

DOI:10.3880/j.issn.1004-6933.2015.03.006

基于层次分析法与物元分析法的水安全评价

刘传旺,吴建平,任胜伟,张 旭

(郑州大学水利与环境学院,河南 郑州 450001)

摘要:提出了采用层次分析法与物元分析法相结合评价水安全的思路。基于 PSR 模型,选取 12 个反映水安全的指标,采用层次分析法确定了权重系数,建立了类型识别的物元评判模型。以新郑市为例,采用层次分析法和物元分析法,先分析 2006 年新郑市各指标的水安全等级水平,再对 2006—2011 年新郑市的水安全进行综合评价。结果表明,新郑市 2008 年、2010 年的水安全水平属于安全等级,2006 年、2007 年、2009 年、2011 年的水安全水平为Ⅳ级,属于不安全等级,但具有向其他等级转化的可能性。针对评价结果提出相应的对策。

关键词:水安全评价;PSR 模型;层次分析法;物元分析法;权重

中图分类号:X24 文献标志码:A 文章编号:1004-6933(2015)03-0027-06

Water safety assessment based on analytic hierarchy process and matter element analysis method

LIU Chuanwang, WU Jianping, REN Shengwei, ZHANG Xu

(School of Water Conservancy & Environment, Zhengzhou University, Zhengzhou 450001, China)

Abstract: The author of this paper put forward an idea of water safety assessment by adopting the analytic hierarchy process (AHP) and the matter element analysis method. Based on PSR model, selecting 12 indices that reflect water safety, and determining the weight coefficient by using AHP, a matter element evaluation model of type identification was established. Taking Xinzheng City as an example, the author firstly analyzed the water safety level of each index in 2006, and then comprehensively evaluated the water safety level from 2006 to 2011. The results show that the water safety level of Xinzheng City in the years of 2008 and 2010 belongs to the safety grade, while in the years of 2006, 2007, 2009 and 2011 belongs to the unsafe grade with the Ⅳ level of water safety. However, there are some possibilities for the water safety level transforming to other grades. Based on that, some corresponding measures were put forward.

Key words: water safety assessment; PSR model; analytic hierarchy process; matter element analysis method; weight

随着城市化的不断提高,城市规模和人口数量逐渐扩大,水资源短缺、水污染、洪涝灾害、水土流失等问题已经对水安全和生态安全构成了严重的威胁。评估区域水安全,并提出有效的保障措施,以实现水资源可持续利用和经济可持续发展,受到了各

国的重视。笔者采用 PSR (pressure state response) 模型,选取了 12 个指标建立了多层次的水安全评价体系,并应用层次分析法计算各个影响因素的权重,利用物元评判模型对新郑市水安全水平进行评价,并针对评价结果提出了相应的对策。

基金项目:南水北调河南受水区饮用水安全保障技术研究示范项目(2012ZX07404-004)
作者简介:刘传旺(1987—),男,硕士研究生,研究方向给水排水系统及优化。E-mail:chuanwang22@163.com
通信作者:吴建平,副教授。E-mail:jpwu@zzu.edu.cn

1 指标体系的确定

1.1 建立原则

为保证指标体系能公平、客观、正确地反映水安全,建立指标体系选取原则:科学性原则、全局性原则、可比性原则、定量与定性相结合原则、可操作性原则^[1]。

1.2 PSR 模型

PSR 模型,即压力-状态-响应模型,起初被用来评估资源的利用和持续发展情况,后来被广泛地应用于区域环境可持续发展指标体系和水资源、土地资源指标体系研究。20 世纪 90 年代初,经济合作与发展组织 OECD(organization for economic co-operation and development)在进行环境指标研究时对 PSR 模型进行了适用性和有效性评价。目前许多政府和组织都认为 PSR 模型仍然是用于环境指标组织和环境现状汇报最有效的模型。

1.3 指标体系

水安全评价指标体系由 3 个层次、3 个子系统组成。3 个层次分别为目标层、准则层和指标层(表 1);3 个子系统分别为压力系统、状态系统、响应系统^[2-3]。

