

DOI: 10.16198/j.cnki.1009-640X.2015.04.015

戴文渊, 张芮, 成自勇, 等. 白银市水生态安全评价研究[J]. 水利水运工程学报, 2015(4): 92-97. (DAI Wen-yuan, ZHANG Rui, CHENG Zi-yong, et al. Hydroecological safety evaluation for Baiyin city[J]. Hydro-Science and Engineering, 2015(4): 92-97.)

## 白银市水生态安全评价研究

戴文渊<sup>1</sup>, 张芮<sup>1</sup>, 成自勇<sup>1</sup>, 宋众艳<sup>2</sup>, 刘静霞<sup>1</sup>, 马奇梅<sup>1</sup>

(1. 甘肃农业大学 工学院, 甘肃 兰州 730070; 2. 东北大学 理学院, 辽宁 沈阳 110000)

**摘要:** 研究影响白银市水生态安全的主要影响因子, 为白银市水生态安全城市建设服务, 同时为白银市水生态安全管理提供理论依据。采用基于模糊系统分析的方法对白银市水生态安全评价指标进行分析优化, 运用模糊综合评价的方法对白银市水生态安全状况模糊综合评价, 并对白银市各县区水生态安全状况分级。经模糊系统分析得到了影响白银市水生态安全的主要影响因子, 模糊综合评价后得出了白银市各县区水生态安全状况排序。白银市水生态安全城市建设过程中, 蒸发量、万元增加值用水量、污水处理达标率、GDP、固定资产投资、年均降雨量、城镇居民可支配收入这几个指标对水生态安全的影响尤为突出, 白银市各县区水生态安全状况发展不均衡, 水生态安全城市建设还面临严峻挑战, 应引起城建管理部门高度重视。

**关键词:** 白银市; 模糊系统分析; 水生态安全; 模糊综合评价; 城市建设

**中图分类号:** X171

**文献标志码:** A

**文章编号:** 1009-640X(2015)04-0092-06

生态安全指一定尺度上气候、水、空气、土壤等环境和生态系统的完整性和健康水平, 与国防安全、经济安全同等重要, 是国家安全的重要基石。饮用水安全难以得到有效保障, 区域水生态安全形势不容乐观, 水生态安全问题的存在直接威胁到区域社会经济的可持续发展<sup>[1]</sup>。目前我国关于水生态安全方面的研究已经较多, 黄昌硕等<sup>[3-5]</sup>就城市化进程中的水生态安全问题, 城市水生态文明城市建设指标体系的构建进行了研究, 基本解决了关于水生态安全的一些定性概念、内涵及对策问题。李万莲等<sup>[1, 6-7]</sup>分别应用不同的评价指标模型对城市水安全状况进行了评价分析, 在专家打分的基础上, 对影响水生态安全的指标进行打分, 得到了权重。李橙等<sup>[8]</sup>运用灰色关联度和模糊综合评价方法对河北省主产葡萄品质评价方面进行了研究, 得出模糊综合评价在葡萄品质评价中优于灰色关联分析的结论。李辉<sup>[9]</sup>应用模糊系统分析和模糊综合评价的方法对辽宁省 14 个市区生态安全状况进行评价分析, 得到了客观合理的评价结果。水生态安全评价方面的研究方法多为传统的层次分析法、综合指数法、主成分分析法等, 缺乏一定的创新。关于水生态安全评价本身存在模糊性和不确定性, 因此, 本文运用基于模糊系统分析和模糊综合评价的方法, 评价研究白银市水生态安全也就具有了独特的理论优势。

### 1 研究方法的提出

白银市毗邻省会兰州, 自然区划上属陇西黄土高原向腾格里沙漠过渡地带, 全市地形地貌复杂, 水资源匮乏与水土流失并存。由于自然及人类因素影响导致土地沙漠化, 黄河白银段地表水环境污染尚未得到有

收稿日期: 2015-01-17

基金项目: 甘肃省青年科技基金资助项目(1208RJYA017); 甘肃省教育厅项目: 兰州市水资源节约集约与水生态文明城市建设研究(2014A-054); 兰州市社科规划项目: “兰州市水生态文明研究”(13-048F)

