doi:10.11988/ckyyb.20180212 2019,36(9):34-39

基于灰色预测模型的区域水资源承载力预测分析

刘志明[1],周真中[2],王永强[1],洪晓峰[1]
(1.长江科学院 流域水资源与生态环境科学湖北省重点实验室,武汉 430010;
2.宜昌市水资源管理中心,湖北 宜昌 443000)

摘 要:水资源承载力研究集综合评价和预测分析为一体。以宜昌市为例,在2005—2015年宜昌市"水资源-社会经济-生态环境"复合系统承载力综合评价基础上,采用GM(1,1)灰色预测模型预测2020年、2025年、2030年水资源承载力;在分析未来水平年预测结果不确定性的基础上,结合最严格水资源管理制度和河长制,探讨4种情景假设下宜昌市社会经济发展模式的可持续性。研究结果表明,未来水平年宜昌市水资源承载力状态良好(2025年左右达到Ⅰ级),建议宜昌市社会经济与生态环境协调可持续发展。

关键词:水资源承载力;预测分析;综合评价;GM(1,1)灰色预测模型;不确定性分析;可持续发展;宜昌市
中图分类号:TV21 **文献标志码**:A
文章编号:1001-5485(2019)09-0034-06 **开放科学(资源服务)标识码(OSID)**:

Predicting and Analyzing Regional Carrying Capacity of Water Resources in Yichang Using a Grey Model

LIU Zhi-ming[1], ZHOU Zhen-zhong[2], WANG Yong-qiang[1], HONG Xiao-feng[1]
(1.Hubei Provincial Key Laboratory of Basin Water Resources and Ecological Environmental Science, Yangtze River Scientific Research Institute, Wuhan 430010, China;
2.Yichang Water Resources Management Center, Yichang 443000, China)

Abstract: Research on the carrying capacity of water resources involves comprehensive evaluation and prediction and analysis. With Yichang City as a case study, we assessed the comprehensive carrying capacity of a composite system including water resources subsystem, social economy subsystem, and ecology subsystem. Firstly we predicted the carrying capacity of water resources in target years 2020, 2025, and 2030 using GM(1,1) model. Furthermore, we examined the sustainability of social economic development pattern under four scenarios based on analysis of the uncertainty of the prediction results in line with the Most Strict Water Resources Management Policy and the River Chief System. Research findings unveiled that the carrying capacity of water resources in Yichang is good in future, reaching degree Ⅰ around 2025. Under scenario three, in which sewage declines, river water quality improves, eco-environmental water use and forest cover remain increasing, the social economic development is well sustainable. Thus, we propose that social economy development should be coordinate with ecological environment protection.

Key words: carrying capacity of water resources; prediction and analysis; comprehensive evaluation; GM(1,1) model; uncertainty analysis; sustainable development; Yichang City

1 研究背景

承载力源于生态学概念,最初只在生物学和生态学领域得到应用。1920年,Pearl和Reed证明了北美地区的人口增长符合生物数量增长的对数方程(logistic equation),随后承载力概念在人口、自然资源、环境规划等领域得到了广泛研究和应用[1]。

收稿日期:2018-03-07;**修回日期**:2018-05-02
基金项目:国家重点研发计划项目(2017YFC0403600,2017YFC0403606);国家自然科学基金面上项目(51779013);中央级公益性科研院所基本科研业务费项目(CKSF2017008/SZ)
作者简介:刘志明(1994-),男,湖北武汉人,硕士研究生,研究方向为水文水资源。E-mail: liuzhiming@hhu.edu.cn
通信作者:王永强(1982-),男,河南新郑人,高级工程师,博士,主要从事水资源优化配置与水利信息化研究。E-mail:wangyq@mail.crsri.cn

20 世纪 80 年代初,自然资源供需矛盾加剧,联合国教科文组织和粮农组织提出了资源承载力的概念[2]。水资源承载力是承载力概念与水资源领域的自然结合,其概念由我国学者在 20 世纪 80 年代末提出,目前没有统一表述,但可以概括为水资源对区域社会经济和生态环境的承载程度或最大承载规模,常用的研究方法有模糊综合评价、主成分分析、多目标决策分析、系统动力学法等[3],通过选取单指标或者多指标对照评价标准或进行系统模拟推演得到定性或定量的承载程度(如超载)或最大规模(如人口和 GDP 等)[4-6]。水资源承载力研究涉及"水资源-社会经济-生态环境"复合系统,集综合评价与预测分析为一体[7-8]。目前关于水资源承载力预测的研究相对较少,且存在预测年限越长结果越不精确的问题,关于预测结果合理性的研究相对更少。本文以宜昌市为例,在综合评价的基础上,基于灰色系统理论,建立 GM(1,1)灰色预测模型,对宜昌市水资源承载力进行预测,并结合宜昌市现状及未来发展规划,对其社会经济发展情景模式进行深入探讨,并给出合理性建议。

