

水资源安全综合评价与预测

——基于浙江省台州市实证分析

张自英¹, 潘万贵¹, 黄涛², 林海波¹

(1. 台州职业技术学院, 浙江 台州 318000; 2. 长安大学 旱区地下水文与生态效应教育部重点实验室, 陕西 西安 710054)

摘要: 水安全关乎一个城市社会、经济各方面的协调发展。以台州市为例, 采用“压力-状态-响应(PSR)”模式建立水安全评价指标体系, 通过层次分析法(AHP)获得各指标的权重, 以“边际效益递减”原理求得各指标的子安全度, 结合综合指数法对台州市2011-2015年水安全状况进行综合评价。结果表明: 台州市该阶段的水安全情况处于基本安全状态, 化学需氧量、河流污染百分比、年降雨量、城市用水重复率是台州市水安全状况的主要影响因素。以灰色预测GM(1,1)模型对台州市水安全情况进行预测, 预测结果显示: 台州市2016-2020的水安全状态仍处于基本安全状态, 且呈逐年上升向安全状态转化的趋势。

关键词: 城市水安全; 评价指标; 层次分析法; GM(1,1)模型; 台州市

中图分类号: TV213.4; X824

文献标识码: A

文章编号: 1672-643X(2017)04-0070-05

Comprehensive evaluation and prediction of water security: An empirical analysis based on Taizhou city of Zhejiang Province

ZHANG Ziyang¹, PAN Wangui¹, HUANG Tao², LIN Haibo¹

(1. Taizhou Vocational & Technical College, Taizhou 318000, China; 2. Key Laboratory of Subsurface Hydrology and Ecological Effects in Arid Region (Chang'an University), Ministry of Education, Xi'an 710054, China)

Abstract: Water security is related to the coordinated development of all aspects of urban society and economy. Taking Taizhou city as an example, this paper establishes the evaluation index system of water security by using PSR model. The index weights was obtained by the analytic hierarchy process and the safety degree of each index was acquired based on the principle of diminishing marginal benefit, and the comprehensive index method was used to evaluate the water security of Taizhou city from 2011 to 2015. The results show that the water security situation is in a safe state, and chemical oxygen demand, annual rainfall, river pollution percentage, and urban water reuse rate are the main influencing factors of water security. We also predicted the future water security of Taizhou city by using the Grey Prediction GM(1,1) model. The forecasting results show that the water security status of Taizhou from 2015 to 2020 is still in a basic safety state, and the trend is increasing year by year to the full safety state.

Key words: urban water security; evaluation index; analytic hierarchy process; GM(1,1) model; Taizhou

1 研究背景

进入21世纪以来,城市水安全问题与社会经济发展的联系愈加密切,是区域水安全及城市生态安全的重要研究对象,也是城市发展进程中一项战略性课题^[1]。城市水安全问题已受到学术界广泛关注与重视,但具体研究仍凸显不足^[2]。多年来水资

源承载力对城市发展的影响是该研究的主要侧重方面。靳英华等^[3]对于松辽平原水资源承载力的现状与相应的水安全对策进行了研究;赵然行^[4]建立了Vague集近似转化Fuzzy集的方法与模型实现了上海市水资源承载力的模糊评价;赵亚峰等^[5]在水资源可利用量的基础上应用了多目标情景分析法对银川市不同经济发展阶段的水资源承载力进行了评

收稿日期:2017-03-30; 修回日期:2017-05-03

基金项目:浙江省台州市哲社项目(16GHY04);浙江省自然科学基金项目(LY14E050001);台州市科技计划项目(1701gy24)

作者简介:张自英(1986-),女,浙江台州人,硕士研究生,讲师,工程师,从事水环境污染修复与控制研究。

通讯作者:潘万贵(1962-),男,浙江台州人,硕士,副研究员,从事化学工程、污水处理工程。

价;王丽婧等^[6]通过对水资源承载力的计算以及环境承载力对比分析,探讨了三峡库区生态承载力的现状与承载力的变化趋势。水安全评价是一个非常复杂的问题,其研究涉及社会经济与生态环境等多方面因素,而不仅限于城市的水资源状况与水环境承载力问题^[7]。韩奇等^[8]从水资源与水环境系统、社会经济系统的定量关系入手,建立系统动力学预警模型从而实现了水安全的中长期定量分析。贾绍凤等^[9]提出了如何构建水资源安全评价的指标体系;夏军^[10]分析了水循环基础研究与水安全管理的相互关系与相互作用;李成艾等^[11]以生态文明视角

