DOI:10.3880/j.issn.1004-6933.2016.02.017

基于 PSR 的城市水生态安全评价体系研究

——以“五水共治”治水模式下的临海市为例

王繄玮,陈 星,朱 琰,熊雪珍,卢婉莹

(河海大学水文水资源学院,江苏 南京 210098)

摘要:以 PSR 模型和“五水共治”治水模式为基础,从治污、防洪、排涝、供水、节水和社会经济 6 个方面选择指标,建立城市水生态安全评价指标体系,对城市水生态安全状况进行定量分析。采用专家评分的层次分析法对评价指标赋权,采用综合指数法对临海市水生态安全状况进行综合计算;最后根据计算结果评价临海市水生态安全状况。结果表明,临海市水生态安全状况随“五水共治”治水模式的推进逐渐得到改善。

关键词:水生态安全;PSR 模型;层次分析法;综合指数法;五水共治;临海市

中图分类号:X826 **文献标志码**:A **文章编号**:1004-6933(2016)02-0082-05

Study of urban aquatic ecological security evaluation system based on PSR model: a case study in Linhai City under mode of co-governance on fiver water categories

WANG Yiwei, CHEN Xing, ZHU Yan, XIONG Xuezhen, LU Wanying

(*College of Hydrology and Water Resources, Hohai University, Nanjing* 210098, *China*)

Abstract: Based on the PSR model and the mode of co-governance on five water categories, the indices involving sewage treatment, flood control, drainage, water supply, water conservation, and social economy were selected to establish an urban aquatic ecological security evaluation system, which was used to quantitatively analyze the status of urban aquatic ecological security. The index weight was determined by using the AHP method based on expert evaluation, and the comprehensive index method was used to calculate the status of aquatic ecological security of Linhai City. Based on the calculation results, the status of aquatic ecological security of Linhai City was evaluated. Results of the study show that the status of aquatic ecological security of Linhai City has improved under the mode of co-governance on the five water categories.

Key words: aquatic ecological security; PSR model; AHP; comprehensive index method; co-governance on five water categories; Linhai City

水是人类社会生态和发展不可缺少、不可替代的自然资源,也是一种宝贵的战略资源。水资源作为生命之源、生产之要、生态之基[1],水生态安全已经成为 21 世纪社会经济发展的制约因素之一[2]。水生态安全问题的研究从 20 世纪 70 年代开始起步,直到目前,大多数研究仍集中于对其概念和内涵的讨论,也有学者开始对水安全问题进行定量评价,如英国生态与水文中心提出了由资源、途径、利用、能力和环境 5 个分指数组成的水贫困指数(WPI)来反映水资源短缺对人类的影响[3-4];夏军等[5]构建了水资源承载力的平衡指数(IWSD)来分析流域水资源安全的程度;韩宇平等[6]应用多层次多目标决

基金项目:国家自然科学基金(51579148);苏州市水利科技计划(2014-7-6);江苏省科技支撑计划(BE2011697)

作者简介:王繄玮(1991—),女,硕士研究生,研究方向为水文水资源及生态水文。E-mail:wangyw@hhu.edu.cn

通信作者:陈星,讲师。E-mail:chenxing@hhu.edu.cn

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,并结合多层次的水安全评价指标体系对我国部分省级行政区进行水安全状况评价;张巧显等[7]从生命安全、经济安全、生态安全等6方面选取了一些指标对中国水安全问题进行研究。

浙江省提出的"五水共治",突破了传统"就水论水"的思路,体现了水科学的多学科与多部门特征,对保障城市水生态安全具有积极意义。该模式从治污、防洪、排涝、供水、节水以及社会经济几方面对评价体系进行综合考虑,更具有全面性、科学性和前瞻性。本文基于这一治水模式,利用"压力-状态-响应(PSR)"框架模型并结合"五水共治"的治水模式建立城市水生态安全评价指标体系,对"五水共治"治水模式下的临海市水生态安全状况进行评价,旨在给区域水生态安全提升提供一个新的思路。

