

基于协同学理论评价湘江流域水资源系统适应性

周念清¹, 赵露¹, 沈新平²

(1. 同济大学 水利工程系, 上海 200092; 2. 湖南省洞庭湖水利工程管理局, 湖南 长沙 410007)

摘要: 随着全球气候变化以及人类活动的影响, 水资源系统的适应性已经成为研究热点。以湘江流域水循环-社会经济-生态环境耦合形成的水资源复合系统为例, 从协同学理论出发对复合系统的各个子系统设置序参量, 详细阐述了适应性评价模型的建立和评价过程。采用基于贴进度理论的方法计算了各个序参量的组合权重, 最后使用综合评价法计算了湘江流域水资源系统的适应度。研究表明: 湘江流域水资源系统适应性总体状况良好, 与实际情况相吻合。评价结果为湘江流域水资源的可持续利用提供了可靠的依据。

关键词: 协同学理论; 适应性评价; 贴进度; 组合权重; 湘江流域

中图法分类号: TV213 **文献标志码:** A

水作为生命的源泉, 是人类赖以生存和发展的重要物质资源。水资源的合理开发利用越来越受到人们的关注。近年来, 全球变暖引起的海平面不断上升给人类生存环境造成了重大威胁^[1-2]。同时, 伴随着世界人口不断增长、人类经济社会的快速发展, 人类活动的加剧带来了诸如水资源短缺、水旱灾害频发和水环境日益恶化等问题。处于外界条件不断变化中的水资源复合系统的适应性已成为研究的热点^[3-4]。

水资源复合系统是一个由多个子系统组成的开放的、非线性的复杂大系统, 具有自然系统与人造系统的双重属性。自然属性体现在水资源系统具有内部的自组织现象, 即内部的子系统或元素按照一定法则自发地向有序结构发展; 人造系统的属性体现在水资源系统还服从人为的调节和改造, 即具有其他组织的特征。各个子系统之间的协同作用共同适应外界条件的变化是复杂大系统良好运行的重要条件。因此, 从协同学理论的角度对水资源系统的适应性进行研究, 具有重要的理论意义和实际应用价值^[5-6]。

1 适应性概念和内涵

“适应性”(adaptability)这一概念来源于生态学领域, 通常是指某一生物体随外界环境条件的改变而改变自身的特性或生活方式的能力。水资源系统的适应性则是指水资源系统在外界自然条件改变、人类活动的影响下, 内部子系统或元素相互作用, 从而达到一个新的适应平衡状态。目前, 对水资源系统的适应性研究主要侧重于水资源系统对气候变化的响应, 夏军通过论述气候变化对中国水资源影响的适应性评估与管理框架, 提出了一个气候变化影响决策评估工具^[7]; A. Lopez 研究了气候变化对英国西南地区水资源系统的影响以及相应的适应性管理措施。

2 适应性评价模型

2.1 协同学理论

协同学是 20 世纪 70 年代由德国理论物理学家哈肯创立的, 主要研究系统在外参量的驱动和子系统的

收稿日期: 2012-07-10; 修回日期: 2012-09-11

基金项目: 国家自然科学基金项目“湿地演替带氧化还原电位变化特征与氮素迁移转化机理”(41272249); 博士点专项基金项目“湿地演替带氧化还原电位及其对氮素迁移转化的影响”(20110072110020)

作者简介: 周念清, 男, 教授, 博士生导师, 博士, 主要从事工程地下水数值模拟与水环境评价方面的研究。E-mail: nq.zhou@tongji.edu.com