构建了城市水安全评价指标体系。此外,我国的城市水安全研究多侧重于北方城市且研究角度单一,对南方湿热地区的城市水安全及全方位、多视角的研究相对薄弱^[12]。

本文根据浙江省台州市社会经济与水资源现状,采用“压力-状态-响应”模式(PSR模式)模式建立台州市水安全评价指标体系,根据“边际效益递减”原理计算各指标的子安全度,结合综合指数法对水安全状况进行综合评价;采用灰色预测GM(1,1)模型对水安全进行预测,从而为南方湿热型城市的水安全研究提供参考。

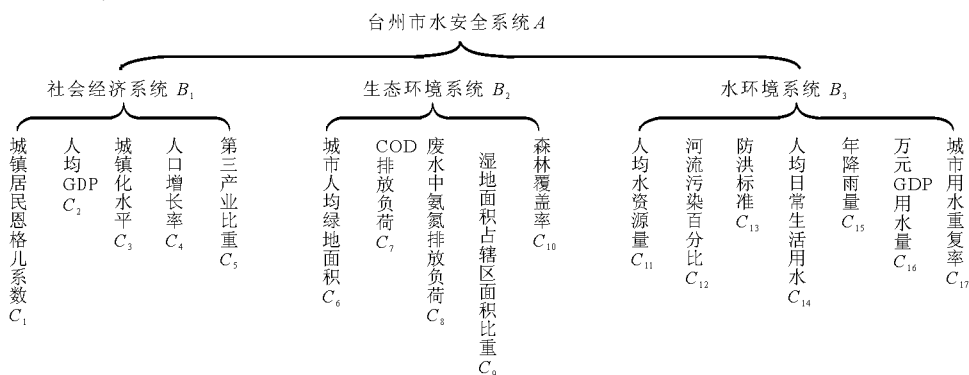


图1 台州市水安全指标体系框架

2 水安全研究方法

2.1 水安全指标体系的建立

水安全指标的选取依据区域性、科学性、代表性、定性与定量相结合、动态与静态相结合以及可操作性七大原则,结合台州市实际情况和资料获取的难易程度选取了17个指标来描述台州市的水安全状况,建立了基于PSR模式^[13]的指标体系,如图1所示。

2.2 层次分析法(AHP)计算权重

本文采用层次分析法^[1]来确定水安全综合评价指标的权值。此方法将诸评价指标按照隶属关系划分为若干层次,以数学方法得出各层次各要素的相对重要性权重,并进行层次单排序和层次总排序的检验,要求判断矩阵的随机一致性比例CR均小于0.1。现构造台州市判断矩阵如下:

$$A = \begin{bmatrix} 1 & 1/2 & 1/4 \\ 2 & 1 & 1/2 \\ 4 & 2 & 1 \end{bmatrix}$$

$$B_1 = \begin{bmatrix} 1 & 1/5 & 1/4 & 1/4 & 1/8 \\ 5 & 1 & 3 & 4 & 1/5 \\ 4 & 1/3 & 1 & 1/2 & 1/3 \\ 4 & 1/4 & 2 & 1 & 1/5 \\ 8 & 3 & 4 & 5 & 1 \end{bmatrix}$$

$$B_2 = \begin{bmatrix} 1 & 1/5 & 1/4 & 1/3 & 4 \\ 5 & 1 & 1 & 3 & 6 \\ 4 & 1 & 1 & 2 & 6 \\ 3 & 1/3 & 1/2 & 1 & 5 \\ 1/4 & 1/6 & 1/6 & 1/5 & 1 \end{bmatrix}$$

