It has been used to evaluate the groundwater vulnerability in Sanjiang Plain. The satisfying result is acquired. Comparably, the same result is acquired by the other method named projection pursuit evaluation based on real-coded accelerating genetic algorithm. It shows that entropy weight coefficient method is applicable on groundwater vulnerability evaluation. The evaluation result can provide reference on the decision-making departments.

Key words: groundwater vulnerability; Entropy Weight Coefficient Model; indexes system

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 (Groundwater Vulnerability) 的概念是 1968 年法国的 Margat^[1] 首次提出的。由于牵涉到太多的复杂因素, 加之目前尚有待提高的研究水平, 至今尚没有明确的定义。2002 年, 长安大学姜桂华^[2] 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。

通过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

*收稿日期: 2007-01-11
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: 刘仁涛 (1975-), 男, 哈尔滨人, 硕士, 主要从事水土资源系统分析、数学建模及地下水脆弱性研究。
通信作者: 付强 (1973-), 男, 辽宁锦州人, 教授, 博士生导师, 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。

范作用。

在以往的地下水脆弱性评价中,常采用层次分析技术、模糊数学理论等,其共同的弊端是人为确定各评价因子的分级标准以及人工为因子赋权,带有一定程度的主观性。为了克服这个弊端,结合三江平原实际情况,首次将熵权系数法模型应用于该地区的地下水脆弱性评价,取得了令人满意的效果,为地下水脆弱性评价提供了新思路和新方法。

1 熵权系数法评价模型简介

1.1 熵的定义及基本性质

熵的概念源于热力学,后在工程技术、经济社会中得到应用,是一种多目标决策的有效方法。其定义如下:熵是系统状态不确定性的一种度量,当系统可能处于 n 种不同状态且每种状态出现的概率为 $p_i(i=1,2,\dots,n)$ 时,该系统的熵为

$$E=-\sum_{i=1}^n p_i \ln p_i \tag{1}$$

式中: p_i 满足 $0 \leq p_i \leq 1; \sum_{i=1}^n p_i = 1$ 。

熵的基本性质主要有“可加性”和“非负性”等几点。可加性是指系统的熵等于其各个状态熵之和,非负性是指系统处于某种状态的概率 $P_i \geq 0$,即系统的熵总是非负的^[3]。

1.2 熵权系数法评价模型

熵权系数法^[3]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。其建模步骤如下^[4-5]:

步骤 1: 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 :

$$X_{ij} = \begin{bmatrix} X_{11} & X_{12} & \cdots & X_{1n} \\ X_{21} & X_{22} & \cdots & X_{2n} \\ \cdots & \cdots & \cdots & \cdots \\ X_{m1} & X_{m2} & \cdots & X_{mn} \end{bmatrix}$$

$(i=1,2,\dots,m; j=1,2,\dots,n)$ (2)

步骤 2: 按照各评价指标的分级标准,将上述矩阵转化成定额矩阵 X' :

$$X'_{ij} = \begin{bmatrix} X'_{11} & X'_{12} & \cdots & X'_{1n} \\ X'_{21} & X'_{22} & \cdots & X'_{2n} \\ \cdots & \cdots & \cdots & \cdots \\ X'_{m1} & X'_{m2} & \cdots & X'_{mn} \end{bmatrix} \tag{3}$$

步骤 3: 计算第 i 个评价指标下第 j 个待评价样本评价指标特征值比重:

$$p_{ij} = X'_{ij} / \sum_{j=1}^n X'_{ij} \tag{4}$$

步骤 4: 计算第 i 个评价指标的熵:

$$e_i = -\frac{1}{mn} \sum_{j=1}^n p_{ij} \ln p_{ij} \tag{5}$$

步骤 5: 计算第 i 个评价指标的权重:

$$a_i = (1 - e_i) / \sum_{i=1}^m (1 - e_i) \tag{6}$$

步骤 6: 计算各样本的综合评价价值:

$$W_j = \sum_{i=1}^m a_i p_{ij} \tag{7}$$

步骤 7: 按 W_j 由大到小,对各个样本进行优劣排序。

2 应用实例

三江平原位于黑龙江省东北部,包括黑龙江、松花江、乌苏里江汇流的三角地带以及倭肯河与穆稜河流域和兴凯湖平原。全区总控制面积 10.89 万 km^2 , 占全省面积的 23.9%, 是我国的重要的商品粮生产基地。近些年来,随着三江平原地区井灌水稻面积的逐年增加,一些地区地下水资源严重超采,局部地区已经出现漏斗现象,农业水资源出现严重危机。同时,人类活动以及化肥农药的大量使用,不可避免地对地下水产生一定程度的影响。为了实现地下水资源的可持续利用,对三江平原地区地下水脆弱性进行评价,为该地区水资源保护及合理开发利用提供有益的参考。

