

DOI: 10.13476/j.cnki.nsbdtq.2019.0106

门宝辉,蒋美彤.基于生态足迹法的水资源承载力研究[J].南水北调与水利科技,2019,17(5):29-36. MEN B H,JIANG M T. Research on water resources carrying capacity based on ecological footprint: A case study of Beijing[J]. South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology,2019,17(5):29-36. (in Chinese)

基于生态足迹法的水资源承载力研究

——以北京市为例

门宝辉,蒋美彤

(华北电力大学 可再生能源学院 能源安全与清洁利用北京市重点实验室,北京 102206)

摘要:为分析和评估区域水资源可持续发展状态,以水资源生态足迹系统的框架体系作为基础,引入水资源足迹广度与深度,区分水资源流量资本与存量资本,结合北京市实际情况,在现有人口和水资源条件下,计算水资源生态承载力的同时探讨改进的差分自回归移动平均模型 ARIMA 与广义神经网络 GRNN 的组合模型在水资源生态足迹中的拟合预测效果。结果显示:北京市长期处于水资源赤字这种不安全状态下,研究期内水资源足迹深度均大于1,平均水资源生态足迹为 $0.169 \text{ hm}^2/\text{cap}$,约是平均水资源生态承载力的2倍,万元工业增加值用水量、万元 GDP 用水量、万元农业增加值用水量三个指标是影响北京市水资源生态足迹的重要因素。ARIMA(3,2,1)与 GRNN 耦合模型对北京市水资源生态足迹的拟合及预测效果优于单纯的 ARIMA 模型,其预测结果可为北京市水资源更有效地进行保护和配置提供参考。

关键词:水资源承载力;水资源生态足迹;差分自回归移动平均模型;广义回归神经网络

中图分类号:TV211.1 文献标志码:A 开放科学(资源服务)标识码(OSID):



Research on water resources carrying capacity based on ecological footprint: A case study of Beijing

MEN Baohui,JIANG Meitong

(Beijing Key Laboratory of Energy Safety and Clean Utilization, North China Electric Power University, Beijing 102206, China)

Abstract: To analyze and evaluate the sustainable development status of regional water resources, this paper used framework of water resources ecological footprint system as foundation. This study introduced the breadth and depth of water resources footprint to distinguish water resources flow capital and stock capital, combined the actual situation of Beijing to calculate the ecological carrying capacity of water resources, and discussed the fitting prediction effect of the improved combination model of ARIMA and GRNN in water resources ecological footprint. Results showed that under the unsafe state of Beijing's long-term water deficit, the depth of water resources in the study period is greater than 1, and the average water ecological footprint was $0.169 \text{ hm}^2/\text{cap}$, which is about twice the average ecological carrying capacity of water resources. The three indicators, i. e., water consumption per ten thousand yuan of value-added by industry, ten thousand yuan, and ten thousand yuan GDP water added value of agricultural water use were important factors which influenced the ecological footprint of water resources of Beijing. The effect of ARIMA (3,2, and 1) and GRNN coupling model on the fitting and prediction of the ecological footprint of water resources in Beijing was better than that of ARIMA model alone. The prediction results can provide reference for the

收稿日期:2019-03-04 修回日期:2019-05-14 网络出版时间:2019-05-24

网络出版地址: <http://kns.cnki.net/kcms/detail/13.1334.TV.20190523.1618.022.html>

基金项目:国家重点研发计划(2016YFC0401406)

作者简介:门宝辉(1973—),男,黑龙江绥化人,教授,博士,主要从事水资源系统优化及水资源优化配置方面研究。E-mail:menbh@126.com

more effective protection and allocation of water resources in Beijing.

Key words: water resources carrying capacity; water resources ecological footprint; ARIMA model; GRNN

社会经济的发展使水资源的需求量逐年增加,但发展带来的负面影响却致使可利用水资源不断减少,同时引发水环境污染、水生态退化等问题,水资源、经济社会与生态环境之间形成了一种三角矛盾关系,在“水”竞争上表现日益突出^[1],因此计算水资源生态足迹并对水资源生态承载力进行核算便具有十分重要的现实意义。随着生态足迹理论的发展^[2],国内外学者在其基础上相继提出了水资源生态足迹的概念及计算方法^[3-6],然而现阶段常用的水资源生态足迹模型仅仅能够判断区域是否处于超载状态,缺乏能够解释超载程度的相应指标,且学术界在对水资源生态足迹变动趋势作出预测方面研究较少^[7-8]。为更好地解释人类占用水资源流量资本及水资源存量资本的情况,本文在 Niccolucci V 等^[9]提出的三维生态足迹理论框架下,将水资源足迹广度与深度引入到水资源生态承载力的计算中,以北京市为例,分析其水资源生态足迹、水资源生态承载力、水资源足迹广度及深度变化后,结合 GRNN 模型将单纯的 ARIMA 模型改进,得到拟合外推能力均提高的组合模型并将其应用于水资源生态足迹的预测中,为相关部门进行水资源管理规划乃至城市宏观社会经济发展提供决策依据。