$$B_3 = \begin{bmatrix} 1 & 3 & 2 & 2 & 1 & 1 & 1/3 \\ 1/3 & 1 & 4 & 6 & 2 & 3 & 1 \\ 1/2 & 1/4 & 1 & 2 & 1/3 & 1/2 & 1/4 \\ 1/2 & 1/6 & 1/2 & 1 & 1/4 & 1/3 & 1/6 \\ 1 & 1/2 & 3 & 4 & 1 & 2 & 1 \\ 1 & 1/3 & 2 & 3 & 1/2 & 1 & 1/4 \\ 3 & 1 & 4 & 6 & 1 & 4 & 1 \end{bmatrix}$$

用excel计算各判断矩阵A、B₁、B₂、B₃的CR值分别为0.0726、0.0965、0.0455、0.0791,均小于0.1。由此,层次单排序具有满意的一致性,层次总排序结果也具有满意的一致性,并得到各指标权重见表1。

2.3 指标子安全度的计算

应用“边际效益递减”原理^[14]建立各指标子安全度的计算模型。

2.3.1 以对数函数作为评价函数

$$y = a + b \lg x \tag{1}$$

式中:a、b均为参数;x为指标数值;y为安全度值。x取最差值时,y取0;x取及格值时,y取0.6;x取最优

值时, y 取 1.0, 由此确定出各指标的评价函数。

2.3.2 各指标核算标准的确定及安全度值的计算

各指标标准值的确定一般应该遵循下列原则:

(1)以国际标准或国家标准值为准;(2)参考国内具有代表性城市的现状值;(3)参考发达国家或地区的现状值;(4)国家现有的统计资料平均值可作为标准值;(5)可用类似标准代替当前无确切标准值的指标。根据上述 5 项原则,确定了台州市水安全评价体系中各指标的核算标准,见表 1。

2.3.3 评价模型的确定及安全度的计算 将表 1 中各指标核算标准代入公式(1)可确定各指标的评价模型,见表 2。在进行城市水安全评价时,把各个

指标每 1 年的实际数值(数据源于台州市 2011 - 2015 年统计年鉴及水利公报)代入对应指标子安全度的评价模型中(见表 2),即可得各年份各个指标的得分情况,见表 1。

2.4 水安全综合评价指数的计算

水环境安全综合评价指数是由系统各层元素安全度值与相应权重进行加权计算而得,其模型公式:

$$E = \sum_{i=1}^n (E_i \times W_i) \quad (2)$$

式中: E 为水安全综合评价指数; E_i 为指标层第 i 个元素的安全度值; W_i 为指标层第 i 个元素的权重; n 为指标层元素的个数。

表 1 台州市 2011 - 2015 年各评价指标核算标准、权重及得分情况

指标	核算标准			权重	得分情况				
	最差值	及格值	最优值		2011 年	2012 年	2013 年	2014 年	2015 年
城镇居民恩格尔系数/%		0.4	0.2	0.007	0.667	0.760	0.766	0.743	0.743
人均 GDP/10 ⁴ 元	0.22	2.4		0.040	0.866	0.878	0.896	0.910	0.923
城镇化水平/%		48	73	0.016	0.469	0.473	0.478	0.481	0.799
人口增长率/‰		17	3.5	0.020	0.065	0.063	0.076	0.070	0.028
第三产业比重/%		40	80	0.060	0.765	0.768	0.770	0.759	0.780
城市人均绿地面积/m ²	0.01	8		0.025	0.624	0.630	0.633	0.635	0.638
化学需氧量排放负荷/(mg · L ⁻¹)		100	60	0.105	0.574	0.575	0.576	0.577	0.581
废水中氨氮排放负荷/(mg · L ⁻¹)		25	15	0.482	0.500	0.541	0.578	0.609	0.092
湿地面积占辖区面积比重/%	0.5	6.4		0.051	0.942	0.948	0.955	0.962	0.967
森林覆盖率%	1	30		0.012	0.517	0.520	0.528	0.534	0.540
人均水资源量 /m ³	100	1700		0.084	0.401	0.405	0.335	0.395	0.315
河流污染百分比/%	100		6	0.120	0.364	0.372	0.376	0.390	0.398
防洪标准/a	20		100	0.036	1.000	0.569	0.569	1.000	1.000
人均日常生活用水/kg	80		180	0.569	0.521	0.597	0.645	0.645	0.028
年降雨量/mm	800	1450		0.941	0.959	0.701	0.601	0.601	0.098
万元 GDP 用水量/m ³		450	100	0.057	0.591	0.467	0.576	0.541	0.625
城市用水重复率/%	10		100	0.154	0.653	0.663	0.699	0.708	0.724