地下水脆弱性评价的关键是指标体系的建立。影响地下水脆弱性的各种潜在因素很多,因此要建立一个包含所有因素的庞大指标体系在实际应用中是很难实现的。一方面这些因素所包含的指标有一些很难取得,另一方面指标过多,它们之间的关系也错综复杂,并且它们之间还存在着协同和拮抗等作用。这就要求在进行地下水脆弱性评价时,应根据不同地区的情况具体问题具体分析,尽量找出影响地下水脆弱性的主要因素,并且选取的指标不宜过多,否则会冲淡主要指标的作用。

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^[6]。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)。

表 1 地下水脆弱性评价指标体系中不可直接测得的指标

分区	A	S
萝北地区	细砂、中砂、砂砾石	薄层粉质黏土及厚层砂砾石
同抚地区	中粗砂、含砾中粗砂、砂砾石	厚度为 8-15 m 的粉质黏土及厚层砂砾石
挠力河地区	粉细砂、中细砂、砂砾石	厚度为 10-17 m 的粉质黏土及厚层砂砾石
安邦河地区	中粗砂、含砾中粗砂、砂砾石	薄层粉质黏土、粉土及厚层砂砾石
倭肯河地区	中粗砂、含砾中粗砂、砂砾石	粉质黏土、粉土、砂及砂砾石
穆稜河地区	中粗砂、含砾粗砂、砂砾卵石	薄层粉质黏土及粉土、厚层砂及砂砾石

表 2 地下水脆弱性评价指标体系中直接测得指标

分区	$D/$ m	$R/$ ($\text{m} \cdot \text{d}^{-1}$)	$C/$ %	$L/$ %	$P/$ ($\text{人} \cdot \text{km}^{-2}$)
萝北地区	5.3	15.79	15.33	85.83	83.82
同抚地区	6.5	16.1	24.65	72.11	42.59
挠力河地区	6.0	14.15	12.60	86.49	26.63
安邦河地区	2.6	6.42	2.15	77.68	315.55
倭肯河地区	2.3	13.81	10.20	85.03	143.48
穆稜河地区	3.5	4.05	1.28	87.67	80.55

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。

表 3 可直接定量获得指标的分级及定额

D		R		C		L		P	
分级范围/ m	定额	分级范围/ cm	定额	分级范围/ ($L^2 \cdot d^{-2}$)	定额	分级范围/ %	定额	分级范围/ ($人 \cdot km^{-2}$)	定额
0~ 1.53	10	0~ 6	1	1~ 10	1	< 30	10	< 20	10
1.53~ 4.58	9	6~ 12	3	10~ 300	2	30~ 50	9	20~ 40	9
4.58~ 9.15	7	12~ 21	6	300~ 700	4	50~ 70	7	40~ 100	6
9.15~ 15.25	5	21~ 30	8	700~ 1000	6	70~ 80	5	100~ 400	3
15.25~ 22.88	3	≥ 30	9	1000~ 2000	8	80~ 90	3	> 400	1
22.88~ 30.50	2			≥ 2000	10	> 90	1		
≥ 30.50	1								

表 4 不可直接定量获得指标的分级及定额

A(含水层介质类型)		S(土壤介质类型)	
分类	定额	分类	定额
大面积页岩	2	很薄或裸露	10
变质岩/喷出岩	3	砂	9
风化的变质岩/喷出岩	4	珍珠岩	8
冰渍物	5	收缩黏土	7
沉积砂岩	6	沙质亚黏土	6
块状砂岩	6	亚黏土	5
块状灰岩	6	粉砂质亚黏土	4
砂砾石	8	黏土质亚黏土	3
玄武岩	9	腐殖质	2
岩溶化石灰岩	10	未收缩的黏土	1

根据表 1- 4,得出三江平原地下水脆弱性评价指标体系的定额,见表 5。

表 5 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	9
挠力河地区	7	6	8	9	4	9	9
安邦河地区	9	3	7	10	1	7	1
倭肯河地区	9	6	7	8	2	9	3
穆棱河地区	9	1	7	10	1	9	6

