

基于熵权法的济南市水安全时间序列研究*

张戈丽,王立本,董金玮

(山东师范大学 人口·资源与环境学院,济南 250014)

摘要:人口压力、水污染等全球性问题已经使得水安全重要性越来越突出,如何有效地评价和监测水安全对于人类可持续发展具有重要的意义。首先分析了目前我国水安全问题,在此基础上以济南市为例,采用改进的 PSR 模型构建济南市水安全评价指标体系,通过熵权法确定指标权重,计算出 2000 年以来济南市水安全评价综合指数序列,并在此基础上进行相关分析与预测。结果表明:济南市水安全指数逐年升高,压力、状态、响应呈现不同的变化幅度,人类社会经济活动对水环境的影响较大。最后提出了解决济南市水安全问题的保障措施。

关键词:水安全;熵权;PSR 模型;济南

中图分类号:X52

文献标识码:A

文章编号:1005-3409(2008)01-0131-04

Time-series Analysis in Water Security
Assessment of Ji'nan City Based on Entropy Weight

ZHANG Ge-li, WANG Li-ben, DONG Jin-wei

(College of Population, Resources and Environment, Shandong Normal University, Ji'nan 250014, China)

Abstract: Global problems like population pressure, water pollution and so on have already make people recognize that the water security is becoming more and more important. Effectively assessing and monitoring the water security is significant to the human sustainable development. Firstly the article discussed the problems of water security in China, on which taken Ji'nan as the example, used the improved PSR model to construct water security assessment indicator system of water security in Ji'nan. Index weights of water security assessment indicators were determined by entropy method. Then get composite indices of water security assessment since 2000, on the basis of it carry through the correlation analysis and forecast. The results expressed that the composite index of Ji'nan had been increasing since 2000, with different models of pressure, state and response. Human economical activities have played an important role for that. Finally some suggestions were taken for water security problem.

Key words: water security; entropy weight; PSR (Pressure-State-Response) Model; Ji'nan

人口压力、水污染等全球性问题已经使得水安全问题越来越突出,如何有效地评价水安全对于人类可持续发展具有重要的意义。水安全是 20 世纪末提出的一个重要概念,近年来对其研究已成为热点。2000 年 3 月在荷兰海牙召开的世界部长级会议和 2000 年 8 月在瑞典斯德戈尔摩召开的世界水讨论会上都明确将“21 世纪水安全”作为会议主题。水安全不仅是一个生态环境问题,已成为关系到地区或国家快速发展的社会、经济、政治问题^[1-2],因此,在进行区域水安全研究与分析中,不仅要考虑地区的水资源状况,同时还要综合分析与之紧密相关的社会、经济、政治、资源、环境及生态等多方面因素。

该文首先提出目前我国水安全问题,在此基础上以济南市为例,采用改进的 PSR 模型构建济南市水安全评价指标体系,通过熵权法确定指标权重,计算出 2000 年以来济南市水安全评价综合指数,并在此基础上进行分析,最后对济南市水安全进行短期预测,并提出实现济南市水安全的建议。

1 问题的提出

目前,国内学者对水安全问题进行了广泛的探讨和研

究,在对环境安全研究的背景下,提出了水安全概念,但学术上对水安全没有统一的定义,不同学者有不同见解^[1-3]。概括上讲,水系统不是封闭的系统,而是开放的系统,具有不同的地域及层次范围,故水安全是一个开放的概念。由于水安全内涵中包括其自然属性、社会属性以及人文属性,因此水安全的评价对象不仅指水资源本身,也包括与水相关的一切活动和载体的相应指标。水安全是所有这些子系统组成的综合水环境系统的安全。

我国水资源的人均占有量少,时空分布变异性大,与土地资源的匹配状况不理想,生态环境相对脆弱,快速城市化阶段水安全问题更为明显。城市作为人化的生态系统,又是水环境污染的主要承载区,其自然水环境十分脆弱,目前我国大多数城市已出现不同程度的缺水,城市供水水源结构单一,夏、秋季节及用水高峰时段供需失衡;同时由于对废水管理力度不足,废水排放量增加,水环境恶化趋势加剧,导致区域性水环境功能退化,进一步加剧了水资源短缺的矛盾,并对城市居民饮水安全造成威胁。因此,城市水安全问题已成为制约社会经济全面、协调、可持续发展的瓶颈。

