

DOI: 10.13476/j.cnki.nsbdtqk.2015.06.034

基于投影寻踪方法的下辽河平原城市水安全综合评价

郑德凤^{1,2}, 苏琳¹, 魏秋蕊¹, 李红英³

(1. 辽宁师范大学 城市与环境学院, 辽宁 大连 116029;

2. 国土资源部 资源环境承载力评价重点实验室, 北京 065201; 3. 辽宁省水文局, 沈阳 110003)

摘要: 通过层次分析法构建水安全评价指标体系, 在此基础上应用投影寻踪方法, 建立水安全评价模型, 并以下辽河平原区主要城市为研究对象, 进行区域尺度的水安全综合评价, 发现抚顺与辽阳水安全处于安全状态, 沈阳与鞍山处于较安全状态, 锦州、营口、铁岭与盘锦等城市处于不安全状态。研究表明, 水安全投影寻踪模型切实可行, 可应用于区域水安全综合评价。

关键词: 水安全; 综合评价; 指标体系; 层次分析法; 投影寻踪法; 下辽河

中图分类号: X820 **文献标志码:** A **文章编号:** 1672-1683(2015)06-1181-04

Comprehensive evaluation of urban water security in the Lower Liao River Plain based on projection pursuit method

ZHENG De feng^{1,2}, SU Lin¹, WEI Qiu rui¹, LI Hong ying³

(1. School of Urban Planning and Environmental Science, Liaoning Normal University, Dalian 116029, China;

2. Key Laboratory of Carrying Capacity Assessment for Resource and Environment, Ministry of Land and Resources (Chinese Academy of Land and Resource Economics, China University of Geosciences Beijing), Beijing 065201, China;

3. Hydrology bureau of Liaoning Province, Shenyang 110003, China)

Abstract: The evaluation index system of water security was developed using the Analytic Hierarchy Process (AHP) method. On the basis, a water security model was established using the projection pursuit method, and applied to perform the comprehensive evaluation of water security in the Lower Liao River Plain on the regional scale. The results showed that water security is safe in Fushun and Liaoyang, relatively safe in Shenyang and Anshan, and unsafe in Jinzhou, Yingkou, Tieling, and Panjin. The water security evaluation model based on projection pursuit method is applicable and can be applied to assess regional water security.

Key words: water security; comprehensive evaluation; index system; Analytic Hierarchy Process; projection pursuit method; Lower Liao River

水安全问题是指现在或将来由于天然水文循环波动或人类对水循环的不合理改变, 导致人类赖以生存的区域水状况发生对人类不利的演进^[1], 主要表现为干旱、洪涝、水量短缺、水质污染、水环境恶化等, 并由此引发粮食减产、社会不稳、经济下滑及地区冲突等一系列问题。水安全问题已被联合国列为影响人类社会稳定的重要因素之一, 其研究领域主要包括水安全内涵和外延、水安全度量、水安全评价等^[2]。我国水安全研究起步略晚但发展迅速, 经历了从环境需水问题、水污染防治研究到水资源供需的“生态水利问题”三个阶段。在此期间国内学者应用不同的方法进行水安全研究: 韩宇平等^[1]利用多层次多目标决策和模糊优选理论, 建立了区

域水安全评价的模糊优选模型。张翔等^[3,4]利用干旱风险指数, 对海河流域水安全进行了风险评价, 其研究侧重于干旱期的水安全评价, 而未考虑洪涝灾害对水安全的影响。张戈丽等^[5]采用改进的PSR模型对济南市水安全进行了评价, 评价过程中忽略了水安全系统的不确定性问题, 采用各指标加权求和获得水安全评价综合指数。李永等^[6]采用Vague集相似度量模型构建了城市水安全应急保障度综合评价模型, 对成都市水安全应急保障度进行了评价。王顺久、李跃清等^[7]从水安全内涵分析出发, 建立了水安全评价指标体系并应用于7省市水安全综合评价中。

水安全评价包括构建评价指标体系、确定评价指标权

收稿日期: 2014-09-08 修回日期: 2015-09-27 网络出版时间: 2015-11-03

网络出版地址: <http://www.cnki.net/kcms/detail/13.1334.TV.20151103.1112.020.html>

基金项目: 国土资源部资源与环境承载力评价重点实验室开放课题资助项目(CCA2015.04); 辽宁经济社会发展立项课题(2015lslktxxj03); 辽宁省教育厅人文社会科学重点研究基地项目(ZJ2014034)

