

DOI: 10.19797/j.cnki.1000-0852.20210110

海南岛水资源承载力分析及预测

杨波¹, 王文¹, 秦大军^{1,2}, 任丙南¹, 耿静¹, 杨秀敏¹

(1. 三亚学院翟明国院士工作站, 海南 三亚 572022; 2. 中国科学院地质与地球物理研究所, 北京 100029)

摘要:根据近21年来海南水资源可利用量大小,采用适线法估算不同保证率下可用于产业发展的水资源可利用量,同时,通过建立的万元GDP综合用水量与GDP的定量关系对海南万元GDP综合用水量进行预测;最后,通过可用于产业发展的水资源量与万元GDP综合用水量的比值表达和预测海南水资源可承载的经济规模,采用水资源可承载的经济规模与人均GDP的比值表达海南水资源可承载的人口,从而实现海南水资源承载力的表达和预测。结果表明,在保证率为95%、90%、75%和50%条件下,用于海南全岛产业发展的水资源量分别为59.28亿m³、69.57亿m³、88.86亿m³和113.56亿m³,万元GDP综合用水量与GDP定量关系可用幂函数来表达。在同一保证率下,海南岛可承载经济规模随时间呈现明显上升趋势,但可承载人口规模基本维持平稳。从全年和全岛的平均尺度来看,研究期限内个别年份接近临界承载状态,其他年份均处于可载状态。

关键词:水资源承载力;水资源可利用量;万元GDP综合用水量;经济规模;海南岛

中图分类号:TV213

文献标识码:A

文章编号:1000-0852(2022)03-0078-06

0 引言

水资源承载力^[1]是一项综合指标,其与水资源、社会经济和生态环境等多个系统要素紧密联系。通过建立综合的指标体系和评价模型进行水资源承载力的评价,结果主要以承载力赋分来表达水资源承载状态,主要分析方法有层次分析法、主成分分析法、多目标分析法、投影寻踪法和模糊评价法等^[2-7],主要应用模型有系统动力学模型、压力-状态-响应(PSR)及其扩展模型、TOPSIS模型等^[7-9],上述方法和模型考虑了水资源承载力的众多影响因素,研究结果可用于优化区域水资源配置、多种水资源统筹调配等领域,但也存在指标选择难以统一和指标权重赋值不一的问题,评价模型赋分也不能直接反映水资源能承载的最大经济规模或人口规模。

王建华等^[1]基于水量水质和地表水资源可利用量角度,构建了以经济和人口规模为指标的水资源

承载力计算模型,金菊良等^[10]建立了不同承载标准下以经济和人口规模为指标的区域水资源承载力评价模型,上述研究的评价体系和结果能比较直接的表达区域水资源对社会经济和人口的最大支撑规模。但水资源可利用量、社会经济产业结构和发展水平都不是一个静态的量,用上述方法进行水资源承载力研究时,水资源可利用量的年际变化以及社会经济发展趋势对水资源承载力的影响需要进一步的研究,同时在区域水资源承载力的预测方面也需要进一步的探索。

本文基于海南产业发展的水资源可利用量、社会经济产业结构和各产业用水定额的年际变化,从水资源可利用量、万元GDP综合用水量、社会经济发展与水资源承载力之间的相互关系角度,对海南水资源承载力进行了分析和预测,期望对水资源承载力的分析和预测方法提供参考,同时为海南水资源合理配置和安全调控措施提供依据。

收稿日期:2021-03-09

网络首发时间:2022-06-02

网络首发地址:https://kns.cnki.net/kcms/detail/11.1814.P.20220601.1011.001.html

基金项目:海南省基础与应用基础研究计划(自然科学领域)高层次人才项目(2019RC256)

