

基于 WOE 法的下辽河平原地下水 硝酸盐氮特殊脆弱性研究*

孙才志, 王言鑫

(辽宁师范大学 城市与环境学院, 辽宁 大连 116029)

摘要:通过分析影响下辽河平原地区地下水特殊脆弱性的因子, 建立基于 GIS 平台的预测因子图层数据库, 利用 Arc-Wofe 系统进行证据权重法模拟预测, 对下辽河平原区地下水硝酸盐氮特殊脆弱性进行研究, 得到硝酸盐氮浓度后验概率分布图。从预测结果看, 后验概率高或较高的地区正是硝酸盐氮浓度已经比较高的地区或预测的硝酸盐氮浓度高值区; 并通过多种途径检验了研究结果的客观合理性。

关键词:地下水脆弱性; 证据权重法; 预测因子

中图分类号: X523

文献标识码: A

文章编号: 1005-3409(2009)04-0080-05

The Study on Intrinsic Vulnerability of Nitrate in Groundwater in the Lower Reach of Liaohe River Based on WOE Method

SUN Cai-zhi, WANG Yan-xin

(School of Urban and Environment, Liaoning Normal University, Dalian, Liaoning 116029, China)

Abstract: The prediction factor database was constructed by GIS flat according to the analysis of factors which influence the groundwater intrinsic vulnerability in the lower reach of Liaohe River, and then the weight of evidence method was applied to simulate the groundwater intrinsic vulnerability on the Arc-Wofe system, the posteriori probability distribution map of nitrate concentration was obtained. The prediction result showed that the region with high posteriori probability usually was corresponding to a high nitrate concentration, and several methods were applied to testify the rationality of result.

Key words: the intrinsic groundwater vulnerability; weight of evidence method; prediction factor

随着经济的快速发展和人口的不断增长, 地下水污染程度逐渐加重, 尤其是化肥的大量使用, 使得地下水中氮浓度不断增加。研究区下辽河平原作为辽宁省最大的冲积平原, 为省内最重要的商品粮基地, 农业污染较为严重, 使得地下水中硝酸盐氮浓度严重超标, 这对当地居民的身体健康产生了不利影响, 因此对下辽河平原区地下水脆弱性的研究有很重要的实际意义, 可以为该地区的地下水资源保护提供科学依据。

1 研究方法

WOE 法(Weights of evidence, 证据权重法)是加拿大数学地质学家 Agterberg 等^[1]提出的一种基于二值(存在或不存在)图象的地学统计方法, 是在

假设条件独立的前提下, 基于贝叶斯定理的一种定量预测方法。Agterberg^[1-2]、Harris^[3]、Soile Tis-sari^[4]、Ranjan^[5], 等都先后应用该方法预测矿产的远景分布。

Barber^[6-7]等首次将 WOE 方法用于区域地下水脆弱性的研究, Alberti 等^[8]用该方法对意大利北部一个地区进行地下水脆弱性评价。雷静^[9]于 2003 年在国内首次应用该模型进行唐山市平原区地下水脆弱性评价。上述研究均取得较好的研究成果, 因此应用该方法对下辽河地下水特殊脆弱性进行评价, 从而对该区地下水资源可持续开发利用提供参考。WOE 法的计算流程如下:

1.1 先验概率计算

假定对某一特定的研究区, 已有一系列的二值

* 收稿日期: 2009-02-16

基金项目: 国家自然科学基金(40501013); 辽宁省教育厅创新团队课题(2008T100)

作者简介: 孙才志(1970-), 男, 山东烟台人, 博士后, 教授, 博士生导师, 从事地下水资源评价与管理研究。E-mail: suncaizhi@sohu.com

图(如地下水埋深等), 将这些图作为预测因子, 对某一特定的响应因子(如硝酸盐浓度)作预测。研究区面积 $A(T)/\text{km}^2$, 将其分成单元格, 每个单元格的面积为 u/km^2 , 则研究区内单元格的总数为 $N(T) = A(T)/u$, 响应因子用 D 表示, 假设已知有 $N(D)$ 个单元格内有响应因子分布, 如果 u 足够小的话, 已知响应因子的点数将等于 $N(D)$, 即每个单元格内刚好有一个响应因子分布, 则在研究区内随机选取一个单元格, 其内响应因子出现的概率为 $P(D) = N(D)/N(T)$, 这也被称为先验概率, WOE 方法假定整个研究区内各单元格的先验概率都相等, 先验概率用几率 $O(D)$ 来表达, 即为