相互作用下,以自组织的方式在宏观尺度上形成空间、时间或功能有序结构的条件、特点及演化规律。协同是指复合系统中各个子系统相互作用而产生的整体效应。通过识别水资源系统的自然、经济和社会属性,可以将水资源系统分为水循环子系统、社会经济子系统和生态环境子系统3个相互竞争、相互合作的部分,其竞争性体现在各个子系统对于有限水资源总量存在竞争的关系,这种竞争性是系统远离平衡态的最大动力,造就了其远离平衡态的自组织演化条件;其合作性体现在各个子系统相互作用共同目标是使整个水资源系统达到更加有序的结构,从而能够更好地适应外界变化。基于协同学理论对水资源系统的适应性进行评价,其实质是从系统学的角度考察水资源系统各个子系统相互协调、相互作用共同适应自然环境变化和人类活动影响的能力。

2.2 水资源系统的协同学特征

从协同学的基本原理出发,考虑水资源系统作为复杂大系统自身具有的特点以及水资源管理的需要,水资源系统的协同学特征表现在如下方面。

(1) 自发性。区域水资源系统是由水循环子系统、社会经济子系统、生态环境子系统相互耦合形成的复杂大系统,在没有任何外部指令或外力干预的条件下,各个子系统也会相互作用,发生物质、能量的交换,从而自发地达到稳定状态。

(2) 涨落波动性。复合水资源系统受到如全球气候变化、人类活动的影响,随着时间不断波动。水资源系统中各个供水、用水单位受到气候、季节、地区和政策等多种因素的影响,使区域水资源的供需平衡不断发生变化。因此,水资源复合系统的涨落波动性与其接触的外界环境变化、人类活动紧密相关。

(3) 动态平衡。水资源系统原有平衡被打破之后,系统内部通过相互作用共同调节,适应新的变化,从混乱的状态下走向新的平衡,这种平衡会在下一次外界条件改变时被打破。协同学中的自组织理论说明,水资源复合系统在发展过程中,通过各种水资源分配、利用活动,提高水资源的利用效率和可持续发展能力,从而使整个系统向平衡态发展。水资源复合系统是在不断适应外部条件变化中达到自身平衡的一个动态系统。

(4) 多元非线性。由于水资源系统配置的目标是多目标共同决策的平衡状态,且系统各个部分之间具有协同、竞争、合作的复杂关系,所以水资源复合系统是一个多目标的非线性函数系统。水资源复合系统的最终目标是实现水资源的最佳合理利用,同时使系统适应外界变化能力达到最优。

2.3 适应性评价模型的建立与评价

2.3.1 序参量的选择

根据协同学理论,复合系统处于相变点的变量可分为快、慢弛豫两类变量,慢弛豫变量又称系统的序参量,是决定系统相变的根本变量。快弛豫变量服从于慢弛豫变量,对系统的结构、功能变化不起主导作用,因此可以不予考虑。复合系统由无序走向有序的关键在于系统内部序参量之间的协同作用。

通常按照科学性和实用性原则对水资源系统适应性评价模型中的序参量作出选择,其中,科学性原则,即从水资源复合系统的内涵、机理以及协同学理论来确定序参量的选择,应具有尽可能大的集成度,能全面反映水资源系统适应性的主要特征。实用性原则,即考虑可操作性和数据可获得性,尽量结合现有资料并选取操作性强的序参量。

(1) 水循环子系统。水循环子系统是整个水资源复合系统的资源提供者,也是外界自然环境变化和人类活动影响的外力胁迫直接承担者,受到包括人口增加、区域工业发展等因素的直接影响。降水到达地面形成径流,通过汇流最终形成人类可利用的水资源,区域水资源总量直接影响区域的供水水平,也是洪旱灾害的诱发因子。因此,在结合现有可获取资料的基础上,选取单位面积地表水资源量作为水循环子系统的序参量。

(2) 社会经济子系统。社会经济子系统是影响水资源复合系统适应性的重要因素,区域的社会经济发展水平很大程度上决定了其对水资源的需求。水资源是区域社会经济持续发展的物质保障,社会经济发展对水资源复合系统产生扰动,使其离开现有的平衡状态。可选用人口密度、各个产业用水定额作为经济社会子系统的序参量。

