

海南省用水效率测算及可达性分析

石晓晓^{1,2}, 秦长海², 汪妮¹, 赵勇², 何国华²

(1. 西安理工大学西北旱区生态水利工程国家重点实验室, 陕西 西安 710048;

2. 中国水利水电科学研究院流域水循环模拟与调控国家重点实验室, 北京 100038)

摘要: 针对最严格水资源管理以及水资源消耗总量和强度双控行动提出的效率指标要求, 测算海南省预期万元 GDP 用水量和万元工业增加值用水量, 评估用水指标的可达性。阐释了用水效率的影响因素, 综合应用时间序列法和灰色等维动态递补模型, 对 2020 年和 2025 年用水指标进行预测, 并将现状年指标与国内外先进水平进行对比分析。结果预估 2020 年全省万元 GDP 用水量、万元工业增加值用水量分别较现状年下降 27.7%、36.2%, 能够达到国家要求的控制目标。这一结果为落实水资源消耗总量和强度双控行动提供技术支撑, 对于海南省水资源优化配置具有参考价值。

关键词: 万元 GDP 用水量; 万元工业增加值用水量; 时间序列法; 灰色等维动态递补模型

中图分类号: TV213.4

文献标识码: A

文章编号: 1003-9511(2018)06-0026-05

1 研究背景

作为我国唯一的热带岛屿, 海南省生态环境一流, 自然资源丰富, 是目前我国最大的经济特区、21 世纪海上丝绸之路的排头兵和主力军。受干湿季风和地形条件影响, 省内降雨量充沛, 但具有时空分配不均的特点^[1], 在时间上降雨量主要集中在 7—10 月, 空间上降雨量总的变化趋势是由中部山区向四周沿海递减, 呈现东南高西北低的特征。河川径流洪枯悬殊, 丰水期暴雨集中, 难于调蓄, 枯水期干旱严重, 基流量小。

2016 年水利部、国家发展和改革委员会联合印发《“十三五”水资源消耗总量和强度双控行动方案》的通知, 实施水资源消耗总量和强度双控行动, 全面节约和高效利用水资源, 破解我国水资源短缺瓶颈, 确保水资源可持续利用^[2]。要顺利实施该项行动, 需突出抓好八项重点任务, 第一项就是要健全完善双控指标体系。用水效率指标是双控指标的重要内容。

用水效率能够综合地反映出个国家或地区的

经济发展阶段、产业结构、用水设施与装备情况、水资源条件、水资源管理水平等状况^[3]。对海南省用水效率进行测算, 评估其在全国的水平及与发达国家用水效率的差异, 分析指标的可达性, 一方面可为落实水资源消耗总量和强度双控行动提供技术支撑, 另一方面测算结果可为提高用水效率、改革水资源管理体制提供参考。

目前万元 GDP 用水量和万元工业增加值用水量指标已经纳入《中国统计年鉴》年度发布指标中, 《“十三五”水资源消耗总量和强度双控行动方案》也明确将这两项指标作为评价用水效率的核心指标, 明确要求: 海南省 2020 年万元 GDP 用水量和万元工业增加值用水量较 2015 年下降 25%。万元 GDP 用水量是一项综合的用水效率指标, 可以反映海南省全省总体用水效率情况; 万元工业增加值用水量是重要行业用水效率指标, 可以反映海南省工业领域用水效率状况。本文的目标是分析《“十三五”水资源消耗总量和强度双控行动方案》中相关指标的可达性, 故重点选择万元 GDP 用水量和万元工业增加值用水量进行分析。

基金项目: 国家重点研发计划京津冀项目(2016YFC0401407); 国家自然科学基金项目(71573274); 中央分成水资源费项目(126301001000180014)

作者简介: 石晓晓(1993—), 女, 硕士研究生, 主要从事水资源价值问题的研究。Email: 1298983498@qq.com

通信作者: 秦长海(1976—), 男, 教授级高级工程师, 博士, 主要从事水资源经济与管理、区域节水潜力评估等研究。Email: qinchh@iwhr.com

2 数据来源与研究方法

2.1 数据来源

为掌握海南省的用水效率实际状况及未来发展趋势,搜集了海南省 1997—2016 年人口、地区生产总值、供用水量、耗水量等数据。基准年为 2016 年,预测水平年分别为 2020 年和 2025 年。

