

基于粗糙集和BP神经网络组合的水资源承载力动态变化分析

郭晓英^{1a, 1b}, 陈兴伟^{1a, 1b, 2}, 陈莹^{1a, 1b, 2}, 王壬^{1a, 1b}

(1. 福建师范大学 a. 地理科学学院; b. 地理所, 福州 350007; 2. 福建省陆地灾害监测评估工程技术研究中心, 福州 350007)

摘要: 利用粗糙集约简冗余指标, 将约简后的指标作为BP神经网络的输入, 进而进行区域水资源承载力动态变化分析。以厦门市为例, 在分析水资源现状及其影响因素的基础上, 从水资源系统、经济系统、生态系统和社会系统四个方面, 构建厦门市水资源承载力评价指标体系, 评价厦门市2000年-2012年的水资源承载力状态。结果表明: 2000年-2004年水资源承载力大多为“弱不可承载”, 2005年-2010年为“弱承载”, 即社会经济活动和水资源处于非协调状态; 2011年-2012年厦门市水资源承载能力得到了较大改善, 达到“可承载”状态。

关键词: 水资源承载力; 粗糙集; BP神经网络; 厦门市

中图分类号: TV213.4 **文献标志码:** A **文章编号:** 1672-1683(2015)02-0236-05

Dynamic variation analysis of water resources carrying capacity in Xiamen City based on rough set theory and BP neural network

GUO Xiaoying^{1a, 1b}, CHEN Xingwei^{1a, 1b, 2}, CHEN Ying^{1a, 1b, 2}, WANG Ren^{1a, 1b}

(1a. College of Geographical Science, Fujian Normal University, Fuzhou 350007, China; 1b. Institute of Geography, Fujian Normal University, FUZHOU 350007, China; 2. Fujian Provincial Engineering Research Center for Monitoring and Assessing Terrestrial Disasters, Fujian Normal University, Fuzhou 350007, China)

Abstract: Evaluation of water resources carrying capacity is the foundation of regional ecological environment construction and is important for determining the direction of socioeconomic development. In the paper, redundant indicators were screened by the rough set theory, and then the reduced index system was served as input to the BP neural network to evaluate the dynamic change of carrying capacity of water resources in Xiamen City. Based on the investigation of water resources and related influencing factors, the evaluation index system of water resources carrying capacity was constructed from four aspects including water resources system, economic system, ecological system, and social system, and the dynamic change of water resources carrying capacity in Xiamen City from 2000 to 2012 was evaluated. The results showed that the water resources carrying capacity in Xiamen City was weak and unsustainable from 2000 to 2004; was weakly sustainable from 2005 to 2010, indicating incompatible status between socioeconomic activity and water resources; and was improved from 2011 to 2012 to reach the sustainable status.

Key words: water resources carrying capacity; rough set theory; BP neural network; Xiamen

水资源承载力是区域水资源在某一特定历史条件和可预见的经济、技术水平下, 保证区域可持续发展, 对该地区社会经济、环境、人口的最大支撑能力^[1-4], 其大小是区域生态环境建设和确定社会经济发展方向的基础。水资源承载力评价是建立在指标体系的基础上, 结合相应的评价方法或模型, 对区域水资源承载力状况的定量评估。国外对水资源承

载力的研究比较少, 大多数将其纳入可持续发展研究范畴^[5-8], 国内对水资源承载力主要集中在水资源承载力评价指标体系及评价模型或方法上^[3, 5, 9]。目前, 主要的评价方法有多元数据分析的投影寻踪^[10]、综合评价法^[4]、多目标分析法^[11]、系统动力学法^[12]以及BP神经网络法等。水资源系统具有非线性和混沌特征, 水资源承载力评价的各项指标彼

收稿日期: 2014-06-03 修回日期: 2015-02-05 网络出版时间: 2014-03-19
网络出版地址: <http://www.cnki.net/kcms/detail/13.1334.TV.20150319.0934.010.html>
基金项目: 福建省科技厅重点项目(2013N0013)

