



DOI: 10.13476/j.cnki.nsbdtqk.2016.02.005

付晓敏, 方国华, 黄显峰. 城市水生态文明建设协调度评价——以马鞍山市为例[J]. 2016, 14(2): 21-25.

FU Xiaomin, FANG Guohua, HUANG Xianneng. Coordination degree evaluation of city aquatic ecological civilization: the case of Maanshan city[J]. 2016, 14(2): 21-25. (in Chinese)

城市水生态文明建设协调度评价

——以马鞍山市为例

付晓敏, 方国华, 黄显峰

(河海大学 水利水电学院, 南京 210098)

摘要: 基于协同理论构建城市水生态文明建设协调度评价模型, 建立包含水安全、水生态、水供水、水管理、水文化及水景观五大子系统的“五位一体”评价指标体系, 利用改进模糊层次分析法计算各指标权重, 并以马鞍山市为例进行了城市水生态文明建设协调度评价。结果表明, 马鞍山市 2009 年—2013 年间城市水生态文明建设协调度稳步提升, 2013 年协调度为 0.798, 处于中度协调状态。

关键词: 水生态文明; 评价指标体系; 权重; 协调度; 模糊层次分析法; 马鞍山市

中图分类号: TV213; X171.4 **文献标志码:** A **文章编号:** 1672-1683(2016)02-0021-05

Coordination degree evaluation of city aquatic ecological civilization: the case of Maanshan city

FU Xiaomin, FANG Guohua, HUANG Xianneng

(College of Water Conservancy and Hydropower Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China)

Abstract: A coordination evaluation model was built up in this study based on synergetic theory, and “five one” evaluation index system was established, which includes water security, water ecology, water supply, water management, water culture and view. The fuzzy analytic hierarchy process was used to calculate the weight of each index, and the Maanshan city’s aquatic ecological civilization construction was applied as an example to quantitatively evaluated. The result showed that the coordinating degree of Maanshan city’s aquatic ecological civilization construction was steadily improved during 2009~2013, which is 0.798 in 2013 as a moderate coordination stage.

Key words: aquatic ecological civilization; index system; weight; coordination degree; FAHP; Maanshan city

2013 年水利部出台的《关于加快推进水生态文明建设的意见》和 2015 年中共中央、国务院印发的《关于加快推进生态文明建设的意见》中, 均明确提出将建设水生态文明作为提高我国生态文明水平的重要一环。长期以来, 我国经济社会的快速发展给水生态系统带来了一定的压力, 造成的水资源、水环境问题治理代价过大, 部分北方地区的地下水资源超采已诱发了严重的生态环境问题, 工业化及

城市化带来的污染压力有增无减^[1,2], 实施水生态文明建设已成为国家可持续发展的迫切要求与必然选择。

水生态文明是人类在遵循与融入水生态系统自然规律、追求人水和谐过程中创造的物质与精神成果的总和, 包括人类因保护水环境、维护水生态安全、弘扬水文化等形成的思想体系、指导战略、规章制度以及组织机构等^[3]。水生态文明是人类尊重水

收稿日期: 2015-03-21 修回日期: 2016-03-07 网络出版时间: 2016-04-14
网络出版地址: <http://www.cnki.net/kcms/detail/13.1334.TV.20160414.1448.016.html>
基金项目: 国家社会科学基金(12&ZD214)

Fund: National Planning Office of Philosophy and Social Science(12&ZD214)

作者简介: 付晓敏(1991-), 陕西宝鸡人, 主要从事水利经济与水利规划方面研究。E-mail: fxm168400@163.com

通讯作者: 方国华(1964-), 安徽定远人, 教授, 博士生导师, 主要从事水利经济与水利规划方面研究。E-mail: fxm168400@163.com

生态系统完整性的更高阶段,要求人类保护水环境,与水和谐,将友好、共存等观念扩展到处理人类与水关系的实践中去,最终实现水生态系统与人类社会的可持续发展^[4]。

随着水生态文明建设实践在全国有关省市的展开,对水生态文明的内涵、建设意义以及评价指标体系等的研究成果在不断丰富,但存在评价指标体系片面化以及评价结果单一等问题。水生态文明作为一个复合系统,传统意义上的建设水平评价难以反映出各子系统协调发展状况。在前人研究基础上,本文依据协同理论构建协调度评价模型,建立包含水安全、水生态、水供用、水管理、水文化及水景观五大子系统的评价指标体系,利用改进的模糊层次分析法计算各指标权重,衡量与评价城市水生态文明建设中各子系统协调发展程度。