作者简介: 郑德凤(1970), 女, 黑龙江伊春人, 副教授, 博士, 主要从事水资源评价、管理与水环境保护研究。E-mail: defengzheng@lnnu.edu.cn

重、选择评价模型等步骤^[8]。本文基于水安全的内涵,从自然属性、经济属性、人文属性三个方面选取评价指标,并应用层次分析法对指标进行筛选,构建水安全评价的指标体系,并应用投影寻踪模型对下辽河平原的主要城市进行区域尺度的水安全综合评价。

1 水安全评价指标体系的建立

水安全综合评价需要建立水安全系统评价指标体系和评价等级标准^[9]。遵循科学性、可操作性、与实际相结合等原则,从水安全的内涵出发,考虑水的自然属性、社会经济属性、人文属性,初步筛选出 20 项水安全评价指标,并应用层次分析法按照目标层、准则层和指标层三个层次划分层次结构并确定各评价指标的权重,见表 1。综合考虑各子系统的属性特征,从每个子系统中选取 4 项权重较大的指标,构成区域水安全评价的指标体系。

表 1 水安全评价指标权重

Tab. 1 Weights of water security evaluation indexes

评价指标	权重
人口密度	0.035
经济密度*	0.031
水资源利用率	0.012
生活污水处理率*	0.020
灌溉水综合利用系数	0.010
饮用水短缺风险	0.005
饮用卫生水达标人口率	0.003
城市化程度	0.007
人均水资源量	0.121
单位面积水资源量*	0.175
水域面积率*	0.175
森林覆盖率	0.071
荒漠化指数	0.043
水土流失率	0.025
人均 GDP ^F	0.090
水利工程投资占 GDP 比例	0.084
洪涝损失占 GDP 比例*	0.043
干旱损失占 GDP 比例*	0.022
环保投资占 GDP 比例	0.016
工业万元产值用水量	0.010

注:标注*的为选取的区域水安全评价指标。

2 水安全投影寻踪模型构建

投影寻踪方法通过把高维数据投影到低维子空间,获取能反映原高维数据的结构或特征的投影,进而分析和处理非正态、非线性高维观测数据^[10]。建立水安全评价的投影寻踪模型步骤如下。

(1) 构造投影指标函数。

对多目标系统中第 i 个样本第 j 项指标的原始输入值为 x_{ij}^* ($i=1, 2, \dots, n; j=1, 2, \dots, m$), n 为样本数, m 为指标数。首先对各指标输入值进行标准化处理将 x_{ij}^* 转化为 x_{ij} 。根据投影寻踪原理,把样本的 m 维数据 $\{x_{ij}^* | j=1 \sim m\}$ 综合成以 $a=(a_1, a_2, \dots, a_m)$ 为投影的一维投影值 z_i 。综合投影时,构造综合投影指标函数 $Q(a)^{[11]}$ 如下:

$$z_i = \sum_{j=1}^m a_j x_{ij} \tag{1}$$

$$Q(a) = S_z D_z \tag{2}$$

式中: S_z 为投影值 z_i 的标准差; D_z 为类内密度集,表示 z_i 的局部密度。

(2) 优化投影指标函数。

对于给定的水安全经验等级及样本数据,投影指标函数 $Q(a)$ 只随投影方向向量 a 变化而变化,可通过求解投影指标函数最大化问题来估计最佳投影方向向量^[11],即

$$\text{Max} Q(a) = S_z D_z \tag{3}$$

$$\text{s. t. } \sum_{j=1}^m a_j^2 = 1 \tag{4}$$

用基于实数编码的加速遗传算法(RAGA)可求解上述非线性优化问题^[12]。

(3) 基于投影寻踪方法的水安全综合评价模型。

将求得的最佳投影方向估计值 \hat{a} 带入式(1)得到第 i 个样本的投影计算值 z_i^* 。设 y_i 为水安全的经验等级,根据 $z_i^* \sim y_i$ 的散点图可建立水安全评价的数学模型。若 $z_i^* \sim y_i$ 的散点图成“S”形,则可用逻辑斯蒂曲线(Logistic Curve)^[13-14] 作为水安全综合评价模型,即

$$y_i^* = \frac{N}{1 + e^{C_1 + C_2 z_i^*}} \tag{5}$$

式中: y_i^* 为第 i 个样本水安全等级的计算值;最大水安全等级 N 为该曲线的上限值; C_1, C_2 为待定参数,可通过求解最小化问题确定。

各参数确定后,通过式(5)计算各样本的水安全值并判断其水安全等级,判断依据见表 2。

表 2 水安全等级判断依据

Tab. 2 Judgment of water security level

水安全等级	\hat{N} 级 (安全)	$\hat{0}$ 级 (较安全)	$\hat{0}$ 级 (临界安全)	...	N 级(不安全)
水安全等级 计算值 y_i^*	(0, 1.5)	[1.5, 2.5)	[2.5, 3.5)	...	[(N-1)+0.5, N]