作者简介:杨波(1981—),男,湖南邵阳人,博士,副教授,主要研究方向为生态环境保护和自然资源保护。E-mail:yangbo810819@163.com

1 水资源承载力分析和预测方法

1.1 研究方法

1.1.1 不同保证率下可用于产业发展的水资源可利用量

估算区域历年来可用于产业发展的水资源可利用量,其值等于区域内水资源可利用量总量减去生活用水和河道外生态需水量。由于水资源可利用量年际变化较大,采用水文频率计算的方法来预测水资源可利用量。

1.1.2 万元GDP综合用水量计算

根据历年各产业(第一、第二和第三产业)实际用水量计算区域内各产业的实际用水定额,再根据历年各产业实际用水定额和GDP占比的乘积之和计算万元GDP综合用水量^[10-11]。

1.1.3 区域GDP、人均GDP及万元GDP综合用水量预测

采用时间序列ARIMA(p, d, q)模型预测区域GDP和人均GDP^[12]。模型中,3个参数 p, d, q 分别表示自回归项数,差分系数,滑动平均项数。根据万元GDP综合用水量和GDP的定量关系,通过GDP的增长变化来预测万元GDP综合用水量的变化。

1.1.4 区域水资源承载力计算及预测

可用于产业发展的水资源量除以万元GDP综合用水量得到区域水资源可承载的经济规模,区域内水资源可承载的经济规模除以人均GDP得到区域水资源可承载的人口^[10-11]。

1.1.5 判别水资源承载状态

实际或预测得到的GDP(或人口)与计算得到的水资源可承载经济规模(或人口规模)进行比较,并将其定义为水资源承载比,根据比值大小进行水资源承载状态的判别。参考2016年水利部颁布的《全国水资源承载能力监测预警技术大纲》相关判别标准,水资源承载比大于1.0表示超载,0.9~1.0表示临界超载,低于0.9表示可载。

1.2 数据来源

数据主要来源于海南省历年水资源公报和统计年鉴、《海南省水资源综合规划》(2010)、《海南省水资源调查评价》(2004)。文中GDP相关数据采用平减指数法(2018=100)进行了可比价折算。

2 结果与分析

2.1 产业发展年水资源可利用量估算

根据海南岛近21年的地表、地下水资源量和《海南省水资源综合规划》中的地表水、地下水资源可利用量所占地表水、地下水资源量的比例,计算出1998~

2018年间的各年水资源可利用总量,再减去每年实际的生活用水量和除河道外生态需水量,得到每年可用于产业发展的水资源可利用量。将其从大到小排序后计算水文频率,利用适线法^[13]作频率曲线,结果如图1所示(图中 E_x 为频率为50%对应的理论水资源可利用量、 C_s 为变差系数, C_v 为偏差系数)。从频率曲线反查可得到,保证率为95%、90%、75%和50%的用于产业发展的水资源量分别为59.28亿 m^3 、69.57亿 m^3 、88.86亿 m^3 和113.53亿 m^3 。

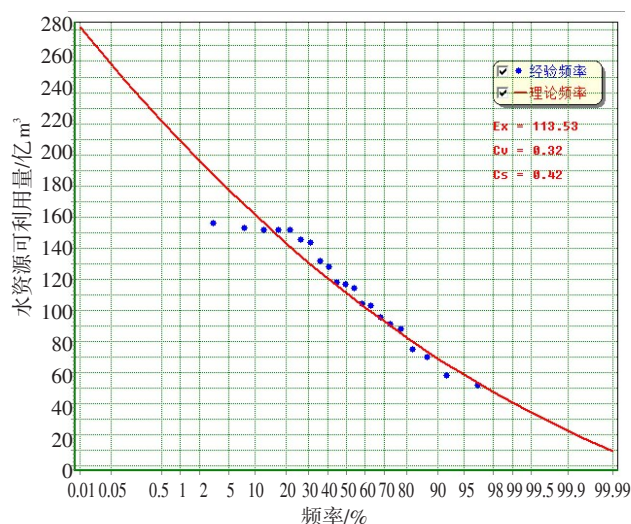


图1 海南岛用于产业发展的水资源可利用量频率曲线

Fig.1 Frequency curve of water availability for industrial development of Hainan Island