(3) 生态环境子系统。生态环境子系统的有序程度主要体现为污水排放对生态环境的水污染。因此,可选用生态环境用水量作为这一子系统的序参量。

2.3.2 评价模型的建立

(1) 标准化。设 x_{ij} 为序参量 i 在某特定时段的实际值,对 x_{ij} 进行均值化处理,对于其中越大越优的序参量有:

$$q_{ij} = \frac{x_{ij} - x_{\min j}}{x_{\max j} - x_{\min j}} \quad (1)$$

对越小越优的序参量有:

$$q_{ij} = \frac{x_{\min j} - x_{ij}}{x_{\max j} - x_{\min j}} \quad (2)$$

(2) 确定序参量的权重。确定方法分为主观赋权

法和客观赋权法,其中主观赋权法有相对比较法、层次分析法等,客观赋权法有熵值法、变异系数法等。主观赋权法能够较好反映评价者的评价意图,但是具有较大的主观随意性。本文采用了一种基于贴进度理论的组合赋权法来计算组合权重,该方法通过主观赋权法和客观赋权法对序参量分别赋权,得到一组初始权向量,再通过引入贴进度的概念来度量权重的相似度,当权重相接近时则认为结果稳定可靠^[8]。

限于篇幅限制,对各赋权方法的具体步骤不再叙述。计算组合权重时,首先构造组合赋权函数:

$$\omega_i = \delta_1 W_1 + \delta_2 W_2 + \dots + \delta_q W_q \quad \delta_k \geq 0, \quad (k = 1, 2, \dots, q) \quad (3)$$

$$D(W_k, W_c) = \left[\sum_{i=1}^m (w_{ik} - w_{ic})^2 \right]^{\frac{1}{2}}, \quad (i = 1, 2, \dots, m) \quad (4)$$

$$\lambda(W_k, W_c) = 1 - D(W_k, W_c) \quad (5)$$

$$\lambda_k = \sum_{c=1, k \neq c}^q \lambda(W_k, W_c) \quad (6)$$

$$\delta_k = \frac{\lambda_k}{\sum_{k=1}^q \lambda_k} \quad (k = 1, 2, \dots, q) \quad (7)$$

式中, ω_i 为组合赋权系数向量; δ_k 为权向量的组合系数; $D(W_k, W_c)$ 表示任意权向量 $W_k, W_c (k, c = 1, 2, \dots, q)$ 的距离; $\lambda(W_k, W_c)$ 表示权向量 W_k, W_c 的贴进度; λ_k 表示权向量 W_k 与其他权向量总贴进度。

$$\begin{pmatrix} w_{11} & w_{12} & \dots & w_{1q} \\ w_{21} & w_{22} & \dots & w_{2q} \\ \vdots & \vdots & \dots & \vdots \\ w_{m1} & w_{m2} & \dots & w_{mq} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \delta_1 \\ \delta_2 \\ \vdots \\ \delta_q \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \omega_1 \\ \omega_2 \\ \vdots \\ \omega_m \end{pmatrix} \quad (8)$$

最终确定各项指标的组合同权重 $(\omega_1, \omega_2, \dots, \omega_m)^T$ 。

(3) 水资源系统的适应度 (Adaptability Index, AI)。本文采用的水资源系统适应度计算公式:

$$AI = \sum_{j=1}^n \omega_i q_{ij} \quad (i = 1, 2, \dots, m; \quad j = 1, 2, \dots, n) \quad (9)$$

式中, ω_i 为各组合对应的组合同权重; q_{ij} 为标准化后的序参量值。

2.3.3 AI 评价阈值

目前,对流域水资源系统适应性的评价阈值划分没有一个统一的标准,故本文在划分时,从计算结果出发,参考整个流域水资源系统适应性的平均水平,并结合实际情况,通过将最终结果与流域水资源系统实际运转情况比较,以验证评价阈值划分的合理性。评价

