

海南省平原区浅层地下水脆弱性评价

王秀杰, 封桂敏, 王丽娜

(天津大学 建筑工程学院, 天津 300072)

摘要: 随着海南省区域经济的快速发展, 地下水面临的生态环境问题越来越多。在综合分析海南省平原区浅层地下水特征和现有资料的基础上, 应用 DRASTIC 评价方法, 选取地下水埋深、净补给量、含水层厚度、地下水开采强度、地形坡度和含水层的水力传导系数等指标作为评价参数, 通过层次分析法确定评价参数的权重体系, 对海南省平原区浅层地下水进行了脆弱性评价, 并绘制了脆弱性分区图。评价结果表明: 海南省三亚市浅层地下水脆弱性最小, 属于非防护区; 特别敏感区主要分布在东方市的感城、乐东县平原区以及万宁市的部分区域。

关键词: 地下水; 脆弱性评价; DRASTIC 评价方法; 层次分析法; GIS

中图分类号: X523 **文献标志码:** A **文章编号:** 1672-1683(2015)03-0548-05

Groundwater vulnerability assessment in plain area of Hainan Province

WANG Xiu jie, FENG Gui min, WANG Li na

(School of Civil Engineering, Tianjin University, Tianjin 300072, China)

Abstract: With the rapid development of regional economy in Hainan province, ecological environment problems in groundwater become more and more serious. In this paper, based on the comprehensive analysis of the hydrogeological conditions and currently available data in Hainan province, DRASTIC evaluation method is used to perform vulnerability assessment of shallow groundwater in the plain area of Hainan Province. Depth to groundwater, net recharge, aquifer thickness, groundwater exploration intensity, topography, and hydraulic conductivity are the evaluation parameters. Analytic hierarchy process (AHP) is applied to determine the weight system of evaluation parameters. GIS is used to plot the distribution of groundwater vulnerability. The results show that the vulnerability of shallow groundwater in Sanya is the lowest whereas the particularly sensitive area of groundwater is mainly located in Gancheng of Dongfang city, plains area in Ledong County, and Wanning city.

Key words: groundwater; vulnerability assessment; DRASTIC evaluation method; AHP; GIS

地下水污染脆弱性评价是合理开发、利用和保护地下水资源的重要基础性工作, 是制定地下水污染防治措施的重要依据^[1-2]。目前, 国内外的地下水脆弱性评价方法, 主要有迭置指数法、过程数学模拟法、统计方法和模糊数学方法等^[3]。DRASTIC 评价模型是迭置指数法的典型代表, 被多个国家广泛采用, 例如美国、加拿大、南非及欧共体应用 DRASTIC 评价模型进行地下水脆弱性研究^[4]; 以色列 Martin Collin 等^[5]人对地下水污染风险评价进行理论研究和实践探讨, 并将评价成果应用于水源保护和土地利用规划之中; 张保祥等^[6]人针对泰国清迈盆地的特点和区域特色, 利用 DRASTIC 方法对该地区的地下水脆弱性进行了定量评价, 并绘制了地下水脆弱性分区图。在国内, 杨庆等^[7]学者将 DRASTIC 方法应用于大连市地下水易污性评价中, 并结合 GIS 绘

制了易污性指标图; 董亮等^[8]人根据脆弱性评价成果提出了流域内的优先污染控制区, 为西湖流域以后的开发和规划提供了较有价值的参考信息; 姚文锋等^[9]应用 DRASTIC 方法对海河流域平原区地下水进行脆弱性评价, 并根据实测硝态氮浓度对评价结果进行了检验。

本文应用 DRASTIC 评价方法, 结合层次分析法, 对海南省平原区浅层地下水进行脆弱性评价, 以便为海南省地下水资源合理开发、利用和保护提供有价值的参考数据。

1 DRASTIC 评价方法简介

DRASTIC 评价模型主要包括以下内容: (1) 地下水脆弱性评价参数体系, 包括地下水埋深(D), 净补给量(R), 含水层介质(A), 土壤介质(S), 地形坡度(T), 包气带介质影响

收稿日期: 2014-08-03 修回日期: 2014-10-03 网络出版时间: 2015-05-14

网络出版地址: <http://www.cnki.net/kcms/detail/13.1334.TV.20150514.0847.008.html>

作者简介: 王秀杰(1973-)女, 辽宁葫芦岛人, 主要从事水文系统预测与水库调度方面的研究。E-mail: wangxj_m@sina.com.