表 2 指标评价函数

指标	评价函数	指标	评价函数
城镇居民恩格尔系数	$y = 0.0712 - 1.3288 \lg x$	森林覆盖率	$y = -6.6537 + 0.4062 \lg x$
人均 GDP	$y = 0.3802 + 0.578 \lg x$	人均水资源量	$y = -0.9750 + 0.4870 \lg x$
城镇化水平	$y = -3.0933 + 2.1968 \lg x$	河流污染百分比	$y = 1.6368 - 0.8184 \lg x$
人口增长率	$y = 0.7343 - 0.5828 \lg x$	防洪标准	$y = -1.8614 + 1.4307 \lg x$
第三产业比重	$y = -1.5288 + 1.3288 \lg x$	人均日常生活用水	$y = -11.8060 + 5.679 \lg x$
城市人均绿地面积	$y = 0.4133 + 0.2067 \lg x$	年降雨量	$y = -6.7442 + 2.3230 \lg x$
化学需氧量排放负荷	$y = 2.0176 - 0.5732 \lg x$	万元 GDP 用水量	$y = 2.2248 - 0.6124 \lg x$
废水中氨氮排放负荷	$y = 1.8997 - 0.7650 \lg x$	城市用水重复利用率	$y = -1 + \lg x$
湿地占辖区面积比重	$y = 0.1631 + 0.5419 \lg x$		

3 台州市 2011—2015 年水安全评价

3.1 水安全等级的划分

水安全状态分级一般分为 3、4、5 等多种级别。参照国内外专家学者的研究成果,结合社会经济发展水平,水安全情况划分为 4 个级别,分级标准如表 3 所示。

表 3 水安全状态分级标准

$0 < E \leq 0.2$	$0.2 < E \leq 0.5$	$0.5 < E \leq 0.7$	$0.7 < E \leq 1$
很不安全(Ⅰ)	不安全(Ⅱ)	基本安全(Ⅲ)	安全(Ⅳ)

(1)级别Ⅰ:很不安全。水环境、水资源系统恶化严重,濒临崩溃,水量相当短缺,干旱、洪涝等灾害频发,水质重度污染,水环境功能丧失。

(2)级别Ⅱ:不安全。水量短缺,水质污染比较严重,水环境功能退化,水资源和水环境系统不能与社会、经济协调发展。

(3)级别Ⅲ:基本安全。水量供给维持在临界状态,存在水质污染的现象,水体具有一定的恢复能力,水资源和水环境系统与社会、经济能健康协调发展。

(4)级别Ⅳ:安全。水量充足,水质良好,水环境功能优良,且不易受到影响,水资源和水环境系统与社会、经济健康协调高效发展。

3.2 水安全评价

由表 1 层次分析法所得各评价指标的权重可知,台州市水安全状况的主要影响因素是化学需氧量、河流污染百分比、年降雨量、城市用水重复率。通过水安全综合评价指数法得到台州市 2011—2015 年水安全综合评价指数,见表 4。

表 4 台州市 2011—2015 年的水安全综合评价指数

2011	2012	2013	2014	2015
0.6148	0.6163	0.6262	0.6260	0.6350

由表 4 中数据可知,台州市 2011—2015 年的水环境均处于基本安全状态,并呈现出小幅度上升的趋势,说明研究区水体还具有一定的恢复能力水量,但供给维持在临界状态,存在水质污染的现象。这是由于台州市核心区位于平原河网下游,既要依靠上游河网提供补给水源,又承担着上游平原涝水外排的任务。根据近年上游河网水质监测资料分析,丰、枯水期上游河网的水质大多为Ⅴ类—劣Ⅴ类,上下河网连通,核心区水体不可避免将受到外河污水的影响;此外,各工商企业、服务业、生活生产活动产生的污水及以降尘为主的初期雨水直接入河,也对