1 基于协同理论的协调度评价模型

协同论由德国理论物理学家赫尔曼·哈肯于 20 世纪 70 年代提出,是指一个稳定的系统,其子系统都是按照一定的方式协同运动并且有次序地发展演进;在系统演进过程中,各子系统之间协同与拮抗关系相伴始终。系统无序与有序状态之间转换的动态临界过程称为相变。协同理论认为系统相变点处的内部分量包括慢弛豫变量和快弛豫变量两类,最终决定系统相变进程的是慢弛豫变量,即系统序参量。系统相变点处序参量的出现标志着系统内部协同关系发挥主导作用,系统由相变前的无序状态演进到各子系统相互协同运动的新状态^[5,6]。

水生态文明建设工作涉及水资源管理、水利工程管理、水文化弘扬等软、硬件建设两方面内容,是一项系统性、集成性的工程。各子系统之间协同关系的稳定将促使整个系统有序发展,任何局部强调都将破坏这种协同效应。协调度是各子系统在复杂、动态的发展过程中彼此和谐一致的程度,体现了系统由无序走向有序的趋势,协调度高低并不取决于各子系统序参量有序度的大小,关键在于各子系

统间的协同作用程度。因此,以各序参量有序度为协调因子,以协调度表征各子系统之间的协同作用,构建基于序参量有序度水平的协调度评价模型。

设城市水生态文明建设评价系统有 $U_i (i=1, 2, \dots, n)$ 个子系统序参量,各子系统分别有 $U_{ij} (i=1, 2, \dots, n, j=1, 2, \dots, m)$ 个序参量分量,各序参量分量的水平值由功效函数 $E_{ij} (i=1, 2, \dots, n, j=1, 2, \dots, m)$ 计算得出,则各序参量有序度为

$$E_i = \sum_{j=1}^m E_{ij}^* \omega_j (i=1, 2, \dots, n, j=1, 2, \dots, m) \quad (1)$$

式中: ω_j 为各序参量分量对应子系统 U_i 的权重系数; E_{ij}^* 为序参量分量 U_{ij} 的水平值; E_i 为各序参量有序度,其值介于 0 和 1 之间。当 E_i 值越大时,对系统有序性的贡献越大,反之则越低。

不同序参量分量对于城市水生态文明建设协调性的提高存在着正功效和负功效两方面作用,如水面面积率、水功能区水质达标率等指标得分越高越好,相反万元 GDP 用水量等指标得分则是越低越好。因此,为区分序参量正负功效,建立两段式功效函数如下:

$$E_{ij} = \begin{cases} u_{ij}/u_{ij} & \text{当 } U_{ij} \text{ 具有正功效时} \\ u_{ij}/u_{ij} & \text{当 } U_{ij} \text{ 具有负功效时} \end{cases} \quad (2)$$

式中: u_{ij} 为序参量分量 U_{ij} 的实测值; u_{ij} 为序参量分量的理想值。当 $E_{ij} \geq 1$ 时取 $E_{ij} = 1$ 。

协调度函数定义为:

$$S_t = \sqrt[n]{\sum_{i=1}^n (E_i - E_i^0)^2 / n} \quad (3)$$

$$H_t = (\sqrt{1 - S_t})^k \quad (4)$$

式中: H_t 为复合系统在时刻 t 的协调度值; E_i 为子系统 U_i 在 t 时刻的有序度; E_i^0 为子系统 U_i 的理想有序度,本文中取 $E_i^0 = 1$; k 为调节系数。

上述系统协调度计算方法具有意义明确、计算简便的优点,能够直观反映出系统现状与理想状态之间的距离。整个系统协调度介于 0 和 1 之间,协调度越大,说明城市水生态文明建设整体协调性越好,建设水平越高。协调度具体评价标准见表 1。

表 1 协调等级(RHC)划分表^[7]