作者简介: 郭晓英(1989), 女, 福建龙岩人, 主要从事水文水资源研究。E-mail: fsdgyx@163.com

通讯作者: 陈莹(1982), 女, 江西临川人, 副教授, 主要从事水资源与水环境方面的研究。E-mail: chenying_nju@163.com

此间存在非线性的联系,目前大多方法对于评价指标权重的确定存在主观成分,而BP神经网络能够实现强大的非线性数据的处理能力,不需要人工确定权值,降低了人为的主观影响^[13]。崔东文^[14]、杨秋林^[15]利用神经网络方法进行水资源承载力评价研究,取得了较好的结果,但尚未进行指标信息的筛选,然而冗余指标不仅影响评价结果的准确性,而且增加神经网络的训练时间。粗糙集理论作为一种数据分析处理理论,对不确定性的描述与处理相对客观,无需任何先验知识或信息,可以对关键信息进行保留,对数据进行化简^[6]。因此本文将粗糙集和BP神经网络相结合,利用粗糙集对输入数据进行预处理,剔除冗余信息,对厦门市2000年-2012年的水资源承载力状况进行评价,以期水资源承载力评价提供一种新思路,同时也为厦门市生态环境建设、社会经济发展方向的确定提供科学的参考。

1 研究方法

1.1 粗糙集属性约简

粗糙集理论是由波兰数学家Pawlak Z提出的一种处理模糊性和不精确性知识的有效数学工具,已在机器学习、数据挖掘、智能控制等领域获得广泛的应用。属性约简是粗糙集理论的核心思想之一,它是在保持分类能力不变的前提下,删除冗余的知识。常见的属性约简算法主要是基于差别矩阵、信息表示、正区域和区分矩阵等。其中,基于区分矩阵的属性约简算法是一种比较成熟的算法^[7],涉及的核属性是指区分矩阵中个数单一的元素,是信息系统最重要的属性集,但也可以是空集。实际应用中,为减少搜索空间,常使用启发式算法,其中胡可云等^[8]提出的HORAFA算法是启发式约简算法之一,它是在构建区分矩阵的基础上,以属性在区分矩阵中出现的频率为启发式信息,从而建立启发规则求得最小属性约简。

1.2 BP神经网络

人工神经网络是由大量的、简单的处理单元(称为神经元)广泛地互相连接而形成的复杂网络系统,它反映了人脑功能的许多基本特征,是一个高度复杂的非线性动力学系统。BP网络模型是目前应用最为广泛的人工神经网络模型之一,它是一个三层的BP网络模型能够实现任意的连续映射^[9],其网络结构主要包括输入层、隐含层和输出层。隐含层的节点数一般用 $n_1 = \sqrt{m+n} + a$ 来计算,其中 n_1 为隐含层单元数; n 为输入单元数; m 为输出单元数; a 为 $[1, 10]$ 之间的数。计算每层神经元输出的激活函数一般采用 $f(x) = 1/(1 + e^x)$ 。BP神经网络能学习和存贮大量的输入-输出模式映射关系,而无需求前揭示描述这种映射关系的数学方程。它的学习规则是使用最速下降法^[19],通过反向传播来不断调整网络的权值和阈值,使网络的误差平方和最小。

1.3 基于粗糙集和BP神经网络组合法的水资源承载力评价步骤

将粗糙集和BP神经网络相结合进行水资源承载力评价的主要步骤为:

首先,划分评价指标体系的层次结构,综合分析水资源承载力的影响因素,构建水资源承载力评价指标体系,并制

定各项指标的分级标准;

其次,对原始数据进行离散化,基于构造的区分矩阵和HORAFA算法进行属性约简,应用粗糙集约简冗余指标;

再次,依据已构建的水资源承载力分级标准,采用随机插值技术对各等级随机插入训练样本集和测试样本集,并采用极值处理法对各指标进行归一化处理。对于越大越优的因子采用公式 $y_i = (x_i - \min x_i) / (\max x_i - \min x_i)$ 进行无量纲处理,对于越小越优的因子采用公式 $y_i = (\max x_i - x_i) / (\max x_i - \min x_i)$ 进行无量纲处理;