阈值如表 1 所示。

表 1 水资源系统适应性评价阈值

适应性等级	阈值	适应性等级	阈值
好	> 0.6	一般	0.2 ~ 0.4
较好	0.4 ~ 0.6	差	< 0.2

3 实例研究

3.1 研究区概况

湘江发源于广西兴安县白石乡海洋山的近峰岭,汇入洞庭湖,全长 867 km,流域面 94 815 km²,流域平均坡降 0.134‰。本文选取了湖南省内湘江流域流经的 10 个地级市作为研究对象,包括长沙市、株洲市、湘潭市、衡阳市、邵阳市、岳阳市、益阳市、郴州市、永州市和娄底市。

湘江流域属亚热带季风湿润气候,多年平均气温 17.6℃,具有严寒期短、暑热期长、湿热多雨的特点。多年平均年降水量 1 458 mm。降水的时空分布不均,具有明显的季节性和地域性。湘江中、上游多年平均水面蒸发量为 800 ~ 900 mm,下游多年平均值为 900 ~ 1 000 mm。特殊的地理气候和频繁的人类活动,频发的洪旱灾害、季节性的水资源短缺和日益严重的水质污染,已经严重影响到湘江流域的社会经济持续发展。因此,研究湘江水资源系统的适应性对湘江流域水资源的可持续利用具有指导意义。

3.2 计算结果与分析

根据科学性和实用性的原则,在现有资料的基础上,选取的序参量包括:单位面积水资源量 C_1 ,人口密度 C_2 ,居民生活用定额 C_3 ,农业用水定额 C_4 ,工业用水定额 C_5 ,服务业用水定额 C_6 ,建筑业用水定额 C_7 ,城镇生态用水定额 C_8 。具体数据资料来源于 2009 年湖南省水利厅的湘江流域水量分配方案。

选用相对比较法和层次分析法作为主观权重,熵值法和变异系数法计算得到客观权重。再通过基于贴进度的组合同权重法计算得到各个序参量的权重,如表 2 所示。

表 2 不同赋权法得到的序参量的权重

计算方法	C_1	C_2	C_3	C_4	C_5	C_6	C_7	C_8
相对比较法	0.172	0.156	0.141	0.141	0.141	0.047	0.094	0.109
层次分析法	0.143	0.091	0.071	0.185	0.214	0.062	0.091	0.143
熵值法	0.179	0.074	0.074	0.149	0.108	0.115	0.169	0.133
变异系数法	0.074	0.214	0.182	0.028	0.106	0.067	0.083	0.247
组合同权重	0.143	0.133	0.116	0.127	0.143	0.072	0.109	0.156

从图 1 中可以得出,选取的 8 个序参量最终的组合同权重分布比较均匀,基本在 0.12 左右,其中权重最

大的是城镇生态用水定额 (C_8), 为 0.156, 权重最小的是服务业用水定额 (C_6), 为 0.072。

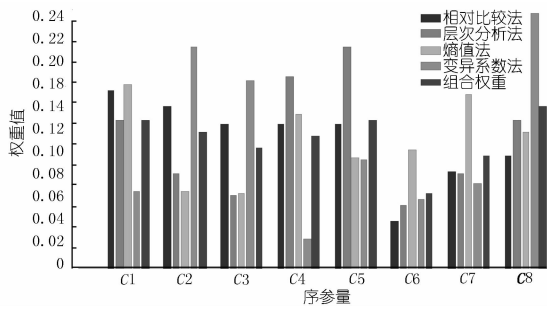


图 1 序参量权重分布

将组合权重值与各序参量的标准化后的值按照式 (9) 进行计算, 得到研究区各地级市的水资源系统适应度 (见表 3)。

表 3 研究区各地级市水资源系统适应度

地级市	适应度	地级市	适应度	地级市	适应度
长沙	0.679	邵阳	0.270	永州	0.460
株洲	0.677	岳阳	0.377	娄底	0.514
湘潭	0.537	益阳	0.622	平均值	0.520
衡阳	0.484	郴州	0.582		