通讯作者: 封桂敏(1989-)女, 吉林榆树人, 主要从事水库调度及防洪减灾方面的研究。E-mail: tjufgm@163.com.

(1), 含水层的水力传导系数(C); (2) 地下水脆弱性评分体系, 由评价参数变化范围的评分构成; (3) 地下水脆弱性权重体系, 按照各个参数对地下水污染影响程度确定; (4) 地下水脆弱性指数, 为各个参数评分的加权, 由式(1)确定。

$$DRASTIC = 5D + 4R + 3A + 2S + 1T + 5I + 3C \quad (1)$$

脆弱性指标较高的区域, 地下水易于被污染, 但 DRASTIC 指标的评价结果具有相对性。根据脆弱性指数将研究区域划分成脆弱性不同的区域。

尽管 DRASTIC 方法在世界各地被广泛应用, 但仍然存在许多局限性^[10], 如各个评价参数的权重一成不变, 但不同地方水文地质条件不同, 会存在参数对地下水的影响程度与实际不符的情况; 另外, 有些资料较难收集, 特别是包气带介质的相关资料。

2 研究区域概况

海南省属于热带海洋气候, 全年暖热, 雨量充沛, 干湿季节明显。地形地貌主要是由山地、丘陵、台地、阶地和平原等地貌类型构成的三大环带, 由里向外依次分布于全岛。本文的研究区为平原区, 主要由风化壳黏结砂质壤土、山前冲洪积半松散亚砂土、滨海砂堤阶地松散砂层及现代港湾、深湖淤泥、早更新世杂色黏质土等组成。平原区浅层地下水主要赋存于第四系松散岩类孔隙含水层, 分布于沿海地区的滨海堆积区、河流冲积区、冲洪积区和山前古洪积区, 面积 6 316 3 km²。具体水文地质特征如下。

(1) 环岛滨海平原堆积层包括砂堤沙地和海成阶地, 富水性差异大。砂堤沙地含水层厚度一般 5~ 15 m, 岩性主要为含贝壳中细砂、含砾亚砂土、中粗砂、砂砾石, 水位埋深小于 2 m, 富水性好, 单位涌水量一般 200~ 1 000 m³/(d·m)。海成阶地含水层厚度 2.5~ 12 m, 单位涌水量一般 50~ 150 m³/(d·m), 山前地区富水性差, 一般 10~ 20 m³/(d·m)。

(2) 河流冲洪积区分布于河流两侧, 含水层岩性主要为含砾亚砂土、含砾中粗砂、中粗砂、砂砾石。从上游到下游, 从阶地外缘到内缘, 含水层厚度增加, 分选性变好, 富水性变好。民井单位涌水量一般 30~ 100 m³/(d·m), 局部地段 > 200 m³/(d·m)。

(3) 山前古洪积层零星分布于山前, 含水层岩性主要为亚砂土, 局部为砾砂, 颗粒分选性差, 含水层薄(一般 3~ 5 m), 富水性差, 单位涌水量一般 < 20 m³/(d·m)。

大气降雨是潜水主要补给来源, 因地层岩性松散, 透水性良好, 入渗系数一般 0.3~ 0.6, 部分地区灌溉水亦为重要补给来源。

据浅层地下水的分布区域及水文地质特征的差异性, 将海南省平原区浅层地下水分为 14 个水文地质单元, 见表 1。

3 地下水脆弱性评价

3.1 评价单元划分

以浅层地下水二级水文地质单元分布为基础, 与行政区划范围叠加, 将研究区划分为 35 个评价单元, 见图 1。

3.2 评价参数及评分体系

科学合理的评价因子体系, 可以在最大程度上反映这些因子对污染物的影响, 影响评价结果的准确性。DRASTIC 中

表 1 海南省水文地质单元分区

Tab. 1 Hydrogeological units in Hainan Province

序号	二级水文地质单元
1	松散岩类孔隙潜水排浦-光村水文地质亚区(Ñ 1)
2	松散岩类孔隙潜水临城水文地质亚区(Ñ 2)
3	松散岩类孔隙潜水加来-定安水文地质亚区(Ñ 3)
4	松散岩类孔隙潜水花场水文地质亚区(Ñ 4)
5	松散岩类孔隙潜水新海-演丰水文地质亚区(Ñ 5)
6	松散岩类孔隙潜水文昌海积平原水文地质亚区(Ñ 6)
7	松散岩类孔隙潜水琼海水文地质亚区(Ñ 7)
8	松散岩类孔隙潜水万宁水文地质亚区(Ñ 8)
9	松散岩类孔隙潜水陵水-滕桥水文地质亚区(Ñ 9)
10	松散岩类孔隙潜水三亚滨海平原水文地质亚区(Ñ 10)
11	松散岩类孔隙潜水崖城水文地质亚区(Ñ 11)
12	松散岩类孔隙潜水莺歌海水文地质亚区(Ñ 12)
13	松散岩类孔隙潜水感城-八所水文地质亚区(Ñ 13)
14	松散岩类孔隙潜水昌化-海尾水文地质亚区(Ñ 14)