3 实例应用

以下辽河平原的主要城市为研究对象,应用水安全投影寻踪模型,进行区域尺度水安全综合评价。流域内自然因素之间、自然和社会因素之间的相互作用具有空间展延性和时间推移性,流域内的水安全影响因子之间也存在着密切关系^[15],区域水安全评价研究应实行流域一体化管理。同一流域内的各城市水安全影响因子之间也存在密切联系,所以应选择同一指标体系进行水安全评价研究。本文研究区中的 8 个城市同处于下辽河平原,故采用同一指标体系进行水安全评价,也利于下辽河平原区多城市之间水安全的横向比较分析。水安全评价各指标的等级划分标准见表 3^[9]。在各等级水安全的指标取值范围内随机生成 5 个样本,5 个评价等级共生成 25 个样本序列,见表 4。将表 4 的数据进行标准化处理,得到归一化序列 $\{x_{ij} | i=1 \sim 25, j=1 \sim 12\}$,并与 $\{y_i | i=1 \sim 25\}$ 一起代入式(1)、式(2)得到投影指标函数,用实数编码加速遗传算法优化该函数,得到最大投影指标函数值为 0.099,最佳投影方向向量 $\hat{a}^* = (-0.256, 0.271, 0.185, 0.715, -0.109, 0.110, 0.318, 0.236, -0.225, -0.033, -0.189, -0.217)$ 。把 \hat{a}^* 代入式(1)得到各样本投影计算值 z_i^* 。

表3 水安全评价指标体系及等级划分标准

Tab.3 Index system and classification criterion of water security evaluation

评价指标	水安全等级				
	\tilde{N} (安全)	$\hat{0}$ (较安全)	$\acute{0}$ (临界安全)	$\grave{0}$ (较不安全)	$\bar{0}$ (不安全)
人均水资源量/ m^3	< 10	10~ 25	25~ 40	40~ 60	> 60
单位面积水资源量/($万 m^3 \cdot km^2$)	> 300	300~ 150	150~ 75	75~ 30	< 30
水域面积率(%)	> 20	20~ 15	15~ 10	10~ 5	< 5
森林覆盖率(%)	> 30	30~ 20	20~ 15	15~ 10	< 10
人口密度/($人 \cdot km^2$)	< 100	100~ 200	200~ 350	350~ 500	> 500
经济密度/($万元 \cdot km^2$)	> 600	600~ 400	400~ 300	300~ 100	< 100
人均 GDP/千元	> 12	12~ 8	8~ 5	5~ 2	< 2
水利工程投资占 GDP 比例(%)	> 1.0	1.0~ 0.8	0.8~ 0.5	0.5~ 0.2	< 0.2
水资源利用率(%)	< 10	10~ 25	25~ 40	40~ 60	> 60
生活污水处理率(%)	> 80	80~ 60	60~ 40	40~ 20	< 20
洪涝损失占 GDP 比例(%)	< 1	1~ 2.5	2.5~ 4	4~ 5.5	> 5.5
干旱损失占 GDP 比例(%)	< 1	1~ 2.5	2.5~ 4	4~ 5.5	> 5.5

表4 水安全评价等级与水安全等级计算值

Tab.4 Water security evaluation levels and calculated values of water security levels