* 收稿日期:2006-09-10

基金项目:济南市东联供水可行性研究

作者简介:张戈丽(1983-),女,山东淄博人,硕士研究生,主要从事生态环境规划与管理等研究。

2 济南市水安全评价指标体系的建立

2.1 济南市水资源状况

济南市是山东省政治、经济、文化、教育中心,且有“泉城”的美誉。全市总面积 8 177 km²,市区面积 3 257 km²。南依泰山,北跨黄河,地处鲁中南低山丘陵与鲁西北冲积平原的交接带上。境内河流主要有黄河、小清河 2 大水系。属暖温带大陆性季风气候,降水集中,年蒸发量大于降水量。济南市独特的地理位置、气候条件和地形地貌,使得其水资源现状主要表现为降水量年际变化大,水资源补给量小,时空分布不均;城市社会、经济发展进程中引起水资源变化表现为人均水资源占有量少,水资源供需差距大,用水结构不合理,地下水过渡开采,水污染问题较为突出等问题。

2.2 基于改进 PSR 的指标体系构建

国内已有不少学者运用不同方法对地区或流域进行水安全评价。其中多采用水资源承载力作为水资源安全的度量指标,部分学者运用水贫困指数^[4]、水足迹^[5-6]以及虚拟水^[7]的方法,从新的角度进行区域水安全研究。还有一些学者则通过建立数学模型对区域进行水安全评价^[8-9]。水问题的复杂性决定了在对一个地区或流域进行水安全评价时,不仅要考虑区域水资源现状,还要综合评价与之相关的多方面因素,相应地水安全评价的指标体系也应该包括与水资源相关的环境、社会经济因素的评价。有学者应用 PSR 模型 (Pressure-State-Response Model)^[10-11]对区域进行水安全评价,取得了较好效果,但对于压力、状态理解上主要强调水资源本身的相关指标,而响应方面则主要指人类活动的反馈作用,忽视了水资源本身具有的自净能力、容纳能力等,又陷入了狭义水安全评价范畴。本文通过改进的 PSR 模型构建指标体系,进行水安全综合评价,强调资源、环境及社会经济 3 个方面都应具有压力、状态和响应的表征指标,模型更清晰地表达出资源、环境、经济社会的相关关系,如图 1 所示。

P(压力)指人类活动引起的水安全问题压力因素,例如人口增长、工业废水排放、农药的施用量等;S(状态)指与水资源相关的环境、经济等要素当前所处的状态或表征指标,例如城市水资源量、水质、城市化进程等;R(响应)指人类在社会经济活动和政策中的对水安全问题的能动反映,同时也包括水资源的可恢复性以及水体自身的自净能力,它是动态变化的,例如工业用水重复率等。

指标体系的选取是进行评价的重要前提,以 PSR 模型作为框架建立指标体系。指标体系选取在对济南市实际情况充分考虑的基础上,本着科学性、全面性、可持续性、可操作性原则进行^[12]。

该文采用改进的 PSR 模型构建水安全评价指标体系,将其划分为 3 个子系统,4 个层次,再对指标体系进行数据处理,去除掉研究时间内变化幅度剧烈的指标,在此基础上最终确定的指标体系如表 1 所示(数据主要来源于 2000 - 2005 年济南市统计年鉴、统计公报及水资源公报)。

3 济南市水安全评价结果

3.1 采用线性插值法进行指标数据量化

由于该文对济南市水安全作时间序列上的研究,故可采用线性插值法 (Interval standardization) 对指标进行标准化

处理。

表 1 基于 PSR 的济南市水安全指标体系^[2,10]

目标层	准则层	要素层	指标层
济南市水安全评价指标体系	压力指标 (P)	水资源	人均水资源量 P11
		压力 P1	人均日生活用水 P12
			水资源利用率 P13
		水环境	每公顷耕地化肥施用量(折纯) P21
		压力 P2	工业废水排放量 P22
			生活污水排放量 P23
	状态指标 (S)	社会经济	工业万元产值用水量 P31
		压力 P3	农业公顷均用水量 P32
			人口密度 P33
		环境状态	饮用水源水质达标率 S11
		S1	人均公共绿地 S12
		社会经济	人均 GDP(以 52 年为 100) S21
	响应指标 (R)	状态 S2	城镇恩格尔系数 S22
			城市化率 S23
		资源状态	水资源供需比(可供水量/需水量) S31
		S3	地表水资源量 S32
			地下水综合补给量 S33
			城市地面水水质达标率 S34
	响应指标 (R)	环境保护	城市污水处理率 R11
		与治理响应	工业治理废水总投资占 GDP 比例 R12
		R1	工业废水排放达标率 R13
			工业用水重复利用率 R14
		社会经济	水价 R21
		影响 R2	农民人均纯收入 R22
			万人在校大学生数 R23