Tab. 1 Rank of harmony coefficient of aquatic ecological civilization

等级	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
协调度	0~0.1	0.1~0.2	0.2~0.3	0.3~0.4	0.4~0.5	0.5~0.6	0.6~0.7	0.7~0.8	0.8~0.9	0.9~1.0
含义	极度失调	高度失调	中度失调	低度失调	弱度失调	弱度协调	低度协调	中度协调	高度协调	极度协调

2 评价指标体系构建与权重计算

水生态文明评价指标体系是衡量区域水生态文明水平、监测水生态文明进程、制定水生态文明建设

目标、明确水生态文明建设方向与重点的基础。本文基于上文对水生态文明内涵的阐释,参考水利现代化评价指标体系^[8,10]、生态文明建设评价指标体系^[11,13]等,自上而下建立评价指标体系系统层、子系

统层和序参量分量层,依据指标体系构建的科学性、整体性、可操作性、整体与区域兼顾等原则^[14],结合城市建设与发展的特点,构建水安全、水生态、水管理、水供用、水景观与水文化“五位一体”评价指标体系,包含5个序参量,共29个序参量分量。

然后,利用模糊层次分析法(FAHP)构造模糊判断一致矩阵,计算各序参量分量的权重值。FAHP能够很好地反映各专家思维的一致性,避免层次分析法中判断矩阵的一致性检验和反复一致性调整的缺点^[15]。

设元素 $a_1, a_2, a_3, \dots, a_n$ 两两之间相对重要程度的模糊一致判断矩阵为:

$$R = \begin{pmatrix} r_{11} & \dots & r_{1n} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ r_{n1} & \dots & r_{nn} \end{pmatrix} \quad (5)$$

式中: r_{ij} 为元素 a_i 比 a_j 重要的隶属度, r_{ij} 越大, a_i 就比 a_j 元素越重要。隶属度的判定采用0.1~0.9标度法(表2)结合专家打分法确定。

R 具有如下性质:

- (1) $r_{ii} = 0.5, \quad i = 1, 2, 3, \dots, n;$
- (2) $r_{ij} + r_{ji} = 1, \quad i, j = 1, 2, 3, \dots, n;$
- (3) $r_{ij} = r_{ik} - r_{jk} + 0.5, \quad i, j, k = 1, 2, 3, \dots, n$

由于实际问题的复杂性以及众多专家认知上的偏差,初始构造的模糊判断矩阵往往不满足一致性的要求,可参考文献[16]进行判断矩阵一致性的调整。

表2 0.1~0.9数量标度
Tab.2 Scale of 0.1~0.9 measure

标度	定义	说明
0.5	同等重要	两元素相比较,同等重要
0.6	稍微重要	两元素相比较,一元素比另一元素稍微重要
0.7	明显重要	两元素相比较,一元素比另一元素明显重要
0.8	重要得多	两元素相比较,一元素比另一元素重要得多
0.9	极端重要	两元素相比较,一元素比另一元素极端重要
上列标度互补	互补	元素 a_i 与 a_j 的标度为 r_{ij} , 反之则为 $1 - r_{ij}$

R 为模糊一致矩阵的充要条件是存在 n 阶非负归一化向量 $W = (w_1, w_2, \dots, w_n)$ 及正数 a , 使得 $\forall_{i,j}$ 满足下式:

$$r_{ij} = a(w_i - w_j) + 0.5 \quad (6)$$

其中参数 $a \geq (n-1)/2$ (本文取 $a=2$)。参数取值大小的选择反映了决策者的个人偏好, a 越小表

明决策者偏好权重之间差异程度越大。

由式(6)固定 i 得:

$$w_i = \frac{1}{a}(r_{ik} - \frac{1}{2}) + w_k \quad (7)$$

对 k 求和,得

$$nw_i = \frac{1}{a} \sum_{k=1}^n r_{ik} - \frac{n}{2a} + \sum_{k=1}^n w_k \quad (8)$$

由权重向量归一化条件 $\sum_{k=1}^n w_k = 1$, 得

$$w_i = \frac{1}{n} - \frac{1}{2a} + \frac{1}{na} \sum_{k=1}^n r_{ik}, \quad i = 1, 2, 3, \dots, n \quad (9)$$

