

孙 斌,徐 渭,薛建春,等. 黄河流域城市群城镇化与生态环境耦合协调预测[J]. 地球科学与环境学报,2021,43(5):887-896.
SUN Bin,XU Wei,XUE Jian-chun,et al. Prediction of Coupling and Coordination Between Urbanization and Eco-environment of Urban Agglomerations in Yellow River Basin,China[J]. Journal of Earth Sciences and Environment,2021,43(5):887-896.

DOI:10. 19814/j. jese. 2021. 05033

黄河流域城市群城镇化与生态环境耦合协调预测

孙 斌,徐 渭,薛建春,侯思杰

(内蒙古科技大学 经济与管理学院,内蒙古 包头 014010)

摘 要:城镇化对于生态环境的胁迫效应和生态环境对城镇化进程形成的约束作用具有积累性和长期性。针对基于历史数据分析中未考虑到的滞后性问题,以黄河流域呼包鄂榆、宁夏沿黄、兰西、关中平原、中原、山东半岛和晋中等 7 个城市群为基本研究单元,构建城镇化与生态环境评价指标体系和耦合协调度模型,对 2000~2019 年黄河流域城市群耦合协调度进行测度,并建立 ARIMA-BP 组合模型来预测 2020~2025 年未来发展趋势。结果表明:黄河流域城市群耦合协调度呈上升趋势,部分城市群出现波动,耦合协调特征由轻度失调、濒临失调转为勉强协调、初级协调;对未来 6 年耦合协调度预测发现,7 个城市群耦合协调度未来皆表现出上升趋势,但不同城市群存在一定差异,部分城市群在 2025 年依旧未能突破轻度协调达到更加理想的耦合协调阶段。未来应不断提升山东半岛城市群核心竞争力,推进关中平原城市群和中原城市群次级中小城市成长壮大,并且要格外关注呼包鄂榆城市群、晋中城市群依靠资源发展所导致的水土流失和污染防治问题,加强宁夏沿黄城市群和兰西城市群城镇化建设和生态环境保护力度,补齐流域发展短板,早日实现流域城市群协同发展。

关键词:城市群;城镇化;生态环境;耦合协调;预测;ARIMA 模型;BP 神经网络模型;黄河流域
中图分类号:F291.1;X196 **文献标志码:**A **文章编号:**1672-6561(2021)05-0887-10

Prediction of Coupling and Coordination Between Urbanization and Eco-environment of Urban Agglomerations in Yellow River Basin, China

SUN Bin, XU Wei, XUE Jian-chun, HOU Si-jie

(School of Economics and Management, Inner Mongolia University of Science and Technology,
Baotou 014010, Inner Mongolia, China)

Abstract: The stress effects of urbanization on eco-environment and the restraint effects of eco-environment on urbanization are accumulated and long-termed. In response to the lag problems based on historical data, taking 7 urban agglomerations including Hohhot-Baotou-Ordos-Yulin, along Yellow River in Ningxia, Lanzhou-Xining, Guanzhong Plain, Zhongyuan, Shandong Peninsula and Jinzhong in Yellow River basin as the basic research units, the urbanization and eco-environment evaluation index system and coupling coordination model of urban agglomerations in Yellow River basin during 2000—2019 were constructed, and an ARIMA-BP combination model to predict future trends was established. The results show that coupling coordination degrees of urban agglomerations in Yellow River basin are rising, and some urban

agglomerations show fluctuation values; the coupling coordination characterized by mild disorder and endangered turns into barely coordinated and primary coordinated; for the next 6 years forecast, the coupling coordination degrees of 7 urban agglomerations show an upward trend in the future, but there are certain differences, some urban agglomerations still fail to break through mild coordination to reach more ideal coupling phases in 2025. In the future, the core competitiveness of Shandong Peninsula urban agglomeration should be continuously improved, Guanzhong Plain urban agglomeration and Zhongyuan urban agglomeration should be promoted for the growth of secondary small and medium-sized cities, and special attention should be paid to the water and soil erosion caused by the development of Hohhot-Baotou-Ordos-Yulin urban agglomeration and Jinzhong urban agglomeration. Besides, urban agglomeration along Yellow River in Ningxia and Lanzhou-Xining urban agglomeration should strengthen the urbanization and ecological environment protection, and make up for the shortcomings in the development to realize the coordinated development of the urban agglomerations in the river basin as soon as possible.

Key words: urban agglomeration; urbanization; eco-environment; coupling coordination; prediction; ARIMA model; BP neural network model; Yellow River basin

0 引言

2019 年 9 月,习近平总书记作出加强黄河治理保护、推动黄河流域高质量发展的重大部署。黄河流域城市群是黄河流域高质量发展重心区和环境污染综合治理与生态保护重点区,在推进黄河流域生态保护和高质量发展过程中具有很高战略地位^[1]。黄河流域城市群包括呼包鄂榆、宁夏沿黄、兰西、关中平原、中原、山东半岛和晋中 7 个城市群^[2]。除了山东半岛城市群发育成熟,其余城市群尚处于雏形阶段,总体发育和城镇集聚程度偏低^[3],在面临发展迫切需求的同时,还需克服发展中忽视“外部经济性”所造成的流域污染治理和生态保护难题。因此,有必要对黄河流域城市群城镇化与生态环境耦合协调发展进行研究,深入挖掘存在的问题,结合实际提出政策建议,为地区探索城镇化与生态环境耦合协调发展提供借鉴。

国内外学者针对城镇化与生态环境相互作用及耦合关系已开展了大量研究。其主要包括:①理论研究及演变规律分析。在国外,不同学者及研究机构先后提出了 PSR(Pressure-state-response)模型、EKC 曲线(Environmental Kuznets Curve)和脱钩理论,丰富了相关理论研究^[4-6];在国内,黄金川等对耦合规律曲线进行了推演^[7-8],方创琳等构建了多集成时空耦合动力学模型,提出“耦合魔方”概念^[9-11]。②城镇化与生态环境耦合实证研究。国外学者在世界各地均进行了大量相关案例研究^[12-13];刘耀彬等