1 模型与方法

1.1 水资源生态足迹与生态承载力模型

生态足迹模型是一种直观、全面且具有强可持续性的测量手段,它通过估算维持特定人口的自然资源消费和吸收人类产生的废弃物所需的生态生产性土地面积,并度量其与承载力之间的差距,进而判断研究对象的发展状况。然而生态足迹模型所描述的林地、耕地等六大类生产性土地中,水域的生物生产功能仅靠渔业的产量来概括,基于这一不足,学术界提出了水资源生态足迹模型,在生态足迹中的账户的基础上增列水资源用地账户,弥补了水域对水资源功能描述的不足,把人类活动对水资源的影响整合到水域面积这一指标上后,再通过均衡化因子将其转化为可以在不同地区进行比较的数值^[10-12]。由于缺乏研究区早期水污染方面的相关统计数据以及污水和酸雨等自然净化和人工处理的复杂性,构建模型时水污染生态足迹并未被考虑。其计算公式为

$$E_F = N \times \gamma \times W / P \quad (1)$$

$$E_C = (1 - 60\%) \times \gamma \times \phi \times Q / P \quad (2)$$

式中: E_F 为总的水资源生态足迹(hm^2); N 为总的人口数; γ 为水资源均衡因子; W 为总的水资源消耗量(m^3); P 为全球水资源平均生产能力(m^3/hm^2); E_C 为水资源生态承载力(hm^2); ϕ 为区域水资源产量因子; Q 为水资源总量(m^3)。60%则是世界环境与发展委员会建议在水资源生态足迹和水资源生态承载力计算时扣除用于生态和生物多样性的补偿的面积比例。

由于人类活动影响,城市水资源环境也会变得比天然水环境复杂,有限性和脆弱性将更加明显,水资源生态盈余(赤字)及水资源生态足迹指数的分析有利于更好地判断研究区域水资源开发利用现状^[13],计算公式为

$$E_P = E_C - E_F \quad (3)$$

$$E_{FI} = E_P / E_C \quad (4)$$

式中: E_P 表示生态盈余(赤字); E_{FI} 表示水资源生态足迹指数。

1.2 水资源生态足迹模型的改进

传统的水资源生态足迹模型注重水资源的可持续利用,却没有对水资源存量资本及流量资本进行区分,不能体现存量资本在水资源生态系统平衡中起到的重要作用,属于二维平面模型。若将传统水资源生态足迹看做一个圆形(图 1),应用三维生态足迹理论,引入水资源足迹广度表示圆柱的底面积,水资源足迹深度表示圆柱的高,那么水资源生态足迹由面积表示转化为体积表示,达到了二维到三维模型的转变^[14]。水资源足迹广度表征在水资源承载力范围内人类消耗的水资源对自然水资源量的占用程度。水资源足迹深度表示人类对水资源存量消耗水平,它通常指在维持当下水资源消耗水平不变的条件下,理论上所需要占用的水资源生产用地面积与实际能提供水资源生产用地面积之比,存量只有处于生态赤字状态时才会被占用。根据 Niccolucci V^[9]的研究,水资源足迹广度和深度的计算公式为

$$E_{FS} = \min[E_C, E_F] \quad (5)$$

$$E_{FD} = 1 + \frac{E_P}{E_C} \quad (6)$$

式中: E_{FS} 表示水资源足迹广度; E_{FD} 表示水资源足迹

深度。当 $E_F \leq E_C$ 时,人类对水资源的需求仅通过消耗流量资本便可满足,此时水资源足迹深度为自然深度 $E_{FD} = 1$, E_{FD} 越大,区域消耗水资源存量越多,对水资源生态系统危害越大^[15-16]。

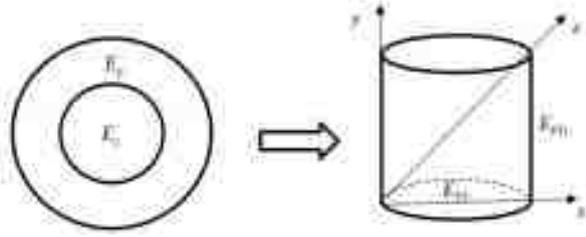


图1 二维水资源生态足迹模型向三维的转化

Fig. 1 The transformation of two-dimensional water ecological footprint model into three dimensions

1.3 水资源生态足迹预测方法

水资源生态足迹模型本身的静态性使得人们无法对水资源未来的可持续趋势进行预测,也不足以监测其变化过程,不利于全面描述区域水资源安全状况,因而需要对区域水资源生态足迹指标进行追踪预测,找到水资源生态足迹时间变化规律和发展规律。时间序列预测法被广泛应用于水文、生物等各种领域的预测,通过对时间序列数据的分析,掌握数据随时间变化的规律,对其未来进行预测^[17-18]。

实际问题中许多序列并不近似为平稳序列,对线性和平稳时间序列建模较好的自回归移动平均模型 (ARMA) 此时便不适用,对于这类序列,可以采用差分自回归移动平均模型 ARIMA, ARIMA 模型建模分四个基本步骤^[19-20]: 观测序列平稳性; 若不稳那么将其平稳化处理; 相关参数估计; 模型检验。

本文将计算所得北京市水资源生态足迹作为被观测时间序列数据,发现水资源生态足迹序列的线性趋势与非线性趋势并存,而 ARIMA 模型对于数据的非线性特征不够敏感,因而建立基于人工神经网络的 ARIMA 模型进行预测。