作者简介: 戴文渊(1989—), 男, 甘肃白银人, 硕士研究生, 主要从事生态水利和节水灌溉方面的研究。

E-mail: daiwybaxia@163.com 通信作者: 张芮(E-mail: 873850358@qq.com)

效控制,森林覆盖率增速缓慢,城市环境空气污染加重,以旱灾为主要特征的自然灾害扩大,农业生态环境和农村生态环境受到污染。城市水生态安全形势严峻,势必影响到该市的区域社会经济的可持续发展,为了弄清两者间的因果关系,运用模糊系统分析结合模糊综合评价的方法,对白银市水生态安全评价指标进行分析优化。

### 1.1 白银市水生态安全评价指标体系构建

由于水生态安全的评价是多指标的综合评价,存在一定的模糊性和不确定性,受人类经济社会活动和自然生态影响较大,主要从指标的可获得性和准确可靠性出发,同时参照前人研究成果,在对前人关于水生态安全评价指标体系深入研究基础上<sup>[10-16]</sup>,选取了16个具有典型性代表白银市水生态环境状况的指标,构建了一个与水有关的,涵盖经济、环境、生态的水生态安全评价指标体系(见表1)。

由于水生态安全评价是多指标综合评价,指标涉及范围广,需要将数据按比例缩放,使之落入到一个小的特定区间0~1之间,即对数据的归一化,使各指标无量纲化,称为评价指标数据的标准化处理,公式如下:

$$\mu_{ik} = (\max x_i - x_{ik}) / (\max x_i - \min x_i) \quad (1)$$

$$\mu_{jk} = (x_{ik} - \min x_i) / (\max x_i - \min x_i) \quad (2)$$

式中: $\mu_{ik}$ 为第*i*城市第*k*指标标准化值; $x_{ik}$ 为第*i*城市第*k*指标值; $\max x_i$ 为第*i*城市评价指标最大值; $\min x_i$ 为第*i*城市评价指标最小值。对于越大越安全的指标采用式(1),越小越安全的指标采用式(2)。

表1 白银市各县区水生态安全评价指标数据标准化

Tab.1 Data standardization of index system of hydroecological safety evaluation for Baiyin city

编号	指标	白银区	平川区	靖远县	会宁县	景泰县
1	蒸发量	0.224 2	0.047 7	0.000 8	0	1.000 0
2	万元增加值用水量	0.205 1	1.000 0	0.564 1	0	0.435 9
3	耕地面积	1.000 0	0.047 5	0.346 5	0	0.187 8
4	有效灌溉面积	0.143 2	1.000 0	0	0.489 2	0.607 3
5	人口	0.197 5	1.000 0	0.687 1	0	0.051 0
6	GDP	1.000 0	0.180 1	0.046 3	0	0.015 7
7	城镇居民可支配收入	1.000 0	0.904 0	0.132 1	0	0.166 5
8	农民纯收入	0.785 7	0.035 9	0	1.000 0	0.153 9
9	城乡参合率	0.272 7	1.000 0	0.681 8	0.577 3	0
10	固定资产投资	1.000 0	0.061 0	0	0.057 8	0.036 2
11	污水处理达标率	1.000 0	0	0	0	0
12	森林覆盖率	1.000 0	0.200 0	0.400 0	0.280 0	0
13	可用水资源量	0.065 0	0.136 5	1.000 0	0	0.927 1
14	降雨量	0.034 8	0.059 9	0.219 6	1.000 0	0
15	第三产业比重	1.000 0	0	0.916 1	0.956 9	0.644 0
16	农业增加值	0.159 3	0	1.000 0	0.678 7	0.336 6

### 1.2 白银市水生态安全评价指标模糊系统分析

建立模糊矩阵  $R$ ,将标准化数据  $\mu_{ik}$  和  $\mu_{jk}$  代入:

$$\begin{cases} \gamma_{ij} = \sum_{k=1}^m \mu_{ik}\mu_{jk} & (i \neq j) \\ \gamma_{ij} = 1 & (i = j) \end{cases} \quad (3)$$

式中: $m$ 为评价指标总数。由此构造的矩阵  $(\gamma_{ij})_{n \times n}$  称为模糊矩阵。

建立模糊相关矩阵  $U$ ,以相关隶属函数表征矩阵元,构造的矩阵为模糊相关矩阵,记为:

$$U = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & \cdots & a_{1n} \\ a_{21} & a_{22} & \cdots & a_{2n} \\ \vdots & \vdots & & \\ a_{n1} & a_{n2} & \cdots & a_{nn} \end{bmatrix} \quad (4)$$