构建耦合发展模型探寻发展规律^[14-15];陈晓红等分析了未来耦合关系演变趋势^[16];邓宗兵等探寻了地区城镇化与生态环境耦合驱动机制^[17];赵建吉等对黄河流域城镇化与生态环境影响因素进行了研究^[18]。③不同尺度上的研究。多数学者选用城市或生态特殊区;部分学者选用不同城市群进行研究分析^[19-22];还有一些学者以流域为尺度进行了相关研究。例如,马艳对长江经济带城镇化与生态环境交互关系进行了测度与推演验证^[23];高红贵等对长江经济带进行了耦合测度^[24]。④对于不同复杂非线性系统,学者们使用多种方法进行了评价与预测。宋学锋等利用 SD 模型对江苏省城市化与生态环境耦合进行了情景模拟分析^[25];冯雨雪等使用灰色预测模型对青藏高原城镇化与生态环境耦合协调进行预测^[26];蔡文静等对西北五省进行了生态-经济-城镇化系统的耦合预测分析^[27]。

总体而言,现有研究仍存在一些不足之处。首先,现有研究的评价指标选取在高质量发展内涵上表现不足;其次,以往研究通常以黄河流域某一城市群作为研究区,黄河流域城市群是一个“3+4”的空间组织格局,需要全流域视角的整体研究;最后,尽管研究方法较为丰富,但对耦合关系的模拟和预测相对较少。城镇化和生态环境间相互作用具有长期性和累积性,单纯评估现状难免有滞后性和被动性。耦合协调度时间序列包含了线性趋势和非线性趋势,因此,本文使用 ARIMA 模型预测线性趋势,并用 BP 神经网络模型对 ARIMA 模型的误差进行预

测,以期使预测效果达到最优。

基于此,本文以黄河流域 7 个城市群为基本研究单元,在 PESS (Population-economic-sociology-space)模型和 PSR 模型基础上建立体现高质量发展内涵的城镇化与生态环境评价指标体系,运用耦合协调度模型对耦合协调度进行测度,并构建 ARI-MA-BP 组合模型预测 2020~2025 年黄河流域城市群耦合协调度,探讨其耦合发展趋势并提出未来发展建议。

1 研究区概况与数据来源

1.1 研究区概况

黄河发源于青藏高原巴颜喀拉山脉,流经青、川、甘、宁、蒙、晋、陕、豫、鲁等 9 个省区,流域面积约占全国面积的 8.28%。黄河流域是中国重要生态

屏障、经济发展重要地带和脱贫攻坚重要区域,对国家经济发展和生态安全具有重要意义。黄河流域范围和城市群分布如图 1 所示。由于黄河流域不同城市群在城市构成上略有重叠,且考虑到部分城市群内个别县级市和少数民族自治州数据缺失严重情况,所以选择 7 个城市群中 58 个核心城市作为城市群构成样本,在此基础上进行数据收集及研究。

1.2 数据来源

以黄河流域 7 个城市群 58 个核心城市为基本单元,开展 2000~2019 年各城市群城镇化与生态环境耦合协调度研究,并对 2020~2025 年耦合协调度预测结果进行空间上的演变展示。数据来源包括各年份《中国城市统计年鉴》及各省份、各地级市统计年鉴等,部分指标数据来源于各城市历年社会经济统计公报,并通过数据处理方法进行缺失值填补。