1.4 ARIMA-GRNN 耦合预测方法

人工神经网络是一种模拟人脑神经网络结构和功能建立的信息处理系统,该模型具有很强的学习和映射能力。其基本组成单位为人工神经元,这些神经元是分层且完全连接的,从上游神经元收集输入,用组合函数组合到一起,然后输入到通常是非线性的激励函数中,生成一个输出响应,接着输送到下游的其他神经元中,而广义回归神经网络 GRNN 无需对神经元的数量及传递函数进行设置,只需确定唯一的参数即散布常数,模型的学习完全来自于数据样本,避免了人为等主观因素对结果的干扰^[21-22]。GRNN 在非线性的逼近能力、自学能力及并行协同处

理信息能力方面优势较强^[23-24]。耦合模型是将 ARIMA 模型对序列的拟合值输入到 GRNN 中,序列原始值作为 GRNN 的输出,经由多次计算,模拟归纳出输入输出变量的关系,多次尝试确定散布常数的值。结束 GRNN 模型训练后,观察训练好的模型拟合值与原始值的吻合程度,判断模型可靠性后将其应用于水资源生态足迹的预测中^[25]。

2 实例应用

2.1 研究区概况及数据来源

北京作为我国最严重缺水的城市之一,以不足全国 0.2% 的水资源量承载着约全国 1.6% 的人口和 3.5% 的 GDP, 根据目前的情况看,水资源短缺现状在南水北调中线水进京后虽已有所缓解,但并没有根本改变,仍需要过度开采地下水保证水源的供应,虽然开采量正逐渐减少,却远远未达到采水与补水的平衡。

根据相关研究成果^[26],全球水资源平均生产能力 P 取 $3\ 140\ \text{m}^3/\text{hm}^2$, γ 水资源均衡因子取 5.19,北京市水资源产量因子 ϕ 采用 0.77。

本研究中涉及的总的水资源量、水资源消耗量及人口数等基础数据均来源于 1992—2017 年北京市水资源公报。

2.2 结果与讨论

2.2.1 北京市水资源生态足迹模型计算结果分析

由图 2 可以看出,北京市水资源生态足迹总趋势是下降的,1992 年达到最大值 $0.279\ \text{hm}^2/\text{cap}$,在 2013 年降至整个时间序列的最小值 $0.113\ \text{hm}^2/\text{cap}$,2013 年后序列虽呈上升趋势,却并不显著,可以看出相关部门对水资源进行了有效管理。水资源生态承载力上下波动的频率较快,因其影响因素不仅限于人口、水文、植被、地质等,也与当年的气象条件如降水量多少密切相关。北京市水资源生态赤字在 1993 年达到 $0.179\ \text{hm}^2/\text{cap}$ 的最低值,而出现生态赤字的时候正是水资源生态承载力变动幅度最大的时期,主要发生在 1993—1999 年,下降幅度达 72%。2000—2007 年呈现波动缓滞状态,较为稳定。参考 2011 年戴昌军等^[13]对水资源生态足迹指数的等级划分,绘制北京市水资源足迹指数历年变化图(图 2(b)),研究期内北京市水资源利用在严重不可持续与弱不可持续范围间波动,1999 年是水资源生态压力最大的时期。长期的生态赤字状态及较低的安全利用程度表明水资源消耗量已超过了生态负荷,

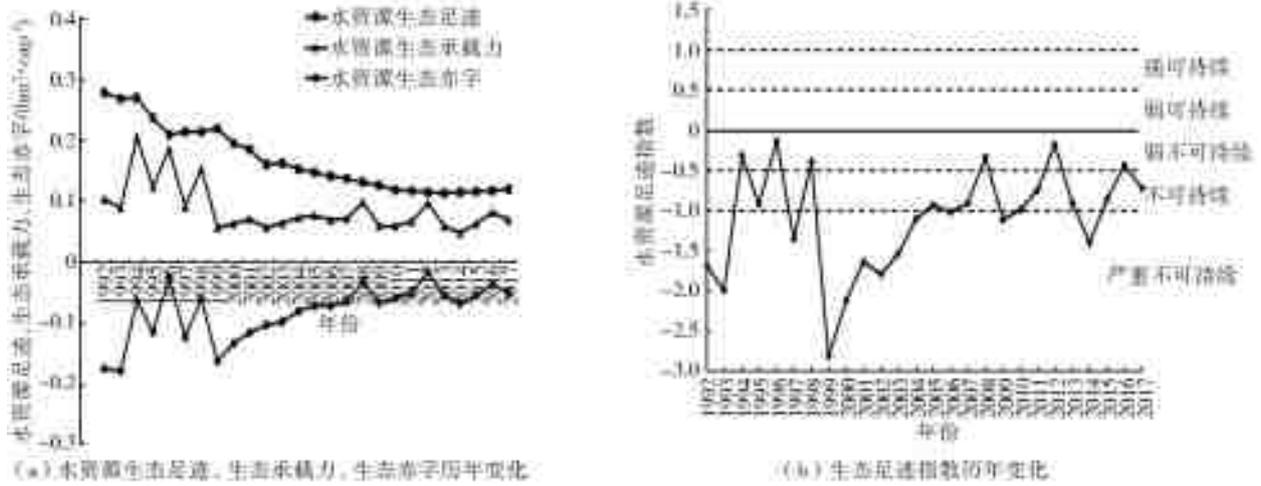


图 2 北京市水资源生态足迹、生态承载力、生态赤字及生态足迹指数历年变化
 Fig. 2 Changes of Beijing's water resources ecological footprint, ecological carrying capacity, ecological deficit and ecological footprint index over the years