由表 3 可知, 水资源系统适应度最高的地级市为长沙市和株洲市, 而水资源适应度较低的地级市为邵阳市和岳阳市。由表 2 所划分的水资源系统适应度阈值可知, 研究区水资源系统整体适应性能力较好。其中, 长沙市、株洲市和益阳市的水资源系统的适应度好; 湘潭市、衡阳市、永州市和娄底市的水资源适应度较好; 邵阳市、岳阳市的水资源系统适应度一般。益阳市、衡阳市和邵阳市各序参量分项权重如图 2 所示。

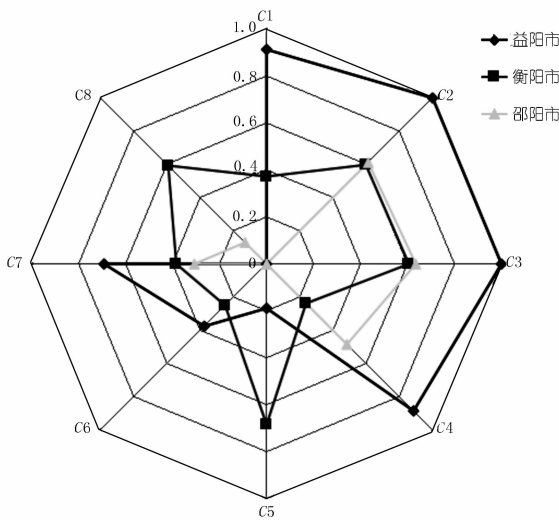


图 2 水资源系统适应度

可以看出, 益阳市水资源系统适应度最大, 衡阳市次之, 邵阳市水资源系统适应度最小。其中, 就益阳市

水资源系统适应度而言, 单位面积水资源量、人口密度、居民生活用水定额、农业用水定额这 4 个序参量适应度较大, 说明其水循环子系统和社会经济子系统的协调能力较强, 应对变化情况的适应能力较强。对于邵阳市而言, 其单位面积水资源量、工业用水定额、服务业用水定额和城镇生态用水定额这 4 个序参量的适应度较弱, 表明邵阳市水资源复合系统中, 水循环子系统供水能力尚有待加强, 工业用水、服务业用水定额偏高, 从而导致其适应外界条件变化的能力较弱。

4 结论

(1) 基于协同学原理建立了湘江流域水资源系统适应性评价模型, 可以定量评价湘江流域水资源复合系统的适应性情况。研究表明, 湘江流域水资源系统适应性能力整体情况较好。加快工业结构转型、提高农业用水效率、增加生态环境用水定额和建立水资源应急预案等一系列措施, 都有助于进一步提高湘江流域水资源系统应对全球气候变化和人类活动影响的适应能力。

(2) 采用基于贴进度理论计算选定的序参量的组合权重, 综合了相对比较法、层次分析法作为主观赋权法的优势和熵值法、变异系数法作为客观赋权法的数据客观性, 使最后得到的组合权重既能反映评价模型的机理, 又避免了人为判断主观随意性较大的弊端。

参考文献:

- [1] Shepard C C, Agostini V N, Gilmer B, et al. Assessing future risk: quantifying the effects of sea level rise on storm surge risk for the southern shores of Long Island, New York [J]. Natural Hazards, 2012, 60(2): 727 - 745.
- [2] H A Loaiciga, T J Pingel, E S Garcia. Sea water intrusion by sea - Level rise: scenarios for the 21st Century [J]. Ground Water, 2012, 50(1): 37 - 47.
- [3] 丁文荣. 龙川江水资源对气候变化的敏感性和适应性分析 [J]. 人民长江, 2011, 42(9): 15 - 18.
- [4] P. 穆赫比尔, 陈桂蓉. 南非应对气候变化的水资源适应性管理战略 [J]. 水利水电快报, 2009, (7): 1 - 6.
- [5] 刘丙军, 陈晓宏. 基于协同学原理的流域水资源合理配置模型和方法 [J]. 水利学报, 2009, (1): 60 - 66.
- [6] 常文娟, 梁忠民, 冯晓晶. 调水工程对区域产业用水系统协调性影响研究 [J]. 南水北调与水利科技, 2011, (5): 19 - 22.
- [7] 夏军, Thomas Tanner, 任国玉, 等. 气候变化对中国水资源影响的适应性评估与管理框架 [J]. 气候变化研究进展, 2008, (4): 215 - 219.
- [8] 中锦标, 吕跃进. 一种基于向量贴进度的组合赋权方法 [J]. 重庆工学院学报: 自然科学版, 2009, (2): 75 - 77, 89.