最后,利用训练样本集进行BP神经网络训练,并用测试样本集测试BP神经网络模型的性能;利用训练好的BP神经网络模型进行水资源承载力评价。

2 厦门市水资源承载力评价

2.1 研究区概况

厦门市位于我国东南沿海、九龙江入海处,由厦门岛、鼓浪屿、九龙江北岸的沿海部分地区以及同安等组成,陆地面积1699.39 km²。厦门市属亚热带季风气候,降水时空分布不均,2000年-2012年平均降水量为1561 mm,水资源平均开发利用率达47.6%,平均水资源总量为13.67亿m³,但常住人口平均水资源占有量仅为500 m³,其中2012年仅为全国人均水资源量的30.67%。厦门市2010年人口达353万人,比2000年增长了72%。随着城市的发展和人口的快速增加,厦门市水资源供需矛盾较大,在水量和水质两方面均面临巨大的压力。

2.2 评价指标体系构建

受水资源、社会、经济和生态等系统的综合影响,水资源承载力成为一个复杂系统,正确认识和确定参与评价的影响因素是水资源承载力研究的关键,直接影响到评价结果的准确性^[20,21]。本文参考前人研究成果^[21,22],遵循综合性、层次性、协调性及可操作性等基本原则,从水资源系统、经济系统、生态系统、社会系统4个方面建立了厦门市水资源承载力评价指标体系,共15项因子(见表1)。

2.3 指标约简

以年份为对象,以15个指标为属性,生成一个二维表,采用极值处理法对2000年-2012年各项指标数据进行无量纲处理,将指标按照 $[0, 0.25)$, $[0.25, 0.5)$, $[0.5, 0.75)$, $[0.75, 1]$ 等距离离散化为4个等级,并根据构造的区分矩阵和HORAFA算法进行冗余分析。通过粗糙集属性约简法的计算,约简了 C_7 和 C_{13} 两个指标(见表2)。

2.4 BP神经网络模型构建

目前国内外对水资源的评价没有统一的标准,本文将评价标准划分为5个等级(表3)。其中水资源承载力指数为 $[0.8, 1]$,表示水资源承载力为“理想状态”,人类经济活动与水资源处于协调状态,在合理保护利用水资源的同时,可以加大经济发展的力度; $[0.6, 0.8)$ 表示水资源承载力为“可承载”,人类社会经济活动和水资源处于比较协调的状态,要注意保护水资源; $[0.4, 0.6)$ 表示水资源承载力为“弱承载”,处于及格状态,需要加大水资源的利用效率,调整发展速度与经济结构; $[0.2, 0.4)$ 表示水资源承载力为“弱不可承载状态”,

表 1 厦门市水资源承载力评价指标体系

Tab. 1 Evaluation index system of water resources carrying capacity in Xiamen City

目标层	准则层	指标层	指标计算	类型
厦门市水资源承载力	B ₁ 水资源系统	C ₁ 人均水资源量/m ³	水资源总量/常住人口数	+
		C ₂ 供水模数/(10 ⁴ m ³ ·km ²)	供水量/区域面积	+
		C ₃ 年降水量/mm	年降水量	+
		C ₄ 水资源开发利用效率(%)	供水量/水资源总量	-
	B ₂ 经济系统	C ₅ 万元工业产值用水量/m ³	工业用水量/工业总产值	-
		C ₆ 农田亩均用水量/m ³	农田灌溉用水量/农田面积	-
		C ₇ 人均GDP/元	GDP/常住人口数	+
		C ₈ 农民人均纯收入/元	农民人均总收入-农民人均总支出	+
	B ₃ 生态系统	C ₉ 年污水处理率(%)	废污水处理量/废污水排放量	+
		C ₁₀ 绿化覆盖率(%)	绿化覆盖面积/区域面积	+
		C ₁₁ 人均废污水排放量/m ³	年污水排放量/常住人口数	-
	B ₄ 社会系统	C ₁₂ 区域平均城镇化率(%)	户籍城镇人口/户籍总人口	+
		C ₁₃ 人口密度/(人·hm ²)	常住总人口/国土面积	-
		C ₁₄ 人口自然增长率(‰)	人口出生率-人口死亡率	-
		C ₁₅ 生活用水定额/(m ³ ·d ⁻¹ ·人 ⁻¹)	生活用水量/总人口/365天	-