2.2 GDP和人均GDP预测

根据海南省统计年鉴,选取GDP和人均GDP(1998—2017年)的时间序列,采用SPSS21.0进行ARIMA建模,分别对海南GDP和人均GDP进行了预测。ARIMA模型构建过程中,3个参数 p, d, q 的确定方法见参考文献[12]。根据自相关和偏自相关分析,海南GDP和人均GDP序列估计的最优模型分别为ARIMA(3,2,2)和ARIMA(3,2,3),拟合结果分别见图2和图3。结果表明实际GDP、人均GDP和拟合曲线吻合度较高。

采用ARIMA(3,2,2)和ARIMA(3,2,3)模型分别对2021—2025年海南GDP和人均GDP进行预测,结果见表1。2018—2020年的预测值与实际值对比结果见表2。结果表明,GDP和人均GDP预测误差较小,预测较准确。

2.3 万元GDP综合用水量计算及预测

根据1.1.2方法计算得到历年海南万元GDP综合用水量,结果如图4所示。结果表明,1998—2019年间,万元GDP综合用水量呈现逐年下降趋势,且降幅

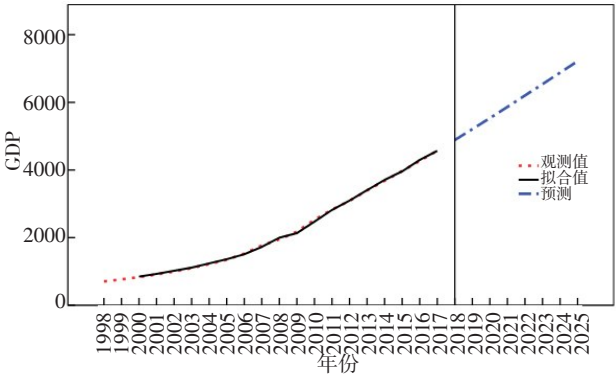


图2 海南GDP总量拟合及预测结果

Fig.2 Fitting and forecasting result of Hainan Province GDP

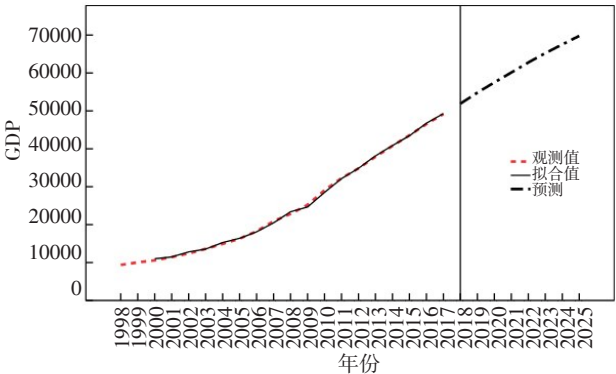


图3 海南人均GDP拟合及预测结果

Fig.3 Fitting and forecasting result of Hainan Province per capita GDP

表1 2021—2025年海南GDP和人均GDP预测值

Table1 Prediction (2021–2025) of GDP and per capita GDP of Hainan Province

年份	2021	2022	2023	2024	2025
GDP/亿元	5814.69	6131.85	6447.60	6763.29	7076.76
人均GDP/元	60129	62775	65235	67544	69773

表2 2018—2020年海南GDP和人均GDP预测值与实际值比较

Table2 Comparison of predictive and actual GDP and per capita GDP in Hainan Province

年份	GDP/亿元			人均GDP/元		
	预测值	实际值	误差	预测值	实际值	误差
2018	4876.19	4832.05	+0.91%	51917	51717	+0.39%
2019	5187.09	5112.31	+1.46%	54824	54906	-0.15%
2020	5498.66	5291.24	+3.92%	57510	-	-