(编辑: 李慧)

Discussion on calibration method of flow meter for field survey of river water intake by pipe

WANG Li¹, DAI Nengwu², WU Xinsheng¹, SHI Zhengguo¹

(1. *Testing Center, Changjiang River Scientific Research Institute, Wuhan 430010, China*; 2. *Network and Information Center, Changjiang Water Resources Commission, Wuhan 430010, China*)

Abstract: In order to promote the reasonable development and utilization of water resources and strengthen the standard management of water intake measuring facility, it is realistic and necessary to carry out the calibration of flow meter. The standard meter method is applied in the comparative experiment of flow meters. The calibration method and principle of flow meter in the field survey are introduced. On the basis of error theory, the error controlling range of calibration of the field survey is proposed. Through case study, it is proved that the comparative experiment of standard method can meet the calibration requirement of field survey. The further study suggestion is put forward, which provides support for compiling the technical standard for calibration of flow meter in on - situ survey of river water intake by pipes.

Key words: flow measurement; on - site calibration; water resources utilization; river water intake by pipes

(上接第 4 页)

Study of river channel evolution from Yichang to Hukou at downstream of Three Gorges Project

HU Xiangyang

(*Testing Center, Changjiang River Scientific Research Institute, Wuhan 430010, China*)

Abstract: After the impoundment of Three Gorges Project, the sediment released from the reservoir is reduced largely and the mid - lower reach of Yangtze River would experience a scouring process in long distance and for a long time. The erosion of the downstream river channel of the Three Gorges Project is calculated by 1D constant non - equilibrium non - uniform suspended sediment model. The erosion process, river type changes and river regime adjustment are predicted and evaluated. The results are compared with the measured data from Yichang to Hukou at downstream after the impoundment of Three Gorges Reservoir in 2003. It shows that the flow and sediment situation changed during erosion process; however, the original river type keeps the same; the river regime is stable, only with adjustments in some local reaches. The erosion process of riverbed and evolution of river channel is within the range of prediction.

Key words: river channel evolution; river type; river regime; flow and sediment variation; Three Gorges Project

(上接第 12 页)

Adaptability assessment for water resources system of Xiangjiang River Basin based on synergetics theory

ZHOU Nianqing¹, ZHAO Lu¹, SHEN Xinping²

(1. *Department of Hydraulic Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China*; 2. *Dongting Lake Water Resources Administration Bureau of Hunan Province, Changsha 410007, China*)

Abstract: With the global climate change and the influence of human activity, water resources adaptability has become the concerns of researchers. The coupled water resources system of water cycle - social economy - ecological environment of Xiangjiang River Basin is taken as an example. We set order parameters of each sub - system based on synergetic theory. The establishment and evaluation of the adaptability assessment model of water resource system is described in detail. Using the method of closeness degree, the weights of each order parameters are obtained, and the adaptability of the water resources system of Xiangjiang River Basin is calculated by comprehensive evaluation method. The conclusion shows that the adaptability of the water resources system of Xiangjiang River Basin is at a good state, which is consistent with the facts. The assessment of the water resources system adaptability can provide a technical guidance for the sustainable development of the water resources in Xiangjiang River Basin.

Key words: synergetics theory; adaptability assessment; closeness degree; combination weight method; Xiangjiang River Basin