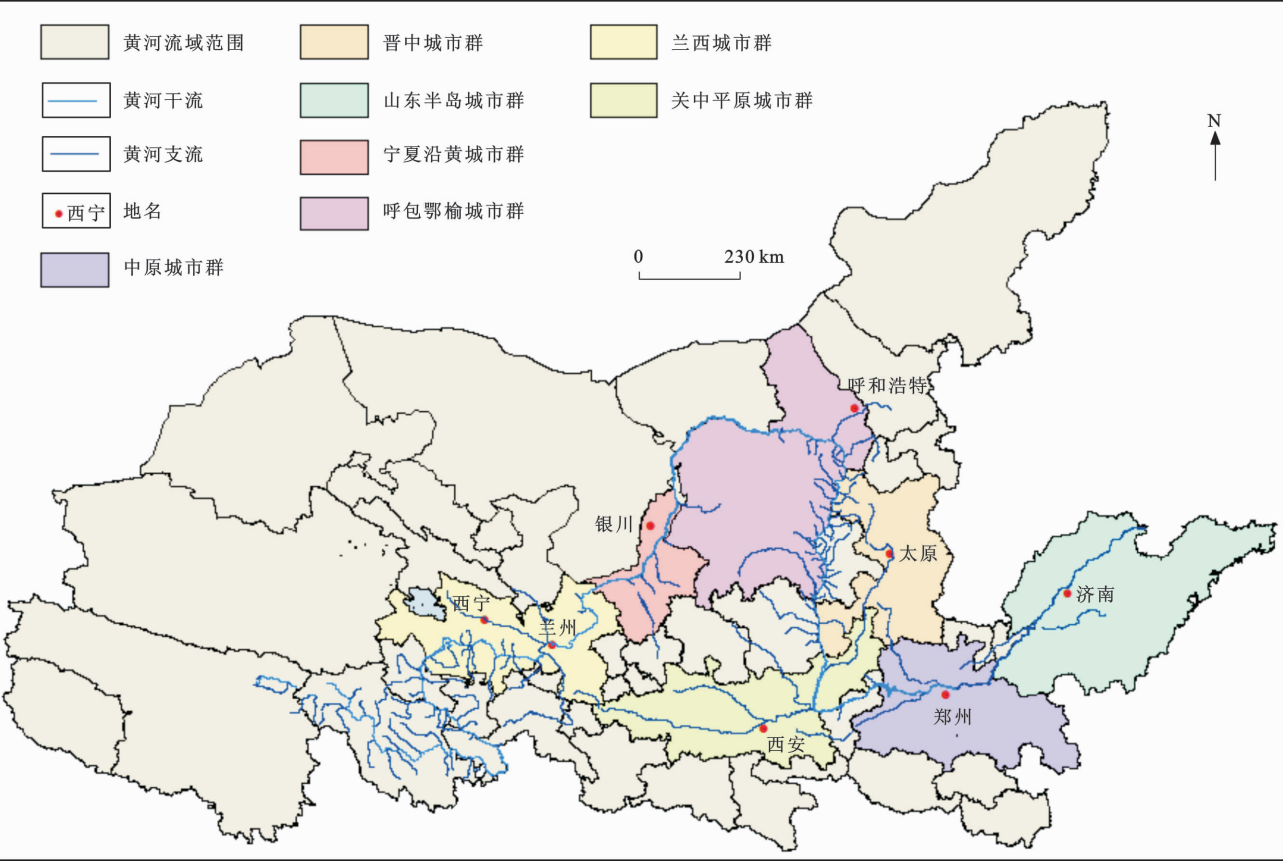


图 1 黄河流域城市群分布
Fig. 1 Distribution of Urban Agglomerations in Yellow River Basin

2 分析方法

2.1 城镇化与生态环境评价指标体系构建

本文选择在 PESS 模型和 PSR 模型基础上选取 29 个指标表征高质量发展中的开放、协调、共享、创新、绿色理念,建立城镇化和生态环境评价指标体

系(表 1、2)。其中,指标权重通过熵值法进行确定,保证了权重客观性。

2.2 耦合协调度模型

耦合是指两个或两个以上系统通过受自身和外界各种作用而相互影响,耦合度模型已经被广泛使用在城镇化与生态环境间复杂的耦合机理研究中,

表 1 城镇化评价指标体系
Tab. 1 Evaluation Index System of Urbanization

系统	一级指标	基础指标层	权重
城 镇 化	人口城镇化	人口城镇化率	0.036 7
		市区人口密度	0.069 3
	经济城镇化	人均 GDP	0.054 2
		人均固定资产投资	0.069 7
		GDP 增长率	0.016 4
		进出口总额	0.099 4
		外商投资总额	0.086 6
		非农产业占 GDP 比重	0.013 0
		居民消费价格指数	0.032 7
	社会城镇化	人均社会消费品零售总额	0.130 0
		城镇人均可支配收入	0.034 9
		失业率	0.017 5
		互联网用户数	0.057 0
		万人拥有床位数	0.024 0
		万人拥有大学生数	0.019 4
		有效专利数	0.095 0
		R&D 经费支出	0.064 5
	空间城镇化	人均建成区面积	0.044 3
		人均城市道路面积	0.035 4

注:人口城镇化率、人均固定资产投资、人均社会消费品零售总额分别由地区城市人口、固定资产投资总额、社会消费品零售总额除以总人口得到。

表 2 生态环境评价指标体系
Tab. 2 Evaluation Index System of Eco-environment

系统	一级指标	基础指标层	权重
生 态 环 境	环境压力	城市人均日生活用水	0.044 6
		人均工业废水排放量	0.114 1
		万人工业 SO ₂ 排放	0.123 9
		人口自然增长率	0.145 1
	生态状态	建成区绿化覆盖率	0.075 8
		人均耕地面积	0.152 0
		人均公园绿地面积	0.087 4
	环境响应	城市污水处理率	0.022 4
		环境治理投资占 GDP 比重	0.198 1
		生活垃圾无害化处理率	0.036 5

注:环境治理投资数据选用城市公共卫生维护费等相近指标进行替代。

具体计算过程如下所示。

(1)耦合度计算,其表达式为

$$C=\left[\frac{F(x)\times G(y)}{\left(\frac{F(x)+G(y)}{2}\right)^2}\right]^{\frac{1}{k}}\tag{1}$$

式中: C 为城镇化与生态环境系统的耦合度, $0\leq C\leq 1$; $F(x)$ 和 $G(y)$ 分别为基于城镇化评价指标 x 与生态环境评价指标 y 收集到的数据,使用熵权法

客观赋权并综合评价得到的城镇化系统和生态环境系统评价值; k 是调节系数, $k\geq 2$,通常来说 $k=2$ 。

(2)系统综合发展指数和耦合协调度计算,其表达式为

$$T=\alpha\times F(x)+\beta\times G(y)\tag{2}$$

$$D=\sqrt{C\times T}\tag{3}$$

式中: D 为耦合协调度; T 为城镇化与生态环境系统综合发展指数; α 和 β 为待定系数,分别表示城镇化系统和生态环境系统评价值的重要程度,除特殊情境外,通常取 $\alpha=\beta=0.5$ 。

借鉴其他学者对协调类型的划分^[28],本文将耦合协调度划分为 10 个等级(表 3)。

表 3 耦合协调度等级分类

Tab. 3 Classification of Coupling Coordination Degree			
耦合协调度分级	类型	耦合协调度分级	类型
$0<D\leq 0.1$	严重失调	$0.5<D\leq 0.6$	勉强协调
$0.1<D\leq 0.2$	重度失调	$0.6<D\leq 0.7$	初级协调
$0.2<D\leq 0.3$	中度失调	$0.7<D\leq 0.8$	中度协调
$0.3<D\leq 0.4$	轻度失调	$0.8<D\leq 0.9$	良好协调
$0.4<D\leq 0.5$	濒临失调	$0.9<D\leq 1.0$	优质协调

2.3 ARIMA-BP 组合模型

2.3.1 ARIMA 模型

ARIMA(p, d, q)模型中的 3 个参数 p, d, q 分别是模型的自回归项阶数(AR 模型阶数)、差分阶数、移动平均项阶数(MA 模型阶数)。ARIMA 模型实质上是在自回归移动平均模型的基础上针对非平稳序列进行 d 阶差分,使其预测精度得以提升。如果原始时间序列非平稳,那么要先对其进行差分处理直至平稳,在这个阶段就可以确定差分阶数 d ,然后对 ARIMA 模型进行定阶,确定使结果最优的自回归项阶数 p 和移动平均项阶数 q 。ARIMA 模型的一般表达式为

$$y_t=c+\varphi_1y_{t-1}+\cdots+\varphi_py_{t-p}+\theta_1\varepsilon_{t-1}+\cdots+\theta_q\varepsilon_{t-q}+\varepsilon_t\tag{4}$$

式中: y_t 为 t 阶差分序列; ε_t 为 t 阶噪声序列; φ_p 为 p 阶 AR 模型拟合参数; θ_q 为 q 阶 MA 模型拟合参数; c 为常数。

2.3.2 BP 神经网络模型

BP 神经网络是按照误差逆向传播算法进行训练的多层神经网络。其在结构上包括输入层、隐含层、输出层 3 种,学习过程包括信号的前向传播和误差的逆向反馈,信息由输入层经过隐含层到达输出层后,比较输出值与期望值之间的误差^[29]。若误差较大,预测结果不理想,则误差将会逐层逆向传播到

输入层,同时不断调整和迭代直至预测结果较为理想,实现收敛。

2.3.3 ARIMA-BP 组合模型

ARIMA 模型是基于线性技术对时间序列数据进行预测的一种方法,但对非线性预测结果可能存在一些不合理的误差,而 BP 神经网络可以很好地预测非线性数据^[30]。实际问题中,线性与非线性同时存在,单纯使用 ARIMA 模型或 BP 神经网络模型难免会存在较大误差,不能很好地预测实际问题。因此,本文使用 ARIMA-BP 组合模型对黄河流域城市群城镇化与生态环境耦合协调度进行预测。