现阶段的水资源利用已经超出了水资源的可承载能力,是不合理的,属于相对不可持续的发展。

2.2.2 北京市水资源足迹广度与足迹深度分析

水资源足迹深度和足迹广度可以分别从横向是否超载、纵向的超载度分析水资源流量和存量的变

化情况。从整体来看(图 3),20 多年间北京市水资源足迹广度取水资源生态承载力的值,在水资源流量资本已被充分占用的情况下,要么从城市外引入水资源,要么消耗自身的水资源存量资本弥补收入供给流量的不足,水资源存量的大规模集中消耗使得地下水的现状尤其不容乐观。

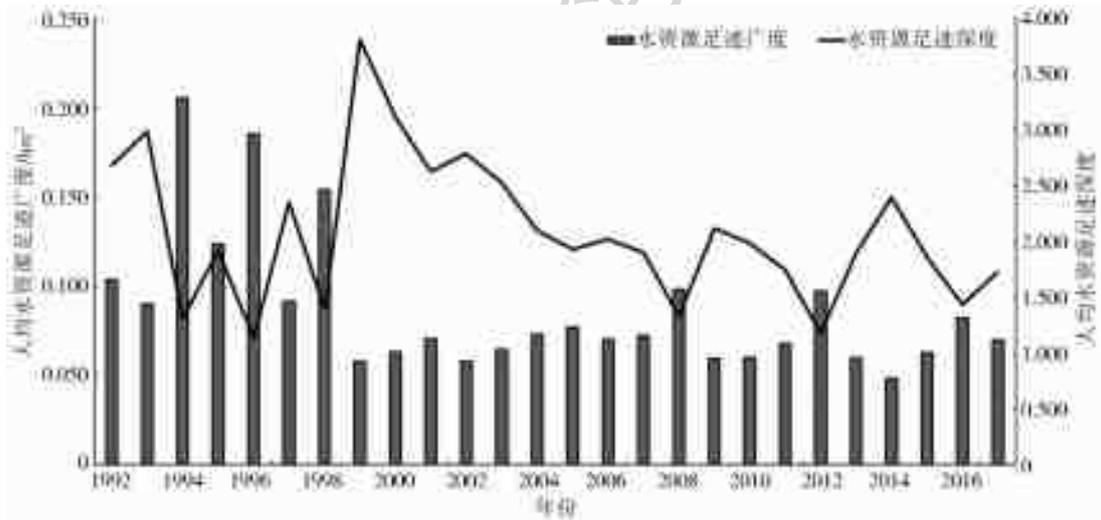


图 3 北京市水资源足迹广度与深度变化
 Fig. 3 Figure of water resources footprint breadth and depth change in Beijing

水资源足迹深度反映了区域对水资源存量资本的消耗程度,研究期内北京市水资源足迹深度平均为 2.087,均大于 1,呈波动趋势变化,在 1999 年达到研究期内最大足迹深度 3.809,最小足迹深度则出现在 1996 年为 1.133。水资源存量资本的消耗严重多于以水资源足迹广度表征的水资源流量资本的占用水平。可供给量与需求量的不匹配,水资源足迹深度的不断增大,加速了水资源存量资本的严重消耗,危害水资源生态系统进而导致水资源生态承载力的降低,加剧了恶性循环,水资源问题成为首

都生态宜居城市发展建设路上的一大难题。

2.2.3 北京市水资源生态足迹影响因素分析

根据北京市水资源开发利用现状,在遵循水资源评价指标体系选取相关原则的基础上,参考北京市历年水资源公报等相关资料,选取 7 个指标与北京市人均水资源生态足迹做相关分析,将相关系数从大到小排序列于表 1 中。

从表 1 可见,万元工业增加值用水量、万元 GDP 用水量、万元农业增加值用水量 3 个指标与人均水资源生态足迹的相关系数较高,是 7 个指标中

对北京市水资源生态足迹产生影响重要的因素。城镇化率、人均 GDP 与人均水资源生态足迹呈负相关,城镇化过程中不断进行产业调整,经济发展过程中科技不断进步,各行业用水效率也随之提高。人均生活日用水量和废水排放量的影响力也不容忽视,生活用水铺张浪费会加剧水资源的消耗,工业废水等不达标或过度排放则不利于水资源的可持续利用与发展。

表 1 北京市人均水资源生态足迹与各指标的相关性分析
Tab.1 Correlation analysis for per capita water resource ecological footprint and various indexes in Beijing

指标	指标名称	相关系数
X ₁	万元工业增加值用水量/m ³	0.959
X ₂	万元 GDP 用水量/m ³	0.929
X ₃	万元农业增加值用水量/m ³	0.928
X ₄	城镇化率/%	-0.919
X ₅	人均 GDP/元	-0.865
X ₆	人均生活日用水量/L	0.746
X ₇	工业废水排放量/万 t	0.522