2　研究方法

2.1　研究流程

本文研究流程如图 1 所示。以宜昌市为例,基于驱动力-压力-状态-影响-响应(Driving forces-Pressure-State-Impact-Response,DPSIR)模型框架[9]和"水资源-社会经济-生态环境"复合系统,构建宜昌市水资源承载力评价指标体系;采用层次分析法(AHP),重点突出生态环境子系统,确定各评价指标权重;简化 Logistic 对数增长方程,提出 Logistic 对数承载模型,计算各评价指标承载力;使用综合指标法,计算水资源复合系统承载力并进行综合评价;建立 GM(1,1)灰色预测模型,结合区域现状及未来发展规划,对水资源复合系统进行合理情景假设。

2.2　DPSIR 模型及 AHP 法

根据宜昌市实际情况,在 DPSIR 模型系统整体框架下,遵循代表性和可操作性原则,选取 12 个评价指标,构建"水资源-社会经济-生态环境"评价指标体系,然后使用 AHP 法求权重,评价指标体系及 AHP 权重如表 1 所示。

2.3　Logistic 对数承载模型

水资源复合系统发展过程可以用 Logistic 对数方程表示[10],本文将其发展过程简化为对数形式,并根据国内外经济发达区平均水平状况以及中国生态省(市、县)建设标准,参考相关学者研究成果并结合区域实际情况,构建各评价指标 Logistic 对数承载模型,具体模型如表 2 所示。

2.4　灰色预测模型

灰色系统理论是邓聚龙教授在 20 世纪 80 年代初提出并发展起来的,灰色系统理论认为,尽管某些系统的信息不够充分,但系统必定是有序且具有特定功能的,只是其内在规律不外显。灰色预测是一种对含有不确定因素的系统进行预测的方法,通过对原始数据进行生成处理,寻找系统变动的规律,然后建立模型对系统未来发展作出预测。在广义层面

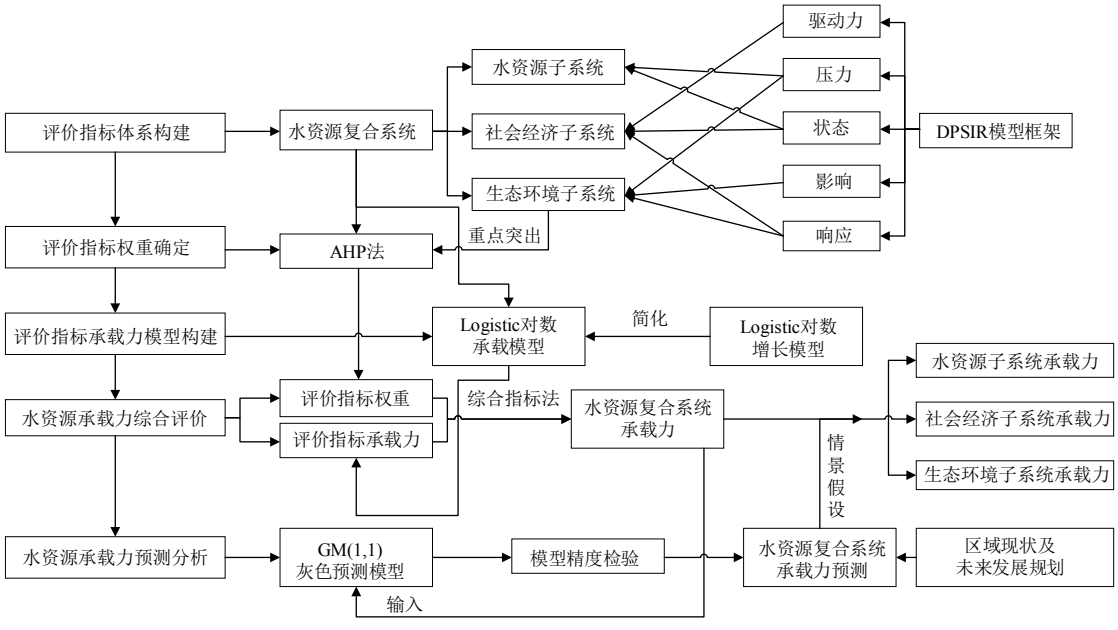


图 1　水资源承载力综合评价和预测分析流程

Fig.1　Flowchart of comprehensive evaluation and prediction of carrying capacity of water resources