根据表 5 中的数据,得到评价指标的特征值矩阵:

$$X_{ij} = \begin{bmatrix} 7 & 7 & 7 & 9 & 9 & 9 \\ 6 & 6 & 6 & 3 & 6 & 1 \\ 8 & 7 & 8 & 7 & 7 & 7 \\ 10 & 9 & 9 & 10 & 8 & 10 \\ 4 & 4 & 4 & 1 & 2 & 1 \\ 9 & 7 & 9 & 7 & 9 & 9 \\ 6 & 6 & 9 & 1 & 3 & 6 \end{bmatrix}$$

由式(4)得到待评价样本评价指标特征值比重矩阵:

在评价指标体系中, A 和 S 为定性指标,其定额值根据表 4 以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,分别见表 1 和表 2。

将可直接定量获得的 5 项指标,即 D, R, C, L, P 的分级范围和定额列于表 3。

将不能直接定量获得的另 2 项指标,即 A, S 的分级范围和定额列于表 4。

$P_{ij} =$

$$\begin{bmatrix} 0.1458 & 0.1458 & 0.1458 & 0.1875 & 0.1875 & 0.1875 \\ 0.2143 & 0.2143 & 0.2134 & 0.1071 & 0.2143 & 0.0357 \\ 0.1818 & 0.1591 & 0.1818 & 0.1591 & 0.1591 & 0.1591 \\ 0.1786 & 0.1607 & 0.1607 & 0.1786 & 0.1429 & 0.1786 \\ 0.2500 & 0.2500 & 0.2500 & 0.0625 & 0.1250 & 0.0625 \\ 0.1800 & 0.1400 & 0.1800 & 0.1400 & 0.1800 & 0.1800 \\ 0.1935 & 0.1935 & 0.2903 & 0.0323 & 0.0968 & 0.1935 \end{bmatrix}$$

由式(5)得到各评价指标的熵:

$$e_i = (0.0425 \quad 0.0400 \quad 0.0426 \quad 0.0426 \quad 0.0392 \quad 0.0425 \quad 0.0393)$$

由式(6)得到各评价指标的权重:

$$a_i = (0.1427 \quad 0.1430 \quad 0.1427 \quad 0.1432 \quad 0.1427 \quad 0.1431)$$

由式(7)得各样本的综合评价值

$$W_j = (7.1403 \quad 6.5696 \quad 7.4271 \quad 5.4233 \quad 6.2819 \quad 6.1383)$$

3 结 论

(1)地下水脆弱性评价的关键是指标体系的建立。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:地下水埋深、含水层的净补给、含水层的介质类型、土壤介质类型、含水层水力传导系数、土地利用率和人口密度。根据相关性分析,该评价指标体系较为合理。

(2)在以往的地下水脆弱性评价中,常采用层次分析技术、模糊数学理论等,其共同的弊端是人为确定各评价因子的分级标准以及人工为因子赋权,带有一定程度的主观性。而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。

(3)将熵权系数法模型与基于实数编码加速遗传算法的投影寻踪模型进行比较,评价结果完全相同,说明熵权系数法应用于地下水脆弱性评价可以得到满意的结果。

(下转第 84 页)

3.2.2 不同封育类型的土壤紧实度对植被盖度的影响

从封育区的土壤紧实度与植被盖度的相互关系来看, 总体水平(图 4a)、老封育区(图 4b)、新封育区(图 4c)和对照区(图 4d)的回归分析都表明土壤紧实度与封育类型区的盖度呈负相关, 即随封育类型区土壤紧实度的增加, 生物量降低。

4 结 语

在 3 种封育措施的群落中, 生物量 ANOVA 的方差分析结果表明, 三者间不存在显著差异; 植被盖度 ANOVA 的方差分析结果表明, 三者间不存在显著差异; 土壤含水量 ANOVA 的方差分析结果表明, 三者间不存在显著差异; 土壤紧实度的变化新封育区< 对照区< 老封育区, ANOVA 方

差分析显示存在着显著差异($P < 0.05$), 可以判定土壤紧实度对植被的生长状况影响较大。

从不同类型封育区的土壤紧实度与生物量和植被盖度的相互关系来看, 回归分析都表明土壤紧实度与不同封育类型区的生物量和植被盖度呈负相关。说明土壤紧实度是影响植被生长状况主要因子之一。

