

DOI:10.3880/j.issn.1004-6933.2019.01.010

基于 ARMA 模型的水环境承载力超载预警研究

刘 丹^{1,2},王 烜^{1,2},曾维华¹,李春晖²,蔡宴朋^{1,3}

(1. 北京师范大学环境学院水环境模拟国家重点实验室,北京 100875; 2. 北京师范大学环境学院水沙科学教育部重点实验室,北京 100875; 3. 北京市流域环境生态修复与综合调控工程技术研究中心,北京 100875)

摘要:基于自回归滑动平均(auto regressive moving average, ARMA)模型建立了水环境承载力超载预警模型,应用2001—2014年的全国水环境数据,对2015—2017年的水环境承载力超载状态进行了预警研究。结果表明:2016年水环境承载力超载状态综合指数为1.39,可能出现警情,主要是由于水环境容量承载率超载造成的,建议采取增加污水治理设备数、减少COD和氨氮排放量等措施以预防警情的发生。

关键词:水环境承载力; ARMA模型; 超载预警

中图分类号:X26 **文献标志码:**A **文章编号:**1004-6933(2019)01-0052-04

Research on overload warning of water environment carrying capacity based on ARMA model // LIU Dan^{1,2}, WANG Xuan^{1,2}, ZENG Weihua¹, LI Chunhui², CAI Yanpeng^{1,3} (1. State Key Laboratory of Water Environment Simulation, Beijing Normal University, Beijing 100875, China; 2. Key Laboratory for Water and Sediment Sciences of Ministry of Education, School of Environment, Beijing Normal University, Beijing 100875, China; 3. Beijing Engineering Research Center for Watershed Environmental Restoration and Integrated Ecological Regulation, Beijing Normal University, Beijing 100875, China)

Abstract: Based on ARMA (auto regressive moving average) model, an overload warning model of water environment carrying capacity was developed. By using the national water environment data from 2001 to 2014, the overload status of water environment carrying capacity from 2015 to 2017 was studied. The results showed that the comprehensive index of overload state of water environmental carrying capacity was 1.39 in 2016, which may cause alarm. It is suggested that measures such as increasing the number of sewage treatment equipment, reducing COD and ammonia nitrogen emissions should be taken to prevent the occurrence of alarm.

Key words: water environment carrying capacity; ARMA model; overload warning

水环境承载力是指“在一定时期、范围内,在一定自然环境条件下,维持水系结构不发生改变、环境功能不遭受破坏的前提下,水系统所能承受人类活动的阈值”^[1]。它能够判断社会经济与水环境系统是否协调,对于规划一个国家或地区综合发展的方向和规模有至关重要的作用^[2-3]。目前,由于全球气候变化和人类活动的影响,水环境问题加剧,导致水环境承载力超载,不足以支撑人类社会经济的长足发展。因此,对水环境承载力超载状态进行预警研究,提前预知水环境承载力超载及影响因素,可以为水利、环境等决策部门进行水资源规划提供科学依

据,对促进水环境保护和社会经济协调可持续发展具有重要意义。

目前水环境承载力超载状态预警研究仍处于发展阶段,国外在解决水污染和洪涝灾害等方面应用研究较多,例如多瑙河流域水污染预警系统、纽约市洪水预报和灾害预警系统等^[4-6]。国内相关研究主要有两个方面:一是基于水资源可持续利用的水资源量危机预警,例如文俊^[7]建立了区域水资源可持续利用预警系统概念框架,秦成^[8]采用粗糙集理论和BP神经网络构建了水资源危机预警模型,徐绪堪等^[9]基于正态云模型构建了水资源可持续利用

基金项目:“十三五”国家重点研发计划(2017YFC0404505,2016YFC0401302);国家自然科学基金(51679008)
作者简介:刘丹(1991—),女,博士研究生,主要从事水环境管理与规划研究。E-mail:danliu@mail.bnu.edu.cn
通信作者:王烜,教授。E-mail:wangx@bnu.edu.cn

分级预警模型,并对西安市 8 个典型区域的水资源量利用状况进行了评估;二是基于水环境容量的水环境风险预警,如赵卫等^[10-11]运用系统学原理分别建立了辽河流域水环境承载力仿真模型和沱江流域水环境系统预警模型,田威等^[12-13]针对突发性水污染事故建立了水质预警模型。但是水环境承载力是一个涵盖水资源、水环境和水生态等多方面的综合承载力的概念,直接将水资源量供不应求或水环境容量超载界定为警情,不能全面反映水环境的超载状态。