注:截至收稿2020年人口数据未发布,实际人均GDP值数据和误差未做计算。

明显。万元GDP综合用水量的逐年降低与各产业实际用水定额的逐年下降和产业结构优化有关。第一、第二和第三产业实际用水定额分别降低了1171.67、

278.14和17.56 m³·万元⁻¹,降幅分别为78.36%、91.40和66.28%。用水定额较大的第一产业增加值占比从0.36降至0.20,用水定额较小的第二、第三产业增加值占比分别从0.17和0.47增至0.21和0.59。

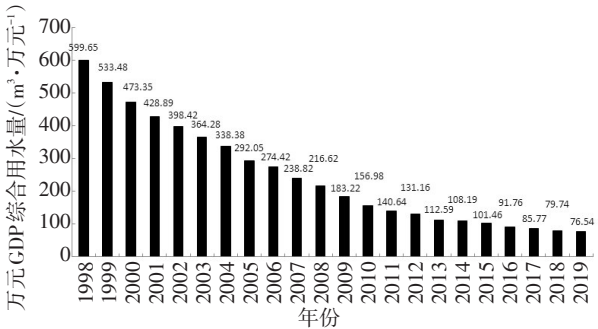


图4 万元GDP综合用水量年际变化

Fig.4 Annual variation comprehensive water consumption per unit GDP

对历年海南万元综合用水量和GDP数据进行曲线拟合,发现二者幂函数拟合结果最优,拟 $y=467620.58 \cdot e^{-1.020x}$, y 为万元GDP综合用水量, x 为GDP。根据上述拟合公式及表1中海南GDP预测结果,对海南万元GDP综合用水量(2020—2025年)进行了预测计算,结果见表3。2017—2019年的预测值与实际值对比结果见表4。2017—2019年预测的误差分别为+0.86%、+1.48%和-0.74%,预测结果较准确。根据表3,海南万元GDP综合用水量将从2019年的76.54m³降至2025年的55.33 m³。

表3 海南万元GDP综合用水量预测

Table3 Forecasting result of Hainan Province comprehensive water consumption per unit GDP

年份	2020	2021	2022	2023	2024	2025
预测值/m ³	71.59	67.62	64.05	60.86	57.96	55.33

表4 2017—2019年万元GDP综合用水量预测值与实际值比较

Table4 Comparison of Hainan Province comprehensive water consumption per unit GDP between predictive and actual value

年份	预测值	实际值	误差
2017	86.51	85.77	+0.86%
2018	80.92	79.74	+1.48%
2019	75.98	76.54	-0.74%

2.4 水资源承载力预测分析

根据2.1中得到的水资源可利用量、2.3中预测得到的海南岛万元GDP综合用水量,以及1.1.4中的方法预测海南岛水资源能承载的经济和人口规模,结果分别如图6和图7所示。结果表明,在水资源可利用量同

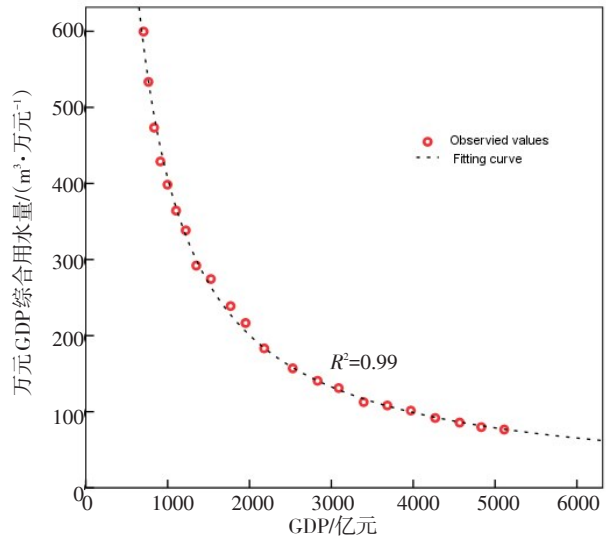


图5 万元GDP综合用水量-GDP相关关系拟合结果

Fig.5 Fitting result of comprehensive water consumption per unit GDP-GDP

一保证率下,可承载经济规模呈现明显上升趋势。在95%保证率下,2025年可承载经济规模预测可达10 712.93亿元,较2020年上升29.37%。可承载人口规模基本维持平稳,预计2025年可承载人口1508.14万人,较2020年仅上升了4.74%。