1 城市水生态安全评价方法

1.1 建立评价指标体系

城市水生态安全系统是一个复杂的系统[7-8],它的构建既要考虑社会经济发展对水的需求的功利性目标,又要考虑实现水环境自身及其周边环境系统功能和谐的理性目标,达到健康、可持续、循环利用的水生态状态。而"五水共治"模式下的水生态安全系统能够反映"治污、排涝、防洪、供水、节水"和社会经济几个方面的综合作用。为了达到这个目的,笔者以PSR模型[9]为基础构建评价指标体系。

城市水生态安全状态可以用压力指标、状态指标和响应指标来表现。随着经济的不断发展和人口的不断增多,水生态安全系统的压力也不断增大。这种压力影响着水生态安全系统的状态,水生态安全系统将这种状态反馈给人类社会,人类社会将做出响应。

根据PSR模型,结合"五水共治"的内涵,笔者从治污、防洪、排涝、供水、节水和社会经济6个方面构建城市水生态安全评价体系[9-10],分目标层、准则层和指标层来描述"五水共治"下的临海市水生态安全,具体见表1。

1.2 归一化处理指标值

采用线性比例变换的方法对各指标层指标值进行归一化处理,得到无量纲指数。

线性比例变换法归一处理如下:

当 x_{it} 为正效应时,

$$x'_{it} = x_{it}/x_{i\max} \tag{1}$$

当 x_{it} 为负效应时,

$$x'_{it} = x_{i\min}/x_{it} \tag{2}$$

式中:x_{it} 为各指标值,分为具有正效应的正向指标和具有负效应的逆向指标;x_{it}' 为 x_{it} 归一化后相对应的无量纲指数[11],$x_{i\max}$ 和 $x_{i\min}$ 分别为各指标值中的最大值及最小值。

1.3 确定系统及指标权重

根据Saaty[12]于1980年提出的层次分析法(AHP法),通过专家打分,同时参考相关水生态安全评价的资料,对各个系统层以及每个系统层中的各个指标进行重要性标度的评判,从而得到各系统层、各系统层中各个指标的相对重要性矩阵[13]。

1.4 计算子系统安全指数

各子系统的安全指数是根据系统内各指标的归一化数值及其权重的乘积加权计算得到的[14]。

子系统安全指数计算公式为

表1 水生态安全PSR指标体系

目标层	准则层(PSR)	指标层	指标说明
城市水生态安全	压力层 P	水质类别(打分制)	表示地表水体的水质压力
		COD排放总量(t/a)	表示水体COD排放压力
		NH_3-N排放总量(t/a)	表示水体NH_3-N排放压力
		人口密度(人/km^2)	表示人口压力
		人均GDP(元)	表示经济发展压力
	状态层 S	城区生活污水处理率(%)	表示城区生活污水处理状态
		农村生活污水处理率(%)	表示农村生活污水处理状态
		规模化畜禽养殖废水处理率(%)	表示畜禽养殖废水处理状态
		万元GDP用水量(m^3)	表示水资源使用状态
		万元工业增加值用水量(m^3)	表示工业用水状态
		管网损失率(%)	表示供水效率
		防洪能力(打分制)	表示城市防洪状态
		排涝能力(打分制)	表示城市排涝状态
		水资源供需平衡满足状况(打分制)	表示城市水资源供需状态
	响应层 R	工业水重复利用率(%)	表示对水安全系统做出的响应
		灌溉水利用系数	表示对水安全系统做出的响应
		节水器具普及率(%)	表示对水安全系统做出的响应
		公共环保意识(打分制)	表示公众对生态安全系统的响应

$$E = \sum_{i=1}^{n} p(x_i) W_i \quad (3)$$

式中：E 为研究区各子系统安全指数；$p(x_i)$ 为各指标的安全指数，即归一化后的指标值；W_i 为各指标权重；n 为指标总个数，$i=1,2,\cdots,n$。