预警理论在经济学领域的应用已相对成熟,主要预警方法有:景气指数法、基于概率模式分类法、判别分析法、BP 神经网络和 Logistic 回归分析法等^[14]。相比之下,自回归滑动平均(auto regression moving average, ARMA)模型考虑因素较少,操作简单,被广泛应用于食品、建筑、电力、能源等其他众多领域^[15-17],但在水环境管理中应用还比较少,尤其在水环境承载力评价和预警方面的研究还未见报道。基于此,本研究从水资源量承载力和水环境容量承载力两方面综合考虑,并基于 ARMA 模型对水环境承载力超载状态进行预警研究,以期对相关决策部门提供科学依据。

1 预警指标体系及研究方法

1.1 预警指标体系构建

为识别可能造成水环境承载力超载的警源,分别从支撑力和压力两个方面分析水资源量承载力、水环境容量承载力的影响因子。根据水环境承载力的定义^[1],人类活动影响下的水环境承载力具有弹性阈值区间,为便于在环境管理的实践中调整人类活动,将水环境系统的自然禀赋作为支撑力,将人类活动对水环境系统的干预作为压力。进而确定可能对水环境承载力产生重要影响的指标,然后通过主成分分析方法去除其中相关性较高的指标,筛选出合理有效的预警指标,构建预警指标体系见表 1。

表 1 水环境承载力超载状态预警指标体系

分类	类别	指标
水资源量承载力	支撑力	水资源总量(+),降雨量(+)
	压力	总用水量(-),工业用水量(-),人均用水量(-)
水环境容量承载力	支撑力	I~Ⅲ类水质断面占比(+),水资源总量(+)
	压力	污水排放量(-),COD 排放量(-),氨氮排放量(-),污水治理设施数(+)

注:“+”表示正向指标,指标值越大则对应分项承载力也越大;“-”表示逆向指标,指标值越大则对应分项承载力越小。

1.2 水环境承载力超载预警模型

1.2.1 ARMA 模型

ARMA 模型的核心思想是根据现象的过去预测未来,其基本原理是:若时间序列 y_t 可以被它的当前与前期的误差和随机项以及它的前期值构成的数学模型描述或模拟,便可以根据该序列的过去值和当前值来预测未来值,称 y_t 是 (p, q) 阶的自回归移动平均序列,记为 $A_{\text{RMA}}(p, q)$ 。具体形式如下:

$$y_t = c + \varphi_1 y_{t-1} + \varphi_2 y_{t-2} \cdots + \varphi_p y_{t-p} + \mu_t + \theta_1 \mu_{t-1} + \theta_2 \mu_{t-2} + \cdots + \theta_q \mu_{t-q} \tag{1}$$

式中: p, q 分别为自回归滞后阶数和滑动平均滞后阶数; μ_t 为白噪声序列; $\varphi_1, \varphi_2, \cdots, \varphi_p$ 和 $\theta_1, \theta_2, \cdots, \theta_q$ 分别为自回归系数和移动平均系数,均是模型的待估参数。ARMA 模型在预测过程中既考虑了指标在时间序列上的依存性,又考虑了随机波动的干扰性,对指标短期趋势的预测准确率较高^[18]。

对于某一指标的时间序列而言,首先需要检验序列的平稳性,如果不平稳,则通常可以通过取对数和差分的方式将其转化为平稳序列,然后对该平稳序列的自相关函数和偏相关函数进行分析。若都呈现出拖尾特性,则可以采用 ARMA 模型进行预测。对模型进行定阶,确定自回归滞后阶数 p 和滑动平均滞后阶数 q 。估计模型参数,并对模型进行残差检验,如果残差不显著,则认为模型可靠。