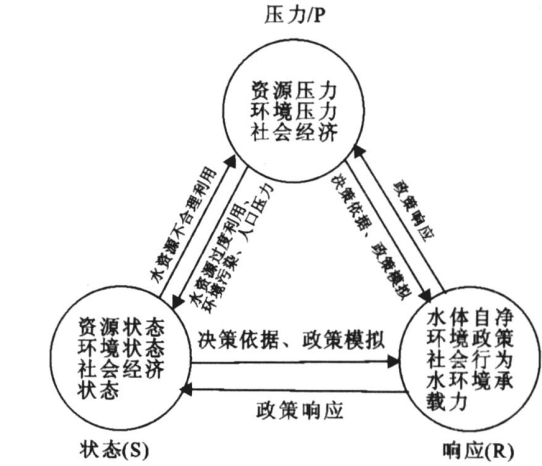


图 1 水安全评价指标体系 PSR 模型框架
对于效益型指标,标准化公式:

$$x = \frac{x - x_{\min}}{x_{\max} - x_{\min}}$$

对于成本型指标:

$$x = 1 - \frac{x - x_{\min}}{x_{\max} - x_{\min}}$$

式中: x_{\max} ——该项指标的最大值,即所有时间序列的最大值; x_{\min} ——该项指标的最小值,即所有时间序列的最小值。

3.2 指标权重的确定

熵权法是一种能够客观地计算指标权重的数学方法。熵权法确定的权重主要以各个指标的年度变化幅度为依据,指标间差距越大,表明指标在评价中的作用越大,这与实际情况也有不符之处。因为部分指标数据变幅不大,可能是数

据统计口径不同以及部分特例历史数据发生的偶然性等原因。因此可以采用层次分析法对其进行修正。两种方法相结合来确定最终的权重无疑会对指标体系及权重进行优化。采用熵权法最终确定的指标权重如表 2 所示:

表 2 熵权法确定的济南市水安全评价的指标权重																							%	
P11	P12	P13	P21	P22	P23	P31	P32	P33	S11	S12	S21	S22	S23	S31	S32	S33	S34	R11	R12	R13	R14	R21	R22	R23
38	54	29	28	56	52	44	29	36	25	36	30	21	58	25	66	32	59	32	56	39	37	38	31	49

3.3 综合评价指数的确定

主要利用各子指标加权求和法进行济南市水安全评价综合指数的计算,公式为

$$S_i = \sum_{j=1}^m w_j y_{ij}$$

式中:Si——济南市水安全评价综合指数;wj——各子指标的权重;yij——各指标数据标准化后的数值。

经计算可知 2000 - 2005 年济南市水安全评价综合指数(见表 3)。

表 3 水安全评价综合指数						
年份	2000 年	2001 年	2002 年	2003 年	2004 年	2005 年
综合指数	0.384611	0.390651	0.44446	0.602075	0.640392	0.737849

4 结果分析及评价预测

4.1 结果分析

(1) 由图 2 可以看出,济南市水安全评价综合指数在 2000 年以来时间序列上总体呈上升趋势。从资源方面来看,2000 - 2002 年济南市降水较少,其中 2002 年降水量仅为 386.1 mm,2003 - 2005 年降水丰沛,降水量达 850 mm 以上,由于降水量的增加,水资源总量安全得到保障,但由于人口总量的增加带来水资源压力的增加;环境方面的原因主要是工业废水和生活污水的排放对水资源产生的压力;从三产业来看,农业对水资源量产生的压力减少,对水环境的污染程度有增加趋势,而工业的迅速发展给水资源和环境造成压力逐步增加;与此同时水环境保护与政策响应对水环境改善起到重要的调节作用,体现在对工业用水的监督管理、环保卫生事业的投资力度不断加大和重视教育等方面。

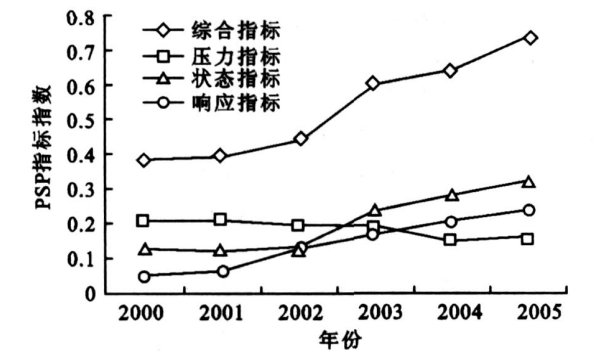


图 2 济南市水安全综合指数及 PSR 分项指数

(2) 通过分析准则层 3 个指标权重,可以较好地地区分其在水安全综合评价结果贡献率的大小。从准则层压力、状态、响应 3 个方面的综合指标来分析,三者权重比例为:0.366 0.352 0.282,压力起到较重要的作用。从 3 个指标的变化趋势来看(见图 2),压力指标呈现波动下降趋势,表明水资源、环境以及社会经济活动中的压力持续增大,特别是近几年来济南市人口增加,从 2000 年的 562.7 万增加到 2005 年的 597.4 万,使得人均水资源量降低,同时人们日