式中:  $a_{ij}$  为模糊矩阵元;  $a_{ij} \in [0, 1]$ 。

$$a_{ij} = \frac{\sum_{k=1}^m (\mu_{ik} - \bar{\mu}_i)(\mu_{jk} - \bar{\mu}_j)}{\sqrt{\sum_{k=1}^m (a_{ik} - \bar{a}_i)^2 \sum_{k=1}^m (a_{jk} - \bar{a}_j)^2}} \quad (5)$$

式中:  $\bar{a}_i = \frac{1}{m} \sum_{k=1}^m a_{ik}$ ;  $\bar{a}_j = \frac{1}{m} \sum_{k=1}^m a_{jk}$ ;  $i, j, k = 1, 2, \dots, m$ ;  $a_{ik}$  为第  $i$  城市第  $k$  指标值,  $a_{jk}$  为第  $j$  城市第  $k$  指标值。

根据所建立的模糊相关矩阵  $U$ , 以最大矩阵元所在行得各指标置信水平; 在相关矩阵  $U$  中最大矩阵元所在行的值即为各指标的置信水平值, 求得各指标的置信水平。白银市水生态安全评价指标的置信水平见表 2。

表 2 白银市水生态安全评价指标置信水平

Tab. 2 Confidence level of index system of hydroecological safety evaluation for Baiyin city

指标编号	置信水平	指标编号	置信水平	指标编号	置信水平	指标编号	置信水平
1	0.274 1	5	0.573 2	9	0.457 4	13	0.497 9
2	0.316 3	6	0.332 1	10	0.340 3	14	0.376 3
3	0.440 2	7	0.387 5	11	0.315 5	15	1.000 0
4	0.605 3	8	0.581 0	12	0.515 6	16	0.612 6

根据模糊矩阵最大矩阵元定理, 由式(6)得到白银市水生态安全评价指标权重, 表 3 为白银市水生态安全评价指标体系指标权重。

$$W_k = \frac{1 - \lambda_k}{\sum_{k=1}^n (1 - \lambda_k)} \quad (6)$$

式中:  $W_k$  为第  $k$  指标权重;  $\lambda_k$  为第  $k$  指标置信水平,  $i = 1, 2, \dots, n$ 。

表 3 白银市水生态安全评价指标体系指标权重

Tab. 3 Index weights of index system of hydroecological safety evaluation for Baiyin city

指标编号	权重	指标编号	权重	指标编号	权重	指标编号	权重
1	0.086 7	5	0.051 0	9	0.064 8	13	0.060 0
2	0.081 7	6	0.079 8	10	0.078 8	14	0.074 5
3	0.066 9	7	0.073 2	11	0.081 9	15	0
4	0.047 2	8	0.050 1	12	0.057 9	16	0.045 8

### 1.3 白银市水生态安全状况模糊综合评价

用白银市水生态安全评价指标体系对白银市的水生态安全状况进行模糊综合评价, 综合评价是因素权重向量与模糊矩阵合成的结果。即:

$$Y = R \times X = (y_1, y_2, \dots, y_n)^T \quad (7)$$

式中:  $Y$  为评价向量;  $R$  为标准化的评价指标矩阵;  $X$  为评价权重向量。

由式(7), 根据表(1)和(3)计算得到白银市各县区水生态安全状况评价向量:

$$Y = (0.562\ 3, 0.363\ 4, 0.307\ 2, 0.323\ 7, 0.174\ 5)^T$$

## 2 评价结果分析

### 2.1 白银市水生态安全综合评价指数影响

从评价结果来看,白银市的5个县(区)中,其水生态安全综合评价指数,白银区、平川区、靖远县、会宁县、景泰县依次为:0.562 3,0.363 4,0.307 2,0.323 7和0.174 5。可以很明显看出白银区水生态安全状况最好,景泰县水生态安全状况相较而言最差。