表 1 宜昌市水资源承载力评价指标体系及 AHP 权重

Table 1 Evaluation index system of carrying capacity of water resources in Yichang and weights using AHP method

子系统		评价指标		DPSIR 指标类型	AHP 权重
名称	权重	名称	权重		
水资源子系统 B1	0.248	年人均水资源量 C_1(m^3)	0.295	State 状态	0.073
		水资源开发利用率 C_2	0.237	State 状态	0.059
		万元 GDP 用水量 C_3(m^3)	0.469	Pressure 压力	0.116
社会经济子系统 B2	0.305	城镇化率 C_4	0.200	Driving force 驱动力	0.061
		农村恩格尔系数 C_5	0.178	State 状态	0.054
		年人均 GDP C_6(万元)	0.283	Driving force 驱动力	0.086
		第三产业 GDP 占比 C_7	0.236	State 状态	0.072
		水利环境公共设施投资占比 C_8	0.014	Response 响应	0.032
生态环境子系统 B3	0.446	生活污水日人均排放量 C_9(L)	0.193	Pressure 压力	0.086
		全年期河流水质达标率 C_{10}	0.304	Impact 影响	0.136
		生态环境用水量占比 C_{11}	0.060	Response 响应	0.027
		森林覆盖率 C_{12}	0.443	Impact 影响	0.198

表 2 宜昌市水资源承载力 Logistic 对数承载模型

Table 2 Logistic logarithmic calculation model of carrying capacity of water resources in Yichang

评价指标 x	参考依据	不同承载力 y 下指标取值					计算模型
		极差(0)	较差(0.2)	较好(0.6)	良好(0.8)	极好(1)	
C_1	文献[11-13]		500 m^3	1 700 m^3			$y=0.33\ln x-1.83$
C_2	文献[11-13]			40%	10%		$y=1.2\ln(2.05-x)$
C_3	文献[11-13]			240 m^3		10 m^3	$y=0.18\ln(268-x)$
C_4	文献[12-13]		30%	55%			$y=0.66\ln x+0.99$
C_5	国际标准			0.4	0.2		$y=1.57\ln(1.87-x)$
C_6	文献[11-13]			3 万元	6 万元		$y=0.29\ln x+0.28$
C_7	文献[13]			50%	70%		$y=0.59\ln x+1.01$
C_8	中国统计年鉴		1%	10%			$y=0.17\ln x+1$
C_9	中国环境统计年鉴			100 L	70 L		$y=0.21\ln(118-x)$
C_{10}	中国水资源公报		40%		80%		$y=0.87\ln x+0.99$
C_{11}	文献[11]		0.01%	2%			$y=0.075\ln x+0.9$
C_{12}	文献[12]	15%			75%		$y=0.5\ln x+0.94$

上,灰色系统理论认为任何系统都可看作一个能量系统,而能量系统具有能量聚积和衰减的趋势,指数递变是能量变化的一种形式[14]。基于差分微分方程的 GM(1,1)灰色预测模型建立步骤如下[15]。

第 1 步:对原始数据进行一次累加。

原始数据为

$$X^{(0)}=\{x^{(0)}(1),x^{(0)}(2),\cdots,x^{(0)}(n)\}\quad 。\quad (1)$$

一次累加后为

$$X^{(1)}=\{x^{(1)}(1),x^{(1)}(2),\cdots,x^{(1)}(n)\}\quad 。\quad (2)$$

其中 $x^{(1)}(t)=\sum_{k=1}^{t}x^{(0)}(k)\,(t=1,2,\cdots,n)$,$n$ 为数据个数。

第 2 步:构造累加数据矩阵 $\boldsymbol{B}$ 和参数向量 $\boldsymbol{Y}$,即

$$\boldsymbol{B}=\begin{bmatrix}-0.5(x^{(1)}(1)+x^{(1)}(2)) & 1\\ -0.5(x^{(1)}(2)+x^{(1)}(3)) & 1\\ \vdots & \vdots\\ -0.5(x^{(1)}(n-1)+x^{(1)}(n)) & 1\end{bmatrix}\quad ;(3)$$

$$\boldsymbol{Y}=[x^{(0)}(2),x^{(0)}(3),\cdots,x^{(0)}(n)]^{\mathrm{T}}\quad 。\quad (4)$$