生活用水量逐步增加,从 2000 年的人均 167 L 提高到 2005 年的 193 L;工业用水量及工业废水排放量均减少,但变化幅度较小,而生活污水排放量显著增加,对水环境产生巨大压力。状态指标呈上升趋势,一方面近几年济南市降水量增加(见图 3),地表水资源量和地下水综合补给量增大;另一方面由于社会经济的迅速发展和环保意识的增强,城市化率提高,人均绿化面积和城市地面水质达标率也得到相应的增加。状态指标受自然因素影响,因此具有不稳定性。响应指标呈稳步上升趋势,主要是由于人们环保意识的增强和治理力度的加大,工业治理废水总投资占 GDP 比例显著增加,工业废水排放达标率和工业用水重复利用率得到提高,从而使指标具有上升动力。总体来看,近几年以来济南市水安全呈现出状态不稳定,压力加大,水资源管理力度逐渐增强的特征。

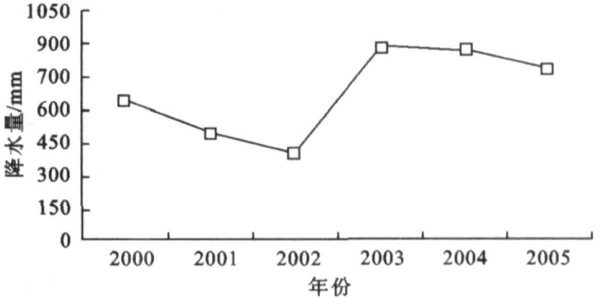


图 3 2000 年以来济南市逐年降水量变化

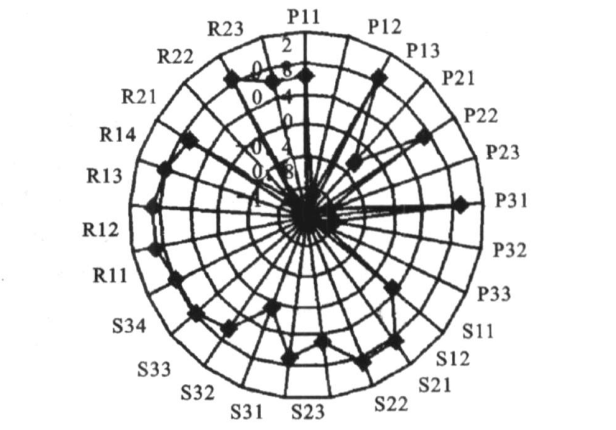


图 4 水安全评价综合指数与各指标的相关分析

(3) 通过综合指数与各指标的相关分析可以看出(图 4),与综合指数相关性较强的有工业万元产值用水量、工业治理废水总投资占 GDP 的比例、城市污水处理率、人均 GDP 等。响应指标与综合指标的相关性均较强,表明人类经济社会活动的响应对水环境的影响较大。

4.2 水安全评价预测

在 DPS 中,将计算得到的 2000 - 2005 年水安全综合指数作为原始数据,采用灰色系统 GM(1,1)模型对济南市水安全进行短期预测,预测公式为

$$S(t+1) = 2.384980e^{0.155780t} - 2.000369$$

精确度检验值为 $C=0.203\ 2$ (很好); $p=1.000$ (很好) 符合要求。根据上述公式计算得到 2006 - 2007 年济南市水安全综合指数分别为 0.876 06, 1.023 73。可见, 未来两年内济南市的水安全状况仍呈现出改善趋势。

5 结论与建议

通过改进的 PSR 模型对济南市水安全进行综合评价, 从水资源、环境及社会经济方面研究了济南市 6 a 来的水安全状况, 在此基础上进行了分析和预测, 结果表明该方法能较好地地为经济发展和地区水安全的协调提供决策依据。

研究表明, 济南市水安全总体上处于稳定的较安全的状态。响应指标和状态指标在水环境对胁迫的恢复力起主要作用, 尽管政策响应处于较强的作用状态下, 但生态环境压力强度仍然较大, 且有增强趋势, 使得水安全的状态呈现出不平衡的增长趋势。该文是对区域时间序列上的研究, 由于数据所限仅以 2000 年以来资料为数据源, 时间尺度较小, 且未涉及区域空间差异分析, 作为一种尝试性的方法, 研究尚待补充和完善。

因此, 济南市的经济 and 城市化发展应该在现有的水环境的承载力范围之内, 在充分了解水环境现状的前提下进行。一方面要提高市民的节水意识, 建立节水型城市, 完善健全的水资源法规; 另一方面加大科技投入, 提高水资源的利用率, 协调生产与生活用水, 实现水资源的合理利用; 同时还应加强预测和预警机制的研究, 提高城市水资源管理能力。

致谢: 感谢济南市水利厅王强在论文写作中给予指导!