### 2.2 白银市水生态安全综合评价指数整体趋势

城市水生态安全状况的分级凸显了城市水生态安全状况的层次性,有利于促进城市产业结构因地制宜合理发展,从而采取区别化的政策措施,有力提升城市水生态安全层级。参考前人研究成果<sup>[11]</sup>及白银市水生态安全实际状况,按照评价向量可以将评价结果分为3级: $y \geq 0.45$ 为Ⅰ级(较好), $0.3 \leq y < 0.45$ 为Ⅱ级(一般), $y < 0.3$ 为Ⅲ级(较差)。所以,白银市各县(区)中,白银区水生态安全状况为Ⅰ级,平川区、靖远县、会宁县水生态安全状况为Ⅱ级,景泰县水生态安全状况为Ⅲ级。

### 2.3 白银市水生态安全综合评价指标与相关分析

由白银市水生态安全评价综合指数与各指标相关分析(图1)可以找出影响城市水生态安全的主要影响因素。将影响白银市水生态安全的影响因子沿横坐标从大到小排列,从白银市水生态安全评价指标累计贡献率图(图2)中可以看出,蒸发量、万元增加值用水量、污水处理达标率、GDP、固定资产投资、年均降雨量、城镇居民可支配收入这几个指标对水生态安全综合指标影响较大,其累计贡献率可达62%。

根据相关分析,显著影响白银市水生态安全状况的前11个指标(图2)的累计贡献率达到了81%,能够基本反映白银市水生态安全状况的绝大部分信息,同时基于白银市水生态安全实际状况及指标的可靠性与准确性出发,将16指标组成的水生态安全评价指标进行优化,剔除对白银市水生态安全状况影响较小的指标(5,8,4,16和15),得到了11指标组成的白银市水生态安全评价指标体系,并用优化后的评价指标体系对白银市水生态安全状况进行模糊综合评价,由式(7)得: $Y = (0.419\ 1, 0.181\ 7, 0.226\ 4, 0.380\ 1, 0.120\ 1)^T$ 。

## 3 结 语

对白银市水生态安全状况进行模糊综合评价,得出:白银市各县(区)中水生态安全状况白银区相较而言最好,景泰县最差;白银区水生态安全状况较好,这与白银区是白银市政治经济文化中心,基于本身的地理区位优势及政策支持有关;而景泰县在白银市各县(区)中年均蒸发量最大,靠近沙漠地带,生态环境本身比较脆弱。在对城市水生态安全状况模糊综合评价之后,进行了白银市水生态安全评价综合指数与各指标相关分析,找出了主要影响因素。从影响白银市水生态安全的这些主要影响因素中可以看出,白银市水生态安全状况发展受自然环境(蒸发量,年均降雨量),经济社会发展

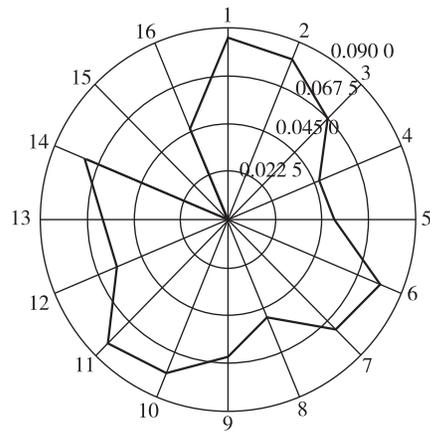


图1 白银市水生态安全评价综合指数与各指标相关分析  
Fig.1 Correlation analysis of hydroecological safety composite index and sub-items index of Baiyin city

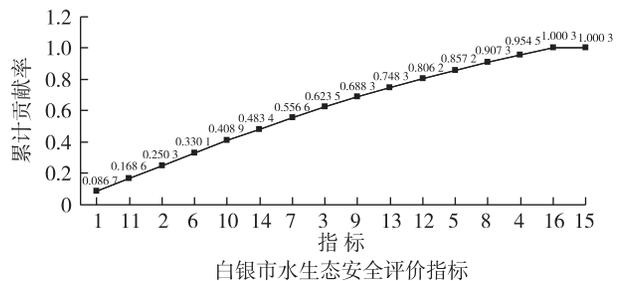


图2 白银市水生态安全评价指标累计贡献率  
Fig.2 Cumulative percentage of hydroecological safety evaluation index of Baiyin city