水生态环境产生极大影响。

4 台州市 2016—2020 年水安全预测

4.1 灰色预测 GM(1,1)模型^[15]

灰色预测 GM(1,1)模型对应的微分方程为:

$$dX^{(1)}/dt + aX^{(1)} = b \quad (3)$$

式中: $X^{(1)}$ 为 n 个序列值累加而生的新序列; t 为第 n 个序列的值; a 为发展系数; b 为灰作用量。利用最小二乘法求解参数向量为:

$$\hat{a} = (B^T B)^{-1} B^T Y = \begin{pmatrix} a \\ b \end{pmatrix} \quad (4)$$

式中: B 为数据矩阵; Y 为数据向量。

预测模型表达式为:

$$\hat{X}^{(1)}(k+1) = [X^{(0)}(1) - b/a] + b/a \quad (5)$$

$$k = 1, 2, \dots, n$$

$$\hat{X}^{(0)}(k+1) = \hat{X}^{(1)}(k+1) - \hat{X}^{(1)}(k) \quad (6)$$

$$k = 1, 2, \dots, n$$

计算后验差检验模型精度为:

$$C = S_2/S_1 \quad (7)$$

式中: C 为后验差比值; S_2 为残差方差; S_1 为 $X^{(0)}$ 的方差。预测精度等级对照表见表 5。

表 5 预测精度等级对照表

好	合格	勉强	不合格
$C < 0.35$	$C < 0.45$	$C < 0.50$	$C \geq 0.65$

4.2 灰色模型精度检验

灰色预测 GM(1,1)模型的模拟结果见表 6、图 2。从表 6 和图 2 可以看出,模拟结果的相对误差为 0.122%~0.5053%、平均相对误差为 0.2482%,且未出现异常拟合结果,模拟结果较接近实际情况,表明模拟水安全度与实际水安全度的拟合程度较好。为进一步检验预测模型的准确性,需对其进行误差分析。灰色预测 GM(1,1)模型精度检验结果见表 7。由表 7 可看出,后验差比值 $C = 0.13$,即精度等级为好,表明灰色预测 GM(1,1)模型可用于预测分析。

4.3 台州市 2016—2020 年水安全预测

采用已验证的灰色预测 GM(1,1)模型对台州市 2016—2020 年的水安全情况进行预测,由式(4)计算出 a 、 b 后代入式(5)获得预测公式为:

$$\hat{X}^{(1)} = 69.0775e^{0.0089t} - 68.4607 \quad (8)$$

式中: t 为 2016—2020 年与 2011 年的时间间隔。

表6 灰色预测 GM(1,1)模型模拟结果统计

年份	t	台州市水安全度				误差	相对 误差/%
		$X^{(0)}$	$X^{(1)}$	$\hat{X}^{(1)}$	$\hat{X}^{(0)}$		
2011	1	0.6148	0.6148	0.6148	0.6148	0.0000	0.0000
2012	2	0.6163	1.2311	1.2323	0.6175	-0.0012	0.1972
2013	3	0.6262	1.8573	1.8554	0.6230	0.0032	0.5053
2014	4	0.6260	2.4833	2.4840	0.6286	-0.0026	0.4163
2015	5	0.6350	3.1182	3.1182	0.6342	0.0008	0.1220