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, 36(9): 1138-1142.

- [2] 韩宇平, 阮本清. 区域水安全评价指标体系初步研究[J]. 环境科学学报, 2003, 23(2): 267-272.
- [3] 陈绍金, 施国庆, 顾琦仪. 水安全系统的理论框架[J]. 水资源保护, 2005, 21(3): 9-11.
- [4] 张翔, 夏军, 贾绍凤. 水安全定义及其评价指标的应用[J]. 资源科学, 2005, 27(3): 145-149.
- [5] 马静, 汪党献, 来海亮, 等. 中国区域水足迹的估算[J]. 资源科学, 2005, 27(5): 96-100.
- [6] 李凤全, 朱丽东, 王天阳, 等. 浙江快速城市化时期水生态足迹与水安全战略探讨[J]. 国土与自然资源研究, 2006(1): 82-83.
- [7] 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.
- [8] 李如忠. 模糊物元模型在区域水安全评价中的应用[J]. 水土保持研究, 2005, 12(5): 221-223.
- [9] 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): 37-42.
- [10] 张翔, 夏军. 基于压力 - 状态 - 响应概念框架的可持续水资源管理指标体系研究[J]. 城市环境与城市生态, 1999, 12(5): 23-25.
- [11] 王天阳, 李凤全, 朱丽东. 区域水安全研究浅议[J]. 吉林水利, 2005(7): 6-9.
- [12] 樊彦芳, 刘凌, 陈星, 等. 层次分析法在水环境安全综合评价中的应用[J]. 河海大学学报: 自然科学版, 2004(5): 512-514.

(上接第 130 页)

展潜力, 统筹考虑, 将耕地空间发展格局划分为重点开发、优化结构、限制开发三类主体功能区。重点开发区域应是水资源保障下的一级潜力宜农荒地资源丰富的区域, 采取农田基础设施建设先行, 生态环境保护和改善为前提, 依据比较效益, 先易后难, 适时、适量地开发后备耕地资源, 如伊犁和阿勒泰地区。优化结构利用区应以耕地资源适宜性为依据, 内涵挖潜, 集约利用, 将耕地利用方式转变到耕地质量提高和利用结构优化与功能趋强方向上来。限制开发区主要是指生态敏感区, 应最大限度减少各类耕地开发对土地生态的不利影响, 如塔里木河上游地区和艾比湖流域上游区。农业生产布局坚持以环境适宜性为前提, 从改善、协调、预防和减缓生态环境问题出发, 合理调整农业发展战略, 严禁不符合主体功能定位的耕地开发, 规范开发秩序, 形成合理的耕地空间布局。

参考文献:

[1] 孙燕, 林振山, 刘会玉. 中国耕地数量变化的突变特征及其驱动机制[J]. 资源科学, 2006, 28(5): 57-61.

- [2] 彭文甫, 周介铭. 近 50 年四川省耕地变化分析[J]. 资源科学, 2005, 27(3): 79-85.
- [3] 蔡文春, 杨德刚. 新疆耕地变化及驱动力分析[J]. 干旱区资源与环境, 2006, 20(2): 144-149.
- [4] 刘新平. 新疆绿洲土地资源可持续利用的经济学分析[M]. 北京: 中国文史出版社, 2005: 56-57.
- [5] 刘旭华, 王劲峰, 刘明亮, 等. 中国耕地变化驱动力分区研究[J]. 中国科学(D 辑): 地球科学, 2005, 35(11): 1087-1095.
- [6] 严岩, 赵景柱, 王延春, 等. 中国耕地资源损失驱动力分析[J]. 生态学杂志, 2005, 24(7): 817-822.
- [7] 唐常春, 陈烈, 魏成. 大都市边缘区域耕地数量变化的时空特征及动力机制[J]. 资源科学, 2006, 28(5): 43-49.
- [8] 贾绍凤, 张豪禧, 孟向京. 我国耕地变化趋势与对策再探讨[J]. 地理科学进展, 1997, 16(1): 24-30.
- [9] 蔡运龙. 中国农村转型与耕地保护机制[J]. 地理科学, 2001, 21(1): 1-6.