$$O(D) = \frac{P(D) / [1 - P(D)]}{N(D) / [N(T) - N(D)]} \quad (1)$$

1.2 权重计算

对任一预测因子二值专题, 权重定义为

$$W^+ = \ln\{P(B/D)/P(B/\bar{D})\}$$

$$W^- = \ln\{P(\bar{B}/D)/P(\bar{B}/\bar{D})\} \quad (2)$$

式中: W^+ , W^- ——预测因子存在区和不存在区的权重值, 对于原始数据缺失区, 权重值为 0。

1.3 后验概率计算

证据权重法要求各预测因子之间相对于响应因子分布满足条件独立。对 n 个预测因子, 若它们都关于响应因子条件独立, 几率对数为

$$\ln\{O[D/(B_1^{k_1} B_2^{k_2} \dots B_n^{k_n})]\} = \sum_{j=1}^n W_j^{k_j} + \ln O(D)$$

$$(j = 1, 2, 3, \dots, n) \quad (3)$$

后验概率为: $P(D/B) = O/(1 + O)$ 。最后, 根据研究区内每个网格单元后验概率值, 生成地下水特殊脆弱性后验概率分布图。

2 基于证据权重法的下辽河平原地下水硝酸盐氮特殊脆弱性评价

2.1 研究区范围及水文地质条件

研究区下辽河平原位于辽河中下游, 东靠千山山脉, 西临医巫闾山, 北至铁法丘陵, 南濒渤海, 面积约 2.44 万 km^2 (图 1)。本区含水岩组主要由第四系松散沉积物组成, 由于浅层地下水与外界环境联系密切, 加之资料限制, 本次研究所选择的目标含水层为研究区内的浅层地下水。

2.2 预测因子的选择

文章根据研究区的具体情况及其所获得数据的情况, 选取 6 个预测因子图层。各预测因子层简介如下:

(1) 施肥强度 (FI)。下辽河平原作为省内最重要的商品粮基地, 农业非常发达, 农业污染也较为严

重, 尤其是化肥的大量使用使得地下水中氮浓度不断增加, 施肥强度越大, 含水层中氮的浓度相应越大, 地下水脆弱性越高。因此, 将施肥强度作为评价地下水特殊脆弱性的一个评价因子, 并以地级市为单元, 利用 MapInfo 软件绘制出施肥强度 (kg/m^2) 空间分布图, 见附图 5。数据来源于《辽宁统计年鉴》, 为 1994–2004 年的平均值。从图中可以看出, 下辽河平原施肥强度东北部略低于西南部, 其中营口地区施肥强度最大。



图 1 研究区地理位置图

(2) 地下水平均开采量 (AD)。过量开采地下水造成研究区地下水位持续下降, 形成许多地下水位降落漏斗。地面污水渗入漏斗, 导致水质恶化。同时, 地下水全部疏干后, 必将引起地面沉降, 使房屋、桥梁等地面建筑物遭到破坏。因此, 将地下水开采量作为评价地下水特殊脆弱性的一个评价因子。地下水开采量越大, 地下水相对脆弱性越高。研究区地下水开采量分布图如附图 6 所示, 数据来源于《辽宁省地下水资源评价》, 为多年平均开采量, 即各市县的开发量除以面积值。由图可知, 沈阳市区及于洪区、东陵区、苏家屯、辽中县, 鞍山的台安县开采强度都较大, 营口市及盘锦市开采强度较小, 但营口地区地下水资源较为贫乏, 主要为咸水区, 盘锦地区第四系地下水多为咸水, 失去供水意义, 深层新近系裂隙、孔隙承压水为主要供水水源, 但本文没有计算承压水的开采量。

(3) 需水量与可供水量之比 (RDS)。需水量与供水之比可衡量水资源所受到的压力大小, 值越大, 表明水资源所受到的压力越大, 相应的地下水资源的压力越大, 地下水脆弱性越高。其值分布见附图 7。数据来源于《辽宁省水资源公报》, 为 1999 年–2005 年的平均值。

(4) 耕地面积与土地面积之比 (RPL)。大量研究表明: 土地覆被与土地利用变化引起的区域植被生态系统改变对区域水文循环过程有着极其显著的

影响, 本文选择耕地面积与土地面积之比来表征人类对土地的压力, 值越大, 相应地地下水脆弱性越高。分布情况见附图 8。数据来源于《辽宁城市统计年鉴》, 为 1994-2004 年的平均值。

(5) 人均水资源量 (AW)。这一数值越大表明人均占有地下水资源越大, 地区地下水资源越丰富, 从而表示地区地下水系统抵御外界因素干扰的能力越强, 地下水脆弱性越小。人均水资源量分布图如附图 9 所示。数据来源于《辽宁省水资源公报》, 为 1994-2004 年的平均值。