注:数据来源于厦门市统计年鉴和厦门市水资源公报;“+”表示为正影响指标,即数值越大,水资源承载力越强;“-”表示为负影响指标,数值越大,水资源承载力越弱。

表 2 粗糙集属性约简结果

Tab. 2 Reduction results of indicator system by rough set theory

准则层	核属性	属性加权频度排序	约简属性	保留属性
B ₁ 水资源系统	C ₁ C ₂ C ₃ C ₄	f(C ₂)>f(C ₁)>f(C ₃)>f(C ₄)	/	C ₁ C ₂ C ₃ C ₄
B ₂ 经济系统	C ₆	f(C ₆)>f(C ₈)>f(C ₅)>f(C ₇)	C ₇	C ₆ C ₈ C ₅
B ₃ 生态系统	C ₉ C ₁₀ C ₁₁	f(C ₉)>f(C ₁₀)>f(C ₁₁)	/	C ₉ C ₁₀ C ₁₁
B ₄ 社会系统	C ₁₂ C ₁₄ C ₁₅	f(C ₁₄)>f(C ₁₂)>f(C ₁₃)>f(C ₁₅)	C ₁₃	C ₁₂ C ₁₄ C ₁₅

是处于及格状态和最差值之间,水资源问题较为突出,需要加大力度保护水资源,提高水资源的供给能力;[0, 0.2)表示

水资源承载力处于“不可承载”状态,人类经济活动和水资源不相协调,有可能引发水资源危机。

表 3 厦门市水资源承载力指标分级

Tab. 3 Classifications of water resources carrying capacity indexes in Xiamen City

评价指标	理想状态	可承载	弱承载	弱不可承载	不可承载
	[0.8, 1]	[0.6, 0.8)	[0.4, 0.6)	[0.2, 0.4)	[0, 0.2)
C ₁ 人均水资源量/m ³	≥2 000	≥1 850	≥1 700	≥1 100	< 1 100
C ₂ 供水模数/(10 ⁴ m ³ ·km ²)	≥60	≥45	≥30	≥15	< 15
C ₃ 年降水量/mm	≥1 500	≥1 000	≥600	≥400	< 400
C ₄ 水资源开发利用效率(%)	≤15	≤27	≤40	≤52	> 65
C ₅ 万元工业增加值用水量/m ³	≤70	≤90	≤110	≤130	> 130
C ₆ 农田亩均用水量/m ³	≤300	≤400	≤500	≤600	> 600
C ₈ 农民人均纯收入/元	≥12 000	≥9 000	≥6 000	≥3 700	< 3 700
C ₉ 年污水处理率(%)	≥80	≥66	≥54	≥42	< 30
C ₁₀ 绿化覆盖率(%)	≥35	≥32	≥28	≥24	< 20
C ₁₁ 人均废污水排放量/(m ³ ·人 ⁻¹)	≤40	≤60	≤80	≤90	> 90
C ₁₂ 区域平均城镇化率(%)	≥90	≥80	≥60	≥40	< 40
C ₁₄ 人口自然增长率(‰)	≤5	≤8	≤10	≤12	> 15
C ₁₅ 生活用水定额/(m ³ ·d ⁻¹ ·人 ⁻¹)	≤100	≤120	≤140	≤180	> 220

根据区域水资源可持续利用评价等级标准,采用随机技术生成训练样本,随机技术公式为^[23]:

$$x_{ij}^k = rand(nk)(a_j^k - b_j^k) + b_j^k \quad (1)$$

式中: a_j^k 和 b_j^k 分别为第 k 个评价等级中评价指标取值上、下限; y_j^k 为评价等级,其中 $i=1, 2, 3, 4, \dots, n$; k 为某评价等级生成的指标序列容量; n 为评价的指标数。