2.2 用水效率影响因素分析

用水效率是指在一定的投入和技术条件下,单位水资源所带来的效益^[4]。影响用水效率的因素很多,由于自然状况和社会经济发展水平的不同,不同的研究区域和发展阶段其主导影响因素可能不完全一致^[5]。目前关于用水效率的研究主要集中于农业^[6-8]或工业^[9-11]单个行业。王学渊等^[12]基于经济学视角对中国农业用水效率进行评价,指出各地区的农业生产布局是影响用水效率的显著变量,农田水利设施、其他投入要素的价格以及农村居民人均收入等经济变量也是影响用水效率的重要因素。赵姜等^[13]采用面板 Tobit 模型检验了自然条件、水利设施、农业生产状况和社会经济条件等因素对京津冀地区农业全要素用水效率的影响。洪昌红等^[14]认为广东省各地市的工业用水效率主要取决于地区的工业结构及规模。姜蓓蕾^[15]采用主成分分析法对全国工业用水效率驱动因素进行筛选分析,指出水资源条件和高耗水行业比例对工业用水效率的提高呈现负向作用,工业科技投入和技术进步对提高用水效率有正向作用。

在综合用水效率影响因素方面,基于已有的研究成果^[16-18],用水效率主要受自然因素、经济因素、产业结构、用水状况和社会因素的影响。定量研究表明人均 GDP、城镇化率、第三产业比重、水价与用水效率呈正相关,而人均水资源量、人均生活用水量与其呈负相关。经济的发展促进技术的进步、设备的改进,进而提高工业水资源重复利用率、改变农业用水的灌溉方式,并改善城市供水管网老化问题,且节水工作也贯穿于其中,从而提高了地区的用水效率;城镇化率越高,受教育机会越多,即人口文化素质越高,节水意识越强,也就提高了水资源的利用率;与其他产业相比,第三产业耗水少;人均水资源量、人均生活用水量越多,公民的节水意识越弱,用水浪费越严重,进而导致用水效率低下。

近年来,海南省人均 GDP、水价以及产业结构、居民用水水平等指标均未发生较大幅度的改变,基本呈现稳定的发展。对海南省用水效率指标的预测已将所有影响因素隐含在时间序列中,直接的、间接的、已知的、未知的、明显的、隐含的因素已或多或少

反映在起伏波动的数据里。

2.3 研究方法

指标预测常用的方法主要有直观预测法、时间序列预测法和模型模拟预测法三大类,本文采用时间序列预测法和模型模拟预测法。因为直观预测法预测效果的客观性较差,而且适用的是缺乏资料的情况下,相比之下时间序列预测法能够直观反映指标序列变化状况;模型模拟预测法选用的是灰色等维递补模型^[19],对指标进行动态预测时优先重视现实信息。

2.3.1 时间序列预测法

时间序列预测法也称阶段序列分析法,是指对过去历年的用水数据进行统计分析以寻找其随时间的变化规律并预测未来用水量的方法。这是以历史时间、序列数据为基础,运用一定的数学方法使其向外延伸,借此预测指标未来发展变化趋势的一种方法^[20]。常用的有加权平均法、平滑指数法等。时间序列预测法是以已有的统计资料为基础来进行预测的,优点是其预测结果人为的主观因素较少,简便易行,费用不大;缺点是其预测结果的可靠性、实用性,由于受历史时间的限制,可能与现状趋势关系不够密切。

2.3.2 灰色等维递补模型

灰色系统理论 GM(1,1) 是邓聚龙教授提出的一种处理动态系统的数学方法,它提供了信息缺少条件下解决系统问题的新途径。把一切随机过程看作是一定范围内变化的、与时间有关的灰色过程。灰色系统理论基于对原始数据进行生成处理,将杂乱无章的序列变为有较强规律性的数据序列,进而寻找系统变动的规律^[21]。

设 $X^{(0)}(k), k = 1, 2, \dots, n$ 为非负离散点序列,其一次累加生成序列为 $X^{(1)}(k), k = 1, 2, \dots, n$ 。其中 $X^{(1)}(k) = \sum_{n=1}^k X^{(0)}(k)$ 。GM(1,1) 的白化微分方程为

$$\frac{dX^{(1)}}{dt} + aX^{(1)} = u \quad (1)$$

式中: a 为待辨识参数,也称发展系数; u 为待辨识内生变量,也称灰作用量。按最小二乘法求解,得到灰色预测的离散时间响应函数:

$$\hat{X}^{(1)}(t+1) = \left[X^{(0)}(1) - \frac{u}{a} \right] e^{-at} + \frac{u}{a} \quad (2)$$