1.5 综合安全指数计算

综合安全指数指根据各个子系统的安全指数与其权重的乘积加权计算得到的值。综合安全指数计算公式为

$$E_{SCV} = \sum_{i=1}^{n} E_i W_{ii} \quad (4)$$

式中：E_{SCV} 为研究区水生态安全系统综合安全指数；E_i 为各子系统安全指数；W_{ii} 为各系统权重；n 为系统总个数，$i=1,2,\cdots,n$。

2 应用实例

临海市地处浙江省东南沿海，地理位置界于北纬 28°40′～29°04′，东经 120°49′～121°41′之间。东濒东海，南接台州市椒江区和黄岩区，西连仙居县，北与天台县、三门县相毗邻。当前临海市水生态安全状况不容乐观，主要表现为：水体质量较差，水资源分布和利用格局不平衡，开发程度不高，部分地区管网漏损率高，节水指标与国内外先进水平差距较大，现有水系格局不满足防洪排涝要求等。基于此现状，“五水共治”在截污减排、水资源保障、水系综合整治等方面均提出了相关规划，分近中远期实施。根据建立的评价模型，临海市随着“五水共治”的实施，达到各阶段的规划目标，更好地提高水生态安全服务，体现规划的合理性与科学性。

2.1 数据计算

以《临海市“五水共治”综合规划》中的规划目标为基础进行计算，采用打分制的数据均为 5 分制。

经过归一化的各指标数据及各子系统安全指数见表 2～3。

表 2 各指标数据归一化结果

年份	水质类别（打分制）	COD 排放总量/(t·a^{-1})	NH_3-N 排放总量/(t·a^{-1})	人口密度/(人·km^{-2})	人均 GDP/元	城区生活污水处理率/%	农村生活污水处理率/%	规模化畜禽养殖废水处理率/%	万元 GDP 用水量/m^3
现状 2013	0.20	0.73	0.60	1	0.38	0.83	0.22	0.86	0.42
近期 2016	0.60	0.81	0.73	0.97	0.52	0.89	0.84	0.92	0.49
中期 2020	0.80	0.94	0.87	0.85	0.66	0.95	0.95	0.97	0.61
远期 2030	1	1	1	0.72	1	1	1	1	1

年份	万元工业增加值用水量/m^3	管网损失率/%	防洪能力（打分制）	排涝能力（打分制）	水资源供需平衡满足状况（打分制）	工业水重复利用率/%	灌溉水利用系数	节水器具普及率/%	公共环保意识（打分制）
现状 2013	0.50	0.59	0.50	0.33	0.40	0.47	0.85	0.89	0.38
近期 2016	0.52	0.70	0.75	0.67	0.20	0.76	0.89	0.92	0.52
中期 2020	0.60	0.88	1	1	0.40	0.88	0.92	0.95	0.66
远期 2030	1	1	1	1	1	1	1	1	1

表 3 子系统安全指数及综合安全指数计算结果

年份	子系统安全指数						综合安全指数
	治污	防洪	排涝	供水	节水	社会经济	
2013	0.54	0.50	0.33	0.40	0.64	0.67	0.50
2016	0.76	0.75	0.67	0.20	0.70	0.72	0.60
2020	0.87	1.00	1.00	0.40	0.78	0.77	0.77
2030	0.98	1.00	1.00	1.00	0.92	0.89	0.99
权重	0.22	0.14	0.13	0.25	0.20	0.06	