即通过式(9)式可由模糊一致判断矩阵直接计算出各序参量分量权重值。

城市水生态文明建设评价指标体系以及各序参量分量计算权重值见表3。

3 实例研究

选择2009年-2013年数据对马鞍山市水生态文明城市创建情况进行评价与分析。指标现状值参考安徽省水利年鉴^[17]及马鞍山年鉴^[18]、水资源公报以及相关规划报告等,指标理想值参考国家、省市相关规划标准,以及部分文献^[19-20]。

在计算各序参量分量相对子系统序参量权重值基础上,按式(1)、式(2)计算各序参量的有序度,根据式(3)、式(4)计算马鞍山市不同时期水生态文明建设系统协调度,结果见表4。

由表4可以看出,马鞍山市2009年-2013年间各子系统的有序度呈逐年上升趋势,其中水安全与水生态有序度最高,水文化及水景观有序度较低。各子系统有序度的提升促进系统有序状态的进一步发展,马鞍山水生态文明建设系统协调度由0.722增长到0.798,处于中度协调的发展阶段,总体发展趋势平缓,仍有较大潜力有待进一步挖掘。

马鞍山市近五年水生态文明建设协调度逐年提升,主要原因是各子系统有序度在五年之中均呈现出稳步增长的态势,建设水平不断提高。马鞍山市境内水资源丰富,长江穿城而过,得天独厚的资源优势以及对防洪、排涝等的长期重视促进了水安全、水生态有序度的高位增长,特别是水供用、水管理子系统因马鞍山市近年来节水型城市、生态文明城市等的创建工作,不断完善制度建设与配套工程建设,也得到了长足的发展。但是,水文化与水景观有序度较低,成为制约水生态文明建设协调度提升的主要短板。因此在水生态文明城市建设过程中,马鞍山市还需大力推进水文化挖掘与弘扬工作,完善城市水景观与自然水景观建设,扩充水利工程建设内涵。

表 3 城市水生态文明建设评价指标体系及指标权重

Tab. 3 Evaluation index system and weight of city aquatic ecological civilization construction

子系统序参量层	序参量分量	理想值	指标层
水安全	流域防洪标准达标率(%)	100	0.270
	城市防洪达标率(%)	100	0.220
	城市排涝达标率(%)	100	0.170
	城市集中式饮用水源地水质达标率(%)	100	0.220
	水功能区水质达标率(%)	≥90	0.120
水生态	生态需水维持度(%)	≥90	0.260
	水面面积率(%)	≥10	0.160
	水土流失治理率(%)	≥85	0.210
	建成区绿化覆盖率(%)	≥30	0.160
	人均占有公共绿地面积/m ²	≥16	0.210
水供用	万元GDP用水量/m ³	≤110	0.129
	规模以上工业万元增加值取水量/m ³	≤50	0.100
	用水量弹性系数	≤-0.03	0.157
	工业废水排放达标率(%)	100	0.100
	城市生活污水集中处理率(%)	100	0.071
	供水管网漏损率(%)	≤18	0.157
	生活节水器具普及率(%)	≥90	0.186
	农田灌溉水有效利用系数	≥0.60	0.100
	水管理	水资源管理考核合格率(%)	100%
取水许可实施率(%)		≥95	0.100
骨干河库管理达标率(%)		100	0.133
生活及重要工业用水保证率(%)		≥95	0.233
人才结构达标率(%)		≥90	0.100
水利科技信息化水平(%)		≥95%	0.133
规划编制完备程度(%)		≥95%	0.133
水文化及水景观	城市滨水景观建设满意率(%)	≥85%	0.317
	水利工程文化配套设施建设率(%)	≥85%	0.250
	水文化知识普及率(%)	≥85%	0.250
	水景观建设程度(%)	≥95%	0.183

表 4 马鞍山市 2009 年-2013 年水生态文明建设各子系统有序度和协调度结果

Tab. 4 Order degrees and coordinating degrees of MaanShan city's aquatic ecological civilization during in 2009-2013

子系统序参量层	2009	2010	2011	2012	2013
水安全	0.771	0.795	0.809	0.820	0.827
水生态	0.791	0.798	0.823	0.825	0.845
水供用	0.631	0.716	0.750	0.765	0.791
水管理	0.734	0.748	0.761	0.775	0.793
水文化及水景观	0.710	0.714	0.724	0.724	0.747
城市水生态文明建设协调度	0.722	0.752	0.770	0.779	0.798