2.2.4 北京市水资源生态足迹预测

应用 ARIMA 模型进行预测首先对 1992—2015 年的水资源生态足迹序列进行差分运算,一阶差分后发现其仍蕴含着长期递增的趋势,进行二次差分(图 4(a)),采用 R 语言对二阶差分后的序列进行 ADF 单位根检验,其结果 $P=0.01$ 表明单位根不存在序列平稳,因此可以使用 ARIMA 模型进行拟合。根据差分后序列自相关函数图及偏自相关函数图初步构建模型 ARIMA(1,2,1)和 ARIMA(3,2,1),反复比较后根据 AIC 最小准则选取模型 ARIMA(3,2,1)进行参数估计。模型参数进行显著性检验,其结果 $P<0.05$,因此接受假设检验结果将模型用于预测。模型的显著有效性在于好的拟合模型能够充分提取时间序列的信息,此时拟合残差中不再蕴含相关有用信息而表现为白噪声序列。绘制残差 LB 统计量检验图(图 4(c)),残差序列通过白噪声检验($P>0.05$);残差 ACF 检验图(图 4(b))中各阶均在 95%的置信区间内,说明模型对样本数据拟合良好。

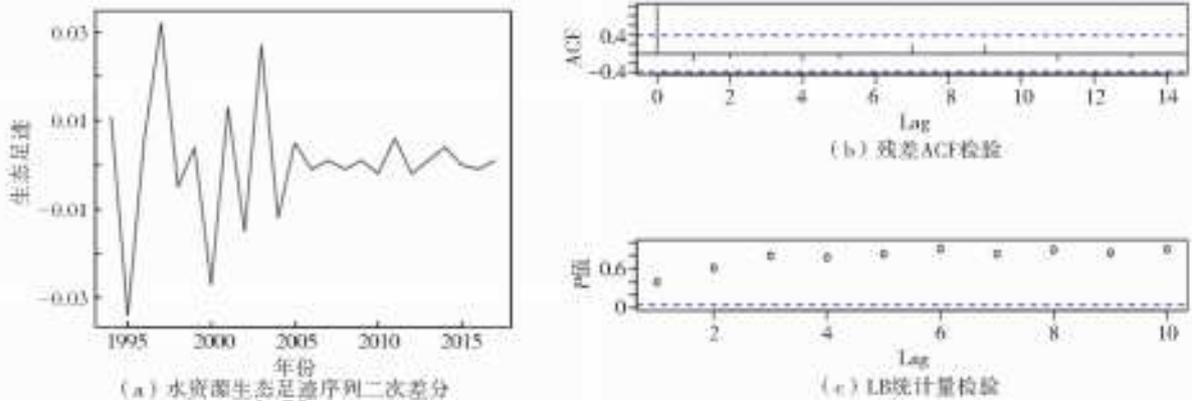


图 4 水资源生态足迹时间序列二次差分(a)、拟合残差的 ACF 自相关检验(b)、Ljung-Box 纯随机性检验 LB 统计量检验(c)
Fig. 4 The sequence diagram after second order difference (a), autocorrelation test graph of fitting residuals(b), test graph for pure randomness(c)

采用 ARIMA-GRNN 进行耦合预测的具体步骤为:(1)首先采用 Sigmod 函数将数据进行归一化处理;(2)选取 ARIMA(3,2,1)模型对 1992—2015 年北京水资源生态承载力的拟合值作为 GRNN 的输入,相应的实际值作为输出;(3)因学习样本数量有限,为从有限数据中尽可能多的获取有效信息,同时避免神经网络发生过拟合,采取交叉验证的方式,从 0.01 开始选择散布常数每次增加 0.01 个单位量进行预测,以均方根误差 RMSE 作为评价指标,反复训练模型直至 RMSE 最小,最终确定散布常数值为 0.14(图 5);(4)利用散布常数 0.14 训练模型,并进行预测。结果表明:ARIMA 模型拟合的平均绝对误差为 3.67%,拟合效果较好,但可以看到还有

部分年份吻合度不高(图 6),而 ARIMA-GRNN 的耦合模型拟合的平均对误差为 3.14%,拟合效果更好。

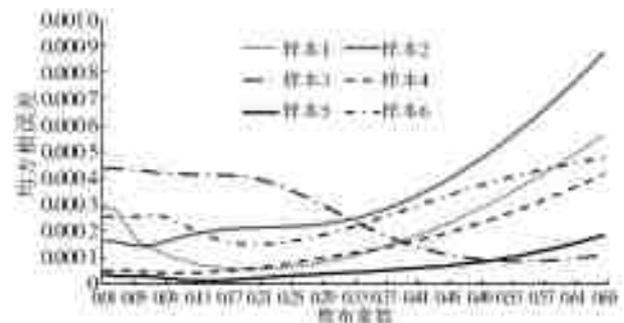


图 5 六重交叉验证不同散布常数对应的均方根误差
Fig. 5 Six-fold cross-validation of root mean square error corresponding to different scatter constants