2.2 评价结果

将各子系统安全指数及临海市水生态安全指数的变化表示出来，见图 1 和图 2。对临海市水生态安全指数与各指标的相关性进行分析，相关系数见图 3。

由图 1 和图 2 可以看出，从现状年到远期规划年，临海市的子系统安全指数及水生态安全系统安全指数基本呈上升趋势。

现状条件下，临海市水生态安全状况一般，与规划期相比相差较大。其制约因素主要有排涝和供水

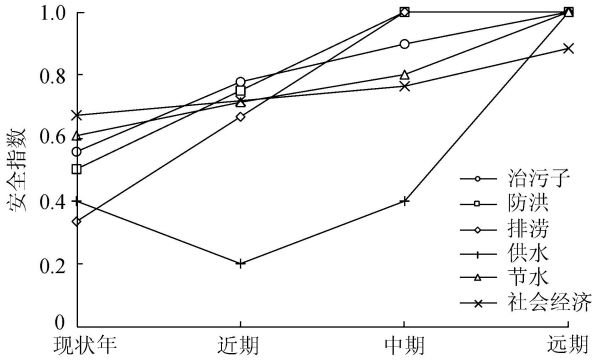

图 1 各子系统安全指数不同时期变化情况

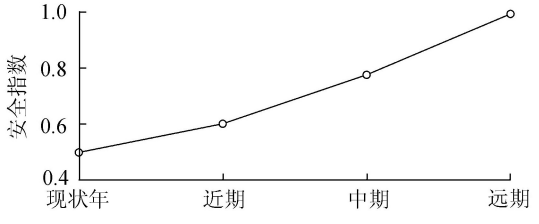

图 2 不同时期水生态安全指数变化情况

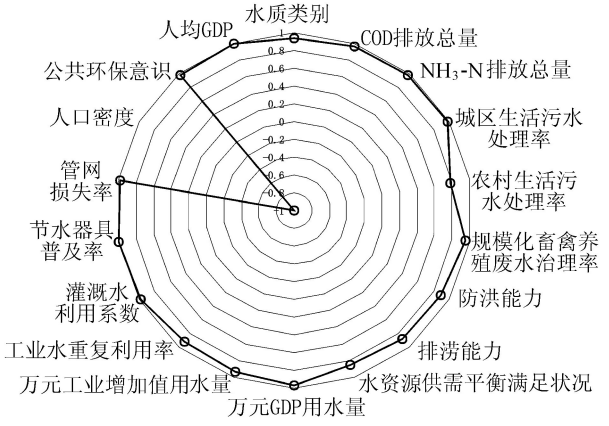

图 3　水生态安全指数与各指标的相关系数

两方面,说明当前临海市的排涝标准较低,供水能力不能满足需水要求。各子系统间相互制约,相互作用,共同对水生态系统产生影响。从现状年 2013 年到远期规划年 2030 年,随着“五水共治”治水模式的推进与深化,各项指标逐步达到国家相关规定或标准,近、中、远期临海市的水生态安全状况将逐步得到改善。

由图 3 可以看出,除人口密度外,其他指标均与临海市水生态安全指数具有较强的相关性。其中 COD 排放总量、NH_3-N 排放总量、城区生活污水处理率、规模化畜禽养殖废水治理率、万元 GDP 用水量、灌溉水利用系数、节水器具普及率、管网损失率、公共环保意识和人均 GDP 与水生态安全指数的相关性高达 0.95,说明这些指标对水生态安全系统影响较大。因此,要提升临海市水生态安全,可以从 COD 排放量、NH_3-N 排放总量等这些与水生态安全指数相关性较高的指标入手。

3　结　论

基于 PSR 模型和“五水共治”理念,构建了“五水共治”治水模式下的城市水生态安全评价体系,并将其应用于临海市水生态安全评价中。与基于普通治水模式的评价体系相比,“五水共治”治水模式下的城市水生态安全评价体系具有一定的科学性和前瞻性,评价结果能较为全面、客观地描述在“五水共治”治水模式下临海市的水生态安全变化趋势。

评价结果表明:①目前临海市水生态安全状况一般,主要受排涝标准较低以及供水不能满足需求这两方面的影响。②随着“五水共治”治水模式的推进与深入实施,临海市水生态安全状态从现状年 2013 年到远期规划年 2030 年将得到较大提升,各子系统的安全程度均得到了一定程度上的改善。③提升临海市水生态安全可以从 COD 排放量、NH_3-N 排放总量等与水生态安全系统相关性较高的指标入手。④“五水”之间是相互作用、相互促进的,在“五水共治”的治水模式下,治污、防洪、排涝、供水、节水等方面均得到了显著改善,带动了整个临海市水生态系统安全状态的提升,将临海市水生态文明建设推向了一个新的高度。