ARIMA-BP 组合模型的表达式为

$$D_t=L_t+N_t$$
(5)

式中: D_t 为真实值; L_t 为原始数据中的线性部分;

N_t 为非线性残差部分。
使用 ARIMA 模型进行预测,得到预测值 L_t' , 则预测残差(E_t)为

$$E_t=D_t-L_t'$$
(6)

使用 BP 神经网络模型对 E_t 进行预测,得到预测值 E_t' 。ARIMA-BP 组合模型得到的最终预测值 D_t' 为

$$D_t'=E_t'+L_t'$$
(7)

3 实证分析

3.1 城镇化与生态环境耦合协调度分析

根据城镇化与生态环境耦合协调模型,对 2000~2019 年黄河流域城市群耦合协调度进行测度,结果如图 2 所示。

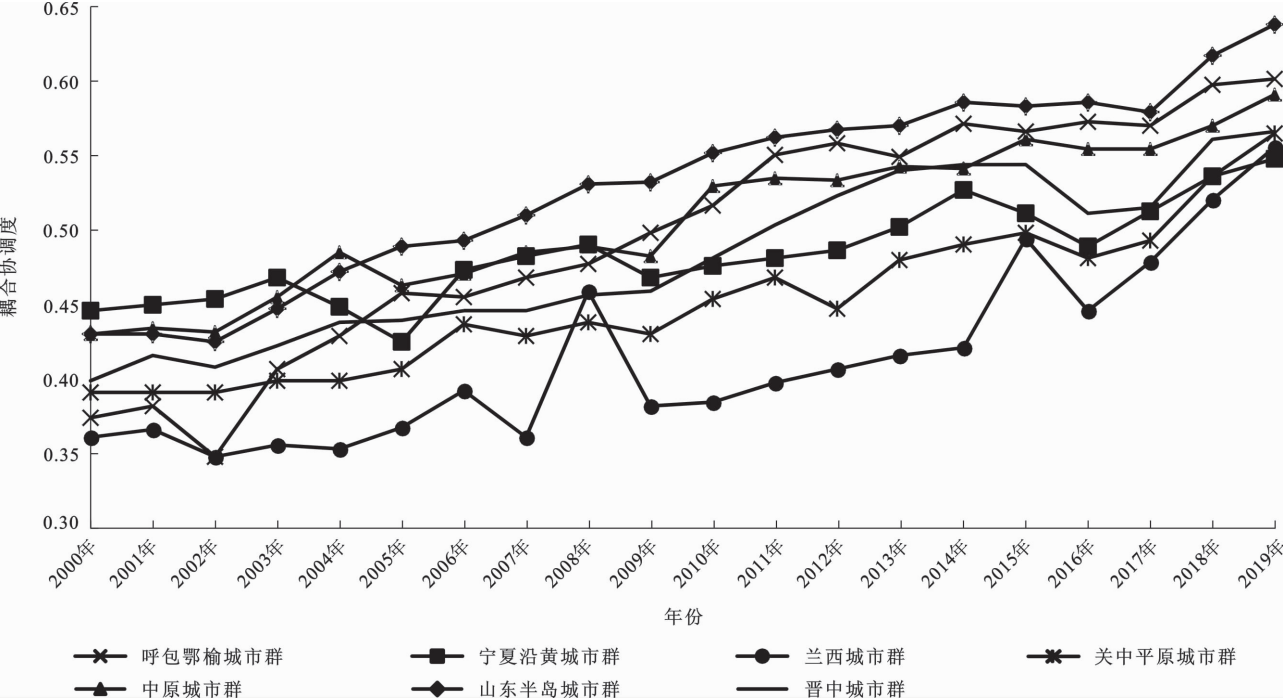


图 2 2000~2019 年黄河流域城市群耦合协调度演变

Fig.2 Evolution of Coupling Coordination Degrees of Urban Agglomerations in Yellow River Basin During 2000—2019

由图 2 可见,7 个城市群城镇化与生态环境耦合协调度总体呈上升趋势。山东半岛城市群 2005 年之后超过中原城市群成为耦合协调度最高的城市群,起步早、发展快、区位优势明显、综合实力较强、生态资源独具特色是其耦合协调度较高的原因;中原城市群承接了东部大量资本和产业,区域发展活力和创新能力得到一定提高,但相较于山东半岛城市群耦合协调度稍低;关中平原城市群地理位置较优,总体保持上升趋势,仅在 2012 年、2016 年出现了下降波动;呼包鄂榆城市群在 2002 年以前耦合协调度较差,和兰西城市群基本相同,之后一直保持积

极增长态势,由 2003 年的 0.407 增长到 2005 年的 0.458,2005 年之后增长速度变慢,主要是由于呼包鄂榆城市群资源密集,经济增长更多依赖资源消耗,易陷入“资源诅咒”,且城镇化发展过程中牺牲了生态环境成本;晋中城市群耦合协调度增长较为稳定,2015 年之后增长速度变慢,依靠煤炭等资源来实现经济增长所引发的生态环境胁迫效应在一定程度上抑制了耦合协调度;宁夏沿黄城市群在 2000 年至 2003 年耦合协调度最高,其后多次出现下降,增长幅度不大,20 年内耦合协调度仅增加了 0.102,且 2019 年耦合协调度居于 7 个城市群末位;兰西城市

群以有色金属、盐化工和石油化工产业为主,地区发展相对贫困,总体上耦合协调度最低,分别在 2008 年和 2015 年出现波动,耦合协调度突然升高并下降,主要受到生态环境发展水平影响。

3.2 城镇化与生态环境耦合协调预测分析

3.2.1 ARIMA 模型时间序列预测分析

使用 ARIMA 模型进行 7 个城市群的城镇化与生态环境耦合协调度时间序列预测分析,预测未来 6 年的变化趋势。由于每个城市群的原始时间序列数据存在差异,ARIMA 模型的参数选取方面也不尽相同(表 4),通过自相关和偏自相关分析进行模型参数确定。使用 ARIMA 模型预测 7 个城市群城镇化与生态环境耦合协调度的结果见表 5。

表 4 ARIMA 模型参数选取情况
Tab. 4 Selection of ARIMA Model Parameters

城市群	ARIMA 模型
呼包鄂榆城市群	ARIMA(0,1,1)
宁夏沿黄城市群	ARIMA(2,1,2)
兰西城市群	ARIMA(0,1,1)
关中平原城市群	ARIMA(0,1,0)
中原城市群	ARIMA(0,1,1)
山东半岛城市群	ARIMA(0,1,0)
晋中城市群	ARIMA(2,1,2)