1.2.2 预警模型建立步骤

步骤 1:指标原始数据标准化。压力中的正向指标和负向指标的原始数据分别按照式(2)和式(3)进行 0~1 标准化,支撑力中的正向指标和负向指标的原始数据分别按照式(3)和式(2)进行 0~1 标准化。

$$T_D = \frac{D_{\max} - D}{D_{\max} - D_{\min}} \tag{2}$$

$$T_D = \frac{D - D_{\min}}{D_{\max} - D_{\min}} \tag{3}$$

式中: T_D 为标准化后的值; D 为原始数据; $D_{\max}$ 为原始数据序列的最大值; $D_{\min}$ 为原始数据序列的最小值。

步骤 2:权重系数确定。对于标准化后的序列,通过熵权法确定同级指标之间的权重系数。

步骤 3:水资源量承载率和水环境容量承载率计算。水环境承载率是社会经济压力与水环境可承载能力的比值,可直观对比压力强度是否超出水环境的支撑能力,以衡量现状值和理想值的差距。按照式(4)计算水资源量承载率和水环境容量承载率。

$$I_{mt} = \frac{A_{pmt}}{A_{smt}} \quad (4)$$

其中 $A_{pmt} = \sum \omega_{im} P_{imt}$ $A_{smt} = \sum \omega_{jm} P_{jmt}$
 式中: I_{mt} 为第 t 年第 m 个分项承载率指数, 本文考虑水资源量或水环境容量 2 个分项; A_{pmt} 为第 m 项分项承载率压力指数; i 为第 m 个分项承载率压力指数所对应的评价指标序号; A_{smt} 为第 m 项分项承载率支撑力指数; j 为第 m 个分项承载率支撑力指数所对应指标序号; ω_{im} 、 ω_{jm} 分别为对应指标的权重系数, 指标权重越大, 指标对分项承载率的贡献也越显著; P_{im} 、 P_{jm} 为各分项承载率对应指标层中经标准化后的评价指标。

步骤 4: 水环境承载力超载状态综合指数计算。考虑短板效应, 采用内梅罗指数法计算水环境承载力超载状态综合指数:

$$C = \sqrt{[\max(I_1, I_2)]^2 + [\text{AVG}(I_1, I_2)]^2} \quad (5)$$

式中: C 为水环境承载力超载状态综合指数; I_1 、 I_2 分别为水资源量承载率和水环境容量承载率。

步骤 5: 水环境承载力超载状态预警。采用 $A_{\text{RMA}}(p, q)$ 模型对水环境容量承载率、水资源量承载率以及水环境承载力超载状态综合指数进行预测, 判别是否存在警情以及发出警报。

2 应用研究

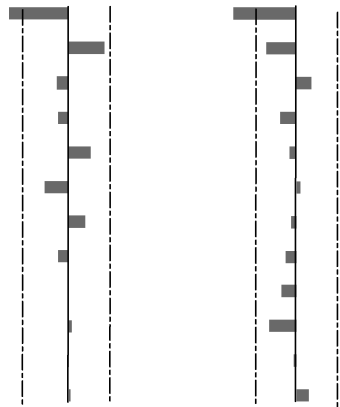
选取全国 2001—2014 年的水环境数据为原始数据, 对 2015—2017 年的水环境承载力超载状态进行预警研究。对相关指标的原始数据进行标准化, 然后通过熵权法确定同级指标之间的权重系数见表 2。分别计算 2001—2014 年水资源量承载率和水环境容量承载率, 进而得到 2001—2014 年水环境承载力超载状态综合指数分别为 0.67、0.42、0.31、1.20、0.64、1.58、1.54、0.85、4.25、0.64、6.92、0.99、1.19、1.20。

表 2 各指标对应权重系数

分类	类别	指标	权重系数
水资源量承载力	支撑力	水资源总量	0.53
		降雨量	0.47
	压力	总用水量	0.32
		工业用水量	0.45
		人均用水量	0.23
		I ~ III 类水质断面占比	0.56
水环境容量承载力	支撑力	水资源总量	0.44
		污水排放量	0.16
	压力	COD 排放量	0.35
		氨氮排放量	0.39
		污水治理设施数	0.10

对 2001—2014 年水环境承载力超载状态综合指数序列建立 ARMA 模型: 首先根据自相关函数图

和单位根检验判断该序列的平稳性, 结果显示为非平稳序列; 故而对该序列先后进行取对数和一阶差分变换, 得到平稳序列, 其序列的自相关函数和偏自相关函数的图形 (图 1) 都呈现拖尾的现象, 属于典型的 $A_{\text{RMA}}(p, q)$ 型结构, 则该时间序列可构建 ARMA 模型。