参考文献:

[1] 陈雷. 新阶段的治水兴水之策[J]. 求是, 2013 (2): 56-58. (CHEN Lei. The method of controlling and governing water in the new stage[J]. Seeking Truth, 2013 (2): 56-58. (in Chinese))

[2] SIMONOVIC S P. World water dynamics: global modeling of water resources [J]. Journal of Environmental Management, 2002, 66(3): 249-267.

[3] 胡松, 梁虹, 舒栋才, 等. 我国水安全研究现状及展望[J]. 水科学与工程技术, 2010 (3): 19-21. (HU Song, LIANG Hong, SHU Dongcai, et al. The status and prospects of water security of China [J]. Water Science and Engineering Technology, 2010 (3): 19-21. (in Chinese))

[4] DÖLL P, KASPAR F, LEHNER B. A global hydrological model for deriving water availability indicators: model tuning and validation [J]. Journal of Hydrology, 2003, 270(1): 105-134.

[5] 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 Yizhong. 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))

[6] 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. (HAN Yuping, RUAN Benqing, XIE Jiancang. Multi-objective and multilevel fuzzy optimization model and its application in water security evaluation[J]. Resources Science, 2003, 25(4):37-42. (in Chinese))

[7] 张巧显, 欧阳志云, 王如松, 等. 中国水安全系统模拟及对策比较研究[J]. 水科学进展, 2002, 13(5): 569-577. (ZHANG Qiaoxian, OUYANG Zhiyun, WANG Rusong, et al. Modeling water security in China and comparison of the strategies [J]. Advances in Water Science, 2002, 13(5):569-577. (in Chinese))

[8] 王沛芳, 王超, 冯骞, 等. 城市水生态系统建设模式研究进展[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2003, 31(5): 485-489. (WANG Peifang, WANG Chao, FENG Qian, et al. Advances in research of urban water ecosystem construction mode [J]. Journal of Hohai University(Natrual Sciences), 2003, 31(5): 485-489. (in Chinese))

[9] 车娅丽, 徐慧, 龚李莉, 等. 基于 PSR 模型和主成分

分析法的节水型社会建设评价[J]. 水电能源科学, 2014, 32(7): 124-127. (CHE Yali, XU Hui, GONG Lili, et al. Evaluation method of water-saving society establishment based on PSR framework and principal component analysis [J]. Water Resources and Power, 2014, 32(7): 124-127. (in Chinese))
[10] 许晓林, 陈星, 向龙, 等. 基于健康河流理念的苏白圩水系规划研究[J]. 中国农村水利水电, 2015 (4): 55-59. (XU Xiaolin, CHEN Xing, XIANG Long, et al. A study of polder water system planning based on the concept of healthy river [J]. China Rural Water and Hydropower, 2015 (4): 55-59. (in Chinese))
[11] 李美娟, 陈国宏, 陈衍泰. 综合评价中指标标准化方法研究[J]. 中国管理科学, 2004 (增刊 1): 45-48. (LI Meijuan, CHEN Guohong, CHEN Yantai. Study on target standardization method of comprehensive evaluation [J]. Chinese Journal of Management Science, 2004 (sup1): 45-48. (in Chinese))
[12] SAATY T L. What is the analytic hierarchy process [M]. Berlin: Springer, 1988.
[13] 何琼, 孙世群, 吴开亚, 等. 区域生态安全评价的AHP赋权方法研究[J]. 合肥工业大学学报(自然科学版), 2004, 27(4): 433-437. (HE Qiong, SUN Shiqun, WU Kaiya, et al. Determining the weighting coefficients of the indexed in the evaluation system of regional ecological security by the AHP method [J]. Journal of Hefei University of Technology (Natrual Sciences), 2004, 27(4): 433-437. (in Chinese))
[14] 邱德华. 区域水安全战略的仿真评价研究[D]. 南京: 河海大学, 2006.