基于表 3 的分级标准,采用公式(1)在每一等级中随机生成 20 个训练样本,作为 BP 神经网络的输入样本集;并在每一个等级中随机生成 3 个样本,作为测试样本集。将输出样本期望值设为:“理想状态”为 0.9,“可承载”状态为 0.7,“弱承载”状态为 0.5,“弱不可承载”状态为 0.3,“不可承载”状态为 0.1,并采用归一化方法对训练样本和测试样本进行

预处理。在 MATLAB 8.0 神经网络工具中进行编程,经过反复的训练和测试,隐含层采用 9 个神经元,均方误差设为 0.0001。网络循环 24 次后收敛,均方误差为 0.000 096 9;训练样本绝对误差最大为 0.037 6,相对误差最大为 9.9%;测试样本绝对误差最大为 0.036 4,相对误差最大为 5.3%;期望输出与实际训练结果相关系数 $R = 0.999\ 39$ 。由此表明,厦门市水资源承载力评价的 BP 神经网络模型可以使用,可以对不同样本数据进行仿真。

2.5 厦门市水资源承载力分析

利用已经建立的 BP 神经网络,将厦门市 2000 年-2012 年归一化后的数据进行仿真,得到厦门市水资源承载力指数,见图 1。

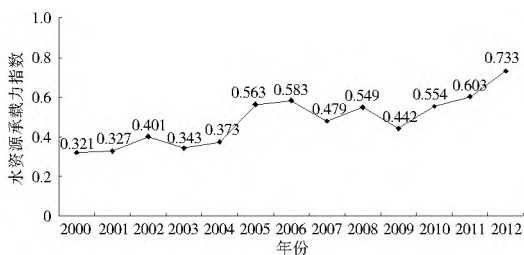


图 1 厦门市 2000 年-2012 年水资源承载力评价结果

Fig. 1 Evaluation results of water resources carrying capacity in Xiamen City between 2000 and 2012

由图 1 可以看出,2000 年-2004 年水资源承载力指数在 0.321~0.401 之间,除了 2002 年为“弱承载”,其余年份均为“弱不可承载”,说明社会经济活动和水资源处于非协调状态;2005 年-2010 年水资源承载力指数在 0.442~0.583 之间,为“弱承载”;2011 年、2012 年水资源承载力得到了较大改善,分别为 0.603 和 0.733,均为“可承载”状态。因此除个别年份外,2000 年-2012 年厦门市的水资源承载力指数是逐年增大的,水资源承载力呈增强趋势。

进一步分析发现,虽然 2005 年-2010 年和 2011 年-2012 年的多年平均降水量较前一阶段分别减少了 1% 和 14%,人均水资源量降低了 30% 和 34%,但供水模数增加了 7% 和 0.1%,万元工业增加值用水量分别减少了 52% 和 50%,农民人均纯收入提高了 68% 和 57%,年污水处理率提高了 22% 和 6%,绿化覆盖率提高了 7% 和 8%,区域平均城镇化率提高了 22% 和 13%,说明经济系统、生态系统和社会系统方面的压力得到缓解是水资源承载力水平得到提高的主要原因。

3 结论

(1) 与基于 BP 神经网络的评价方法相比,将粗糙集和 BP 神经网络相结合进行水资源承载力评价,可简约冗余信息,简化输入信息空间维数,在一定程度上减少人为筛选指标的主观影响。

(2) 厦门市水资源承载力总体上处于波动上升,2000 年-2004 年的水资源承载力大多为“弱不可承载”,2005 年-2010 年水资源承载力为“弱承载”,说明社会经济活动和水资源处于非协调状态;2011 年、2012 年水资源承载能力得到了较大改善,水资源承载力指数分别为 0.603 和 0.733,达到

“可承载”状态,而经济系统、生态系统和社会系统方面的压力得到缓解是水资源承载力水平得到提高的主要原因。

参考文献(References):