1.4 确定权重

层次分析法是确定权重中常用的方法,通过专家咨询,根据专家经验为各个指标打分,代入数学模型,给出各个指标的权重。层次分析法的具体步骤如下:①建立指标体系,将指标按隶属关系进行分类,建立目标层、准则层和指标层的层次结构体系;②构造判断矩阵,根据专家意见确定重要程度,进行两两对比,建立矩阵模型;③层次单排序,进行一致性检验,计算矩阵的最大特征根值及相应的特征向量,并判断是否进行一致性检验;④层次总排序,进行一致性检验。最后确定各指标的权重,见表 2(括号中数据表示权重)。

表 1 基于 PSR 的水安全指标体系

目标层	准则层	指标层	指标含义	指标描述
城市水安全状况	压力指标	人口密度(P_1)	人口总数/城区面积	反映人口压力的大小
		人均 GDP(P_2)	全市 GDP/人口总数	反映经济增长情况
		生态环境用水百分率(P_3)	(生态用水量/用水总量)×100%	反映生态用水需求度及重视度
		人均水资源占有量(P_4)	水资源总量/人口总数	反映该地区缺水程度
	状态指标	居民生活用水定额(S_1)	用水总量/(人口总数×用水天数)	反映居民用水的情况
		城市年降雨量(S_2)	1 年的平均降雨水平	反映该地区降水的基本状况
		人均公共绿地面积(S_3)	公园绿地面积/城市人口数量	反映城市整体环境水平和居民生活质量
		万元产值用水量(S_4)	国民总产值/总用水量	反映经济发展与用水量的关系
	响应指标	用水普及率(R_1)	(用水人口/人口总数)×100%	反映城市水普及水平
		工业用水重复利用率(R_2)	(重复利用水量/总用水量)×100%	反映工业水平利用水的高低
		工业废水治理总投资占 GDP 的百分率(R_3)	(工业废水治理总投资/全市 GDP)×100%	反映政府对水质质量关注的程度
		城市污水处理率(R_4)	(污水处理量/污水总量)×100%	反映该地区污水处理能力

表 2 AHP 法确定的水安全评价的指标权重

准则层	指标层	准则层	指标层	准则层	指标层
$P(0.22)$	$P_1(0.12)$	$S(0.45)$	$S_1(0.42)$	$R(0.33)$	$R_1(0.35)$
	$P_2(0.30)$		$S_2(0.08)$		$R_2(0.26)$
	$P_3(0.07)$		$S_3(0.25)$		$R_3(0.13)$
	$P_4(0.51)$		$S_4(0.25)$		$R_4(0.26)$

2 水安全的物元分析法

2.1 物元分析的基本概念

相比模糊数学评价、灰色系统评价等方法,物元分析方法具有简洁明了、计算量小的特点,能系统研究评价对象,通过建立简单的模型实现质和量的转化,处理不相容系统中的问题,并得出明确的安全等级。根据物元的基本理论^[4-7],物元矩阵 J 由 n 个特征 $Q_1, Q_2, \dots, Q_n$ 及对应的特征值组 $X_1, X_2, \dots, X_n$ 组成, n 维物元矩阵可以表示为

$$J = \begin{bmatrix} & Q_1 & X_1 \\ M & Q_2 & X_2 \\ & \vdots & \vdots \\ & Q_n & X_n \end{bmatrix} \tag{1}$$

式中: J 为 n 维城市水安全水平物元; M 为水安全水平状况,简记 $J=(M, Q, X)$ 。

2.2 节域物元矩阵和经典域物元矩阵

将水安全水平状况 M 分为 4 个等级 M_1, M_2, M_3, M_4 ,每个等级中各个指标 Q_n 对应不同的量值范围,特征 Q_n 的量值范围为 $X_{pj}=[A_{pj}, B_{pj}]$ ($p=1, 2, 3, 4$),则城市水安全水平的经典域的物元矩阵 J_p 可表示为

$$J_p = \begin{bmatrix} & Q_1 & [A_{p1}, B_{p1}] \\ M_p & Q_2 & [A_{p2}, B_{p2}] \\ & \vdots & \vdots \\ & Q_n & [A_{pn}, B_{pn}] \end{bmatrix} \tag{2}$$