将预测值还原即可得到原始序列的预测值。

$$\hat{X}^{(0)}(t+1) = \hat{X}^{(1)}(t+1) - \hat{X}^{(1)}(t) \quad (3)$$

对于模型的精度检验,常采用的方法有:后验差比值 C 检验和小误差概率 P 检验。

灰色等维递补模型以灰色模型为基础,采用等维递补的方法对指标进行动态预测。其数学原理是:在过去 n 年数据序列中选取 $t(t < n)$ 年数据作为原始数据,建立 GM(1,1) 模型,只预测下一年的数值,并将这个灰数补充在已知数列之后,去掉原来数列的第一个数,仍然构成 t 个元素的数据序列。再重复建立 GM(1,1) 模型,预测出下一个值,依次类推。若需预测年数为 m ,则需建立 m 个预测模型,这 m 个模型就构成了动态预测模型。这种模型及时补充和利用新的信息,提高了灰区间的白化度^[22],并且模型的参数处于不断的动态修正中,进而提高了预测的精度。使用该模型需要历史数据少,但是不太适合于长期预测。

综合比较上述两种方法,时间序列预测法与灰色等维动态递补模型预测法有着本质的区别,时间序列预测法是基于时间序列的统计特征和几何规律来进行预测,是一种历史、静态的预测。灰色等维动态递补模型预测是将原始序列数据做一次累加生成,建立微分方程,并不断补充新的数据,是一种现实、动态的预测。这两种预测方法有一个共同点,都是基于现状数据的趋势展开分析,预测区间有一定范围,短期预测能够客观反映变化情势,长期预测则易产生较大偏差,需要根据前期数据不断修正模型,以得到较为准确的结果。故本文重点分析 2020 年指标可达性,对 2025 年仅进行展望,后期将根据现状结果进一步修正。为了降低偏差,文中将两种方法综合使用,以期得到更加合理、精确的结果。

3 结果与分析

3.1 指标预测分析

3.1.1 时间序列模型

根据 1997—2016 年系列数据,进行万元 GDP 用水量和万元工业增加值用水量的趋势拟合。通过

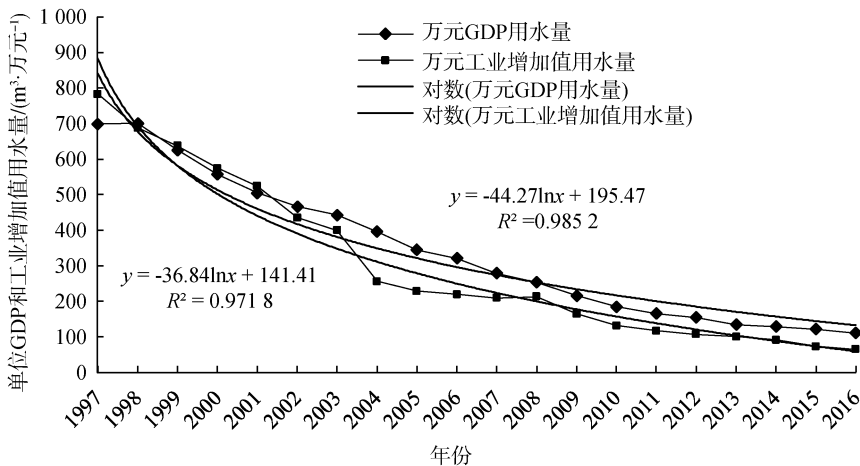


图1 海南产业用水量拟合关系

对构建的各类模型进行趋势及相关性分析,发现对数函数更符合万元 GDP 用水量和万元工业增加值用水量的变化趋势,模型相关关系达到了 0.96 以上,模型拟合关系见图 1。

$$W_{pGDP_t} = -44.27 \ln t + 195.47$$

$$R^2 = 0.9852 \quad (4)$$

$$W_{pVS_t} = -36.84 \ln t + 141.41$$

$$R^2 = 0.9718 \quad (5)$$

式中: W_{pGDP_t} 为预测水平年万元 GDP 用水量, m^3 /万元; W_{pVS_t} 为预测水平年万元工业增加值用水量, m^3 /万元; t 为预测水平年年值。

模型相关系数较高,说明拟合曲线符合海南省产业用水量变化趋势。并且利用现状年数据对确定的模型进行检验,结果表明,模型模拟值和实际值误差均在 5% 以内,可作为预测工具进行预测。