(6) 用水效率 (WUE)。用水效率在一定程度上反映了地区水资源综合利用程度的高低^[11], 用水效率高说明该地区能充分有效利用水资源, 从而减少了浪费行为的发生, 因此值越大, 相应的地下水脆弱性越低, 用水效率分布图见附图 10。

2.3 证据权重法 GIS 模拟

在 ArcView 平台上用加拿大 Laura Kemp 编写的证据权重法扩展模块 (Wofe Extension)。首先提取下辽河平原地区 30 个监测井作为计算权重因子的点 (响应因子) 主题 (Training Points), 将下辽河平原范围作为证据权重法预测中的研究区主题 (Study Area Grid Theme) (图 2)。

2.3.1 先验概率计算 在网格单元 10 km^2 条件下, 依据上述公式计算出前验概率为 0.0122。程序建议的网格单元面积为 20.4 km^2 , 程序建议的网格单元面积计算公式为: 建议网格单元面积值 = (全

部学习区面积/全部训练点数)/40; 程序建议的网格单元面积值是一个上限值, 实际计算时的网格单元面积应等于或小于该值。

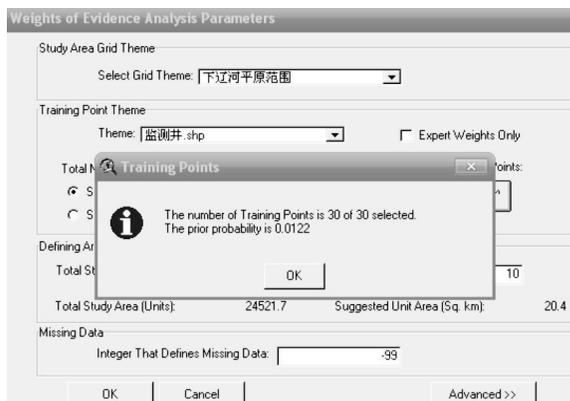


图 2 证据权重法参数设置界面

2.3.2 各预测因子层权重计算 各预测因子层权重数值大小主要根据已知监测井与预测因子之间的空间分布关系来确定。各预测因子的权重结果如表 1 (限于篇幅, 仅列出一个)。

2.3.3 条件独立性检验 在进行后验概率计算之前, 必须检验所选预测因子间相对于监测井分布的条件独立性。本次证据权重分析的条件独立检验结果如表 2 所示。表格中的数值表示预测因子关于监测井点的条件独立性检验概率值, 数值越小, 表示两相交专题间相对于井点分布的条件独立性越好。从表 2 可以看出, 6 个预测因子之间的相关性都很小, 均可以参与后验概率计算。

表 1 耕地面积与土地面积之比预测因子层权重

分类	$A / (\text{km}^2)$	Au	P	W^+	$S(W^+)$	W^-	$S(W^-)$	Contrast	$S(C)$	stud (C)
1	98.1143	9.8114	1	2.2152	1.0552	-0.0303	0.1868	2.2454	1.0716	2.0953
3	16078.7038	1607.8704	18	-0.0898	0.2370	0.1519	0.2907	-0.2418	0.3751	-0.6445
5	8344.8834	834.4883	11	0.0756	0.3035	-0.0413	0.2308	0.1168	0.3813	0.3064

注: A 表示证据因子中每类所占的面积 (km^2); Au 表示证据因子每类所占的面积, 以每个矿点的所占的单元面积为单位; P 表示证据因子每类中的矿化点数; $W^{(+)}$ 表示证据因子每类存在处的权重值, W^- 表示每类不存在处的权重值, $S(W^+)$ 、 $S(W^-)$ 分别表示 W^+ 和 W^- 的标准差; $S(C)$ 表示 $W^+ - W^-$ 的标准差; $S(C)$ 表示 studentized contrast, $S(C) = (W^+ - W^-) / S(C)$ 。

表 2 证据因子条件独立性检验结果

证据层	地下水平均开采量	人均水资源量	施肥强度	需水量与供水量之比	用水效率
耕地面积与土地面积之比	0.4038	0.0000	0.0000	0.1299	0.0000
地下水平均开采量		0.2566	0.0010	0.0100	0.0182
人均水资源量			0.5664	0.0000	0.0000
施肥强度				0.0001	0.2782
需水量与供水量之比					0.0291