式中, J_p 为所划分的城市水安全水平的第 p 个评价等级。

若将 M_0 看成水安全水平状况 M 的标准对象,由各个等级的 M_p 构成,则将 J_0 称为水安全水平的

节域物元,其量值范围 $X_{0j}=[A_{0j},B_{0j}]$,是扩大的量值范围。水安全水平的节域物元矩阵可表示为

$$J_0 = \begin{bmatrix} Q_1 & [A_{01},B_{01}] \\ Q_2 & [A_{02},B_{02}] \\ \vdots & \vdots \\ Q_n & [A_{0n},B_{0n}] \end{bmatrix} \quad (3)$$

2.3 物元归一化

指标体系中,各指标相对于水安全水平来说,有的是数值越大越优,这类指标称为正向指标;有的是数值越小越优,这类性质的指标称为逆向指标。为了更好地计算从优隶属度,对评判指标进行归一化处理:

$$U_{ij} = \begin{cases} \frac{X_{ij}}{\max(X_{ij})} & (\text{越大越优型}) \\ \frac{\min(X_{ij})}{X_{ij}} & (\text{越小越优型}) \end{cases} \quad (4)$$

式中: U_{ij} 是从优隶属度, $\max(X_{ij})$ 、 $\min(X_{ij})$ 为各项选取指标中的最大值和最小值。

采用同样的方法对基础数据进行归一化处理。

2.4 关联系数

关联函数表示量值取值为实轴上一点时待评物元符合要求的范围程度。将关联函数 $K(x_{pL})$ 定义为

$$K(x_{pL}) = \begin{cases} \frac{-\rho(X,X_0)}{|X_0|} & X \subset X_0 \\ \frac{\rho(X,X_0)}{\rho(X,X_p) - \rho(X,X_0)} & X \not\subset X_0 \end{cases} \quad (5)$$

式中: $K(x_{pL})$ 为第 L 年第 p 个等级对应的关联函数值; $\rho(X,X_0)$ 为待测物元量值 X 与有限区间 $X_0(X_0=[A,B],A、B$ 分别为有限元区间的最小值与最大值。) 的距离; $\rho(X,X_p)$ 为待测物元量值 X 与有限区间 $X_p(X_p=[A_p,B_p])$ 的距离; X,X_0,X_p 分别为待评城市生态水平物元的量值、经典域物元的量值范围和节域物元的量值范围。

点与有限元的间距计算公式为

$$\rho(X,X_0) = \left| X - \frac{A+B}{2} \right| - \frac{1}{2}(B-A) \quad (6)$$

2.5 水安全水平评价标准

根据式(5)可以得出 $K(x_{pL})$ 值, $K(x_{pL})$ 表示的具体含义见表 3。

表 3 关联函数的意义

关联函数 $K(x_{pL})$	关联函数意义
≥ 1	表示待评价对象超过标准对象上限,数值越大,开发潜力越大
$(1,0]$	表示待评价对象符合标准对象要求的程度,数值越大,越接近标准
$(0,-1)$	表示待评价对象不符合标准对象要求,但具备转化为标准对象的条件,且值越大,越易转化
≤ -1	表示待评价对象不符合标准对象要求,且又不具备转化为标准对象的条件

2.6 计算待评物元 M_p 关于等级 p 的综合关联度
计算公式为

$$K(M_p) = \sum_{j=1}^n \omega K(x_L) \quad (7)$$

其中 $K(x_L) = \max(K(x_{pL}))$

式中: ω 为每个指标的权重; $K(x_L)$ 为第 L 年同一指标不同安全等级对应的关联函数值中最大的关联函数值。

这样,就可以评定水安全状况 M 的各个年份城市水安全等级水平。

3 实例应用

3.1 新郑市基本概况

新郑市位于河南省中部,地处北纬 $34^{\circ}16' \sim 34^{\circ}39'$,东经 $113^{\circ}30' \sim 113^{\circ}54'$,北靠省会郑州,东邻中牟县、尉氏县,南连长葛市、禹州市,西与新密市接壤。京广铁路、新密铁路和登杞地方铁路及 107 国道、郑平公路、新密公路等在此交汇,京珠高速和南水北调总干渠分别从东、西通过。流经市区的河流有双洎河、黄水河、苇河和莲荷等,这几条河流均属于淮河流域,其中双洎河为新郑市主要河流,其余河流为其支流,属于季节性河流。