水平(万元增加值用水量、污水处理达标率、GDP、固定资产投资、城镇居民可支配收入)的影响较大,这表明加大对白银市基础设施建设投入,优化产业结构,促进经济健康可持续发展意义重大。由于白银市地形地貌复杂,模糊综合评价结果也表明,白银市水生态安全发展水平不均衡,两极分化现象明显,白银区水生态安全状况属于Ⅰ级区,而景泰县水生态安全状况处于Ⅲ级区。

根据优化后的白银市水生态安全评价指标体系对白银市水生态安全状况进行模糊综合评价,其评价结果趋势基本与未优化的评价指标体系相近,由优化后评价体系得到的白银市水生态安全状况整体降低,这也更能说明白银市水生态安全现状整体较为脆弱。由于水生态安全评价本身的模糊性和不确定性,运用基于模糊系统分析和模糊综合评价的方法进行水生态安全评价研究具有理论和实际的优越性,较强的可操作性,指标权重的确定也更为合理准确。

## 参 考 文 献:

- [1] 李万莲, 由文辉. 蚌埠城市水生态安全动态变化的定量评价与分析[J]. 安全与环境工程, 2007, 14(2): 30-34. (LI Wan-lian, YOU Wen-hui. Temporal evolution in Bengbu city of Huaihe River basin[J]. Safety and Environmental Engineering, 2007, 14(2): 30-34. (in Chinese))
- [2] 黄昌硕, 耿雷华, 王立群, 等. 中国水资源及水生态安全评价[J]. 人民黄河, 2010, 32(3): 14-16. (HUANG Chang-shuo, GENG Lei-hua, WANG Li-qun, et al. Evaluation on China water resources and water ecological security[J]. Yellow River, 2010, 32(3): 14-16. (in Chinese))
- [3] 张曰良. 济南市水生态文明建设实践与探索[J]. 中国水利, 2013(7): 66-68. (ZHANG Yue-liang. Practice and exploitation of water ecological civilization construction in Jinan city [J]. China Water Resources, 2013(7): 66-68. (in Chinese))
- [4] 蓝庆新, 彭一然, 冯科. 城市生态文明建设评价指标体系构建及评价方法研究-基于北上广深四城市的实证分析[J]. 财经问题研究, 2013(9): 98-106. (LAN Qin-xin, PENG Yi-ran, FENG Ke. A developing model for Wuwei city under the control of water resources with the STIRPAT model [J]. Research on Financial and Economic Issue, 2013(9): 98-106. (in Chinese))
- [5] 严立冬, 岳德军, 孟慧君. 城市化进程中的水生态安全问题探讨[J]. 中国地质大学学报: 社会科学版, 2007(1): 57-62. (YAN Li-dong, YUE De-jun, MENG Hui-jun. Study on the safety water zoology during the urbanization process[J]. Journal of China University of Geosciences(Social Sciences Edition), 2007(1): 57-62. (in Chinese))
- [6] 王玲玲, 张斌. 基于 DPSIR 模型的丹江口库区生态安全评估[J]. 环境科学与技术, 2012(增2): 340-343. (WANG Ling-ling, ZHANG Bin. The ecological security assessment of Danjiangkou reservoir area based on the DPSIR model [J]. Environmental Science and Technology, 2012(Suppl2): 340-343. (in Chinese))
- [7] 靳春玲, 贡力. 基于 PSR 模型的城市水安全评价研究[J]. 安全与环境学报, 2009, 9(5): 104-108. (JIN Chun-ling, GONG Li. On the urban water security assessment based on the pressure-state-response model[J]. Journal of Safety and Environment, 2009, 9(5): 104-108. (in Chinese))
- [8] 李橙, 杨志新, 刘树庆, 等. 河北省主产区葡萄品质综合评价方法的比较分析[J]. 安徽农业科学, 2011, 39(17): 10229-10234. (LI Cheng, YANG Zhi-xin, LIU Shu-qin, et al. Comparison and analysis of comprehensive evaluation methods on grape quality in the major production area of Hebei Province [J]. Journal of Anhui Agricultural Sciences, 2011, 39(17): 10229-10234. (in Chinese))
- [9] 李辉. 生态安全评价理论体系研究与实例分析[D]. 沈阳: 东北大学, 2004, 10(5): 14-16. (LI Hui. Theoretical research on ecological security assessment and case study analysis [D]. Shenyang: Northeastern University, 2004, 10(5): 14-16. (in Chinese))
- [10] 杜宇, 刘俊昌. 生态文明建设评价指标体系研究[J]. 科学管理研究, 2009, 27(3): 60-63. (DU Yu, LIU Jun-chang. Study on the index system of evaluation of ecological civilization [J]. Scientific Management Research, 2009, 27(3): 60-63. (in Chinese))
- [11] PHILIPPE BERGERON, 温慧娜, 夏朋. 中国水生态安全战略分析——欧洲视角[J]. 人民黄河, 2012, 10(5): 14-16. (PHILIPPE BERGERON, WEN Hui-na, XIA Peng. Strategic analysis for water ecology security in China—from EU perspective [J]. Yellow River, 2012, 10(5): 14-16. (in Chinese))
- [12] 郭永龙, 武强, 王焰新, 等. 中国的水安全及其对策探讨[J]. 安全与环境工程, 2004, 11(1): 42-46. (GUO Yong-long, WU Qiang, WANG Yan-xin, et al. Discussion on water security and recommendations in China [J]. Safety and Environmental