第 3 步:求解参数 α,μ,由式(5)求得。

$$\boldsymbol{\Phi}=\begin{bmatrix}\alpha\\ \mu\end{bmatrix}=(\boldsymbol{B}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{B})^{-1}\boldsymbol{B}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{Y}\quad 。\quad (5)$$

第 4 步:将参数代入方程,求出累加预测解,即

$$\hat{x}^{(1)}(t+1)=\left[x^{(0)}(1)-\frac{\mu}{\alpha}\right]\mathrm{e}^{-\alpha t}+\frac{\mu}{\alpha}\quad 。\quad (6)$$

第 5 步:求出原始预测值,即

$$\hat{x}^{(0)}(t+1)=\hat{x}^{(1)}(t+1)-\hat{x}^{(1)}(t)\quad 。\quad (7)$$

第 6 步:计算残差序列,即

$$e(t)=x^{(0)}(t)-\hat{x}^{(0)}(t)\quad 。\quad (8)$$

第 7 步:模型精度检验,即

$$\text{平均相对误差 rel}=\frac{1}{n}\sum_{t=1}^{n}\frac{|e(t)|}{x^{(0)}(t)}\quad ;\quad (9)$$

$$\text{方差比 } c=\frac{S_2}{S_1}\quad ;\quad (10)$$

小误差概率

$$p=P\{|e(t)-\overline{e(t)}|<0.674\,5S_1\}\quad 。\quad (11)$$

式中:S_1和 S_2分别为原始数据和残差序列的样本标

准差；$\overline{e(t)}$ 为残差序列平均值。GM(1,1)灰色预测模型精度等级划分标准如表 3 所示。

表 3　灰色预测模型精度等级划分标准

Table 3　Criterion of the accuracy of grey forecast model

等级	平均相对误差 rel	方差比 c	小误差概率 p
好(1 级)	≤0.01	≤0.35	≥0.95
合格(2 级)	(0.01,0.05]	(0.35,0.50]	[0.80,0.95)
勉强(3 级)	(0.05,0.20]	(0.50,0.65]	[0.70,0.80)
不合格(4 级)	>0.20	>0.65	<0.70

3　实例研究

3.1　水资源承载力综合评价

表 4 给出了 2005—2015 年宜昌市水资源承载力评价指标数据，图 2 展示了 2005—2015 年宜昌市“水资源-社会经济-生态环境”复合系统综合承载力，表 5 给出了承载力评价标准。

表 4　2005—2015 年宜昌市水资源承载力评价指标数据

Table 4　Data of evaluation indices of carrying capacity of water resources in Yichang from 2005 to 2015

年份	C_1/m^3	C_2/%	C_3/m^3	C_4/%	C_5	C_6/(万元)
2005	2 703	13.4	237	41.0	0.49	1.50
2006	2 713	13.3	209	42.0	0.47	1.72
2007	3 640	9.1	163	44.6	0.47	2.04
2008	3 640	9.6	149	45.6	0.46	2.54
2009	2 639	12.5	106	46.0	0.44	3.08
2010	3 239	11.3	95	49.1	0.44	3.81
2011	2 136	18.5	75	51.2	0.41	5.27
2012	2 260	18.1	67	53.6	0.38	6.15
2013	2 496	14.6	53	54.8	0.38	6.88
2014	2 442	16.0	51	54.6	0.30	7.64
2015	2 505	16.1	49	57.2	0.30	8.24
年份	C_7/%	C_8/%	C_9/L	C_{10}/%	C_{11}/%	C_{12}/%
2005	35.0	1.1	78	89.7	0.036	55.3
2006	36.0	4.6	78	67.7	0.036	55.3
2007	33.8	8.0	84	89.5	0.039	55.3
2008	32.9	8.2	89	89.5	0.037	55.3
2009	32.8	8.9	84	91.4	0.099	55.3
2010	31.1	8.2	93	83.3	0.096	55.3
2011	28.2	7.9	83	71.4	0.090	58.0
2012	27.5	9.9	91	58.8	0.125	65.7
2013	28.0	10.4	93	44.1	0.147	65.7
2014	29.5	12.1	98	79.9	0.242	65.7
2015	30.4	13.7	111	82.1	0.297	65.7