- [1] 张丽,董增川,张伟. 水资源可持续承载能力概念及研究思路[J]. 水利学报,2003(10): 108-113. (ZHANG Li, DONG Zengchuan, ZHANG Wei. On concept of sustainable capacity of water resources[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2003(10): 108-113. (in Chinese))
- [2] 李新,石建屏,曹洪. 基于指标体系和层次分析法的洱海流域水环境承载力动态研究[J]. 环境科学学报,2011,31(6): 1338-1344. (LI Xin, SHI Jianping, CAO Hong. Water environment carrying capacity of Erhai Lake based on index system and analytic hierarchy process[J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2011, 31(6): 1338-1344. (in Chinese))
- [3] 段春青,刘昌明,陈晓楠,等. 区域水资源承载力概念及研究方法的探讨[J]. 地理学报,2010,62(1): 82-90. (DUAN Chunqing, LIU Changming, CHEN Xiaonan, et al. Preliminary research on regional water resources carrying capacity conception and method[J]. Acta Geographica Sinica, 2010, 62(1): 82-90. (in Chinese))
- [4] 朱一中,夏军,谈戈. 西北地区水资源承载力分析预测与评价[J]. 资源科学,2003,25(4): 43-48. (ZHU Yizhong, XIA Jun, TAN Ge. Measurement and evaluation of water resources carrying capacity of Northwest China[J]. Resources Science, 2003, 25(4): 43-48. (in Chinese))
- [5] 姚治君,王建国,江东,等. 区域水资源承载力的研究进展及其理论探析[J]. 水科学进展,2002,13(1): 111-115. (YAO Zhijun, WANG Jianguo, JIANG Dong, et al. Advances in study on regional water resources carrying capacity and research on its theory[J]. Advances in Water Science, 2002, 13(1): 111-115. (in Chinese))
- [6] Harris Jonathan M. Carrying capacity in Agriculture: Globe and regional issue. Ecological Economics[J]. 1999, 129(3): 443-461.
- [7] Rijjsbeman. Different approaches to assessment of design and management of sustainable urban water system[J]. Environment Impact Assessment Review. 2000, 129(3): 333-345.
- [8] Munther J, Haddadin. Water issue in Hashemite Jordan, Arab Study Quarterly[J]. Belmont, Spring 2000, 22(5): 54-67.
- [9] 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))
- [10] Friedman J H, Turkey J W. A projection pursuit algorithm for exploratory data analysis[J]. IEEE Trans On Computers, 1974, 23(9): 881-890.
- [11] 翁文斌,蔡喜明,王浩,等. 宏观经济水资源规划多目标决策分析方法研究及应用[J]. 水利学报,1995,26(1): 1-11. (WENG Wenbin, CAIXiming, WANG Hao, et al. Development of the macroeconomic based water resources multiple objective analysis approach and its applications[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 1995, 26(1): 1-11. (in Chinese))
- [12] 陈冰,李丽娟,郭怀成,等. 柴达木盆地水资源承载力方案系统