3.1.2 灰色等维递补模型

为了提高模型的预测精度,依据原始数据序列的变化趋势,建立不同维数的预测模型进行优选。最终提取 2011—2015 年万元 GDP 用水量、2012—2015 年万元工业增加值用水量数据,分别建立 5 维、4 维动态递补 GM(1,1) 模型,通过 MATLAB 编程对用水效率指标进行预测。根据数据模型预测精度等级的划分,预测精度等级为“好”,满足建模精度等级的要求。现状年模型预测结果见表 1。

表1 现状年用水效率指标预测结果

年份	万元 GDP 用水量			万元工业增加值用水量		
	实际值/ ($m^3 \cdot$ 万元 $^{-1}$)	预测值/ ($m^3 \cdot$ 万元 $^{-1}$)	相对误差/ %	实际值/ ($m^3 \cdot$ 万元 $^{-1}$)	预测值/ ($m^3 \cdot$ 万元 $^{-1}$)	相对误差/ %
2011	165.8	165.8				
2012	154.9	151.3	2.35	107.2	107.2	
2013	134.2	139.8	4.16	100.6	102.0	1.35
2014	129.0	129.2	0.14	91.1	87.4	4.06
2015	121.8	119.4	1.99	72.9	74.9	2.74
2016	111.2	110.3	0.79	65.5	64.2	1.94

时间序列预测法和灰色等维递补模型预测法本身都有优缺点,但每种方法都对用水效率指标做出了正确的预测。为了消除预测所产生的误差,取两种方法预测结果的平均值作为预测真值,对2020年、2025年用水效率指标进行预测,如表2所示。

表2 水平年用水效率指标预测结果

方法	万元 GDP 用水量 ($\text{m}^3 \cdot \text{万元}^{-1}$)			万元工业增加值用水量 ($\text{m}^3 \cdot \text{万元}^{-1}$)		
	2016年	2020年	2025年	2016年	2020年	2025年
时间序列 预测法	109.3	91.0	75.6	69.7	54.8	44.2
灰色等维 递补模型	110.3	85.3	59.8	68.6	38.2	19.5
均值	109.8	88.2	67.7	69.2	46.5	31.9

3.2 指标合理性分析

3.2.1 与国内外用水效率比较

通过相关计算,海南省2016年万元GDP用水量为 $111 \text{ m}^3/\text{万元}$,比全国平均水平($81 \text{ m}^3/\text{万元}$)高37%。万元工业增加值用水量为 $65.5 \text{ m}^3/\text{万元}$,高于全国 $52.8 \text{ m}^3/\text{万元}$ 的平均水平,说明海南省用水效率在国内处于中等偏下水平。另外从全国范围来看,海南省万元工业增加值用水量要高于北方所有省区,但在南方省区中属于相对较高的水平,主要是因为海南省经济发展以旅游业为主,第三产业在产业结构中占有较大比例。

与国外先进水平相比,海南省万美元GDP用水效率、工业用水效率尚与之存在较大差距。日本、英国、韩国、瑞士等国家万美元工业增加值用水量均在 100 m^3 以下,不足海南省的25%。从节水角度考虑,海南省用水效率仍有较大的提升空间。

3.2.2 水平年预测值与考核指标对比

依据经济社会发展预估和考核相关规定,2020年海南省人口为1006.5万人,GDP为5624.3亿元,全省用水总量控制目标为50.3亿 m^3 。根据这3个指标,计算规划水平年2020年万元GDP用水量为 $89.4 \text{ m}^3/\text{万元}$ 。与模型模拟值 $88.2 \text{ m}^3/\text{万元}$ 相比,基本一致。

3.2.3 规划年指标与考核指标比较

根据水利部、国家发展和改革委员会关于印发《“十三五”水资源消耗总量和强度双控行动方案》的通知,到2020年,海南省万元GDP用水量和万元工业增加值用水量需要比2015年分别下降25%。经过模型分析,在海南省产业结构调整及节水有效实施的前提下,2020年万元GDP用水量和万元工业增加值用水量将分别比2015年下降27.7%和36.2%,能够达到国家要求的25%控制目标。

根据模型预测结果,2025年万元GDP用水量

和万元工业增加值用水量将分别比2020年下降23.2%和31.5%。一般来讲,随着节水工作的深入,行业节水潜力将逐步减小,很难保持较高的下降率,所以对2025年用水指标仅做探讨,未来需要根据实际数据适时修正。