图 1 研究区域的评价单元

Fig. 1 Evaluation units in the study area

采用 7 个参数对地下水脆弱性进行评价, 考虑到包气带和土壤资料较难收集, 本文根据海南省平原区的水文地质特征及现有资料, 确定评价参数, 并分析各个参数对地下水脆弱性的影响。

(1) 地下水埋深。地下水埋深与包气带的厚度两个参数对脆弱性的影响基本一致, 决定着污染物到达含水层之前的深度以及与周围介质接触的时间, 通常地下水的埋深越深, 污染物到达含水层所需时间越长, 则污染物稀释的机会就越多, 脆弱性也越低。

(2) 水力传导系数和含水层厚度。污染物进入含水层后, 影响其扩散速度的主要因素为含水层的水力传导系数、含水介质及含水层的厚度等^[7]。DRASTIC 评价体系中, 将含水层介质和含水层水力传导系数同时作为评价参数, 但含水层岩性和含水层水力传导系数有很大的相关性。水力传导系数反映含水层介质的渗透性, 受含水层介质的影响。一般含水层中的颗粒尺寸越大, 粒间孔隙越大, 连通性越好, 水力传导系数越大, 污染物在含水层内的迁移速度越快, 污染物的衰减能力越低, 地下水脆弱性就越高。含水层厚度反映地下水储水量的多少, 进而表征地下水稀释能力的强弱。含水层越薄, 地下水稀释能力越弱, 地下水脆弱性越高。考虑到各个评价参数的独立性, 以影响污染物扩散的水力传导系

数和含水层厚度作为本研究区域的评价参数。

(3) 地下水开采强度。地下水环境与和人类活动的强弱是息息相关的。在研究区域,地下水的人类活动影响集中反映为地下水开采,地下水开采强度越大,污染物更容易随开采过程污染地下水,同时含水层中污染物因水含量的减少其浓度相应越大,地下水脆弱性相应越高。

(4) 净补给量。净补给量反映了污染物运移的动力,补给的地表水是污染物的携带媒介,污染物随着地表水体的入渗逐渐进入地下含水层,形成污染。地下水脆弱性随着地下水补给量的增加而呈现增长的趋势。

(5) 地形坡度。地形坡度与降雨的径流转化程度有关,地形坡度越大,形成地表径流的可能性较大,与斜坡相关的污染潜势相对较低。

因此在本次评价中,选定了地下水埋深、水力传导系数、含水层厚度、地下水开采强度、净补给量、地形坡度 6 个参

数。该评价参数与 DRASTIC 方法评价参数的联系与区别见表 2,评价参数的评分体系见表 3。

表 2 海南省平原区浅层地下水脆弱性评价参数与 DRASTIC 评价参数的联系与区别

Tab. 2 The relationship and difference of parameters between vulnerability assessment and DRASTIC assessment of shallow groundwater in Hainan Province

DRASTIC	本次评价参数	说明
包气带介质	地下水埋深	反映包气带的影响
地下水埋深	地下水埋深	
含水层介质	含水层厚度	反映含水层的影响
含水层水力传导系数	含水层水力传导系数	
土壤介质	地下水开采强度	反映污染物运移的动力和载体
净补给量	净补给量	
地形坡度	地形坡度	

表 3 海南省平原区浅层地下水脆弱性评价评分体系

Tab. 3 Scoring system of vulnerability assessment of shallow groundwater in Hainan Province