样本评价 指标	人均水资源量/ m^3	单位面积水资源量/($万 m^3 \cdot km^2$)	水域面积率(%)	森林覆盖率(%)	人口密度/($人 \cdot km^2$)	经济密度/($万元 \cdot km^2$)	人均 GDP/千元	水利工程投资占 GDP 比例(%)	水资源利用率(%)	生活污水处理率(%)	洪涝损失占 GDP 比例(%)	干旱损失占 GDP 比例(%)	水安全等级计算值 y_i^*	计算等级	
\tilde{N} 级	1	8.33	413.66	21.38	33.50	17.06	773.74	15.34	1.08	8.15	99.60	0.96	0.90	0.80	\tilde{N}
	2	9.15	411.47	23.40	31.97	79.63	616.89	12.40	1.32	9.06	88.78	0.55	0.89	0.87	\tilde{N}
	3	2.14	358.83	23.28	32.51	31.81	679.96	19.22	1.37	1.27	82.22	0.52	0.33	1.06	\tilde{N}
	4	9.22	398.32	20.81	36.16	53.32	651.97	19.56	1.32	9.13	85.16	0.23	0.70	1.18	\tilde{N}
	5	6.69	325.68	20.60	34.73	17.40	760.01	15.93	1.23	6.32	88.17	0.49	0.20	1.19	\tilde{N}
$\hat{0}$ 级	6	11.46	255.91	17.49	23.52	160.20	486.28	9.96	0.91	11.46	71.90	1.94	1.05	1.27	\tilde{N}
	7	14.18	154.77	19.80	28.31	126.30	582.13	9.35	0.86	14.18	65.24	2.02	2.12	2.09	$\hat{0}$
	8	18.20	191.54	16.70	25.85	165.41	436.37	11.60	0.95	18.20	72.06	1.59	1.75	1.78	$\hat{0}$
	9	24.36	156.93	17.93	25.50	168.92	452.76	9.48	0.84	24.36	74.22	1.55	1.72	1.76	$\hat{0}$
	10	24.47	164.57	16.12	29.17	174.82	429.11	8.44	0.94	24.47	64.43	2.48	2.36	2.28	$\hat{0}$
$\acute{0}$ 级	11	27.36	136.76	13.76	16.43	267.58	313.61	7.34	0.56	27.36	42.35	2.56	3.41	3.18	$\acute{0}$
	12	39.56	127.11	11.28	18.79	212.57	386.93	6.17	0.61	39.56	45.93	3.83	3.43	3.19	$\acute{0}$
	13	39.36	98.78	12.53	18.77	234.35	357.97	5.73	0.69	39.36	46.38	3.87	3.79	3.46	$\acute{0}$
	14	32.28	146.27	13.50	16.90	337.00	354.99	6.21	0.73	32.28	48.48	3.69	3.71	3.41	$\acute{0}$
	15	37.00	77.58	14.45	17.84	222.86	314.50	5.29	0.52	37.00	50.16	2.65	3.37	3.14	$\acute{0}$
$\grave{0}$ 级	16	42.84	49.74	9.80	10.38	473.87	270.61	2.40	0.48	42.84	21.71	4.39	4.27	3.79	$\hat{0}$
	17	48.44	47.17	7.74	10.27	430.75	224.41	4.83	0.43	48.44	25.25	4.50	4.36	3.85	$\hat{0}$
	18	58.31	64.45	5.69	12.65	499.42	170.19	4.87	0.35	58.32	36.02	5.02	5.33	4.33	$\hat{0}$
	19	55.84	65.78	5.75	13.90	361.73	202.65	3.73	0.33	55.84	20.58	4.20	4.04	3.64	$\hat{0}$
	20	59.19	38.41	6.29	14.67	416.40	180.36	2.18	0.33	59.19	38.58	5.08	4.73	4.06	$\hat{0}$
$\bar{0}$ 级	21	82.23	14.69	4.20	1.30	521.33	8.52	0.09	0.06	73.12	14.61	5.66	5.75	4.48	$\bar{0}$
	22	61.43	13.37	1.27	5.69	692.38	24.75	0.71	0.10	60.71	9.77	6.48	6.97	4.76	$\bar{0}$
	23	93.97	19.39	4.07	4.69	500.93	13.21	1.64	0.10	76.98	11.57	6.24	6.57	4.69	$\bar{0}$
	24	97.36	21.28	1.22	0.12	654.98	19.21	0.03	0.16	78.68	4.75	6.67	6.25	4.62	$\bar{0}$
	25	87.15	22.64	4.65	3.37	663.46	24.76	0.47	0.16	73.58	9.18	6.57	6.21	4.61	$\bar{0}$