(a) 自相关函数 (b) 偏自相关函数

图 1 研究序列的自相关函数和偏自相关函数图

由图 1 可知, 自相关系数和偏自相关系数均在延迟 2 阶后突然衰减为小值波动, 因此初步确定自回归滞后阶数 p 和滑动平均阶数 q 均小于 2。分别按照 $A_{\text{RMA}}(1, 1)$ 、 $A_{\text{RMA}}(1, 2)$ 、 $A_{\text{RMA}}(2, 1)$ 、 $A_{\text{RMA}}(2, 2)$ 建立模型并进行回归, 综合考虑模型的准确性和简洁性, 基于最小信息量准则^[19]和施瓦兹准则^[20-21]检验模型拟合优度, 并从中选出拟合效果最好的模型。结果显示 $A_{\text{RMA}}(2, 2)$ 模型的最小信息量准则值和施瓦兹准则值最小, 且 R^2 为 0.85, 拟合效果相对较好。

基于 $A_{\text{RMA}}(2, 2)$ 模型计算得到 2015—2017 年的水环境承载力超载状态综合指数分别为 0.34、1.39、0.50。当综合指数小于 1 时认为水环境是处于安全状态的, 指数大于 1 则说明当前水环境不足以支撑人类社会经济活动带来的压力, 不利于可持续发展, 即认为当综合指数大于 1 时出现警情。由此可见, 2016 年有极大可能会出现警情, 需要引起高度重视, 提前采取规避措施。

对水资源量承载率时间序列和水环境容量承载率时间序列分别利用 ARMA 模型进行分析, 寻找可能造成 2016 年出现水环境承载力超载状况的原因, 得到 2001—2017 年水资源量承载率和水环境容量承载率的变化趋势 (图 2)。由图 2 可见, 2015—2017 年水资源量承载率分别为 0.81、0.54、0.56, 表明水资源缺乏的现状将得到有效改善, 水资源总量能够满足人类生活生产需求; 2015—2017 年水环境容量承载率分别为 0.56、1.27、0.9, 表明未来水质

状况可能会恶化,生活生产污染排放对水体自净功能造成了极大压力。因此,2016 年水环境承载力超载很大程度是源于水环境容量超载,需要提前采取措施降低水环境容量承载率以预防警情。

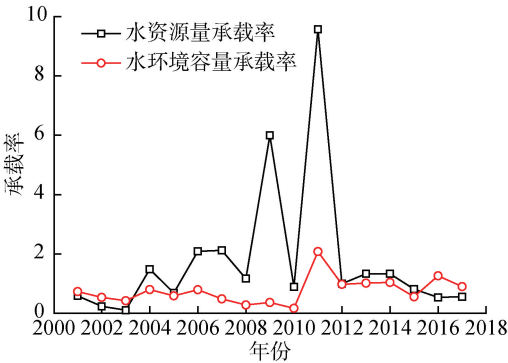


图2 水资源量承载率和水环境容量承载率的变化趋势

为了进一步明确应该采取什么措施以预防水环境容量承载率超载,分别考察 2001—2014 年水环境容量承载率的支撑力指标和压力指标的变化趋势,结果见图 3 和图 4。由图 3 可知,水资源总量是处于相对稳定的波动状态,Ⅰ~Ⅲ类水质断面占比呈现周期性上涨的趋势,但近年来上涨幅度有所减缓。因此,从支撑力指标来看,为提高水环境容量,应该着重立足于通过工程或非工程措施改善河流、湖泊等纳污水体的水环境质量,提高Ⅰ~Ⅲ类水质断面占比。由图 4 可知,随着工业的发展和人民生活水平的提高,污水排放量呈逐年稳定上涨趋势,COD 排放量和氨氮排放量在 2011 年后大幅上涨,然而污水治理设备数在 2011 年之后反而有所减少,这就造成了排放的大量污染物不能得到及时有效的处理,排入河流之后大大增加了水环境容量的压力。因此,从压力指标来看,为提高水环境容量,应该通过增加污水治理设备数以及工艺改进等措施减少 COD 排放量和氨氮排放量,以减轻人类生活生产活动对水环境容量造成的巨大压力,达到预防警情的目的,从而促进社会经济与环境的协调可持续发展。