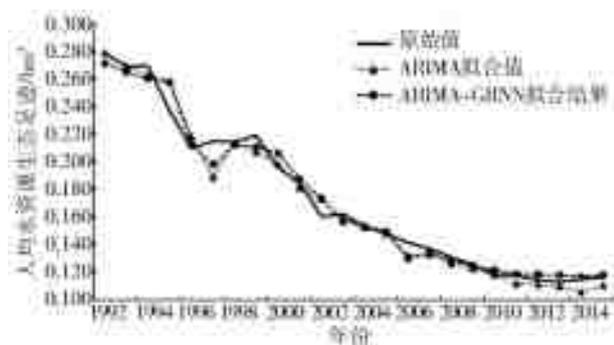


图 6 ARIMA(3,2,1)模型及 ARIMA-GRNN 模型拟合效果

Fig. 6 Fitting renderings of ARIMA (3,2,1) model and ARIMA-GRNN model

表 2 单纯 ARIMA 模型与 ARIMA-GRNN 耦合模型评价

Tab. 2 Evaluation of simple ARIMA model and ARIMA-GRNN combination model

模型	拟合检验		外推检验	
	平均绝对误差/%	拟合优度	平均绝对误差/%	均方根误差/%
ARIMA(3,2,1)	3.67	0.97	6.28	0.85
ARIMA-GRNN	3.14	0.98	1.68	0.21

实际应用中难以按照线性和非线性这一特征对水资源生态足迹序列进行分类,影响水资源生态足迹的因素较多,因此兼具线性和非线性特征,ARIMA模型对数据非线性特征的预测精度往往较差,针对这种情况,难以选择单一模型用以进行水资源生态足迹序列的拟合及预测分析。而 GRNN 因其强大的非线性映射能力和学习速度被广泛应用于具有非线性特征数据的拟合及预测中,将两模型组合,建模过程简单且模型变得更加敏锐。模型的拟合图及评价表都显示了组合后模型有所改善,证实了应用 ARIMA-GRNN 耦合模型对北京市人均水资源生态足迹进行预测这一方法的可行性。但是,对于平稳的时间序列,ARIMA 模型长期的点预测会趋于无条件均值,故模型在进行中长期预测时精度会有所下降,较适用于短期预测。

随着时间的推移城市化水平的提高,社会经济不断发展带来的需水量的增加,水资源生态足迹将会持续走高,2018 年北京市水资源生态足迹预测值为 $0.122 \text{ hm}^2/\text{cap}$ 。根据预测结果,北京市用水量虽然增速变缓但仍在上升,在自身水资源量短缺而水资源开发利用水平已经具备较高水平的前提下,可通过开展大规模调水工程来解决由于水资源短缺造成的经济社会发展的瓶颈问题。南水北调进京后可用水量增加,如何将水资源生态足迹与生态承载力维持在一个相对的平衡状态内,最大限度地降低水资源开发利用过度对生态造成的不利影响,让水利工程得以发挥最大效益,避免引水越多污染越重,陷入恶性循环,将是北京城市发展规划要着重考虑的

2.2.5 ARIMA-GRNN 耦合模型评价

对模型拟合精度的评价采用平均绝对误差及拟合优度,平均绝对误差可以避免误差间相互抵消的问题,拟合优度越接近 1 时,模型拟合效果越好。对模型外推精度的评价采用均方根误差,其越小,模型外推精度越高。从两种模型的拟合效果图(图 6)可以看出,与 ARIMA 模型相比,ARIMA-GRNN 模型的拟合精度有了明显提高,以 2016 年、2017 年数据为参照,对模型拟合外推效果进行检验见表 2。

问题。

3 结论

(1)1992—2017 年北京市水资源负载指数在不可持续范围内波动,水资源足迹深度大于 1,水资源存量资本消耗严重。人均水资源生态足迹总体呈下降趋势,26 年间下降了 $0.158 \text{ hm}^2/\text{cap}$,降幅达 57%。随着南水北调水进京,备用水源地取水量和当地供水量减少,有利于水源地的涵养及水资源生态承载力的提高,但仅仅增加调水量对水资源生态承载能力的改善有限,北京市人均水资源生态承载力依旧呈波动变化,在 2002—2008 年小幅度上升而 2009 年后又有所反弹。1999 年是研究期内北京市水资源生态压力最大的时期,而历史上北京市第四次水危机正发生在 1999—2009 年。

(2) ARIMA 与 GRNN 的耦合模型在保证 ARIMA 模型线性拟合能力的同时,又融合了 GRNN 模型的非线性预测能力,因而比单一模型具有更高的拟合及预测精度。将耦合模型用于北京市水资源生态足迹的预测中,结果表明短期内北京市用水量呈上升趋势,水资源生态足迹提高。尽管北京市水资源利用仍将处于不可持续状态,但经相关分析发现水资源生态足迹与万元 GDP 用水量等 3 个经济性指标相关性较强,因此可以对技术和人力资本进行有效投资,尽可能地使单位水资源的经济效益最大化。

目前北京市水资源赤字程度高,水资源生态压力大,引入水资源足迹广度与深度,研究其横纵向上

的变化积累,不仅强调了水资源稀缺的性,同时关注了人类活动影响下水资源消耗与更新的不同步性。在后续研究中,应着重考虑将水资源生态足迹用水账户划分为水质型和资源型两种形式,以符合水资源短缺地区的实际情况。对水资源生态足迹进行预测时,可以结合新技术如近年来发展迅速的3S技术来突破传统陈旧的数据获取手段,在数据预处理时采用更有效的方法将异常数据剔除并补充,也可以研究神经网络最优结构设计方法,预测时选择性能更优的模型,从而最大限度地提高预测精度与应用普遍性。

参考文献(References):