3.2 评价指标及数据来源

为确保数据的可靠性、真实性,数据主要来源于《郑州市水资源公报》《河南省城乡统计资料汇编》,本文选取了 2006—2011 年 6 年的数据作为基础数据表 4。

3.3 水安全水平评价经典域、节域和待评物元

对数学评价模型中如何合理取值,学术界一直没有一个统一的评价标准,国内外选取的差异度很大。原因是,除了选取的各个指标不同外,评价标准值很大程度上取决于城市的政治、文化、经济和技术条件等因素。另外,已有评价指标体系中大部分缺乏可移植性,具有明显的地域性特点,因此选取一套适合本地区的评价等级是十分必要的。城市水安全评价等级经典域的确定主要参照《生态县、生态市、生态省建设指标(试行)》《宜居城市科学评价标准》等国家同类相关指标标准值、全国平均水平值等^[8-9]。

新郑市水安全评价的经典域物元 $J_1、J_2、J_3、J_4$ 分别为

$$J_1 = \begin{bmatrix} P_{11} & [80, 150] \\ P_{12} & [4.0, 5.5] \\ \vdots & \vdots \\ M_1 & S_{11} & [70, 100] \\ \vdots & \vdots \\ R_{13} & [0.5, 1] \\ R_{14} & [95, 100] \end{bmatrix} \quad J_2 = \begin{bmatrix} P_{21} & [150, 350] \\ P_{22} & [3.3, 4.0] \\ \vdots & \vdots \\ M_2 & S_{21} & [100, 120] \\ \vdots & \vdots \\ R_{23} & [0.3, 0.5] \\ R_{24} & [85, 95] \end{bmatrix}$$

表 4 不同年份各指标的基础数据

年份	基础数据指标											
	$P_1/$ (人·km ⁻²)	$P_2/$ 万元	$P_3/$ %	$P_4/$ (m ³ ·人 ⁻¹)	$S_1/$ (L·d ⁻¹)	$S_2/$ mm	$S_3/$ m ²	$S_4/$ (m ³ ·万元 ⁻¹)	$R_1/$ %	$R_2/$ %	$R_3/$ %	$R_4/$ %
2006	5 413	2. 698 4	0. 002 9	226. 97	127	778. 8	7. 46	54. 0	95. 38	89. 43	0	44. 72
2007	6 717	3. 346 8	0. 002 9	208. 59	117. 09	596. 4	6. 01	53. 3	66. 82	88. 41	0	85. 82
2008	6 762	3. 367 5	0. 003 1	169. 41	107. 61	652. 7	5. 97	39. 4	70. 38	85. 27	0. 062 0	85. 77
2009	6 866	3. 417 6	0. 003 2	166. 05	107. 33	610. 6	7. 81	39. 9	70. 70	38. 06	0. 061 0	70. 55
2010	6 974	3. 469 7	0. 023 8	176. 47	108. 67	620. 0	8. 15	41. 1	70. 23	48. 1	0. 070 8	88. 17
2011	6 997	3. 479 4	0. 022 1	214. 36	97. 19	763. 7	8. 54	34. 5	70. 83	21. 43	0. 017 1	87. 00

注:数据来源于 2006—2011 年《郑州市水资源公报》《河南省城乡统计资料汇编》

$$J_3 = \begin{bmatrix} P_{31} & [350, 500] \\ P_{32} & [2.6, 3.3] \\ \vdots & \vdots \\ M_3 & S_{31} & [120, 160] \\ \vdots & \vdots \\ R_{33} & [0.1, 0.3] \\ R_{34} & [75, 85] \end{bmatrix} \quad J_4 = \begin{bmatrix} P_{41} & [500, 800] \\ P_{42} & [0, 2.6] \\ \vdots & \vdots \\ M_4 & S_{41} & [160, 200] \\ \vdots & \vdots \\ R_{43} & [0, 0.1] \\ R_{44} & [0, 75] \end{bmatrix}$$