2.5 水资源承载状态判别

根据1.1.5的方法对海南水资源承载状态进行判别。分别计算了1998—2019年和2020—2025年不同水资源保证率下的水资源承载比(以经济规模计)的变化,结果如图8和图9所示。1998—2019年的水资源承载比呈现出较强的年际变化,其中2004年接近于临界超载状态,原因在于其可用于产业发展的水资源量仅为51.01 m³,较历年均值减少55.06%。2020—2025

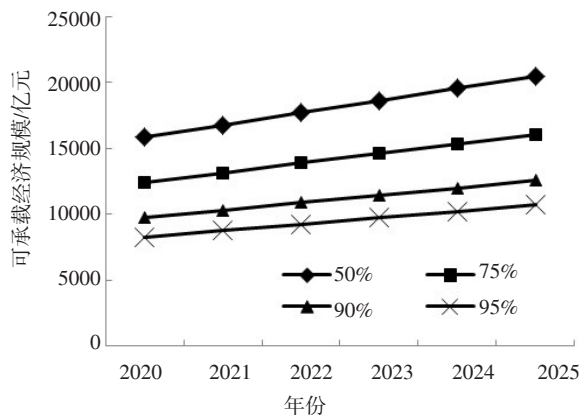


图6 不同保证率下海南水资源可承载经济规模估算

Fig.6 Estimation of bearable economic scale of water resources in Hainan Province under different guarantee rates

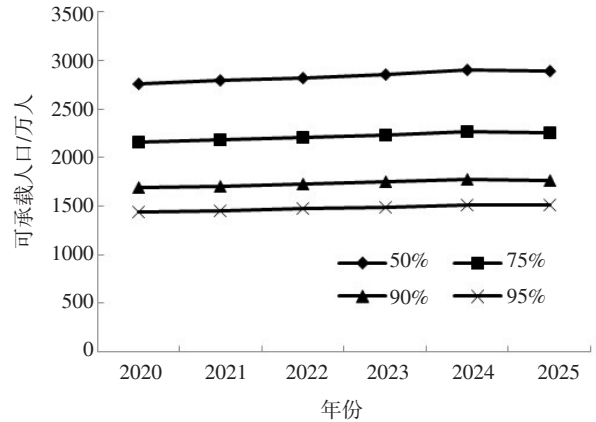


图7 不同保证率下海南水资源可承载人口估算

Fig.7 Estimation of bearable population scale of water resources in Hainan Province under different guarantee rates

年水资源承载比预测结果表明,保证率越高,水资源承载比越高,当保证率为95%时,水资源承载比约为0.67左右。

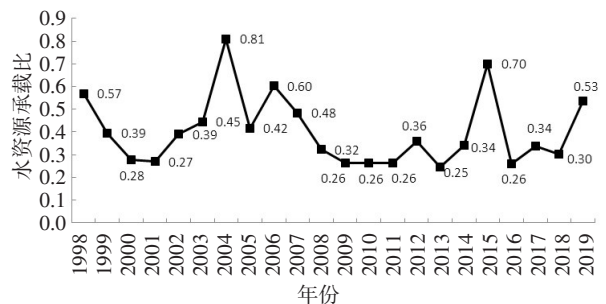


图8 1998—2019年海南水资源承载状态变化

Fig.8 Changes of water resources carrying status in Hainan Province (1998-2019)