3.3 分区用水效率可达性分析

以现状年2015年用水指标为基础,本着协同节水、全面推进的原则,根据模型模拟全省预测结果,预测各分区2020年、2025年万元GDP用水量和万元工业增加值用水量指标,见表3。

表3 各分区水平年用水效率指标预测结果

用水效率 指标	万元 GDP 用水量/ ($\text{m}^3 \cdot \text{万元}^{-1}$)			万元工业增加值用水量 ($\text{m}^3 \cdot \text{万元}^{-1}$)		
	2015年	2020年	2025年	2015年	2020年	2025年
海口	57.9	41.9	32.2	59.6	38.0	26.0
三亚	67.6	48.9	37.5	63.4	40.5	27.7
五指山	228.7	165.4	127.0	58.3	37.2	25.5
文昌	141.2	102.1	78.4	106.9	68.2	46.7
琼海	121.8	88.1	67.7	58.4	37.2	25.5
万宁	126.4	91.4	70.2	150.9	96.2	65.9
定安	213.1	154.1	118.3	183.0	116.7	80.0
屯昌	192.8	139.4	107.1	113.1	72.2	49.4
澄迈	125.5	90.7	69.7	64.7	41.3	28.3
临高	234.1	169.3	130.0	472.4	301.4	206.5
儋州	129.3	93.5	71.8	56.0	35.7	24.5
东方	253.7	183.4	140.9	49.7	31.7	21.7
乐东	377.9	273.2	209.9	91.2	58.2	39.9
琼中	229.4	165.8	127.4	47.1	30.1	20.6
保亭	202.9	146.7	112.7	117.1	74.7	51.2
陵水	158.7	114.7	88.1	75.0	47.9	32.8
白沙	218.5	157.9	121.3	190.2	121.4	83.1
昌江	214.5	155.1	119.1	93.5	59.7	40.9
全省	121.8	88.1	67.6	72.9	46.5	31.9

从表3数据可以看出:各分区万元GDP用水量、万元工业增加值用水量均呈下降趋势。海口市和三亚市主要是以旅游业为龙头产业,人均GDP高,且第三产业相对其他产业耗水少,致使万元GDP用水量、万元工业增加值用水量相对来说明显低于省内其他分区。万元GDP用水量最多的是乐东县,其次是东方市和临高县,这3个分区经济发展主要以第一产业为主,且比值比较大。农业是用水大户,单位产出用水量远高于其他行业。2020年各分区的万元GDP用水量较现状年下降27.7%,2025年较2020年下降23.2%,下降速度呈放缓趋势。万元工业增加值用水量最高的是临高县,最少的是琼中县,极值比接近10.0,可见各市县的万元工业增加值用水量差距比较悬殊,主要是受工业门类 and 节水水平影响。临高县现状工业结构包含建材、机械、能源、制造业等支柱产业,节水潜力很大;2020年各分区的万元工业增加值用水量较现状年下降

36.2%,2025年较2020年下降31.5%。在最严格水资源管理约束下,各分区的万元GDP用水量和万元工业增加值用水量可以达到水利部要求的控制指标。

4 结论及建议

综合利用时间序列预测法和灰色等维递补模型两种方法,对海南省用水效率进行测算,预估2020年万元GDP用水量、万元工业增加值用水量分别为 $88.2\text{ m}^3/\text{万元}$ 、 $66.7\text{ m}^3/\text{万元}$,2025年预测值为 $46.5\text{ m}^3/\text{万元}$ 、 $31.9\text{ m}^3/\text{万元}$ 。用水效率逐年增加,但从全国范围来看,海南省用水效率处于中等居下水平,与国外先进水平相比仍存在较大差异。从节水角度考虑,用水效率有较大的提升空间。结合水利部、国家发展和改革委员会的《“十三五”水资源消耗总量和强度双控方案》对用水效率可达性进行了分析,认为在海南省产业结构调整以及节水措施有效实施的前提下,2020年万元GDP用水量、万元工业增加值用水量分别较现状年下降27.7%和36.2%,能够达到国家要求的25%控制目标。

农业产业结构比重较大是导致分区用水效率较低的主要原因,要逐步提高地区用水效率,需积极引导产业结构调整,优化产业结构布局。总的来说,分析结果为未来海南省水系统的运行和可持续利用提供参考依据,并为海南省经济的发展和水资源优化配置提供强有力的技术支撑。

参考文献:

[1] 周祖光. 海南省水资源现状与开发利用[J]. 水利经济, 2004, 22(4): 35-38.