根据经典域可以确定新郑市水安全水平评价的节域物元矩阵 J_p 为

$$J_p = \begin{bmatrix} P_1 & [80, 800] \\ P_2 & [0, 4] \\ \vdots & \vdots \\ M_p & S_1 & [70, 200] \\ \vdots & \vdots \\ R_3 & [0, 0.5] \\ R_4 & [0, 100] \end{bmatrix}$$

3.4 关联系数计算

将评判矩阵进行归一化处理,再将待测物元的具体数据代入物元模型,根据式(5)即可得到计算结果(表 5,以 2006 年为例)^[10-11]。根据式(7)的判

断标准,即各指标的评价等级为关联系数中的最大值对应的评价等级,就可以得出各指标的评价等级,见表 6。2006 年新郑市水安全等级处于Ⅳ级有 5 个,处于Ⅲ级的有 4 个。从单指标评价可以看出,新郑市水安全等级比较差,总体状况位于不安全状态。由表 7 可知,新郑市反映压力层状况的 3 个指标处于不安全状态,反映环境压力较大,主要原因为新郑市城市化快速发展,人们过度看重经济发展,而忽略水环境的保护,导致部分地区水污染状况严重。另外,新郑市属于华北地区,本身没有大型河流和湖泊,水资源量稀少,这与当地的实际情况相符合;反映状态层状况的 4 个指标处于安全状态的边缘,反映新郑市降水量不大的情况下,生活用水量、工业用水量偏多;响应层的 4 个指标中,用水普及率安全等级处于Ⅰ级,反映用水普及率较高,市民基本用上了自来水;工业用水重复率安全等级处于Ⅱ级,反映工业发展水平已经处于国内平均水平,用水量处于正常水平,另外两个指标位于不安全等级,反映出投入环保资金较少和治污力度不够,局部出现水污染。

表 5 2006 年水安全评价经典域的取值标准

安全等级	基础数据指标											
	$P_1/$ (人·km ⁻²)	$P_2/$ 万元	$P_3/$ %	$P_4/$ (m ³ ·人 ⁻¹)	$S_1/$ (L·d ⁻¹)	$S_2/$ mm	$S_3/$ m ²	$S_4/$ (m ³ ·万元 ⁻¹)	$R_1/$ %	$R_2/$ %	$R_3/$ %	$R_4/$ %
Ⅰ (非常安全)	[80,150)	[4.0,5.5]	[25,30]	[1 000,1 500]	[70,100)	[1 350,2 000]	[15,20]	[10,50)	[85,100]	[90,100]	[0.5,1]	[95,100]
Ⅱ (安全)	[150,350)	[3.3,4.0)	[20,25)	[750,1 000)	[100,120)	[950,1 350)	[11,15)	[50,150)	[75,85)	[80,90)	[0.3,0.5)	[85,95)
Ⅲ (较不安全)	[350,500)	[2.6,3.3)	[15,20)	[500,750)	[120,160)	[550,950)	[7,11)	[150,250)	[65,75)	[70,80)	[0.1,0.3)	[75,85)
Ⅳ (不安全)	[500,800]	[0,2.6)	[0,15)	[0,500)	[160,200]	[0,550)	[0,7)	[250,300]	[0,65)	[0,70)	[0,0.1)	[0,75)