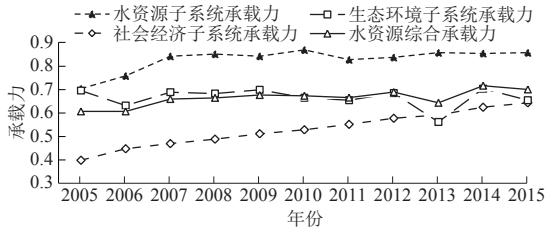


图 2　2005—2015 年宜昌市“水资源-社会经济-生态环境”复合系统综合承载力

Fig.2　Comprehensive carrying capacity of “water resource and social economy and ecological environment” system in Yichang from 2005 to 2015

表 5　承载力评价标准

Table 5　Evaluation criteria of carrying capacity

承载力取值范围	[0,0.2]	(0.2,0.6]	(0.6,0.8]	(0.8,1]
等级评价	IV(极差)	III(较差)	II(较好)	I(良好)

从图 2 可知，宜昌市水资源子系统承载力经历了先增长后稳定的过程，主要原因是宜昌市用水效率不断提高，引起万元 GDP 用水量(C3)呈指数趋势下降。2007 年水资源子系统承载力开始稳定在Ⅰ级(0.85上下)，状态良好。社会经济子系统承载力持续较快增长，除第三产业 GDP 占比(C7)呈下降趋势外，其他评价指标都不断变好。社会经济子系统承载力从 2014 年开始进入状态较好的Ⅱ级，发展状态很好。生态环境子系统承载力在0.66附近波动，主要原因是全年期河流水质达标率(C10)波动变化明显。生态环境子系统承载力除 2013 年为Ⅲ级外其他年份都为Ⅱ级，状态较好。水资源综合承载力呈缓慢增长趋势，主要原因是社会经济子系统承载力持续增长，2005—2015 年水资源综合承载力都为Ⅱ级，现状和发展状态都较好。

3.2　未来水资源承载力预测

表 6 给出了宜昌市水资源承载力 GM(1,1)灰色预测模型 2005—2015 年模拟结果及 2020 年、2025 年、2030 年预测结果，其平均相对误差 rel = 0.023，方差比 c = 0.597，小概率误差 p = 0.818，分别对应合格、勉强、合格等级，整体来说 GM(1,1)灰色预测模型检验通过。

表 6　宜昌市水资源承载力模拟及预测结果

Table 6　Simulation and prediction results of carrying capacity of water resources in Yichang

年份	模拟预测值	实际值	相对误差/%
2005	0.607	0.607	0.0
2006	0.639	0.607	3.2
2007	0.646	0.660	−1.4
2008	0.652	0.665	−1.3
2009	0.659	0.677	−1.8
2010	0.666	0.674	−0.8
2011	0.673	0.666	0.7
2012	0.680	0.690	−1.0
2013	0.688	0.644	4.4
2014	0.695	0.717	−2.2
2015	0.702	0.701	0.1
2020	0.740		
2025	0.780		
2030	0.822		

3.3　宜昌市水资源现状及未来发展规划

根据第二次《宜昌市水资源评价》(2015 年)[16]，宜昌市多年平均水资源总量为134.96亿 m^3。2015 年宜昌市水资源总量为103.10亿 m^3，河道外用水总量为16.61亿 m^3，水资源开发利用率达16.11%，预测2020 年、2030 年宜昌市在保证率为 75%时水资

源开发利用率分别为24.2%和31.9%。通过分析计算,在保证率为 50%、75%和 95%时,宜昌市水资源开发利用程度较高,开发潜力不大。2013 年 1 月,国务院办公厅发布《实行最严格水资源管理制度考核办法》,确立水资源开发利用控制红线,实施用水总量控制,2015 年宜昌市用水总量控制指标为20.24亿 m^3,2020 年为22.40亿 m^3,2030 年为23.26亿 m^3。2015 年宜昌市在湖北省实施最严格水资源管理制度考核中排名第一,2017 年宜昌市在全市范围内实施最严格水资源管理制度,进一步落实最严格水资源"三条红线"(水资源开发利用控制、用水效率控制、水功能区限制纳污)管理。