- [1] 门宝辉,刘焕龙. 基于模糊集对分析的京津冀水资源可持续利用评价[J]. 华北水利水电大学学报(自然科学版), 2018, 39(4): 79-88. (MEN B H, LIU H L. Evolution of sustainable utilization of water resources in Beijing-Tianjin-Hebei based on fuzzy set pair analysis [J]. Journal of North China University of Water Resources and Electric Power (Natural Science Edition), 2018, 39(4): 79-88. (in Chinese)) DOI: 10.3969/j. issn. 1002-5634. 2018. 04. 014.
- [2] REES W E. Ecological footprints and appropriated carrying capacity: what urban economics leaves out[J]. Environment and Urbanization, 1992, 4(2): 121-130. DOI:10.1177/095624789200400212.
- [3] 李培月,钱会,吴健华,等. 银川市 2008 年水资源生态足迹研究与分析[J]. 南水北调与水利科技, 2010, 8(1): 69-71. (LI P Y, QIAN H, WU J H, et al. Study and analysis of water resources ecological footprint of 2008 in Yinchuan City [J]. South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology, 2010, 8(1): 69-71. (in Chinese)) DOI: 10.3969/j. issn. 1672-1683. 2010. 01. 018.
- [4] 陆砚池,方世明. 中国省域水资源生态足迹格局均衡性研究[J]. 水土保持研究, 2018, 25(4): 289-297. (LU Y C, FANG S M. Study on equilibrium of ecological footprint pattern of provincial water resources in China [J]. Research of Soil and Water Conservation, 2018, 25(4): 289-297. (in Chinese))
- [5] 郭晓娜,苏维词,杨振华,等. 城乡统筹背景下重庆市水生态足迹分析及预测[J]. 灌溉排水学报, 2017, 36(2): 69-75. (GUO X N, SU W C, YANG Z H, et al. Assessment and forecast on ecological footprint of water resources in Chongqing under coordinating urban and rural background [J]. Journal of Irrigation And Drainage, 2017, 36(2): 69-75. (in Chinese)) DOI: 10.13522/j. cnki. ggps. 2017. 02. 011.
- [6] 陶倩君,郭程轩. 广东省水资源生态足迹的定量评价及其影响因素[J]. 水资源保护, 2018, 34(2): 28-33. (TAO Q J, GUO C X. Quantitative evaluation and influential factor of water resources ecological footprint in Guangdong Province [J]. Water Resources Protection, 2018, 34(2): 28-33. (in Chinese)) DOI: 10.3880/j. issn. 1004-6933. 2018. 02. 06.
- [7] 谭秀娟,郑钦玉. 我国水资源生态足迹分析与预测[J]. 生态学报, 2009, 29(7): 3559-3568. (TAN X J, ZHENG Q Y. Dynamic analysis and for ecast of water resources ecological footprint in China [J]. Acta Ecologica Sinica, 2009, 29(7): 3559-3568. (in Chinese)) DOI: 10.3321/j. issn: 1000-0933. 2009. 07. 014.
- [8] 张义,邹永福,李丰生,等. 基于灰色神经网络模型的水资源生态足迹预测——以广西为例[J]. 人民长江, 2017, 48(1). (ZHANG Y, ZOU Y F, LI F S, et al. Prediction of water resources ecological footprint based on Grey Neural Network Model: A case of Guangxi Zhuang Autonomous Region [J]. Yangtze River, 2017, 48(1): 37-42. (in Chinese))
- [9] NICCOLUCCI V, BASTIANONI S, TIEZZI E B P, et al. How deep is the footprint? A 3D representation[J]. Ecological Modelling, 2009, 220(20): 2819-2823. DOI: 10.1016/j. ecolmodel. 2009. 07. 018.
- [10] 范晓秋. 水资源生态足迹研究与应用[D]. 南京: 河海大学, 2005. (FAN X Q. Study on the principle of water resources ecological footprint and applical in Jiang 5u province [D]. Hehai University, 2005. (in Chinese)) DOI: 10.7666/d. y717007.
- [11] 张义. 基于生态足迹模型的河池市水资源可持续利用评价[J]. 南水北调与水利科技, 2013, 11(4). (ZHANG Y. Assessment of sustainable utilization of water resources in Hechi City based on ecological footprint model [J]. South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology, 2013, 11(4). (in Chinese)) DOI: 10.3724/SP. J. 1201. 2013. 04026.
- [12] 孙学颖,唐德善. 广西水资源生态足迹时空分析[J]. 南水北调与水利科技, 2015, 13(1): 34-37. (SUN X Y, TANG D S. Analysis of spatio-temporal characteristics of water resources ecological footprint in Guangxi [J]. South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology, 2015, 13(1): 34-37. (in Chinese)) DOI: 10.13476/j. cnki. nsbdqk. 2015. 01. 008.
- [13] 戴昌军,管光明,梁忠民,等. 基于水资源足迹的武汉市水资源可持续利用研究[J]. 人民长江, 2011, 42(9): 8-11. (DAI C J, GUAN G M, LIANG Z M, et al. Sustainable utilization of water resources in Wuhan City based on water footprint theory [J]. Yangtze