- Engineering, 2004, 11(1): 42-46. (in Chinese))
- [13] 李现社, 杜霞, 耿雷华, 等. 中国水资源安全战略研究[J]. 人民黄河, 2008, 30(5): 1-3. (LI Xian-she, DU Xia, GENG Lei-hua, et al. Study on security strategy of China water resources[J]. Yellow River, 2008, 30(5): 1-3. (in Chinese))
- [14] 杜保存. 基于RVA法的河流生态需水量研究[J]. 水利水电技术, 2012, 44(1): 27-30. (DU Bao-cun. RVA based study on river eco-water demand[J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 2012, 44(1): 27-30. (in Chinese))
- [15] 耿雷华, 黄永基, 郦建强, 等. 西北内陆河流域水资源特点初析[J]. 水科学进展, 2002, 13(4): 496-501. (GENG Lei-hua, HUANG Yong-ji, LI Jian-qiang, et al. Analysis of water resources characters of endorheic drainage in Northwest China[J]. Advances in Water Science, 2002, 13(4): 496-501. (in Chinese))
- [16] 刘涛. 长江下游张南上浅区航道整治效果评价[J]. 水利水运工程学报, 2015(2): 91-98. (LIU Tao. Waterway regulation works evaluation for Zhangjiazhou south branch up-shoal area of the Changjiang River [J]. Hydro-Science and Engineering, 2015(2): 91-98. (in Chinese))

## Hydroecological safety evaluation for Baiyin city

DAI Wen-yuan<sup>1</sup>, ZHANG Rui<sup>1</sup>, CHENG Zi-yong<sup>1</sup>, SONG Zhong-yan<sup>2</sup>, LIU Jing-xia<sup>1</sup>, MA Qi-mei<sup>1</sup>

(1. School of Technology, Gansu Agricultural University, Lanzhou 730070, China; 2. Science College of Northeastern University, Shenyang 110000, China)

**Abstract:** The main factors affecting the hydroecological safety in Baiyin city have been studied out in order to provide the service for the construction of the hydroecological safety and give a theoretical base for management of the regional hydroecological safety in Baiyin city. The analysis and optimization of an evaluation index system of the hydroecological safety for Baiyin city have been made based on a fuzzy system analysis method, and an integrated assessment of the hydroecological safety environment of Baiyin city has been done as well on the basis of the fuzzy integrated assessment, and in the last, the hydroecological safety environment of Baiyin city is graded. The main factors affecting the urban hydroecological safety is revealed with the fuzzy system analysis. The hydroecological safety situation of Baiyin city is set in order based on the fuzzy integrated assessment. It is found from Baiyin's construction of the hydroecological safety that the hydroecological safety situation is severely affected by the indexes such as the evaporation, water consumption for every 10 thousand yuan worth of industrial value added, the urban sewage disposal, GDP, fixed asset investment, the average annual rainfall and disposable income of urban residents. The hydroecological safety situation of Baiyin city is uneven, and the hydroecological safety is facing severe challenges to which much more attention should be paid during urban construction and management.

**Key words:** Baiyin city; fuzzy system analysis; hydroecological safety; fuzzy integrated assessment; urban construction