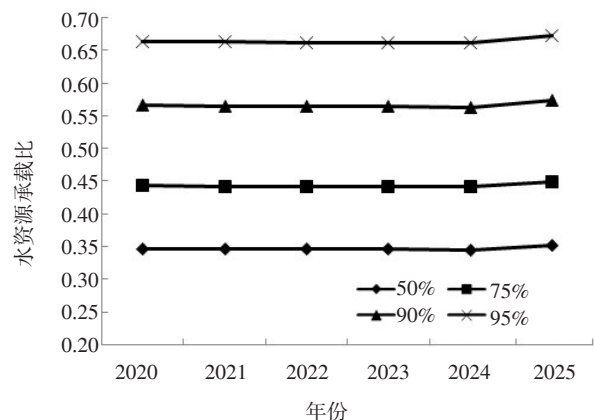


图9 不同保证率下海南水资源承载比预测

Fig.9 Prediction of water resources carrying status in Hainan Province under different guarantee rates

3 讨论

本文采用用于产业发展的水资源可利用量能支撑

的最大经济活动规模或人口规模来表达水资源承载力的大小。通过ARIMA模型预测区域GDP和人均GDP,并通过GDP与万元GDP综合用水量的定量关系实现万元GDP综合用水量的预测,最后,通过可用于产业发展的水资源量与预测得到的万元GDP综合用水量的比值得到可承载经济规模的预测,通过可承载经济规模与人均GDP的比值得到可承载人口的预测,从而实现水资源承载力的预测。

目前对万元GDP综合用水量的预测,常见的方法有趋势分析法、弹性系数法、灰色系统理论模型等^[14-15],上述方法都是基于万元GDP用水量在时间序列上的规律进行预测,从预测结果来看,中远期预测值和实际值偏差较大。万元GDP综合用水量是根据区域产业结构和用水效率推求而来,而经济发展水平与产业结构及其用水效率之间存在密切相关关系,因而万元GDP综合用水量与经济发展水平也密切相关。GDP作为衡量区域社会经济发展水平的核心指标,其与万元GDP综合用水量之间理应也存在一定的对应关系,因此,本文采用历年海南万元GDP综合用水量和GDP进行相关性分析,发现二者符合幂函数关系,拟合结果较优,根据GDP预测数据和拟合的函数关系可进行万元GDP综合用水量的预测。

从本文水资源承载力分析预测中可知,可承载的经济和人口规模随着水资源可利用量保证率的提高而下降,且下降幅度较大,说明未来不确定的水资源量对水资源承载力影响较大。同一保证率下,所承载的经济规模呈现上升趋势,而承载的人口规模却趋于稳定,表明在水资源可利用量不变的情况下,海南水资源可承载的经济规模会随着社会经济发展、产业结构的优化和用水效率的提升而上升,但可承载的人口规模却有一个较稳定的饱和量。金菊良等^[10]在陕西的实证研究中发现,随着产业结构的改变和科技的进步,同一保证率下可承载的经济将呈上升趋势,此结果与本文研究结果相似,但可承载的人口将呈下降趋势,这与本文中的研究结果有一定出入,可能原因在于两省的人口规模、城乡人口结构、社会发展及消费水平差异有关,陕西城镇居民人口规模和占比较海南高,社会发展水平及消费水平也较高,其生活用水需求水平高,从而造成陕西可承载的人口规模呈现下降趋势。

从历史数据来看,海南水资源承载力除2004年处于接近临界超载状态外,其余年份都处于可载范围。至2025年预测结果来看,较高保证率(95%)条件下水资源

承载比低于0.7,说明海南的水资源可利用量对社会经济发展的理论支撑能力较强。但上述研究数据是基于海南全岛和全年的分析结果,可看作是全岛水资源承载力在一年内的平均结果。由于海南岛的水资源空间分布不均和干湿季节明显,海南岛各水资源分区的实际工程利用能力区别也较大,如海南岛东北部和西北部地区水资源可利用总量小而开发利用程度高,势必会表现出海南岛水资源承载力在时空上的不均匀,从而可能出现部分地区或年份水资源承载比较高的情况,从而造成水资源承载力局部局时的过载情况,因此,各水资源分区或各市县的水资源承载状态还需进一步的细化研究,以便对全岛的水资源配置及调控提供更多参考。