表 6 2006 年水安全评价指标等级划分

安全等级	关联函数值											
	P_1	P_2	P_3	P_4	S_1	S_2	S_3	S_4	R_1	R_2	R_3	R_4
Ⅰ (非常安全)	-1. 20	-0. 35	-0. 99	-0. 77	-0. 43	-0. 43	-0. 50	-0. 09	0. 31	-0. 05	-1. 00	-0. 53
Ⅱ (安全)	-1. 66	-0. 18	-0. 99	-0. 70	-0. 13	-0. 19	-0. 17	0. 11	-0. 69	0. 06	-1. 00	-0. 47
Ⅲ (较不安全)	-1. 77	0. 08	-0. 98	-0. 54	0. 21	0. 45	0. 06	-0. 43	-0. 82	-0. 47	-1. 00	-0. 40
Ⅳ (不安全)	0. 00	0. 04	0. 02	0. 03	-0. 36	-0. 22	0. 06	-0. 48	-0. 87	-0. 65	0. 00	0. 40

表 7 新郑市 2006—2011 年水安全水平相关计算结果

年份	关联函数值				水安全等级	等级转化
	I (非常安全)	II (安全)	III (较不安全)	IV (不安全)		
2006	-0.38	-0.34	-0.32	-0.24	IV	向 II 转化中
2007	-0.43	-0.19	-0.27	-0.17	IV	向 II 转化中
2008	-0.35	-0.11	-0.23	-0.23	II	向 IV 转化中
2009	-0.37	-0.21	-0.22	-0.14	IV	向 II 转化中
2010	-0.34	-0.13	-0.22	-0.19	II	向 III 转化中
2011	-0.35	-0.26	-0.21	-0.20	IV	

根据表 6 所得结果,2006 年各指标等级中,压力层指标 P_1 、 P_2 、 P_3 、 P_4 分别为Ⅳ、Ⅲ、Ⅳ、Ⅳ等级;状态层指标 S_1 、 S_2 、 S_3 、 S_4 分别为Ⅲ、Ⅲ、Ⅲ、Ⅱ等级;状态层指标 R_1 、 R_2 、 R_3 、 R_4 分别为Ⅰ、Ⅱ、Ⅳ、Ⅳ等级。

3.5 综合关联度及评价结果

根据计算得出 2006—2011 年不同安全水平对应的关联函数值,再比较相邻两年的关联函数,可以得出安全等级转化的方向,见表 7。

根据相邻两年关联函数值的变化情况,可得出当年的水安全趋势变化情况,如比较 2006 年与 2007 年,从隶属值变化幅度上来看,新郑市城市水安全水平第Ⅱ等级的增长幅度最大,为 0.15,其他等级的关联度增幅不大,暗示了 2006—2007 年新郑市水安全水平有向第Ⅱ等级转化的趋势。通过相邻年份的比较可以得出 2006—2011 年的转化趋势,见表 7。根据模型计算结果,新郑市 2006 年、2007 年、2009 年、2011 年水安全水平为Ⅳ级,但都具备由低等级水平向高等级水平转化的条件,水安全形势具备变好的趋势;2008 年与 2010 年水安全等级为第Ⅱ等级,为安全水平,但有向低安全等级转化的趋势,主要是因为 2008 年工业用水重复利用率处于较低安全水平,表明 2008 年工业用水重复利用水平不高。2010 年也是同样情况,但工业用水重复利用率安全水平已经提高很多,工业废水治理总投资占 GDP 的比例处于较低安全水平。

4 结 论

a. 评价结果显示,2006 年新郑市水安全等级处于Ⅳ级,属于不安全等级,且在选取的 12 个指标中,有 5 个属于Ⅳ级。只要有 1 个指标的安全等级属于Ⅰ级,综合评价结果也显示水安全等级较低,这与单指标评价结果相符,反映 2006 年新郑市水安全面临的水安全问题非常严峻,新郑市人口密度过大,人均水资源占有量不足,工业废水处理率不高等问题都亟须解决。

b. 综合评价结果显示 2006 年新郑市水安全等级有 4 年处于Ⅳ级,2 年处于Ⅱ级,但水安全等级较

低的年份都具备向安全等级转化的可能性。随着南水北调工程的通水,治污投入资金的增加、绿化面积的不断扩大,新郑市水安全状况将不断得到改善,新郑市水安全级别将不断得到提高。

参考文献:

[1] 张翔,夏军,贾绍凤. 干旱期水安全及其风险评价研究 [J]. 水利学报, 2005 (9): 138-142. (ZHANG Xiang, XIA Jun, JIA Shaofeng. The research on water security and risk assessment in drought time [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2005 (9): 138-142. (in Chinese))

[2] 王彦威,邓海利,王永成. 层次分析法在水安全评价中的应用 [J]. 黑龙江水利科技, 2007 (3): 117-119. (WANG Yanwei, DENG Haili, WANG Yongcheng. The application of analytic hierarchy process (AHP) in the evaluation of water security [J]. Heilongjiang Science and Technology of Water Conservancy, 2007 (3): 117-119. (in Chinese))

[3] 张华侨,窦明,赵辉,等. 郑州市水安全模糊综合评价 [J]. 水资源保护, 2010, 26 (6): 42-46, 74. (ZHANG Huaqiao, DOU Ming, ZHAO Hui, et al. Fuzzy comprehensive evaluation of water security in Zhengzhou City [J]. Water Resources Protection, 2010, 26 (6): 42-46, 74. (in Chinese))

[4] 邵东国,杨丰顺,刘玉龙,等. 城市水安全指数及其评价标准 [J]. 南水北调与水利科技, 2013 (1): 66-70. (SHAO Dongguo, YANG Fengshun, LIU Yulong, et al. Urban water security index and its evaluation criterion [J]. South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology, 2013 (1): 66-70. (in Chinese))

[5] 朱冬楠,李畅游,孙标,等. 改进模糊物元模型在湖泊水质评价中的应用 [J]. 人民黄河, 2010 (12): 127-128, 130. (ZHU Dongnan, LI Changyou, SUN Biao, et al. Improved fuzzy matter-element model in the application of the lake water quality evaluation [J]. Yellow River, 2010 (12): 127-128, 130. (in Chinese))

[6] 罗文斌,吴次芳,吴一洲. 城市土地生态水平物元分析评价:以山东省滨州市为例 [J]. 生态学报, 2009 (7): 18-27. (LUO Wenbin, WU Cifang, WU Yizhou. Assessment on ecological level of urban land based on matter element analysis: a case study of Binzhou City in Shandong Province [J]. Acta Ecologica Sinica, 2009 (7): 18-27. (in Chinese))

[7] 谭永明,李森焱. 改进的物元可拓法在水质评价中的应用 [J]. 海河水利, 2008 (4): 51-56. (TAN Yongming, LI Shenyan. The application of improved matter element extension method in water quality evaluation [J]. Haihe River Water Conservancy, 2008 (4): 51-56. (in Chinese))