点绘研究区样本序列的投影计算值 z_i^* 与经验等级 y_i 的散点图(图 1), 此散点图呈“S”形, 故可用式(5)进行水安全计算, 其中 $N = 5, C_1, C_2$ 通过遗传算法优化估计, 进而得到下辽河平原城市水安全评价投影寻踪模型为

$$y_i^* = \frac{N}{1 + e^{1.793 - 5.949z_i^*}} \quad (6)$$

根据各样本投影计算值 z_i^* 应用公式(6)计算各样本水

安全等级计算值 y_i^* , 结果见表 4。参照表 2 的水安全等级判断依据得出各样本相应的划分等级, 对照各样本生成时隶属的等级, 发现有 24 个样本的生成等级与计算等级相一致, 一致率达到 96%, 说明上面建立的水安全评价投影寻踪模型是合理的。应用此模型对下辽河平原区主要城市的水安全状况进行综合评价, 评价结果见表 5。

表 5 下辽河平原区主要城市水安全评价等级

Tab. 5 Water security evaluation levels of major cities in the Lower Liao River Plain

项 目	城市							
	沈阳	鞍山	抚顺	锦州	营口	辽阳	铁岭	盘锦
人均水资源量/ m^3	196	604	1432	256	295	456	504	225
单位面积水资源量/ $(万 m^3 \cdot km^{-2})$	11	23	28	8	13	18	12	9
水域面积率(%)	1	0.6	4	12	2	5	6	49
森林覆盖率(%)	24	52	64	21	46	35	33	8
人口密度/ $(人 \cdot km^{-2})$	2 076	2 532	2 148	2 239	5 280	1 242	2 220	2 606
经济密度/ $(万元 \cdot km^{-2})$	2 980	1 739	4 866	5 625	10 753	9 861	3 120	2 014
人均 GDP/千元	73	68	52	36	50	49	29	80
水利工程投资占 GDP 比例(%)	0.02	0.01	0.05	0.07	0.09	0.1	0.02	0.19
水资源利用率(%)	60	50	40	45	55	52	53	45
生活污水处理率(%)	85.20	71.22	67.79	66.53	64.04	93.40	89.87	100
洪涝损失占 GDP 比例(%)	0.4	0.6	0.9	0.3	0.02	1.4	0.01	0.5
干旱损失占 GDP 比例(%)	0.07	0.04	0.01	0.3	0.2	0.02	0.5	0.3
水安全等级计算值 y_i^*	2.382	1.526	0.875	4.979	4.776	1.064	5.000	4.979
计算等级	0 级	0 级	1 级	0 级	0 级	1 级	0 级	0 级

评价指标

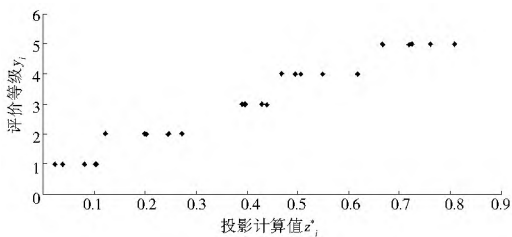


图 1 各样本投影计算值与评价等级散点图

Fig. 1 Scatter plot of calculated projection value and evaluation level value of each sample

评价结果显示,抚顺和辽阳处于 1 级安全状态,沈阳和鞍山处于 0 级较安全状态,锦州、营口、铁岭和盘锦等城市处于 0 级不安全状态。

水安全投影寻踪模型中最佳投影方向向量中各分量绝对值的大小实质上反映了各指标对水安全等级的影响程度,即绝对值越大对水安全的影响程度越大。在下辽河平原的研究中,最佳投影方向 $a^* = (0.300, 0.029, 0.495, -0.316, 0.329, 0.426, 0.028, 0.459, 0.062, 0.028, -0.040, 0.239)$ 。最佳投影方向各分量中人均水资源量、水域面积率、森林覆盖率、人口密度、经济密度、水利工程投资占 GDP 比例和干旱损失占 GDP 比例等指标数值较大,表示其对水安全等级评价影响程度较大。而人均水资源量、水域面积率、森林覆盖率等因素均表征城市的自然资源量,说明水资源的多寡直接影响城市的水安全。人口密度、经济密度、水利工程投资占 GDP 比例和干旱损失占 GDP 比例等指标表征城市的经济指标,说明经济的发展可以保证公共设施的健全,保障人们饮用水安全。所以自然因素和经济因素都在一定程度上影响着城市的水安全状态。