- 分析[J]. 环境科学, 2000, 21(3): 16-21. (CHEN Bing, LI Lijuan, GU O Huaicheng, et al. System analysis on water resources supporting alternatives for Chaidamu Basin[J]. Environment Science, 2000, 21(3): 16-21. (in Chinese))
- [13] 刘树锋, 陈俊合. 基于神经网络理论的水资源承载力研究[J]. 资源科学, 2007, 29(1): 99-105. (LIU Shurfeng, CHEN Junhe. Water resources carrying capacity based on the theory of ANN[J]. Resources Science, 2007, 29(1): 99-105. (in Chinese))
- [14] 崔东文. 基于 BP 神经网络的文山州水资源承载能力评价分析[J]. 长江科学院院报, 2012, 29(5): 9-15. (CUI Dongwen. Evaluation and analysis of water resources carrying capacity in Wen shan Prefecture based on BP neural network[J]. Journal of Yangtze River Scientific Research Institute, 2012, 29(5): 9-15. (in Chinese))
- [15] 杨秋林, 张淑贞. 基于 BP 神经网络水环境承载力评价[J]. 国土与自然资源研究, 2009(4): 70-72. (YANG Qiulin, ZHANG Shuzhen. Evaluation of water environmental carrying capacity based on BP neural network[J]. Territory & Natural Resources Study, 2009(4): 70-72. (in Chinese))
- [16] 梁吉业, 曲开社, 徐宗本. 信息系统的属性约简[J]. 系统工程理论与实践, 2001(12): 76-79. (LIANG Jiye, QU Kaishhe, XU Zongben. Reduction of attribute in information systems[J]. Systems Engineering Theory & Practice, 2001(12): 76-79. (in Chinese))
- [17] 武志峰, 吉根林. 一种基于决策矩阵的属性约简及规则提取算法[J]. 计算机应用, 2005, 25(3): 639-642. (WU Zhifeng, JI Gerlin. Attribute reduction and rule extraction algorithms based on decision matrices[J]. Computer Applications, 2005, 25(3): 639-642. (in Chinese))
- [18] 胡可云. 基于概念格和粗糙集的数据挖掘方法研究[D]. 北京: 清华大学, 2001. (HU Keyun. Studies several data mining methods based on concept lattice and rough set theory[D]. Beijing: Tsinghua University, 2001. (in Chinese))
- [19] 许东, 吴铮. 基于 MATLAB6. x 的系统分析与设计—神经网络(第二版)[M]. 西安: 西安电子科技大学出版社, 2002. (XU Dong, WU Zheng. System analysis and design based on MATLAB 6. x—neural network[M]. Xi'an: Xi'an Electron Science Technology University Publishing Company, 2002. (in Chinese))
- [20] 惠洪河, 蒋晓辉, 黄强, 等. 水资源承载力评价指标体系研究[J]. 水土保持通报, 2001, 21(1): 30-34. (HUI Yanghe, JIANG Xiaohui, HUANG Qiang, et al. Research on evaluation index system of water resources bearing capacity[J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2001, 21(1): 30-34. (in Chinese))
- [21] 王友贞, 施国庆, 王德胜. 区域水资源承载力评价指标体系的研究[J]. 自然资源学报, 2005, 20(4): 597-604. (WANG Youzhen, SHI Guoqing, WANG Desheng. Study on evaluation indexes of regional water resources carrying capacity[J]. Journal of Natural Resources, 2005, 20(4): 597-604. (in Chinese))
- [22] 刘佳骏, 董锁成, 李泽红. 中国水资源承载力综合评价研究[J]. 自然资源学报, 2011, 26(2): 258-269. (LIU Jiajun, DONG Suocheng, LI Zehong. Comprehensive evaluation of china's water resources carrying capacity[J]. Journal of Natural Resources, 2011, 26(2): 258-269. (in Chinese))
- [23] 卢敏, 张展羽. 基于支持向量机的水资源可持续利用评价[J]. 水电能源科学, 2005, 23(5): 18-21. (LU Min, ZHANG Zhan yu. On assessment of sustainable development level of regional water resource based on support vector machine[J]. Water resources and power, 2005, 23(5): 18-21. (in Chinese))

(上接第 235 页)

- [14] 唐五湘. T 型关联度及其计算方法[J]. 数理统计与管理, 1995, 14(01): 34-37. (TANG Wuxiang. The concept and computation method of T's correlation degree[J]. Application of Statistics and Management, 1995, 14(1): 34-37. (in Chinese))
- [15] 李学全. 灰色关联度量化模型的进一步研究[J]. 系统工程, 1995(6): 58-61. (LI Xuequan. Research on the computation model of grey interconnect degree[J]. Systems Engineering, 1995(6): 58-61. (in Chinese))
- [16] 刘金英, 杨天行, 李明, 等. 一种加权绝对灰色关联度及其在密云水库水质评价中的应用[J]. 吉林大学学报: 地球科学版, 2005, 35(1): 54-58. (LIU Jinying, YANG Tianxing, LI Ming, et al. A weight absolute grey correlation degree and its application in evaluation of water quality Miyun Reservoir[J]. Journal of Jilin University: Earth Science Edition, 2005, 35(01): 54-58. (in Chinese))