(收稿日期:2015-12-28 编辑:彭桃英)

(上接第 76 页)

构建岭下、河头村山居新村特色。具体措施是:结合当地原有的道路系统、沟渠系统,营造流动水体及村落空间结构,在上游围绕其原有的青山绿水进行布局,使之构成一道完整的风景线;而在其下游则增设亲水设施,铺设环保亲民的步行道,并在步行道边上种植水生植物,使其更富有自然气息。

4 结 语

笔者对水文化如何嵌入生态文明建设进行了探讨,并以芦江河文化建设为例进行了规划实践。笔者认为,对水文化的 3 种形态(物质形态、制度形态以及精神形态)特征与内涵的理解和深入研究是重中之重,将直接影响水文化嵌入生态文明建设的质量与效果。水文化和生态文明建设在新时期应以何种姿态出现、水文化嵌入生态文明建设的方式是需要长期探索的问题,值得深入的探讨和研究,需要广大研究者和群众的积极参与。

参考文献:

[1] 左其亭. 水生态文明建设几个关键问题探讨[J]. 中国水利, 2013 (4): 1-3, 6. (ZUO Qiting. Discussions on key issues of water ecological civilization construction [J]. China Water Resources, 2013(4): 1-3, 6. (in Chinese))
[2] 左其亭, 罗增良, 马军霞, 等. 水生态文明建设理论体系研究[J]. 人民长江, 2015(8): 1-6. (ZUO Qiting, LUO Zengliang, MA Junxia, et al. Study on theoretical system of water ecological civilization construction [J]. Yangtze River, 2015(8): 1-6. (in Chinese))
[3] 张诚, 严登华, 秦天玲, 等. 试论水生态文明建设的理论内涵与支撑技术[J]. 中国水利, 2014(12): 17-18, 24. (ZHANG Cheng, YAN Denghua, QIN Tianling, et al. Theoretical implication and supporting technologies of water ecological civilization [J]. China Water Resources, 2014(12): 17-18, 24. (in Chinese))
[4] 李桂花, 张建光. 中国特色社会主义生态文明建设的基本内涵及其相互关系[J]. 理论学刊, 2014(2): 92-96. (LI Guihua, ZHANG Jianguang. The basic connotation of the construction of socialist ecological civilization with Chinese characteristics and its relationship [J]. Theory Journal, 2014(2): 92-96. (in Chinese))
[5] 孟亚明, 于开宁. 浅谈水文化内涵、研究方法和意义[J]. 江南大学学报(人文社会科学版), 2008(4): 63-66. (MENG Yaming, YU Kaining. A general research on the connotation, research method and meaning of water culture [J]. Journal of Jiangnan University (Humanities & Social Sciences), 2008(4): 63-66. (in Chinese))
[6] 李宗新. 建设水文化 弘扬水精神 构建水文化核心价值体系[J]. 水利发展研究, 2008(2): 77-81. (LI Zongxin. Construction of water culture to carry forward the spirit of water to build the core value system of water culture[J]. Water Resources Development Research, 2008(2): 77-81. (in Chinese))
[7] 程振翼. 文化遗产与记忆理论:对文化遗产研究的方法论思考[J]. 广西社会科学, 2014(2): 39-43. (CHENG Zhenyi. Cultural heritage and memory theory: a methodological approach to the study of cultural heritage [J]. Guangxi Social Sciences, 2014 (2): 39-43. (in Chinese))
[8] 贺学君. 关于非物质文化遗产保护的理论思考[J]. 江西社会科学, 2005(2): 103-109. (HE Xuejun. Theoretical considerations on the protection of intangible cultural heritage[J]. Jiangxi Social Sciences, 2005(2): 103-109. (in Chinese))

(收稿日期:2016-01-02 编辑:彭桃英)