3.2.2 BP 神经网络模型残差预测分析

将 ARIMA 模型预测得出的结果与真实值进行比较得出绝对误差,利用MATLAB 2017a构建 BP 神经网络模型对误差进行预测。由于误差年份为 2001~2019 年,所以模型样本量为 19。同时,考虑到时间序列数据的特征,选择输入层神经元个数为 3,输出层神经元个数为 1,采用滑动窗口法生成训练集样本作为输入层输入,即将前三年的误差作为输入值,其后一年的误差作为输出值,构建前三年误差与后一年误差的非线性函数,最终 19 个样本滑动生成 16 个矩阵样本,即在 MATLAB 中输入矩阵为 3×16 ,输出矩阵为 1×16 。

由映射存在定理可知,任意连续函数可由一个三层感知器网络逼近,因此,采用三层 BP 神经网络。同时,根据隐含层神经元节点数公式 $S = \sqrt{n+m} + \alpha$ (其中, S 为所求节点数, n 为输入层节点数, m 为输出层节点数, α 为 1~10 之间的常数)可知,隐含层神经元个数范围为[3,12],经多次试验最终确定隐含层神经元个数为 5。将前十列作为训练集,后六列作为测试集,构建神经网络模型开始训练。其中, MATLAB 归一化函数为“mapminmax”,

表 5 ARIMA 模型预测结果
Tab. 5 Prediction Results of ARIMA Model

年份	呼包鄂榆城市群	宁夏沿黄城市群	兰西城市群	关中平原城市群	中原城市群	山东半岛城市群	晋中城市群
2000 年	0.375	0.446	0.362	0.391	0.431	0.431	0.400
2001 年	0.379	0.441	0.360	0.393	0.430	0.430	0.410
2002 年	0.360	0.446	0.350	0.390	0.440	0.420	0.400
2003 年	0.380	0.450	0.370	0.400	0.450	0.440	0.420
2004 年	0.410	0.430	0.380	0.410	0.460	0.460	0.430
2005 年	0.430	0.460	0.380	0.410	0.470	0.480	0.440
2006 年	0.460	0.470	0.380	0.420	0.480	0.460	0.450
2007 年	0.470	0.500	0.400	0.450	0.490	0.480	0.450
2008 年	0.480	0.480	0.390	0.440	0.490	0.500	0.460
2009 年	0.490	0.470	0.430	0.450	0.500	0.500	0.470
2010 年	0.510	0.470	0.420	0.440	0.510	0.520	0.500
2011 年	0.530	0.480	0.420	0.460	0.520	0.540	0.500
2012 年	0.550	0.490	0.420	0.480	0.530	0.540	0.530
2013 年	0.570	0.500	0.420	0.460	0.540	0.570	0.530
2014 年	0.570	0.510	0.430	0.490	0.550	0.580	0.550
2015 年	0.570	0.510	0.440	0.500	0.550	0.600	0.540
2016 年	0.580	0.50	0.470	0.510	0.560	0.590	0.540
2017 年	0.590	0.510	0.470	0.490	0.570	0.600	0.520
2018 年	0.590	0.540	0.480	0.500	0.580	0.590	0.550
2019 年	0.610	0.540	0.520	0.550	0.590	0.630	0.570
2020 年	0.617	0.535	0.536	0.574	0.594	0.649	0.566
2021 年	0.629	0.529	0.546	0.583	0.602	0.660	0.581
2022 年	0.641	0.539	0.555	0.592	0.610	0.671	0.589
2023 年	0.654	0.555	0.564	0.602	0.619	0.682	0.599
2024 年	0.666	0.564	0.574	0.611	0.627	0.692	0.607
2025 年	0.678	0.564	0.583	0.620	0.635	0.703	0.616

输入层与隐含层间传递函数为对数 S 型函数“logsig”,隐含层与输出层传递函数选择线性函数“purelin”,训练函数则选择“trainlm”。

对 7 个城市群进行预测后的效果评估,2004~2019 年组合模型的平均预测精度如表 6 所示。其中,模型平均相对误差是指 2004~2019 年每个城市群不同预测模型相对误差均值,可见每个城市群预测精度均有一定提升,提升程度各有不同,但总体上 ARIMA-BP 组合模型预测效果较为理想。

通过使用训练之后的 BP 神经网络模型对误差进行预测,并将预测得到的误差与使用 ARIMA 模型预测得到的线性部分进行相加,得到最终 ARIMA-BP 组合模型的预测值,结果如表 7 所示。

由表 7 可见,各个城市群在未来 6 年内耦合协调度预测值总体呈上升趋势。山东半岛城市群耦合协调度在 2023 年突然由 0.785 4 下降到 0.696 9,但

表 6 ARIMA-BP 组合模型平均预测精度

Tab. 6 Average Prediction Accuracy of ARIMA-BP Combination Model

城市群	ARIMA 模型 平均相对误差	ARIMA-BP 组合 模型平均相对误差	误差减少
呼包鄂榆城市群	2.046	0.957	1.089
宁夏沿黄城市群	1.063	1.046	0.017
兰西城市群	6.410	1.400	5.010
关中平原城市群	3.097	1.063	2.034
中原城市群	1.858	0.206	1.652
山东半岛城市群	2.714	0.482	2.232
晋中城市群	1.571	0.627	0.944

依旧排在城市群之首。其次是呼包鄂榆城市群和中原城市群,呼包鄂榆城市群在 2021 年耦合协调度由上一年的 0.644 0 下降为 0.588 0,其后不断上升并逐渐超过中原城市群。晋中城市群和关中平原城市

群在 2023 年分别上升和下降,关中平原城市群在下降之后持续上升,而晋中城市群则基本保持不变。宁夏沿黄城市群和兰西城市群的耦合协调度排在 7 个城市群的末位,宁夏沿黄城市群基本保持稳定且缓慢上升趋势,而兰西城市群则出现多次波动情况。将预测结果进行空间演变,结果如图 3 所示。

由图 3 可以看出,空间演变过程呈现东部山东半岛城市群、西北部呼包鄂榆城市群和中部中原城市群耦合协调度较高,其余中西部城市群耦合协调度偏低的空间格局。到 2025 年,山东半岛城市群城镇化与生态环境将进入良好协调阶段,呼包鄂榆城市群处于中度协调阶段,关中平原城市群、中原城市群、晋中城市群处于初级协调阶段,而宁夏沿黄城市群、兰西城市群依旧处于勉强协调阶段,耦合协调度尚不乐观。