4 结语

城市水生态文明建设整体向前推进是水安全、水生态等子系统共同发展、相互促进的结果,各子系统之间存在着彼此影响的耦合作用机制。基于协同理论的协调度评价方法深入剖析系统内各子系统之间彼此协调有序的程度,揭示系统稳定有序发展的内在机理,有助于挖掘系统提升潜力。本文以马鞍山市水生态文明建设为例,通过运用基于协同理论的协调度评价模型,分析了马鞍山市 2009 年-2013 年间水生态文明建设协调度变化情况,结果显示马鞍山市五年间水生态文明建设协调度不断上升,总体处于中度协调阶段,与马鞍山水生态文明建设实际情况基本吻合,仍有较大提升空间。

城市水生态文明建设与综合评价在我国目前尚处于探索与试点实践阶段,尚未建立普适性的评价指标体系与评价方法,构建科学、合理的评价指标与评价方法仍需在水生态文明建设过程中不断探索与完善。

参考文献(References):

- [1] 李虹. 中国生态脆弱区的生态贫困与生态资本研究[D]. 重庆: 西南财经大学, 2011. (LI Hong. Study on ecological poverty and ecological capital in chinese ecologically fragile areas[D]. Chongqing: Southwestern University of Finance and Economics, 2011).
- [2] 王如松, 胡聃. 弘扬生态文明 深化学科建设[J]. 生态学报, 2009(3): 1055-1067. (WANG Rurong, HU Dan. Implementation ecological civilization and promoting development of ecological sciences[J]. Acta Ecologica Sinica, 2009, (3): 1055-1067. (in Chinese))
- [3] 詹卫华, 邵志忠, 汪升华. 生态文明视角下的水生态文明建设[J]. 中国水利, 2013(4): 7-9. (ZHAN Weihua, SHAO Zhizhong, WANG Shenhua. Water ecological civilization construction with respect to ecological civilization[J]. China Water, 2013, (4): 7-9. (in Chinese))
- [4] 王建华, 张义丰, 袁境. 生态文明城市评价指标体系与水平测度[J]. 资源科学, 2013, 35(8): 1677-1684. (WANG Jianhua, ZHANG Yifeng, YUAN Jing. Measuring and defining ecological civilization cities in China[J]. Resources Science, 2013, 35(8): 1677-1684. (in Chinese))
- [5] 傅晓华. 协同学与我国可持续发展系统自组织研究[J]. 系统辩证学学报, 2004, 12(1): 50-55. (FU Xiaohua. Research on the self-organization of sustainable development system in China with the view of synergetics[J]. Journal of Systemic Dialectics, 2004, 12(1): 50-55. (in Chinese))
- [6] 白列湖. 协同论与管理协同理论[J]. 甘肃社会科学, 2007(5): 228-230. (BAI Liehu. Coordination theory and management coordination theory[J]. Gansu Social Sciences, 2007, (5): 228-230. (in Chinese))