4 结论

(1) 本文选取了 20 项水安全评价指标并应用层次分析法对指标进行筛选,进而构建适合研究区的水安全评价指标体系。

(2) 水安全投影寻踪模型不需给出各评价指标权重,减少

了评价过程中的人为因素影响。同时水安全投影寻踪模型的计算精度较高,适用于对多个研究区水安全状态进行对比分析。

(3) 采用层次分析法与投影寻踪模型相结合的方法对下辽河平原区的主要城市的水安全进行综合评价,结果表明抚顺和辽阳的水安全处于安全状态,沈阳与鞍山处于较安全的状态,锦州、营口、铁岭和盘锦等城市处于不安全状态。

参考文献(References):

[1] 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,2003,25(4):36-42.(HAN Yur ping, RUAN Ben qing, XIE Jian cang. Multi objective and multilevel fuzzy optimization model and its application in water security evaluation[J]. Resources Science, 2003, 25(4): 36-42. (in Chinese))

[2] 夏军,朱一中.水资源安全的度量:水资源承载力的研究与挑战[J].自然资源学报,2002,17(3):262-269.(XIA Jun, ZHU Yi zhong. The measurement of water resources security: A study and challenge on water resources carrying capacity[J]. Journal of Natural Resources, 2002, 17(3): 262-269. (in Chinese))

[3] 张翔,夏军,贾绍凤.水安全定义及其评价指数的应用[J].资源科学,2005,27(3):145-149.(ZHANG Xiang, XIA Jun, JIA Shao feng. Definition of Water Security and Its Assessment Using Water Poverty Index[J]. Resources Science, 2005, 27(3): 145-149. (in Chinese))

[4] 张翔,夏军,贾绍凤.干旱期水安全及其风险评估研究[J].水利学报,2005,36(9):1138-1142.(ZHANG Xiang, XIA Jun, JIA Shao feng. Water security of drought period and its risk assessment[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2005, 36(9): 1138-1142. (in Chinese))

[5] 张戈丽,王立本,丁世刚.基于 AHP 的济南市水安全评价研究[J].山东师范大学学报:自然科学版,2007,22(3):94-97.(ZHANG Ge li, WANG Li ben, DING Shi gang. A study of water security assessment of Jinan city based on analytic hierarchy process[J]. Journal of Shandong Normal University: Natural Science, 2007, 22(3): 94-97. (in Chinese))

(下转第 1196 页)

- impacts of South to north Water Diversion to water resources allocation in the intake areas[D]. Zhengzhou. Zhengzhou University, 2011. (in Chinese)
- [6] 吴泽宁, 左其亨. 南水北调(中线)工程系统水资源优化配置研究探讨[J]. 南水北调与水利科技, 2002, 23(91): 8-11. (WU Ze ning, ZUO Qi ting. Optimal allocation of water resources of South to North Water Transfer Project (Mid route)[J]. South to North Water Transfers and Water Science & Technology, 2002, 23(91): 8-11. (in Chinese))
- [7] 贾玲, 游进军, 汪林, 等. 南水北调东、中线一期工程水源置换效应情景分析[J]. 南水北调与水利科技, 2014, 12(1): 16-20. (JIA Ling, YOU Jin jun, WANG Lin, et al. Scenario analysis on water source replacement effects of the 1st stage of South to North Water Transfer Project [J]. South to North Water Transfers and Water Science & Technology, 2014, 12(1): 16-20. (in Chinese))
- [8] 河南省水利勘测设计研究有限公司. 南水北调中线河南省受水区城市挤占农业与生态用水返还方案研究报告[R]. 2010. (Henan Water & Power Engineering Consulting Co. Ltd. Program of Return Agricultural and Ecological Water from City Occupied Water in Henan Province Water Receiving District in the East-route and Mid route of South to North Water Transfer Project[R]. 2010. (in Chinese))
- [9] 河北省水利水电第二勘测设计研究院. 河北省南水北调东中线受水区城市挤占农业与生态用水的返还方案研究[R]. 2010. (Hebei Second Water & Power Engineering Survey and Design Institute. Program of Return Agricultural and Ecological Water from City Occupied Water in Hebei Province Water Receiving District in the East route and Mid route of South to North Water Transfer Project[R]. 2010. (in Chinese))
- [10] 水利部水利水电规划设计总院, 水利部南水北调规划设计管理局. 南水北调(东、中线)受水区地下水压采总体方案(报批稿)[R]. 2009. (The Ministry of Water Resources Water Conservancy and Hydropower Planning & Design Institute, Bureau of South to North Water Transfer of Planning, Designing and Management. The Underground Hydraulic Mining Overall Scheme on Water Recipient Areas[R]. 2009. (in Chinese))
- [11] 韩小虎, 刘昀竺, 姚文锋. 南水北调受水区地下水压采工作面临的问题与对策[J]. 中国水利, 2013(22): 23-24. (HAN Xiao hu, LIU Yun zhu, YAO Wen feng. Problems and countermeasures of groundwater mining reduction in water receiving district of South to North Water Transfer Project [J]. China Water Resources, 2013(22): 23-24. (in Chinese))
- [12] 吴泽宁, 董森蕾, 郭瑞丽, 等. 南水北调中线干线口门两部制水价测算及其影响因素分析[J]. 南水北调与水利科技, 2013, 11(6): 148-152. (WU Ze ning, DONG Mia o lei, GUO Rui li, et al. Study on two part water price calculation and its impact factors for main line of Middle Route of South to North Water Diversion Project [J]. South to North Water Transfers and Water Science & Technology, 2013, 11(6): 148-152. (in Chinese))