近 10 a 来,随着社会经济的高速发展,宜昌市生态环境问题加剧,河流湖泊水质有所下降,造成水环境污染的主要原因有:①未经处理的废污水排放持续增加,2015 年宜昌市废污水排放量是 2005 年的1.7倍;②经济发展与环境保护不协调,乡镇企业技术含量低、能耗高、污染重,点源污染给生态环境特别是水环境造成严重影响;③水土流失以及化肥、农药的不合理使用,造成面源污染及河流湖泊富营养化;④水库梯级开发,修建拦水坝后河水流速减缓,河流自净能力下降。2015 年 11 月底,宜昌市政府印发《关于全面实行"河长制"加强河流生态保护的意见》,在湖北省率先建立以行政首长负责制为核心的河长制,为责任河流把脉问诊,研究"一河一策"治理方案,目前已基本实现市、县、乡三级河长全覆盖。截至 2016 年底,宜昌市河(湖)长制已覆盖河流 336 条、湖泊 11 个,2016 年宜昌市水环境质量明显提升,纳入湖北省地表水考核的 8 个断面(共 9 个)均稳定达标,2 个断面水质由年初的劣Ⅴ类好转为Ⅱ-Ⅲ类,纳入湖北省跨界断面考核的 7 个断面均达到考核要求。

3.4 未来社会经济发展预测分析

从表 6 可知,未来时期宜昌市水资源承载力将持续上升,于 2020 年、2025 年、2030 年分别达到0.740,0.780,0.822。为评估未来时期宜昌市水资源承载力预测值的准确性,表 7 给出了未来水平年水资源、社会经济、生态环境 3 个子系统承载力、AHP 综合承载力及模型检验参数。从表 7 可以看出,AHP 综合承载力与 GM(1,1)模型预测值相差不大,但相对误差随时间在变大(1.3%,3.3%,6.0%);水资源子系统和社会经济子系统承载力将持续上升,模型检验参数均优于 GM(1,1)整体预测模型,其中社会经济子系统承载力模拟精度很高,预计2030 年其将达到1.178;生态环境子系统承载力将持续降低,3 个模型检验参数均未通过检验(不合格)。

上述结果表明,虽然使用 GM(1,1)灰色预测模型存在一定误差,但对未来水平年宜昌市水资源承载力发展规划仍具有参考价值。本文将上述 2 种方法预测结果取平均后略微修正,得到 2020 年、2025 年、2030 年宜昌市水资源承载力发展目标分别为0.75,0.80,0.85。

表 8 给出了未来水平年实施用水总量控制的宜昌市水资源子系统承载力预测结果。其中宜昌市水资源总量取多年平均值,人口(变化幅度很小)按 2005—2015 年数据线性拟合预测,万元 GDP 用水量按 30%,25%,20%每 5 a 递减预测。

表 9 给出了未来水平年 4 种情景假设下的社会

表 7 未来水平年 3 个子系统承载力、AHP 综合承载力及模型检验参数

Table 7 Prediction results of comprehensive carrying capacity of three subsytems in target years using AHP method and corresponding model testing parameters

项目	未来水平年承载力			模型检验参数		
	2020 年	2025 年	2030 年	rel	*c*	*p*
水资源子系统	0.896	0.927	0.958	0.021	0.483	0.909
社会经济子系统	0.790	0.964	1.178	0.004	0.039	1.000
生态环境子系统	0.643	0.633	0.624	0.041	0.959	0.636
AHP 综合	0.750	0.806	0.875	—	—	—
GM(1,1)预测值	0.740	0.780	0.822	0.023	0.597	0.818
相对误差/%	1.3	3.3	6.0	—	—	—

表 8 未来水平年宜昌市水资源子系统承载力预测结果

Table 8 Prediction results of carrying capacity of water resource subsystem in Yichang in target years

未来水平年	年人均水资源量		水资源开发利用率		万元 GDP 用水量		水资源子系统承载力
	评价指标值/m^3	承载力	评价指标值/%	承载力	评价指标值/m^3	承载力	
2020 年	3 251	0.839	16.6	0.760	34	0.982	0.888
2025 年	3 218	0.835	16.9	0.758	26	0.988	0.889
2030 年	3 186	0.832	17.2	0.756	21	0.992	0.890