2.3.4 生成响应因子后验概率分布图 完成上述过程后, 即可计算后验概率, 后验概率值的分位数分为 5 个等级, 每个等级的概率范围分别为低概率 0

~ 0.001、较低概率 0.001~ 0.008、相对中等概率 0.008~ 0.043、相对高概率 0.043~ 0.085 和高概率 0.085~ 0.990, 响应因子硝酸盐氮浓度的后验概率

等级分布图如附图 11 所示, 该图也即以硝酸盐氮为研究对象的地下水特殊脆弱性分布图。

3 结果分析

3.1 研究区地下水硝酸盐氮后验概率分布情况分析

由附图 11 可以得到下辽河平原地区地下水硝酸盐氮后验概率分布情况, 高概率区主要分布在抚顺市北部, 而相对较高概率区主要分布在鞍山, 沈阳、辽阳、阜新为中等概率分布区, 相对较低概率区主要分布在锦州市大部、沈阳北部小部分地区, 铁岭、沈阳中部、盘锦、及营口大部分地区为低概率区。

3.2 研究区地下水硝酸盐氮后验概率分布图与本质脆弱性分布图对比分析

将研究区地下水硝酸盐氮后验概率分布附图 11 与本质脆弱性分布附图 12 进行对比可知, 地下水本质脆弱性评价为高或较高脆弱性的地区, 其硝酸盐氮的后验概率不一定为高概率或较高概率, 但某些地区在地下水脆弱性本质评价中为较低或低脆弱性, 而其硝酸盐氮的后验概率也为低或较低概率, 如锦州东部地区、铁岭南部、沈阳中部。由此可知, 本质脆弱性评价结果可以在一定程度上反映特定污染物如硝酸盐氮的特殊脆弱性情况, 但特殊脆弱性主要与特定污染物的性质及其具体的污染活动, 如污染源情况有关, 不同污染物的特殊脆弱性因其特定性, 不能完全由本质脆弱性评价结果来推断, 只能在参考本质脆弱性评价结果的基础上, 针对不同污染物的具体情况进行特殊脆弱性的评价。因此在针对硝酸盐氮特殊脆弱性研究中, 选取施肥强度、地下水平均开采量、人均水资源量、耕地面积与土地面积之比、地下水平均开采量、需水量与供水量之比 6 个

预测因子。

3.3 研究区地下水硝酸盐氮后验概率分布图与监测井实测水质资料对比分析

将研究区 30 个监测井的实测硝酸盐氮浓度资料与附图 11 所示的后验概率分布图进行对比分析, 附图 13 以硝酸盐氮后验概率分布图为底图显示了各监测井实测硝酸盐氮浓度的分布情况, 以研究区内全部 30 个监测井为样本分别统计属于不同后验概率级的各硝酸盐氮浓度水平的监测井数目, 统计结果如表 3 所示。

从表 3 的统计结果可以看出: 30 个监测井中有 3 个硝酸盐氮浓度小于 2 mg/L, 其后验概均为中等, 10 个监测井的硝酸盐氮浓度大于 20 mg/L, 其中有 5 个监测井为高概率或较高概率(占 50%), 由此可知, 硝酸盐氮低浓度水平的监测井分布在各后验概率区, 其中分布在较低或低概率区的稍多, 硝酸盐浓度超标井(> 20 mg/L), 大都分布在中等及较高或高概率区, 各后验概率区内分布的监测井的硝酸盐氮浓度超标率各不相同, 其中以高概率区为最高, 达到 100%, 其次是较高概率区为 50%, 低概率区的超标率为 0。各后验概率区内硝酸盐氮浓度 > 30 mg/L 的监测井数占本概率区中所有监测井数的百分率也各不相同, 其中以较高概率区最高, 为 37.5%, 其次是较低概率区为 33.3%, 低概率区为 0, 由此可知, 监测井硝酸盐浓度的超标率和 > 30 mg/L 所占百分数的分布情况都与后验概率的分布情况基本一致, 后验概率较高的地区正是超标率和 > 30 mg/L 所占百分数大的地区, 因此, 硝酸盐氮后验概率分布图能较好地反映研究区内各地硝酸盐氮的浓度水平。

表 3 2005 年硝酸盐氮实测浓度水平与后验概率类别关系比较表

后验概率类别	< 2 mg/L	2~ 5 mg/L	5~ 20 mg/L	20~ 30 mg/L	> 30 mg/L	监测井数	> 20 mg/L 所占百分数	> 30 mg/L 所占百分数
低概率	0	0	0	0	0	0	0	0
相对较低概率	0	3	1	0	2	6	33.3	33.3
相对中等概率	3	4	5	1	2	15	20	13.3
相对较高概率	0	3	1	1	3	8	50	37.5
相对高概率	0	0	0	1	0	1	100	0
监测井数	3	10	7	3	7	30		