- [7] 杨世琦, 高旺盛. 农业生态系统协调度理论及实证研究[J]. 中国农业大学学报, 2006, 11(2): 7-12. (YANG Shi qi, GAO Wang sheng. Harmony coefficient theory and case study on agricultural ecosystem[J]. Journal of China Agricultural University, 2006, 11(2): 7-12. (in Chinese))
- [8] 童坤, 刘恒, 耿雷华, 等. 水利现代化评价指标体系研究[J]. 中国水利, 2012(11): 14-18. (TONG Kun, LIU Heng, GEN Lei hua, et al. Study on assessment indicator system of water modernization[J]. China Water, 2012(11): 14-18. (in Chinese))
- [9] 张海涛, 谢新民, 杨丽丽. 水利现代化评价指标体系与评价方法研究[J]. 中国水利水电科学研究院学报, 2010, 8(2), 107-113. (ZHANG Hai tao, XIE Xin min, YANG Li li. Study on evaluation index system and evaluation method for water modernization in China[J]. Journal of China Institute of Water Resources and Hydropower Research, 2010, 8(2), 107-113).
- [10] 陶长生. 水利现代化及其指标体系研究[D]. 南京: 河海大学, 2001. (TAO Chang sheng. The study on water conservancy modernization with index system and assessment methods[D]. Nanjing: Hohai University, 2001).
- [11] 白杨, 黄宇驰, 王敏, 等. 我国生态文明建设及其评估体系研究进展[J]. 生态学报, 2011, 31(20): 295-304. (BAI Yang, HUANG Yu chi, WANG Min, et al. The progress of ecological civilization construction and its indicator system[J]. Acta Ecologica Sinica, 2011, 31(20): 295-304. (in Chinese))
- [12] 曹蕾. 区域生态文明建设评价指标体系及建模研究[D]. 上海: 华东师范大学, 2014. (CAO Lei. Index system and modeling of regional ecological civilization construction evaluation [D]. Shanghai: East China Normal University, 2014).
- [13] 刘海娇, 黄继文, 仕玉治, 等. 黄河下游典型城市水生态文明评价[J]. 人民黄河, 2013, 35(12): 64-67. (LIU Hai jiao, HUANG Wei wen, SHI Yu zhi, et al. Water civilization ecological evaluation on the typical urban of the lower yellow river[D]. Yellow River, 2013, 35(12): 64-67).
- [14] 唐克旺. 水生态文明的内涵及评价体系探讨[J]. 水资源保护, 2013, 29(4): 1-4. (TANG Ke wang. Discussion on concept and assessment system of aquatic ecological civilization[J]. Water Resources Protection, 2013, 29(4): 1-4).
- [15] 兰继斌, 徐扬, 霍良安, 等. 模糊层次分析法权重研究[J]. 系统工程理论与实践, 2006, 26(9): 107-112. (LAN Ji bin, XU Yang, HUO Li an gan, et al. Research on the priorities of fuzzy analytical hierarchy process in China[J]. Systems Engineering Theory & Practice, 2006, 26(9): 107-112 (in Chinese))
- [16] 陶余会. 如何构造模糊层次分析法中模糊一致判断矩阵[J]. 四川师范学院学报(自然科学版), 2002, 23(3): 282-285. (TAO Yu hui. How to make fuzzy consistent judgement matrix of the FAHP[J]. Journal of Sichuan Teachers college (natural science), 2002, 23(3): 282-285. (in Chinese))
- [17] 《安徽水利年鉴》编辑委员会. 安徽省水利年鉴[M]. 合肥: 合肥工业大学出版社, 2009-2014. (《Anhui water yearbook》editorial board. Anhui water yearbook[M]. Hefei: Hefei University of Technology Publisher House, 2009-2014. (in Chinese))
- [18] 马鞍山市地方志编委会编. 马鞍山年鉴[J]. 2009~2014. (Ma'an Shan local chronicles editorial board. Ma'an Shan yearbook[J]. 2009~2014. (in Chinese))
- [19] 张欢, 成金华, 冯银, 等. 特大型城市生态文明建设评价指标体系及应用研究—以武汉市为例[J]. 生态学报, 2015, 35(2): 547-556. (ZHANG Huan, CHENG Jin hua, FENG Yin, et al. An Evaluation Index System for Ecological Civilization Construction in Megacities and its Research Applications: The Case of Wuhan City[J]. Acta Ecologica Sinica, 2015, 35(2): 282-285. (in Chinese))
- [20] 秦伟山, 张义丰, 袁境. 生态文明城市评价指标体系与水平测度[J]. 资源科学, 2013, 35(8): 1677-1684. (QIN Wei shan, ZHANG Yi feng, YUAN Jing. Measuring and defining ecological civilization cities in China[J]. Resources Science, 2013, 35(8): 1677-1684. (in Chinese))

(上接第5页)

- [16] 孙才志, 曾庆雨, 刘玉玉. 基于RS和GIS的绕阳河湿地时空演变及其驱动力分析[J]. 水土保持研究, 2010(2): 150-155, 159. (SUN Cai zhi, ZENG Qing yu, LIU Yu yu, et al. Spatial and temporal change and its driving forces of the Raoyanghe wetlands based on RS and GIS[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2010(2): 150-155, 159. (in Chinese))
- [17] Sophie M, Thuy L. Biomass quantification of Andean wetland forages using ERS satellite SAR data for optimizing live stock management[J]. Remote Sensing of Environment, 2003, 84: 477-492.