地下水埋深		净补给量		含水层厚度		开采强度		地形坡度		水力传导系数	
范围/m	分值	范围/mm	分值	范围/m	分值	范围 /(10 ⁴ m ³ ·km ⁻²)	分值	范围(%)	分值	范围 /(m·d ⁻¹)	分值
0~ 1.5	10	0~ 50	1	< 2	10	0~ 0.5	2	< 2	10	< 4.1	1
1.5~ 4.6	9	50~ 100	3	2~ 6	9	0.5~ 1	3	2~ 6	9	4.1~ 12.2	2
4.6~ 9.3	7	100~ 175	6	6~ 9	7	1~ 2	4	6~ 12	5	12.2~ 28.5	4
9.3~ 15	5	175~ 250	8	9~ 12	5	2~ 4	5	12~ 18	3	28.5~ 40.7	6
15~ 23	3	> 250	9	12~ 16	3	4~ 6	7	> 18	1	40.7~ 81.5	8
23~ 30	2			16~ 20	2	6~ 8	9			> 81.5	10
> 30	1			> 20	1	> 8	10				

3.3 权重体系

根据每个指标对地下水脆弱性影响的相对重要程度给予一个固定的权重构成权重体系。DRASTIC 法各评价参数类别划分不尽合理、各参数权重一成不变也具有局限性,考虑海南省平原区的实际情况,同时也为了在某种程度上克服人为因素对地下水脆弱性评价结果的影响,本文利用层次分析法确定各项指标的权重。

3.3.1 构造判断矩阵

针对选取的 6 个浅层地下水脆弱性评价参数,通过两两对比分析,构建出比较判断矩阵。判断矩阵中各元素表示评价因素 P_i 对 P_j 为相对重要性标度^[14]。

$$P_{ij} = \begin{bmatrix} P_{11} & \dots & P_{16} \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ P_{61} & \dots & P_{66} \end{bmatrix} \quad (2)$$

通过判断矩阵计算出最大特征值对应的特征向量,考虑到数据的可操作性,按照统一的倍数将特征向量进行放大,即得到各个参数的权重系数(表 4)。

3.3.2 一致性检验

为避免其他因素对判断矩阵的干扰,在实际中要求判断矩阵满足大体上的一致性,需进行一致性检验。只有通过检验,才能说明判断矩阵在逻辑上是合理的,才能继续对结果进行分析。用公式(3)计算。

$$CR = CI / RI \quad (3)$$

式中: CR (Consistency ratio)为一致性比例。当 $CR < 0.10$ 时,认为判断矩阵的一致性是可以接受的,否则应对判断矩阵作适当修正。 CI (Consistency index)为一致性指标,按下式计算

$$CI = (K_{max} - n) / (n - 1) \quad (4)$$

式中: K_{max} 为判断矩阵的最大特征根; n 为成对比较因子的个数; RI (random index)为随机一致性指标。低阶矩阵时, $n=6, RI=1.24$,判断矩阵通过一致性检验。

表 4 海南省平原区浅层地下水脆弱性评价参数的权重体系

Tab. 4 Weight system of vulnerability assessment of shallow groundwater in Hainan Province

评价因子	权重
地下水埋深	6
含水层净补给量	4
含水层厚度	3
地下水开采强度	3
地形坡度	1
水力传导系数	2

3.4 评价结果

根据所选的参数及评分体系,分别确定各个因子在各个评价单元上的评分。应用 GIS 软件的地理分析系统对 6 个参数对应的评分按各个参数的相对权重值进行的叠加分析,得到各单元的地下水脆弱性分区图。各因子单独评价结果见图 2- 图 7,脆弱性指数结果见图 8。