- River, 2011, 42(9): 8-11. (in Chinese)) DOI: 10.3969/j.issn.1001-4179.2011.09.003.
- [14] 胡良文,彭泰中,金志农.基于三维生态足迹模型自然资本时空演变——以江西省为例[J].江西科学,2017,35(3):460-468.(HU L W,PENG T Z,JIN Z N.Temporal and spatial evolution of natural capital based on three dimensional ecological footprint model: Taking Jiangxi Province as an example[J].Jiangxi Science,2017,35(3):460-468.(in Chinese)) DOI:10.13990/j.issn1001-3679.2017.03.028.
- [15] 方恺,高凯,李焕承.基于三维生态足迹模型优化的自然资本利用国际比较[J].地理研究,2013,32(9):1657-1667.(FANG K,GAO K,LI H C.International comparison of natural capital use:A three-dimensional model optimization of ecological footprint [J].Geographical Research,2013,32(9):1657-1667.(in Chinese)) DOI:10.11821/dlyj201309008.
- [16] 胡美娟,周年兴,李在军,等.南京市三维生态足迹测算及驱动因子[J].地理与地理信息科学,2015,31(1):91-95.(HU M J,ZHOU N X,LI Z J,et al.Calculation and driving factor analysis of three-dimensional ecological footprint in Nanjing City [J].Geography and Geo-Information Science,2015,31(1):91-95.(in Chinese)) DOI:10.3969/j.issn.1672-0504.2015.01.019.
- [17] 张勇,张治国,董晓辉,等.基于 ARIMA 模型的山西省水资源生态足迹时间序列分析[J].安徽农业科学,2016,44(22):53-55,59.(ZHANG Y,ZHANG Z G,DONG X H,et al.Time series analysis of water resources ecological footprint in Shanxi Province based on ARIMA model[J].Journal of Anhui Agri,2016,44(22):53-55,59.DOI:10.3969/j.issn.0517-6611.2016.22.019.(in Chinese))
- [18] 赵凌,张健,陈涛.基于 ARIMA 的乘积季节模型在城市供水量预测中的应用[J].水资源与水工程学报,2011,22(1):58-62.(ZHAO L,ZHANG J,CHEN T.Application of product seasonal ARIMA model to the forecast of urban water supply [J].Journal of WaterResources&Water Engineering,2011,22(1):58-62.(in Chinese))
- [19] 李希国.烟台地区降水量的 ARIMA 随机模型研究[J].水资源与水工程学报,2006,17(8):8-12.(LI X G.Study on ARIMA stochastic model for precipitation in Yantai Region[J].Journal of WaterResources&Water Engineering,2006,17(8):8-12.(in Chinese)) DOI:10.3969/j.issn.1672-643X.2006.02.016.
- [20] 黄潇莹,张健.ARIMA 模型在成都市供水量预测中的应用[J].水资源与水工程学报,2010,21(4):111-113.(HUANG X Y,ZHANG J.Application of ARIMA model to water supply forecasting in Chengdu[J].Journal of WaterResources&Water Engineering,2010,21(4):111-113.(in Chinese))
- [21] 张杰,陆宝宏,李莉会,等.基于 GRNN 网络的苏州市水资源承载能力评价[J].水资源保护,2013,29(2):43-47.(ZHANG J,LU B H,LI L H,et al.Evaluation of water resources carrying capacity of Suzhou City based on generalized regression neural network[J].Water Resources Protection,2013,29(2):43-47.(in Chinese)) DOI:10.3969/j.issn.10046933.2013.02.009.
- [22] 屈吉鸿,曹连海,陈南祥,等.黄河流域需水量预测的 GRNN 模型研究[J].人民黄河,2008,30(11):56-57.(QU J H,CAO L H,CHEN N X,et al.Study on GRNN model for water demand prediction in the Yellow River basin[J].Yellow River,2008,30(11):56-57.(in Chinese)) DOI:10.3969/j.issn.1000-1379.2008.11.026.
- [23] 崔东文,郭荣.基于 GRNN 模型的区域水资源可持续利用评价——以云南文山州为例[J].人民长江,2012,43(5):26-31.(CUI D W,GUO R.Evaluation of sustainable utilization of regional water resources based on GRNN neural network model: case of Wenshan Prefecture of Yunnan Province[J].Yangtze River,2012,43(5):26-31.(in Chinese)) DOI:10.3969/j.issn.1001-4179.2012.05.006.
- [24] 杨振华,苏维词,赵卫权,等.基于 GRNN 模型的岩溶地区城市水生态足迹分析与预测[J].中国岩溶,2016,35(1):36-42.(YANG Z H,SU W C,ZHAO W Q,et al.Analysis and forecast of water ecological footprint in karst area based on GRNN model[J].Carsologica Sinica,2016,35(1):36-42.(in Chinese)) DOI:10.11932/karst20160106.
- [25] 李经纬,包腾飞.ARIMA——GRNN 模型在大坝安全监测中的应用[J].水电能源科学,2013,31(7):48-50.(LI J W,BAO T F.Application of ARIMA-GRNN model in dam safety monitoring[J].Water Resources and Power,2013,31(7):48-50.(in Chinese))
- [26] 黄林楠,张伟新,姜翠玲,等.水资源生态足迹计算方法[J].生态学报,2007,28(3).(HUANG L N,ZHANG W X,JIANG C L,et al.Ecological footprint method in water resources assessment [J].Acta Ecologica Sinica,2007,28(3).(in Chinese)) DOI:10.3321/j.issn:1000-0933.2008.03.044.