3.4 各预测因子权重分析

研究中各预测因子的分类数都大于 2, 各预测因子的分布图都是多值图而不是真正意义上的二值图, 不能简单地由各预测因子的一对正负权重差 $C = W^+ - W^-$ 来推断各因子对响应因子影响的相对大小, 但是由各预测因子正权重 W^+ 达最大值的属

性分类叠加而成的情况即是使得响应因子后验概率达最大值的情况, 也即对硝酸盐氮这种特定污染物来说地下水最脆弱的情况, 这种情况下各预测因子正权重的相互大小可以在一定程度上反映各预测因子对响应因子的影响大小, 由表 4 知各预测因子正权重的最大值, 响应因子后验概率达最大时耕地面

积与土地面积之比、人均水资源量、用水效率权重最大,它的“贡献”最大,其次是施肥强度,然后是需水量与供水量之比,贡献最小的是地下水平均开采量。

表 4 预测因子正权重最大值表

预测因子	<i>FI</i>	<i>AD</i>	<i>RDS</i>	<i>RPL</i>	<i>AW</i>	<i>WUE</i>
W^+ 最大值	1.0552	0.4343	0.8268	2.2152	2.2152	2.2152

4 结论

(1)文章以 ArcView GIS 软件为平台通过 ArcWofE 系统与证据权重法的结合,对下辽河平原区硝酸盐氮的特殊脆弱性进行了研究,将该结果与研究区各监测井实测硝酸盐氮浓度水平以及由 DRASTIC 评价模型得到的研究区地下水本质脆弱性分布图等进行比较分析,在一定程度上检验了该研究结果的客观合理性。

(2)同时,基于 ArcWofE 系统的证据权重法在进行后验概率计算过程中,可对大量多源信息进行优化综合处理,并将预测结果直接以可视化图形方式表示出来,提高了预测的工作效率和准确性;但是,应用过程中也发现该方法所依据的数学基础是贝叶斯条件概率,需要对大量事实的统计,所以,研究区的研究程度对该方法的应用效果具有一定的制约作用。同时,证据权模型假设各预测因子图层之间相互独立。根据经验,影响地下水脆弱性形成的各预测因子之间是有一定相关性的,所以应对各预测因子层间的相关性做相应技术处理。本文已考虑到这一点,所选择的各预测因子层经相关性检验,可以近似认为相互独立。

参考文献:

[1] Bonham-Carter G F, Agterberg F P, Wright D F. Weights of evidence modeling: A new approach to mapping mineral potential[M]. Geological Survey of Canada, 1989: 174-183.

[2] Agterberg F P, Bonham-Carter G F, Wright D F. Statistical pattern integration for mineral exploration [C]// Goal G, Merrim D F. Computer application in resources estimation prediction and assessment for metal and petroleum. Oxford: Pergamon Press, 1990.

[3] Harris J R, Wilkinson L, Heather K, et al. Application of GIS processing techniques for producing mineral prospectivity maps: a case study: Mesothermal Au in the Swayze Greenstone Belt, Ontario, Canada[J]. Natural Resources Research, 2001, 10(2): 94-124.

[4] Soile T, Vesa N, Jouni L, et al. Classification of Soil Groups Using Weights-of-Evidence Method and RB-FLN-Neural Nets[J]. Natural Resources Research, 2007, 16(2): 159-169.

[5] Ranjan K D, Shuichi H, Atsuko N M Y, et al. GIS-based weights-of-evidence modelling of rainfall-induced landslides in small catchments for landslide susceptibility mapping[J]. Environ Geol, 2008, 54(2): 311-324.

[6] Bates L E, Barber C, Otto C J. Aquifer vulnerability mapping using GIS and Bayesian Weights of Evidence: Review of application[M]. Hydro GIS 96, 1996: 7-14.

[7] Barber C, Bates L E, Barron R, et al. Comparison of standardized and region-specific methods for assessment of the vulnerability of groundwater to pollution: a case study in an agricultural catchment[M]// Shallow Groundwater System, Volume 18, International Contribution to Hydrogeology. Hannover: Verlag Heinz Heise, 1996.

[8] Alberti L, De Amicis M, Masetti M, et al. Bayes rule and GIS for evaluating sensitivity of groundwater to contamination[M]// IAGG Annual Conference, 2001.

[9] 雷静. 地下水环境脆弱性研究[D]. 北京: 清华大学, 2002.

[10] 孙才志, 李红新. 辽宁省水资源利用相对效率的时空分异[J]. 资源科学, 2008, 30(10): 1442-1448.