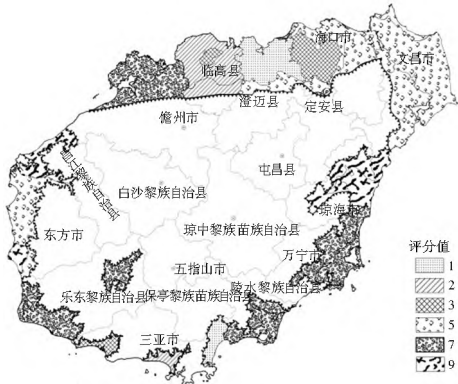


图2 地下水埋深参数评分图

Fig.2 Rating map of depth to groundwater



图6 地形坡度参数评分图

Fig.6 Rating map of topography



图3 净补给量参数评分图

Fig.3 Rating map of net Recharge

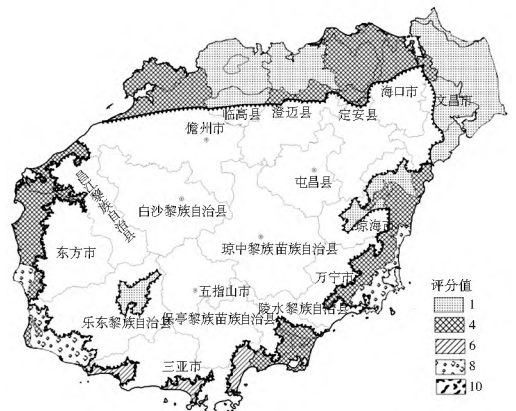


图7 水力传导系数参数评分图

Fig.7 Rating map of hydraulic conductivity

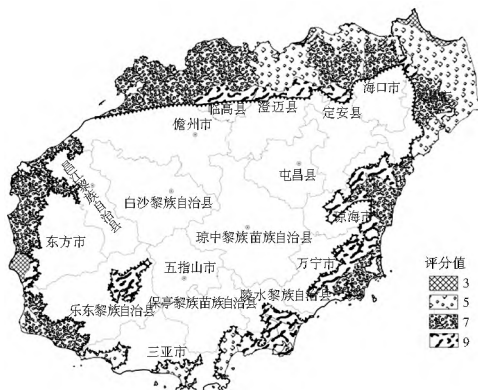


图4 含水层厚度参数评分图

Fig.4 Rating map of aquifer thickness



图5 实际开采量参数评分图

Fig.5 Rating map of actual groundwater exploration amount

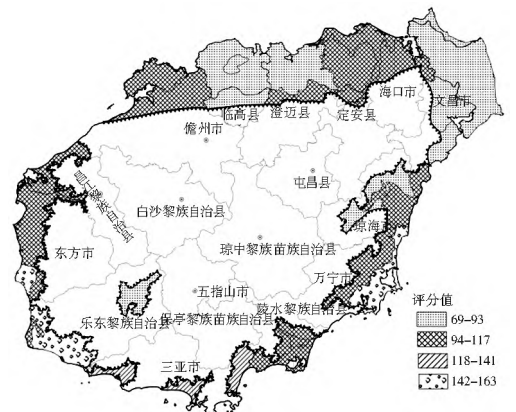


图8 脆弱性指数分布图

Fig.8 Distribution map of vulnerability index

根据评价结果,地下水脆弱性指数最大值为 163,最小值为 69。将研究区的地下水脆弱性按各单元脆弱性指数的大小分为 4 个等级:

- 第一级: 69~ 93, 非保护区;
- 第二级: 94~ 117, 地下水污染一般防护区;
- 第三级: 118~ 141, 地下水污染敏感区;
- 第四级: 142~ 163, 地下水污染特别敏感区。

从评价图 8 可以看出,特别敏感区的地区主要分布在东方感城、乐东平原区以及万宁。据调查,受污染的主要原因是人畜生活垃圾及化肥污染而导致水中的“三氮”含量超标

或者矿化度 > 2 g/L, 如乐东县佛罗井、冲坡井等检出多项参数超生活饮用水卫生标准, 影响参数主要为硝酸盐氮、亚硝酸盐氮、氨氮、pH 值。同时, 乐东地区地下水补给量较少, 可开采的资源量较少, 但 2010 年的实际开采量较大, 对地下水脆弱性具有较大的影响, 脆弱性较大。万宁地区的地下水开采程度较大, 加上地下水埋深较浅, 很容易受到污染。

地下水污染敏感区主要分布在海口市、东方市、陵水县、琼海县等地区。海口市、东方市为经济发展水平较高的区域, 水资源需求量较大, 地下水开采量大。海口地区, 由于地下水资源开采量大, 地下水水位下降, 并形成大面积的漏斗区, 造成部分地区地下水受海水入侵影响, 地下水的脆弱性较大。

而三亚地区地下水埋深较大, 含水层较厚, 污染物到达含水层所需时间较长, 且地下水储水量较多, 则污染物稀释的机会较多; 同时三亚市作为国际旅游城市, 以生态节水型社会为目标, 注重生态环境质量, 开展了许多水资源规划和保护工作, 地下水的脆弱性较低。

根据以上分析, 表明地下水脆弱性评价的结果与实际情况较相符。

4 结论

(1) 通过对各个评价参数对地下水脆弱性影响分析, 选取评价参数, 解决了资料对参数选取的限制。应用层次分析法, 确定权重体系, 避免了 DRASTIC 方法权重对不同地区一成不变的局限。

(2) 脆弱性指数分布图直观显示了不同地区地下水的易受污染程度, 是一种简单、实用的表达方式。通过分布图可以看出, 海南省平原区特别敏感区的地区主要分布在东方市的感城、乐东县平原区以及万宁市, 非防护区主要分布在三亚市。评价结果可为各个地区的区域综合土地利用规划和地下水资源保护规划提供参考。