表7 灰色预测 GM(1,1)模型精度检验

$X^{(0)}$ 均值	S_1	残差均值	S_2	C	精度等级
0.6237	0.165	0.0001	0.0022	0.013	好

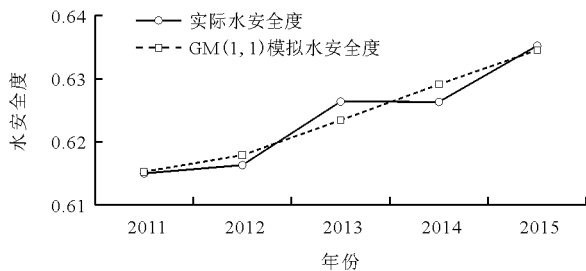


图2 灰色预测 GM(1,1)模型模拟结果

由预测公式计算出台州市 2016 - 2020 年的水安全度分别为 0.6472, 0.6566, 0.6661, 0.6758, 0.6856, 均处于基本安全状态, 呈逐年上升向安全状态转化的趋势, 表明台州市未来几年水安全状况持续改善, 水资源和水环境系统与社会、经济健康协调高效发展, 水量充足, 水质良好, 水环境功能优良且不易受到影响。这是近年来台州市旨在打造以水为载体, 以 IV 类以上的水质为目标, 进而呈现水城交融共生的新城风貌的结果。

5 结论

本文根据浙江省台州市社会经济与水资源现状, 对其水安全进行综合评价与预测, 初步得到以下结论:

(1) 台州市 2011 - 2015 年的水安全状态处于基本安全状态。影响台州市水环境安全的主要因子是化学需氧量排放负荷、河流污染百分比、年降雨量、城市用水重复率。

(2) 灰色预测 GM(1,1) 模型结果显示台州市 2016 - 2020 年的水环境仍处于基本安全状态, 且呈逐年上升向安全状态转变的趋势, 即台州市未来几年的经济社会系统、生态系统、水环境系统会协调发

展, 水环境将会总体处于水量充足, 水质良好, 水体功能优良的状态。

参考文献:

- [1] 陈琳, 邹添丞, 石杰, 等. 基于层次分析法的成都市水安全评价[J]. 南水北调与水利科技, 2013, 11(4): 41 - 45.
- [2] 史正涛, 刘新有. 城市水安全研究进展与发展趋势[J]. 城市规划, 2008, 32(7): 82 - 87.
- [3] 靳英华, 秦丽杰, 刘辉, 等. 松辽流域水资源承载力与安全对策研究[J]. 东北师大学报(自然科学版), 2005, 37(4): 121 - 126.
- [4] 赵然杭. 基于 Vague - Fuzzy 理论的城市水安全承载力评价研究[J]. 水力发电学报, 2010, 29(2): 90 - 93 + 101.
- [5] 赵亚峰, 汪一鸣, 王永洁. 银川市水资源承载力多目标情景分析[J]. 宁夏大学学报(自然科学版), 2008, 29(3): 272 - 276.
- [6] 王丽婧, 李虹, 郑丙辉, 等. 三峡库区生态承载力探讨[J]. 环境科学与技术, 2014, 37(11): 169 - 174 + 179.
- [7] 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.
- [8] 韩奇, 谢东海, 陈秋波. 社会经济 - 水安全 SD 预警模型的构建[J]. 热带农业科学, 2006, 26(1): 31 - 34 + 84.
- [9] 贾绍凤, 张军岩, 张士峰. 区域水资源压力指数与水资源安全评价指标体系[J]. 地理科学进展, 2002, 21(6): 538 - 545.
- [10] 夏军. 华北地区水循环与水资源安全: 问题与挑战[J]. 地理科学进展, 2002, 21(6): 517 - 526.
- [11] 李成艾, 孟祥霞. 生态文明视角下城市水安全评价指标体系的构建[J]. 城市环境与城市生态, 2014, 27(2): 5 - 9.
- [12] 史正涛, 刘新有. 城市水安全研究进展与发展趋势[J]. 城市规划, 2008, 32(7): 82 - 87.
- [13] 冉启英, 李宁. 基于压力 - 状态 - 响应模型的生态安全评价——以新疆为例[J]. 生态经济(中文版), 2015, 31(7): 114 - 117.
- [14] 史正涛, 刘新有, 黄英, 等. 基于边际效益递减原理的城市水安全评价方法[J]. 水利学报, 2010, 41(5): 545 - 552.
- [15] 朱登远, 常晓凤. 灰色预测 GM(1,1) 模型的 Matlab 实现[J]. 河南城建学院学报, 2013, 22(3): 40 - 46.