(上接第 1184 页)

- [6] 李永, 朱明, 李嘉. 基于 Vague 集相似度量模型的城市水安全应急保障能力评价[J]. 水利学报, 2009, 40(5): 608-613. (LI Yong, ZHU Ming, LI Jia. Evaluation method of urban water security assurance capability for emergency rescue based on similarity method of vague sets[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2009, 40(5): 608-613. (in Chinese))
- [7] 王顺久, 李跃清, 丁晶. 基于指标体系的水安全评价方法研究[J]. 中国农村水利水电, 2007(2): 116-119. (WANG Shun jiu, LI Yue qin, DING Jing. Evaluation Method of Water Security Based on Indicator System [J]. China Rural Water and hydro power, 2007(2): 116-119. (in Chinese))
- [8] 王淑云, 刘恒, 耿雷华, 等. 水安全评价研究综述[J]. 人民黄河, 2009, 31(7): 11-13. (WANG Shu yun, LIU heng, GENG lei hua, et al. Review of Water Security Evaluation [J]. Yellow River, 2009, 31(7): 11-13. (in Chinese))
- [9] 王文圣, 李跃清, 金菊良, 等. 水文水资源集对分析[M]. 北京, 科学出版社, 2010. (WANG Wen sheng, LI yue qing, JIN Ju liang, et al. Hydrology and water resources set pair analysis [M]. Beijing, Science Press. 2010. (in Chinese))
- [10] 邱德华. 区域水安全战略的研究进展[J]. 水科学进展, 2005, 16(2): 305-312. (QIU De hua. Research advances in regional water security strategy [J]. Advanced in Water Science, 2005, 16(2): 305-312. (in Chinese))
- [11] 李世玲. 基于投影寻踪和遗传算法的一种非线性系统建模方法[J]. 系统工程理论与实践, 2005, 25(4): 22-28. (LI Shi ling. A nonlinear system modeling method based on projection pursuit and genetic algorithm [J]. Systems Engineering-Theory & Practice, 2005, 25(4): 22-28. (in Chinese))
- [12] 金菊良, 魏一鸣, 丁晶. 水质综合评价的投影寻踪模型[J]. 环境科学学报, 2001, 21(4): 431-434. (JIN Ju liang, WEI Yi ming, DING Jing. Projection pursuit model for comprehension evaluation of water quality [J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2001, 21(4): 431-434. (in Chinese))
- [13] 金菊良, 杨晓华, 丁晶. 基于实数编码的加速遗传算法[J]. 四川大学学报: 工程科学版, 2000, 32(4): 20-24. (JIN Ju liang, YANG Xiao hua, DING Jing. Real coding based acceleration genetic algorithm [J]. Journal of Sichuan University: Engineering Science Edition, 2000, 32(4): 20-24. (in Chinese))
- [14] Ayiomamitis A. Logistic curve fitting and parameter estimation using nonlinear noniterative least squares regression analysis [J]. Computers and Biomedical Research, 1986, 19(2): 142-50.
- [15] 程毛林. 逻辑斯蒂曲线的几个推广模型与应用[J]. 运筹与管理, 2003, 12(3): 85-88. (CHENG Mao lin. Extension and application of logistic curve [J]. Operations Research and Management Science, 2003, 12(3): 85-88. (in Chinese))