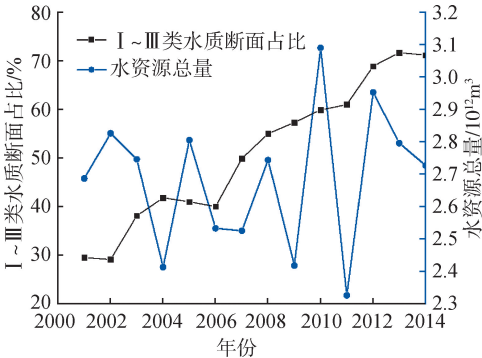


图3 水环境容量承载率支撑力指标值的变化趋势

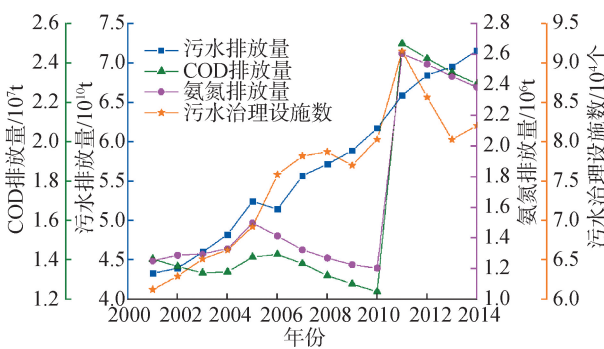


图4 水环境容量承载率压力指标值的变化趋势

3 结 论

从水资源量承载力和水环境容量承载力两方面综合考虑,基于 ARMA 模型构建了水环境承载力超载预警模型,选取全国 2001—2014 年的水环境数据作为原始数据,对 2015—2017 年的水环境承载力超载状态进行预警。结果表明:2016 年水环境承载力超载状态综合指数为 1.39,可能出现警情,并且水环境承载力超载主要是由于水环境容量承载率超载造成的,建议通过改善河流、湖泊等纳污水体的水环境质量以及通过增加污水治理设备数和工艺改进等措施减少 COD 排放量和氨氮排放量,减轻人类生活生产活动对水环境容量造成的巨大压力,以预防警情的发生。

参考文献:

[1] 曾维华. 环境承载力理论、方法及应用[M]. 北京:化学工业出版社,2014.

[2] 崔凤军. 论环境质量与环境承载力[J]. 山东农业大学学报, 1995, 26 (1): 71-77. (CUI Fengjun. On the environmental quality and environmental bearing capacity [J]. Journal of Shandong Agricultural University, 1995, 26 (1): 71-77. (in Chinese))

[3] 沈珍瑶, 祝莹欣, 贾超, 等. 基于动态模拟递推算法和向量模法的水环境承载力计算方法[J]. 水资源保护, 2015, 31 (6): 32-39. (SHEN Zhenyao, ZHU Yingxin, JIA Chao, et al. Calculation method of water environment carrying capacity based on dynamic simulation-recursion algorithm and vector norm method [J]. Water Resources Protection, 2015, 31 (6): 32-39. (in Chinese))

[4] JANŽA M. A decision support system for emergency response to groundwater resource pollution in an urban area (Ljubljana, Slovenia) [J]. Environmental Earth Sciences, 2015, 73 (7): 1-12.

[5] PINTÉR G G. The danube accident emergency warning system[J]. Water Science & Technology, 1999, 40 (10): 27-33.

(下转第 69 页)

rivers[M]. New York: Wiley, 1973.

[33] WUEST A, PIEPKE G, VAN SENDEN D. Turbulent kinetic energy balance as a tool for estimating vertical diffusivity in wind-forced stratified water[J]. Limnology and Oceanography, 2000, 45: 1388-1400.

[34] WUEST A, LORKE A. Small-scale hydrodynamics in lakes [J]. Annual Review of Fluid Mechanics, 2003, 35: 373-412.

[35] GOUDSMIT G H, PEETERS F, GLOOR M, et al. Boundary versus internal diapycnal mixing in stratified natural waters [J]. Journal of Geophysical Research, 1997, 102(C13): 27903-27914.

[36] MACINTYRE S, FLYNN K M, JELLISON R, et al. Boundary mixing and nutrient fluxes in Mono Lake, California [J]. Limnology and Oceanography, 1999, 44: 512-529.

[37] WAIN D J, REHMANN C R. Transport by an intrusion generated by boundary mixing in a lake [J]. Water Resources Research, 2010, 46, W08517.

[38] GOLOSOV S D, IGNATIEVA N V. Hydrothermodynamic features of mass exchange across the sediment-water interface in shallow lakes [M]. Berlin: Springer, 1999: 153-157.