利用设置指数法进行地下水脆弱性评价过程中, 在评价参数的选取、单项参数评分以及权重体系的构建等方面, 存在人为主观因素, 对评价结果的客观性造成影响。如何真正克服人为因素的影响, 将是地下水脆弱性评价中的一个重要内容。

参考文献(References):

- [1] 田华. 基于过程的地下水污染风险评价以滦河三角洲为例[D]. 西安: 西安科技大学, 2011. (TIAN Hua. Risk assessment of groundwater pollution based on process A case study in Luanhe Delta[D]. Xi'an: Xi'an University of Science and Technology, 2011. (in Chinese))
- [2] 孙才志, 左海军, 栾天新. 下辽河平原地下水脆弱性研究[J]. 吉林大学学报: 地球科学版, 2007, 37(5): 943-948. (SUN Cai zhi, ZUO Hai jun, LUAN Tian xin. Research on groundwater vulnerability assessment of the lower Liaohe river plain[J]. Journal of Jilin University(Earth Science Edition) 2007, 37(5): 943-948. (in Chinese))
- [3] 张泰丽. 浙江省丽水市地下水脆弱性研究[D]. 北京: 中国地质科学院, 2006. (ZHANG Tai li. Study on groundwater vulnerability in Lishui city of Zhejiang province[D]. Beijing: Chinese Academy of Geological Sciences, 2006. (in Chinese))
- [4] Aller I, Bennet T, Lehr JH, Petty R J. DRASTIC: A standardized system for evaluating groundwater pollution potential using hydrogeologic settings[R]. U. S. EPA Report, 1987
- [5] Collin M L, Melloul A J. Combined Land use and Environmental Factors for Sustainable Groundwater Management[J]. Urban Water, 2001 3: 229-237.
- [6] 张保祥, 万力, JADE Julawong. DRASTIC 地下水脆弱性评价方法及其应用—以泰国清迈盆地为例[J]. 水资源保护, 2007, 23(2): 38-41. (ZHANG Bao xiang, WAN Li, JADE Julawong. Groundwater vulnerability assessment with DRASTIC method and its application in Chiangmai Basin in Thailand[J]. Water resources protection, 2007, 23(2): 38-41. (in Chinese))
- [7] 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]. 理工大学学报, 1999, 39(5): 684-688. (YANG Qing, LUAN Mao tian, CHONG Jin zhu, et al. Study of application of DRASTIC index to assessment of groundwater vulnerability to pollution of Dalian city[J]. Journal of Dalian University of Technology, 1999, 39(5): 684-688. (in Chinese))
- [8] 董亮, 朱荫湄, 胡勤海, 等. 应用 DRASTIC 模型评价西湖流域地下水污染风险[J]. 应用生态学报, 2002, 13(2): 217-210. (DONG Liang, ZHU Yin mei, HU Qin hai, et al. Evaluating groundwater vulnerability in West Lake Watershed by using DRASTIC model[J]. Chinese journal of applied ecology, 2002, 13(2): 217-210. (in Chinese))
- [9] 姚文峰, 张思聪, 唐莉华, 等. 海河流域平原区地下水脆弱性评价[J]. 水力发电学报, 2009, 28(1): 113-118. (YAO Wen feng, ZHANG Si cong, TANG Li hua, et al. Groundwater vulnerability assessment in plain area of Haihe basin Journal of hydroelectric engineering [J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2009, 28(1): 113-118. (in Chinese))
- [10] 范琦, 王贵玲, 蔺文静, 等. 地下水脆弱性评价方法的探讨及实例[J]. 水利学报, 2007, 38(5): 601-605. (FAN Qi, WANG Gui ling, LIN Wen jing, et al. New method for evaluating the vulnerability of groundwater[J]. Journal of Hydraulic Engineering. 2007, 38(5): 601-605. (in Chinese))
- [11] 陈南祥, 董贵明, 贺新春. 基于 AHP 的地下水环境脆弱性模糊综合评价[J]. 华北水利水电学院学报, 2005, 26(3): 63-66. (CHENG Nan xiang, DONG Gui ming, HE Xin chun. Fuzzy comprehensive evaluation of groundwater environmental vulnerability based on AHP [J]. Journal of north institute of water conservancy and hydroelectric power. 2005, 26(3): 63-66. (in Chinese))