从整体上看土壤紧实度与生物量和植被盖度的相互关系是负相关, 即随着土壤紧实度的增加, 生物量和植被盖度呈减少趋势。土壤紧实度在 $2.0 \sim 3.0 \text{ kg/m}^2$ 时, 植被的盖度和生物量均较高(图 5)。

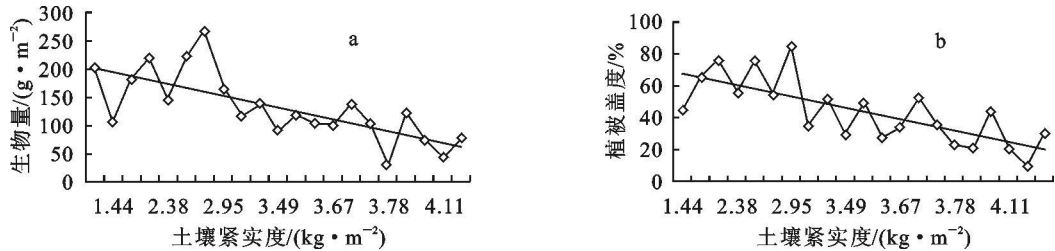


图 5 土壤紧实度与植被特征的关系

参考文献:

[1] 刘晚苟, 山仑, 邓西平. 植物对土壤紧实度的反应[J]. 植物生理学通讯, 2001, 37(3): 254– 260.

[2] Bai W, Bao X, Li L. Effect of *Agriophyllum squarrosum* seed banks on its colonization in a moving sand dune in Hunshandake Sand Land of China[J]. Journal of Arid Environments, 2004, 59: 151– 157.

[3] 常学礼, 杨持, 刘颖如, 等. 裸沙生境中沙米异质种群的时空动态研究[J]. 内蒙古大学学报, 2003, 34(6): 630– 635.

[4] QI Xiangzhen, LIN Zhenshan. Grassland evolution under soil degradation: Numerical simulation and test[J]. Pedoshere, 2005, 15(1): 41– 45.

[5] Zhang Y, Penf B Z, Gao X, et al. Degradation of soil properties due to erosion on sloping land in southern Jiangsu Province, China[J]. Pedoshere, 2004, 14(1): 17– 26.

[6] 中国土壤学会. 土壤农业化学分析方法[M]. 北京: 中国农业出版社, 2000: 146– 195, 272– 276.

[7] 马育华. 试验统计[M]. 北京: 农业出版社, 1982.

[8] 常学礼, 崔步礼, 陈雅琳, 等. 流动沙丘土壤紧实度对沙米生长状况的影响[J]. 自然资源学报, 2006, 21(2): 238– 244.

[9] 王晓云, 霍建林, 漆建忠. 灌木林放牧利用对沙地水分的缓解作用[J]. 水土保持通报, 1994, 14(7): 15– 21.

[10] 李新荣, 赵雨兴, 杨志中, 等. 毛乌素沙地飞播植被与生境演变的研究[J]. 植物生态学报, 1999, 23(2): 116– 124.

(上接第 22 页)

(4) 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了评价, 得出了三江平原各地区中, 挠力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、倭肯河地区、穆棱河地区和安邦河地区。评价结果可为决策部门提供参考。

参考文献:

[1] Jaroslav V, Alexander Z. Guidebook on Mapping Groundwater Vulnerability[A]. Cast any G, Groba E, Romijn E. International Contributions to Hydrogeology Founded[C]. 1968.

[2] 姜桂华. 关中盆地地下水脆弱性研究[D]. 西安: 长安大学, 2002.

[3] 郑秀慧, 张清, 罗敏. 熵权系数法在投资项目风险决策的应用[J]. 科技与管理, 2000(2): 73– 75.

[4] 付强. 农业水土资源系统分析与综合评价[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2005: 350– 352.

[5] 林运东, 门宝辉, 贾文善. 熵权系数法在水体营养类型评价中的应用[J]. 西北水资源与水工程, 2002, 13(3): 27– 28.

[6] Alley L, et al. DRASTIC. A Standardized System for Evaluating Groundwater Pollution Potential Using Hydrogeologic Settings [M]. U. S. Environmental Protection Agency, Ada, O K, EPA/600/2– 87– 036, 1987: 445.