4 结论

(1)海南可用于产业发展的水资源量相对较丰富,在保证率为95%、90%、75%和50%条件下,用于产业发展的预估水资源量分别为59.28亿 m^3 、69.57亿 m^3 、88.86亿 m^3 和113.56亿 m^3 。

(2)由于产业结构优化和产业用水效率的提升,海南万元GDP综合用水量呈现逐年下降趋势,且降幅明显。根据预测,2025年海南万元GDP综合用水量将降至55.33 m^3 。

(3)从全年和全岛的平均尺度来看,1998—2019年间除个别年份水资源承载力处于接近临界超载状态外,其余年份均处于可载状态。预测结果表明,海南的水资源可利用量对社会经济发展的理论支撑能力较强,海南岛水资源可承载经济规模呈现明显上升趋势,但可承载人口规模基本维持平稳。

参考文献:

- [1] 王建华,姜大川,肖伟华,等. 水资源承载力理论基础探析:定义内涵与科学问题[J]. 水利学报, 2017, 48(12):1399-1409. (WANG Jianhua, JIANG Dachuan, XIAO Weihua, et al. Study on theoretical analysis of water resources carrying capacity: definition and scientific topics [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2017, 48(12):1399-1409. (in Chinese))
- [2] 贾建辉,龙晓君. 水资源承载力预测模型研究[J]. 水利水电技术, 2018, 49(10):24-30. (JIA Jianhui, LONG Xiaojun. Study on prediction model of water resources carrying capacity[J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 2018, 49(10):21-27. (in Chinese))
- [3] GONG Li, JIN Chunling. Fuzzy comprehensive evaluation for carrying capacity of regional water resources[J]. Water resources management, 2009, 23(12):2505-2513.
- [4] 袁艳梅,沙晓军,刘煜晴,等. 改进的模糊综合评价法在水资源承载力评价中的应用[J]. 水资源保护, 2017(1):56-60. (YUAN