表 7 ARIMA-BP 组合模型预测结果

Tab. 7 Prediction Results of ARIMA-BP Combination Model

年份	呼包鄂榆城市群	宁夏沿黄城市群	兰西城市群	关中平原城市群	中原城市群	山东半岛城市群	晋中城市群
2020 年	0.644 0	0.536 5	0.516 4	0.599 1	0.594 0	0.667 4	0.583 2
2021 年	0.588 0	0.532 2	0.530 2	0.579 8	0.602 0	0.765 8	0.576 6
2022 年	0.615 0	0.541 4	0.573 0	0.581 9	0.610 0	0.785 4	0.585 9
2023 年	0.640 0	0.557 6	0.530 3	0.573 1	0.619 0	0.696 9	0.608 6
2024 年	0.706 0	0.566 7	0.636 9	0.613 0	0.627 0	0.787 2	0.605 4
2025 年	0.721 0	0.566 6	0.556 6	0.669 4	0.635 0	0.817 4	0.611 9

4 结 语

(1)2000~2019 年黄河流域城市群耦合协调度呈上升态势,总体上山东半岛城市群耦合协调度最高,兰西城市群耦合协调度最低且出现波动。7 个城市群耦合协调特征由轻度失调、濒临失调转为勉强协调、初级协调,总体上耦合程度并不理想,2000~2019 年 7 个城市群均未达到较高的耦合协调状态。

(2)通过构建 ARIMA-BP 组合模型对未来 6 年黄河流域城市群城镇化与生态环境耦合协调度进行预测,探寻未来发展趋势。结果显示:未来 6 年,7 个城市群城镇化与生态环境耦合协调度均有提高,耦合协调度等级有一定提升,且呈现出东部山东半岛城市群、西北部呼包鄂榆城市群和中部中原城市群耦合协调度较高,其余中西部城市群耦合协调度偏低的空间格局。山东半岛城市群从初级协调转为中度协调,预计在 2025 年转为良好协调;呼包鄂榆城市群则从初级协调转为中级协调;除宁夏沿黄城市群和兰西城市群以外,其余城市群城镇化与生态

环境耦合协调度基本达到协调状态,在 2025 年均进入初级协调或已超越初级协调阶段。

(3)对于黄河流域城市群的未来发展,首先,要抓住发展中的主要矛盾,既要高质量发展,继续推进城镇化建设,又要关注到发展所带来的环境污染等现象。能源型流域城市群(如呼包鄂榆城市群、晋中城市群)对矿产资源和水资源依赖突出,绿色转型和污染治理任务艰巨,因此,需格外关注生态环境污染问题;兰西城市群生态环境脆弱,地广人稀,经济发展相对滞后,要多依靠创新驱动,用空间规划引领资源利用和环境治理。其次,要制定个性化发展策略,实现区域协同发展。从上述结果分析可以看出,不同城市群未来发展仍存在一定差异。山东半岛城市群未来依旧发挥其在流域发展中的龙头作用,但相比全国其他发育成熟的城市群而言,科技创新能力与核心竞争力不够突出,今后仍需增强在全国的综合竞争力;关中城市群和中原城市群地处平原,是中西部战略发展重地,今后要继续提升区域整体发展水平,推动除省会城市以外其他次级中小城市发展壮大。此外,宁夏沿黄城市群和兰西城市群在 7