- [8] 环办[2012]101 号 生态县、生态市、生态省建设指标 [S].
 - [9] 罗亚蒙,顾文选. 宜居城市科学评价标准[R]. 北京: 中华人民共和国建设部科学技术司,2007.
 - [10] 张俊艳,韩文秀. 城市水安全问题及其对策探讨[J]. 北京科技大学学报, 2005(2):78-82. (ZHANG Junyan, HAN Wenxiu. The discuss about problems and countermeasures of urban water security[J]. Journal of Beijing University of Science and Technology,2005(2): 78-82. (in Chinese))
 - [11] 韩宇平,阮本清,解建仓. 多层次多目标模糊优选模型在水安全评价中的应用[J]. 资源科学,2003(4):37-42. (HAN Yuping, YUAN Benqing, XIE Jiancang. Multi objective and multilevel fuzzy optimization model and its application in water security evaluation [J]. Resources Science,2003(4):37-42(in Chinese))
(收稿日期:2014-04-22 编辑:彭桃英)
- +++++
- (上接第 15 页)
- [31] 舒月红,吴宏海,黄小仁,等. CBs 在沉积物上的吸附-解吸行为[J]. 地球化学,2009,38(2):153-158. (SHU Yuehong, WU Honghai, HUANG Xiaoren, et al. Sorption-desorption behavior of chlorobenzenes in sediments[J]. Geochimica,2009,38(2):153-158. (in Chinese))
 - [32] 陈迪云,彭燕. 憎水有机物在水/土壤、沉积物体系中吸附与解吸[J]. 化工时刊,2001,15(4):11-15. (CHEN Diyun, PENG Yan. Sorption and desorption of hydrophobic organic compounds on water/soil, sediment system [J]. Chemical Industry Times, 2001, 15 (4): 11-15. (in Chinese))
 - [33] YONG R, BAOSHAN X, RAO P S C, et al. Importance of adsorption (hole-filling) mechanism for hydrophobic organic contaminants on an aquifer kerogen isolate[J]. Environmental Science & Technology, 2004, 38 (16): 4340-4348.
 - [34] 孟庆昱,储少岗,徐晓白. 多氯联苯的环境吸附行为研究进展[J]. 科学通报,2000,45(15):1572-1583. (MENG Qinyu, CHU Shaogang, XU Xiaobai. Advances in PCBs environmental adsorption behavior [J]. Chinese Science Bulletin, 2000, 45 (15): 1572-1583. (in Chinese))
 - [35] 张娇,张龙军. 有机物在河口区迁移转化机理研究[J]. 中国海洋大学学报:自然科学版,2008,38(3):489-494,394. (ZHANG Jiao, ZHANG Longjun. Research progress on the transfer and transformation of organic matters in estuaries[J]. Periodical of Ocean University of China,2008,38(3):489-494,394. (in Chinese))
 - [36] 刘婷. 硝基苯在河水中气-液-固相间迁移规律研究[D]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学,2006.
 - [37] CHAO K P, ONG S K. Water-to-air mass ratnsfer of VOCs:laboratory-scale air sparging system[J]. Journal of Environmental Engineering,1998,124(11):1054.
 - [38] 赵岚. 硝基苯污染物在河污混合过程中的迁移转化行为研究[D]. 上海:华东师范大学,2004.
 - [39] 迟杰,张玄. DDTs 在海河干流市区段沉积物/水间迁移行为研究[J]. 环境科学,2009,30(8):2376-2380. (CHI Jie,ZHANG Xuan. DDTs transport between sediment and water in the mainstream of Haihe River in the urban area [J]. Environmental Science,2009,30(8):2376-2380. (in Chinese))
 - [40] 聂湘平,魏泰莉,蓝崇钰. 多氯联苯在模拟水生态系统中的分布、积累与迁移动态研究[J]. 水生生物学报,2004,28(5):478-483. (NIE Xiangping, WEI Taili, LANG Chongyu. Distribution, accumulation and transfer dynamics of PCB1254 in a simulated micro-cosmos system[J]. Acta Hydrobiologica Sinica, 2004, 28 (5): 478-483. (in Chinese))
 - [41] 陈刚,金相灿,姜霞,等. 水流模拟断面中硝基苯的迁移转化规律[J]. 环境科学研究,2008,21(1):78-84. (CHEN Gang, JIN Xiangcan, JIANG Xi, et al. Research of nitrobenzene 's translocation and transformation rule in simulative section of stream [J]. Research of Environmental Sciences, 2008, 21 (1): 78-84. (in Chinese))
 - [42] ZEPP R G, BRAUN A M, HOIGNE J, et al. Photoproduction of hydrated electrons from natural organic solutes in aquatic environments [J]. Environmental Science and Technology,1987,21(5):485-490.
 - [43] JURADO E, ZALDÍVAR J-M, MARINOV D, et al. Fate of persistent organic pollutants in the water column: does turbulent mixing matter? [J]. Marine Pollution Bulletin, 2007,54(4):441-451.
 - [44] 彭虹,齐迪,张万顺. 河流环境中硝基苯的归趋模型研究[J]. 人民长江,2011,42(24):81-84,88. (PENG Hong, QI Di, ZHANG Wangshun. Study of fate model of nitrobenzene in rivers[J]. Yangtze River,2011,42(24):81-84,88. (in Chinese))
 - [45] WANG C, FENG Y, ZHAO S, et al. A dynamic contaminant fate model of organic compound:a case study of nitrobenzene pollution in Songhua River, China [J]. Chemosphere,2012,88(1):69-76.
(收稿日期:2014-07-25 编辑:高渭文)