- Yanmei, SHA Xiaojun, LIU Yuqing, et al. Application of improved fuzzy comprehensive evaluation method to water resources carrying capacity evaluation[J]. Water Resources protection, 2017, 33(1):35-38. (in Chinese))
- [5] 苏敏杰, 白棚嘉. 基于最大熵投影寻踪模型的云南省近10a水资源承载力评价[J]. 长江科学院院报, 2018, 35(6):12-18. (SUN Minjie, BAI Yujia. Assessment of water resources carrying capacity by maximum entropy projection pursuit model: case study of Yunnan Province in recent decade[J]. Journal of Yangtze River Scientific Research Institute, 2018, 35(6):12-18. (in Chinese))
- [6] 邢旭光, 史文娟, 张译丹, 等. 基于主成分分析法的西安市地下水水资源承载力评价[J]. 水文, 2013, 33(2):35-38. (XING Xugang, SHI Wenjuan, ZHANG Yidan, et al. Assessment of groundwater resources carrying capacity in Xi'an City based on principal component analysis[J]. Journal of China Hydrology, 2013, 33(2):35-38. (in Chinese))
- [7] LEE C S. Multi-objective game-theory models for conflict analysis in reservoir watershed management[J]. Chemosphere, 2012, 87(6):608-613.
- [8] YANG J, LEI K, KHU S, et al. Assessment of water resources carrying capacity for sustainable development based on a system dynamics model: a case study of Tieling City, China[J]. Water Resources Management, 2015, 29(3):885-899.
- [9] 郭倩, 汪嘉杨, 张碧. 基于DPSIRM框架的区域水资源承载力综合评价[J]. 自然资源学报, 2017, 32(3):484-493. (GUO Qian, WANG Jiayang, ZHANG Bi. Comprehensive evaluation of the water resource carrying capacity based on DPSIRM[J]. Journal of Natural Resources, 2017, 32(3):484-493. (in Chinese))
- [10] 金菊良, 董涛, 郦建强, 等. 不同承载标准下水资源承载力评价[J]. 水科学进展, 2018, 29(1):31-39. (JIN Juliang, DONG Tao, LI Jianqiang, et al. Water resources carrying capacity evaluation method under different carrying standards[J]. Advances in Water Science, 2018, 29(1):31-39. (in Chinese))
- [11] 袁鹰. 区域水资源承载能力评价方法研究[D]. 北京:中国水利水电科学研究院, 2006. (YUAN Ying. Study on Methodology of Assessment for Water Resources Carrying Capacity in Different Zones[D]. Beijing: China Institute of Water Resources and Hydropower Research, 2006. (in Chinese))
- [12] 张强, 黎楠, 陈文颖, 等. 基于省区协调发展的GDP预测模型[J]. 气候变化研究进展, 2019, 15(1):54-61. (ZHANG Qiang, LI Nan, CHEN Wenying, et al. Provincial GDP projection model based on balanced development[J]. Climate Change Research, 2019, 15(1):54-61. (in Chinese))
- [13] 鲍振鑫. 水文频率分析适线法参数估计研究[D]. 南京:南京水利科学研究院, 2010. (BAO Zhenxin. Parameter Estimation on Curve-Fitting Methodology in Hydrologic Frequency Analysis [D]. Nanjing: Nanjing Hydraulic Research Institute, 2010. (in Chinese))
- [14] 李俊, 宋松柏, 郭田丽, 等. 基于分数阶灰色模型的农业用水量预测[J]. 农业工程学报, 2020, 36(4):82-89. (LI Jun, SONG Songbo, GUO Tianli, et al. Prediction of agricultural water consumption based on fractional grey model[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2020, 36(4):82-89. (in Chinese))
- [15] 石丽忠, 席璐. 基于灰色系统理论对辽宁省万元GDP用水量分析预测[J]. 沈阳大学学报(自然科学版), 2017, 29(5):380-383. (SHI Lizhong, XI Lu. Analysis and forecast of water consumption of Million Yuan GDP in Liaoning Province based on gray system theory[J]. Journal of Shenyang University (Natural Science), 2017, 29(5):380-383. (in Chinese))

Analysis and Prediction of Water Capacity in Hainan Island

YANG Bo¹, WANG Wen¹, QIN Dajun^{1,2}, REN Bingnan¹, GENG Jing¹, YANG Xiumin¹

(1. Zhai Mingguo Academician Work Station, Sanya University, Sanya 572022, China; 2. Institute of Geology and Geophysics, Academy of Science, Beijing 100029, China)

Abstract: The water resources available for industrial development under different guarantee rates was estimated by using the line fitting method, Hainan's GDP and per capita GDP were forecasted by ARIMA model, and the predication method of comprehensive water consumption per unit GDP was established. Finally, the ratio of the water resources of industrial development to the comprehensive water consumption per unit GDP was used to predict the scale economy capacity of water resources, and the ratio of scale economy to per capita GDP was used to express the population capacity of water resources, so as to achieve the prediction of water capacity in Hainan. The results show that under the conditions of 95%, 90%, 75% and 50% assurance rate, the water resources for industrial development of Hainan are $59.28 \times 10^8 \text{ m}^3$, $69.57 \times 10^8 \text{ m}^3$, $88.86 \times 10^8 \text{ m}^3$, and $113.53 \times 10^8 \text{ m}^3$ respectively. The quantitative relationship between comprehensive water consumption per unit GDP and GDP could be expressed by power function. Furthermore, under the same guarantee rate, the scale economy shows an obvious upward trend, but the population capacity basically remained stable. For the annual and the whole-island scale, the water capacity of Hainan Island is in the affordability for some years.

Keywords: water capacity; available water resources; comprehensive water consumption per unit GDP; scale economic; Hainan Island