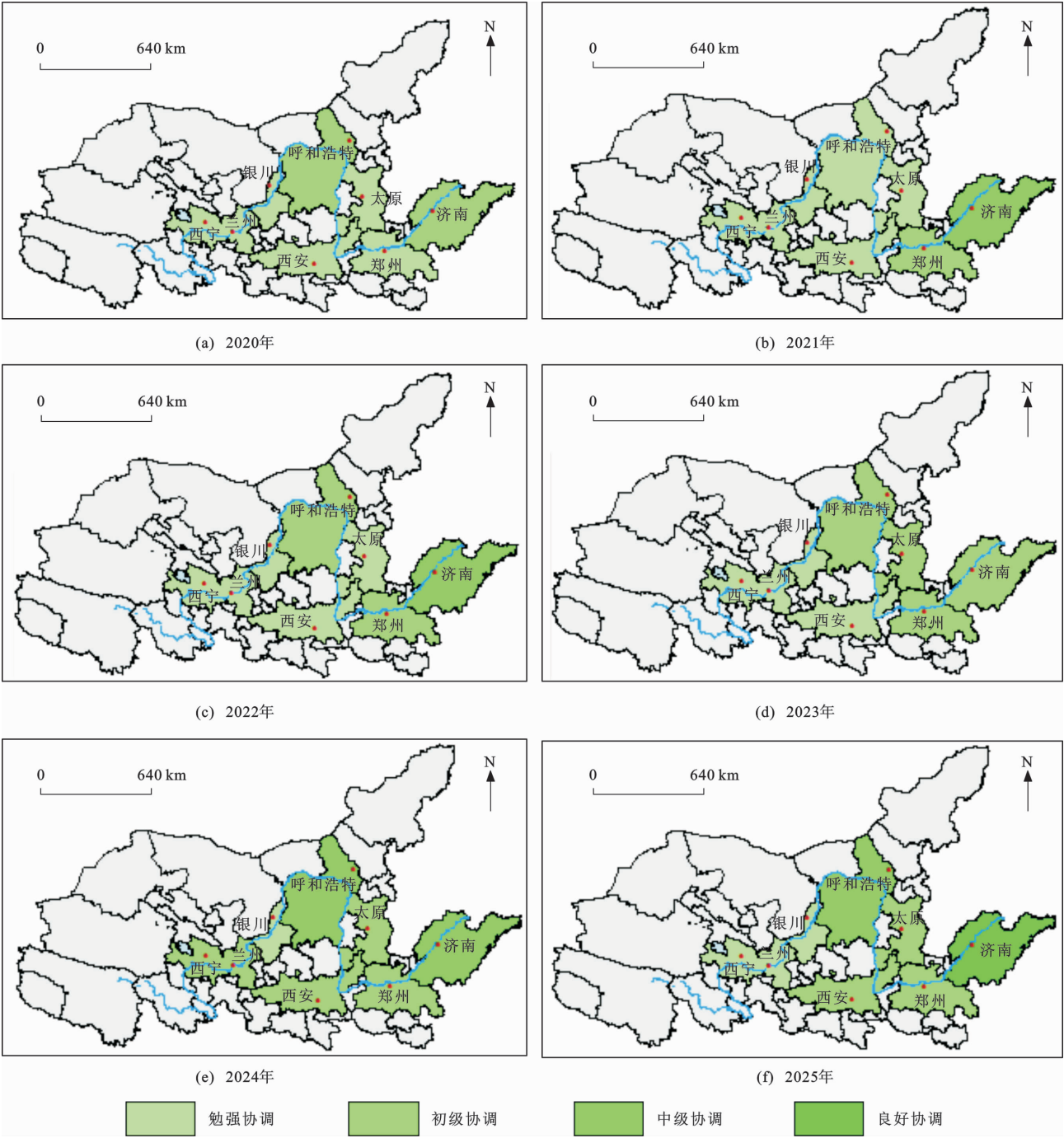


图 3 2020~2025 年黄河流域城市群耦合协调度预测结果空间演变

Fig. 3 Spatial Evolution of Coupling Coordination Degree Prediction Results of Urban Agglomerations in Yellow River Basin During 2020—2025

个城市群中耦合发展状况相对不佳,需进一步补齐发展短板,推进城镇化过程,强化生态环境保护力度,这样才能尽快实现全流域城市群的协同发展。

参考文献：

References：

[1] 方创琳. 黄河流域城市群形成发育的空间组织格局与高质量发展[J]. 经济地理, 2020, 40(6): 1-8.

FANG Chuang-lin. Spatial Organization Pattern and High-quality Development of Urban Agglomeration in the Yellow River Basin[J]. Economic Geography, 2020, 40(6): 1-8.

[2] 马海涛,徐植钤. 黄河流域城市群高质量发展评估与空间格局分异[J]. 经济地理, 2020, 40(4): 11-18.

MA Hai-tao, XU Xuan-fang. High-quality Development Assessment and Spatial Heterogeneity of Urban

- Agglomeration in the Yellow River Basin[J]. *Economic Geography*, 2020, 40(4): 11-18.
- [3] 方创琳, 鲍超, 马海涛. 中国城市群发展报告[M]. 北京: 科学出版社, 2016.
- FANG Chuang-lin, BAO Chao, MA Hai-tao. China Urban Group Development Report[M]. Beijing: Science Press, 2016.
- [4] BERGER A R, HODGE R A. Natural Change in the Environment: A Challenge to the Pressure-state-response Concept[J]. *Social Indicators Research*, 1998, 44(2): 255-265.
- [5] CAVIGLIA-HARRIS J L, CHAMBERS D, KAHN J R. Taking the "U" out of Kuznets: A Comprehensive Analysis of the EKC and Environmental Degradation[J]. *Ecological Economics*, 2009, 68(4): 1149-1159.
- [6] OECD. Indicators to Measure Decoupling of Environmental Pressure from Economic Growth [R]. Paris: OECD, 2002.
- [7] 黄金川, 方创琳. 城市化与生态环境交互耦合机制与规律性分析[J]. *地理研究*, 2003, 22(2): 211-220.
- HUANG Jin-chuan, FANG Chuang-lin. Analysis of Coupling Mechanism and Rules Between Urbanization and Eco-environment [J]. *Geographical Research*, 2003, 22(2): 211-220.
- [8] 刘耀彬. 中国城市化与生态环境耦合规律与实证分析[J]. *生态经济*, 2007(10): 122-126.
- LIU Yao-bin. Analysis of Coupling Rule Between Urbanization and Eco-environment and Positive Test of China[J]. *Ecological Environment*, 2007(10): 122-126.
- [9] 方创琳, 周成虎, 顾朝林, 等. 特大城市群地区城镇化与生态环境交互耦合效应解析的理论框架及技术路径[J]. *地理学报*, 2016, 71(4): 531-550.
- FANG Chuang-lin, ZHOU Cheng-hu, GU Chao-lin, et al. Theoretical Analysis of Interactive Coupled Effects Between Urbanization and Eco-environment in Mega-urban Agglomerations[J]. *Acta Geographica Sinica*, 2016, 71(4): 531-550.
- [10] 方创琳, 崔学刚, 梁龙武. 城镇化与生态环境耦合圈理论及耦合器调控[J]. *地理学报*, 2019, 74(12): 2529-2546.
- FANG Chuang-lin, CUI Xue-gang, LIANG Long-wu. Theoretical Analysis of Urbanization and Eco-environment Coupling Coil and Coupler Control[J]. *Acta Geographica Sinica*, 2019, 74(12): 2529-2546.
- [11] 刘海猛, 方创琳, 李咏红. 城镇化与生态环境“耦合魔方”的基本概念及框架[J]. *地理学报*, 2019, 74(8): 1489-1507.
- LIU Hai-meng, FANG Chuang-lin, LI Yong-hong. The Coupled Human and Natural Cube: A Conceptual Framework for Analyzing Urbanization and Eco-environment Interactions [J]. *Acta Geographica Sinica*, 2019, 74(8): 1489-1507.
- [12] KIM D S, MIZUNO K, KOBAYASHI S. Analysis of Urbanization Characteristics Causing Farmland Loss in a Rapid Growth Area Using GIS and RS[J]. *Paddy and Water Environment*, 2003, 1(4): 189-199.
- [13] FANG C L. Important Progress and Future Direction of Studies on China's Urban Agglomerations [J]. *Journal of Geographical Sciences*, 2015, 25(8): 1003-1024.
- [14] 刘耀彬, 宋学锋. 城市化与生态环境的耦合度及其预测模型研究[J]. *中国矿业大学学报*, 2005, 34(1): 91-96.
- LIU Yao-bin, SONG Xue-feng. Coupling Degree Model and Its Forecasting Model of Urbanization and Ecological Environment[J]. *Journal of China University of Mining and Technology*, 2005, 34(1): 91-96.
- [15] 乔标, 方创琳. 城市化与生态环境协调发展的动态耦合模型及其在干旱区的应用[J]. *生态学报*, 2005, 25(11): 3003-3009.
- QIAO Biao, FANG Chuang-lin. The Dynamic Coupling Model of the Harmonious Development Between Urbanization and Eco-environment and Its Application in Arid Area[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2005, 25(11): 3003-3009.
- [16] 陈晓红, 吴广斌, 万鲁河. 基于BP的城市化与生态环境耦合脆弱性与协调性动态模拟研究: 以黑龙江省东部煤电化基地为例[J]. *地理科学*, 2014, 34(11): 1337-1343.
- CHEN Xiao-hong, WU Guang-bin, WAN Lu-he. Dynamic Simulation of Vulnerability and Coordination of the Coupling of Urban and Ecological Environment Based on BP: A Case of the Coal-electricity Base in the Eastern Heilongjiang Province[J]. *Scientia Geographica Sinica*, 2014, 34(11): 1337-1343.
- [17] 邓宗兵, 宗树伟, 苏聪文, 等. 长江经济带生态文明建设与新型城镇化耦合协调发展及动力因素研究[J]. *经济地理*, 2019, 39(10): 78-86.
- DENG Zong-bing, ZONG Shu-wei, SU Cong-wen, et al. Research on Coupling Coordination Development Between Ecological Civilization Construction and New Urbanization and Its Driving Forces in the Yangtze River Economic Zone[J]. *Economic Geography*, 2019, 39(10): 78-86.
- [18] 赵建吉, 刘岩, 朱亚坤, 等. 黄河流域新型城镇化与