(收稿日期: 2018-01-12 编辑: 王 芳)

+++++

(上接第 55 页)

[6] RAHMAN M M, GOEL N K, ARYA D S. Study of early flood warning dissemination system in Bangladesh [J]. Journal of Flood Risk Management, 2013, 6(4): 290-301.

[7] 文俊. 区域水资源可持续利用预警系统研究[D]. 南京: 河海大学, 2006.

[8] 秦成. 水资源危机预警模型[J]. 水资源保护, 2012, 28(5): 71-74. (QIN Cheng. Water resources crisis forewarning model[J]. Water Resources Protection, 2012, 28(5): 71-74. (in Chinese))

[9] 徐绪堪, 赵毅, 成春阳. 西安市水资源可持续利用预警分级[J]. 水资源保护, 2017, 33(5): 25-30. (XU Xukan, ZHAO Yi, CHENG Chunyang. Early warning grading of sustainable utilization of water resources in Xi'an City[J]. Water Resources Protection, 2017, 33(5): 25-30. (in Chinese))

[10] 赵卫, 刘景双, 孔凡娥. 辽河流域水环境承载力的仿真模拟[J]. 中国科学院研究生院学报, 2008, 25(6): 738-747. (ZHAO Wei, LIU Jingshuang, KONG Fan'e. Simulation of water environmental carrying capacity in Liaohe watershed[J]. Journal of the Graduate School of the Chinese Acad of Sciences, 2008, 25(6): 738-747. (in Chinese))

[11] 朱杰, 祝义平, 曾秀莉. 沱江流域成都段水环境系统预警研究[J]. 安全与环境学报, 2011, 11(4): 126-129. (ZHU Jie, ZHU Yiping, ZENG Xiuli. Warning of water environmental system of Chengdu section of Tuojiang River Basin[J]. Journal of Safety and Environment, 2011, 11(4): 126-129. (in Chinese))

[12] 田威, 邱利, 李一平. 基于 EFDC 模型的感潮江段溢油事故风险预测[J]. 水资源保护, 2015, 31(6): 98-102. (TIAN Wei, QIU Li, LI Yiping. Prediction of oil spill risk on tide sect of Yangtze River based on EFDC model[J]. Water Resources Protection, 2015, 31(6): 98-102. (in Chinese))

[13] 左锐, 石榕涛, 王贻, 等. 地下水型水源地水质安全预警技术体系研究[J]. 环境科学研究, 2018, 31(3): 409-418. (ZUO Rui, SHI Rongtao, WANG Bin, et al. Technological system of early warning for groundwater quality in a groundwater source area [J]. Research of Environmental Sciences, 2018, 31(3): 409-418. (in Chinese))

[14] 黄继鸿, 雷战波, 凌超. 经济预警方法研究综述[J]. 系统工程, 2003, 21(2): 64-70. (HUANG Jihong, LEI Zhanbo, LING Chao. A survey for early warning system of economics[J]. Systems Engineering, 2003, 21(2): 64-70. (in Chinese))

[15] 李俊青. 水果市场价格预测与波动预警研究[D]. 武汉: 华中农业大学, 2015.

[16] 梁勇. 中国石油进口价格风险预警研究[D]. 成都: 西南石油大学, 2010.

[17] 郇滢. 基于监测数据分析的黄河管桥预警及可靠性计算[D]. 北京: 北京交通大学, 2016.

[18] 韩瑞玲, 佟连军, 朱绍华, 等. 基于 ARMA 模型的沈阳经济区经济与环境协调发展研究[J]. 地理科学, 2014, 34(1): 32-39. (HAN Ruiling, TONG Lianjun, ZHU Shaohua, et al. The coordinated development of economy and environment based on ARMA model in Shenyang economic zone [J]. Scientia Geographica Sinica, 2014, 34(1): 32-39. (in Chinese))

[19] AKAIKE H. A new look at the statistical model identification[J]. Automatic Control IEEE Transactions, 1974, 19(6): 716-723.

[20] SCHWARZ G. Estimating the dimension of a model[J]. Annals of Statistics, 1978, 6(2): 15-18.

[21] 张凌翔. STAR 模型的滞后阶数选择与稳健性研究[J]. 统计研究, 2014, 31(6): 107-112. (ZHANG Lingxiang. Selection of the lag order of star model and its robustness analysis [J]. Statistical Research, 2014, 31(6): 107-112. (in Chinese))

(收稿日期: 2018-04-04 编辑: 王 芳)