[2] 张祥云, 陈晓宏, 颜毓南. 海南省“十三五”水资源消耗总量和强度双控行动方案浅析[J]. 水利发展研究, 2017(8): 25-30.

[3] 王浩, 马滇珍, 张象明, 等. 我国的用水效率与节水潜力[J]. 水利规划, 1998(增刊1): 37-45.

[4] 杜焱强, 苏时鹏, 王育平, 等. 基于DEA-Tobit模型的福建用水效率及影响因素分析[J]. 资源开发与市场, 2015(1): 44-48.

[5] 鲍超, 陈小杰, 梁广林. 基于空间计量模型的河南省用水效率影响因素分析[J]. 自然资源学报, 2016(7):

1138-1148.

[6] 唐建军. 陕西省灌溉用水技术效率及其影响因素研究[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2010.

[7] 耿献辉, 张晓恒, 宋玉兰. 农业灌溉用水效率及其影响因素实证分析: 基于随机前沿生产函数和新疆棉农调研数据[J]. 自然资源学报, 2014(6): 934-943.

[8] 佟金萍, 马剑锋, 王慧敏, 等. 中国农业全要素用水效率及其影响因素分析[J]. 经济问题, 2014(6): 101-106.

[9] 沈杰. 江苏省万元工业增加值用水量影响因素研究[D]. 扬州: 扬州大学, 2014.

[10] 李俊. 河南省工业用水总量的驱动分析与工业用水效率影响因素的研究[D]. 开封: 河南大学, 2015.

[11] 黄丽萍. 中国工业用水效率的动态演进及驱动因素研究[D]. 广州: 华南理工大学, 2016.

[12] 王学渊, 赵连阁. 中国农业用水效率及影响因素: 基于1997—2006年省区面板数据的SFA分析[J]. 农业经济问题, 2008(3): 10-18.

[13] 赵姜, 孟鹤, 龚晶. 京津冀地区农业全要素用水效率及影响因素分析[J]. 中国农业大学学报, 2017(3): 76-84.

[14] 洪昌红, 黄本胜, 邱静, 等. 广东省工业用水效率影响因素分析[J]. 广东水利水电, 2011(8): 27-29.

[15] 姜蓓蕾, 耿雷华, 卞锦宇, 等. 中国工业用水效率水平驱动因素分析及区划研究[J]. 资源科学, 2014(11): 2231-2239.

[16] 孙才志, 王妍, 李红新. 辽宁省用水效率影响因素分析[J]. 水利经济, 2009, 27(2): 1-5.

[17] 刘庆生. 浙江省水资源利用效率研究[J]. 水利经济, 2010, 28(2): 28-30.

[18] 潘登, 黄薇, 王树鹏, 等. 基于DEA模型的用水效率研究: 以云南省为例[J]. 长江科学院院报, 2011(12): 15-18.

[19] 郝永红, 王学萌. 灰色动态模型及其在人口预测中的应用[J]. 数学的实践与认识, 2002(5): 813-820.

[20] 刘开宁. 浅论水利工程建设成本预测与控制[J]. 江苏水利, 2006(7): 18-20.

[21] 邓聚龙. 灰色系统理论简介[J]. 内蒙古电力, 1993(3): 51-52.

[22] 汪妮, 孙博, 张刚. 改进的灰色模型在城市工业需水量预测中的应用[J]. 西北大学学报(自然科学版), 2009, 39(2): 313-316.

(收稿日期: 2018-06-27 编辑: 胡新宇)

(上接第25页)

[13] 姜晓丽, 张平宇. 基于 Huff 模型的辽宁沿海港口腹地演变分析[J]. 地理科学, 2013, 33(3): 282-290.

[14] 董晓菲, 韩增林. 东北沿海港口群腹地空间格局及驱动机理[J]. 经济地理, 2016, 36(5): 33-39.

[15] 李振福, 汤晓雯. 大渤海圈港口腹地演变的腹地烟羽模

型研究[J]. 经济地理, 2016, 35(6): 116-123.

[16] 叶雷, 焦华富, 曹贤忠. 港口能级与城市经济协调发展评价及对策研究: 以安徽省沿江5市为例[J]. 世界地理研究, 2018, 27(2): 76-84.

(收稿日期: 2018-10-15 编辑: 陈玉国)