- 生态环境耦合的时空格局及影响因素[J]. 资源科学, 2020, 42(1): 159-171.
- ZHAO Jian-ji, LIU Yan, ZHU Ya-kun, et al. Spatio-temporal Differentiation and Influencing Factors of the Coupling and Coordinated Development of New Urbanization and Ecological Environment in the Yellow River Basin[J]. Resources Science, 2020, 42(1): 159-171.
- [19] 王秀明, 张勇, 奚蓉, 等. 广东省城镇化与生态环境耦合协调的空间特征及影响因素研究[J]. 中国环境管理, 2019, 11(3): 100-106.
- WANG Xiu-ming, ZHANG Yong, XI Rong, et al. Spatial Characteristics and Driving Factors of the Coupling Coordination Between Urbanization and Ecological Environment in Guangdong Province[J]. Chinese Journal of Environmental Management, 2019, 11(3): 100-106.
- [20] 黄河东. 中国城市群城市化与生态环境协调发展比较研究[J]. 生态经济, 2016, 32(4): 45-48.
- HUANG He-dong. Comparative Study on the Coordinated Development of Urbanization and Eco-environment of China's Urban Agglomeration[J]. Ecological Economy, 2016, 32(4): 45-48.
- [21] 梁龙武, 王振波, 方创琳, 等. 京津冀城市群城市化与生态环境时空分异及协同发展格局[J]. 生态学报, 2019, 39(4): 1212-1225.
- LIANG Long-wu, WANG Zhen-bo, FANG Chuang-lin, et al. Spatiotemporal Differentiation and Coordinated Development Pattern of Urbanization and the Ecological Environment of the Beijing-Tianjin-Hebei Urban Agglomeration[J]. Acta Ecologica Sinica, 2019, 39(4): 1212-1225.
- [22] 崔木花. 中原城市群9市城镇化与生态环境耦合协调关系[J]. 经济地理, 2015, 35(7): 72-78.
- CUI Mu-hua. The Relationship of Coupling Coordination Between Urbanization and Ecological Environment: A Case of Urban Cluster in the Central Plain[J]. Economic Geography, 2015, 35(7): 72-78.
- [23] 马艳. 长江经济带城镇化与生态环境耦合协调效应测度与交互胁迫关系验证[J]. 长江流域资源与环境, 2020, 29(2): 275-286.
- MA Yan. Examining the Coupling Degree and Interactive Stress Between Urbanization and Eco-environment in Yangtze River Economic Belt[J]. Resources and Environment in the Yangtze Basin, 2020, 29(2): 275-286.
- [24] 高红贵, 罗颖. 长江经济带城镇化与生态环境质量耦合测度[J]. 统计与决策, 2021, 37(1): 111-115.
- GAO Hong-gui, LUO Ying. Coupling Measurement of Urbanization and Eco-environmental Quality in the Yangtze River Economic Belt[J]. Statistics and Decision, 2021, 37(1): 111-115.
- [25] 宋学锋, 刘耀彬. 基于SD的江苏省城市化与生态环境耦合发展情景分析[J]. 系统工程理论与实践, 2006(3): 124-130.
- SONG Xue-feng, LIU Yao-bin. Scenarios Simulation of Urbanization and Ecological Environment Coupling in Jiangsu Province by System Dynamic Model[J]. Systems Engineering—Theory & Practice, 2006(3): 124-130.
- [26] 冯雨雪, 李广东. 青藏高原城镇化与生态环境交互影响关系分析[J]. 地理学报, 2020, 75(7): 1386-1405.
- FENG Yu-xue, LI Guang-dong. Interaction Between Urbanization and Eco-environment in Tibetan Plateau[J]. Acta Geographica Sinica, 2020, 75(7): 1386-1405.
- [27] 蔡文静, 夏咏, 赵向豪. 西北5省区“生态环境-经济发展-城镇化”耦合协调发展及预测分析[J]. 中国农业资源与区划, 2020, 41(12): 219-227.
- CAI Wen-jing, XIA Yong, ZHAO Xiang-hao. Analysis of Coupled Coordinated Development and Forecast of “Ecological Environment-economic Development-urbanization” in Five Provinces of Northwest China[J]. Chinese Journal of Agricultural Resources and Regional Planning, 2020, 41(12): 219-227.
- [28] 任祁荣, 于恩逸. 甘肃省生态环境与社会经济系统协调发展的耦合分析[J]. 生态学报, 2021, 41(8): 2944-2953.
- REN Qi-rong, YU En-yi. Coupling Analysis on Coordinated Development of Ecological Environment and Social Economic System in Gansu Province[J]. Acta Ecologica Sinica, 2021, 41(8): 2944-2953.
- [29] 张逸飞, 付玉慧. 基于ARIMA-BP神经网络的船舶交通事故预测[J]. 上海海事大学学报, 2020, 41(3): 47-52.
- ZHANG Yi-fei, FU Yu-hui. Prediction of Ship Traffic Accidents Based on ARIMA-BP Neural Network[J]. Journal of Shanghai Maritime University, 2020, 41(3): 47-52.
- [30] 李晓萍, 王淑芹, 周清. 船舶工业与物流业耦合协调度评价及预测研究[J]. 数学的实践与认识, 2020, 50(11): 19-27.
- LI Xiao-ping, WANG Shu-qin, ZHOU Qing. Coordination Degree Evaluation and Prediction of Ship Building Industry and Logistics Industry[J]. Mathematics in Practice and Theory, 2020, 50(11): 19-27.