表 9　未来水平年 4 种情景假设下的宜昌市社会经济子系统承载力

Table 9　Prediction results of carrying capacity of social economy subsystem in Yichang in target years under four scenarios

未来水平年	复合系统发展目标承载力	水资源子系统承载力	情景 1 承载力		情景 2 承载力		情景 3 承载力		情景 4 承载力	
			生态环境子系统（未改善）	社会经济子系统	生态环境子系统（改善较小）	社会经济子系统	生态环境子系统（改善较大）	社会经济子系统	生态环境子系统（改善明显）	社会经济子系统
2020 年	0.75	0.888	0.66	0.755	0.70	0.713	0.72	0.684	0.74	0.655
2025 年	0.80	0.889	0.66	0.912	0.73	0.833	0.76	0.789	0.80	0.730
2030 年	0.85	0.890	0.66	1.095	0.75	0.966	0.80	0.893	0.85	0.820

经济子系统承载力预测结果（前提条件：科学技术进步和社会管理水平提高未有阶段跳跃性突破）。情景 1：生活污水排放量（C9）、生态环境用水量（C11）、森林覆盖面积（C12）增加趋势不变，河流水质（C10）未改善；情景 2：生活污水排放量增加趋势得到控制，河流水质改善较大；情景 3：生活污水排放量呈减少趋势，河流水质改善明显；情景 4：生活污水排放量呈减少趋势，河流水质改善明显，生态环境用水量和森林覆盖面积增加明显。

从表 9 可以看出，在给定的水资源承载力发展目标下，情景 1 社会经济发展模式可持续性较低；情景 2 可持续性不高；情景 3 可持续性较好；情景 4 可持续性最高，但受生态环境保护影响较大，发展速度相对情景 3 较慢。

4　总结与建议

本文在水资源承载力综合评价的基础上，建立了 GM(1,1)灰色预测模型，讨论了其预测结果的不确定性，并结合最严格水资源管理制度和河长制等生态环境治理行动，探讨了未来水平年 4 种情景假设下的宜昌市社会经济发展模式。研究结果表明，未来水平年宜昌市水资源综合承载力状态良好（2025 年左右达到Ⅰ级），在用水总量控制和情景 3（生活污水排放量呈减少趋势，河流水质改善明显，生态环境用水量、森林覆盖面积增加趋势不变）发展模式下，社会经济发展可持续性较好，发展速度较快，生态环境保护较好，建议宜昌市社会经济与生态环境协调可持续发展。

参考文献：

[1] 龙腾锐，姜文超，何　强. 水资源承载力内涵的新认识[J]. 水利学报，2004，35(1)：38-45.

[2] UNESCO and FAO. Carrying Capacity Assessment with a Pilot Study of Kenya：A Resource Accounting Methodology for Exploring National Options for Sustainable Development[R]. Paris and Rome：UNESCO and FAO，1985.

[3] 左其亭. 水资源承载力研究方法总结与再思考[J]. 水利水电科技进展，2017，37(3)：1-6.

[4] SONG Xiao-meng，KONG Fan-zhe，ZHAN Che-sheng. Assessment of Water Resources Carrying Capacity in Tianjin City of China[J]. Water Resources Management，2011，25(3)：857-873.

[5] WANG Zhong-gen，LUO Yu-zhou，ZHANG Ming-hua. Quantitative Evaluation of Sustainable Development and Eco-environmental Carrying Capacity in Water-deficient Regions：A Case Study in the Haihe River Basin，China[J]. Journal of Integrative Agriculture，2014，13(1)：195-206.

[6] WANG Chang-hai，HOU Yi-lei，XUE Yong-ji. Water Resources Carrying Capacity of Wetlands in Beijing：Analysis of Policy Optimization for Urban Wetland Water Resources Management[J]. Journal of Cleaner Production，2017，161：1180-1191.

[7] 张光凤，张祖陆. 南京市水资源承载力评价[J]. 水土保持通报，2014，34(3)：154-159.

[8] 张自若，潘万贵，黄　涛，等. 水资源安全综合评价与预测：基于浙江省台州市实证分析[J]. 水资源与水工程学报，2017，28(4)：70-74.

[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.

[10] 冯宝平，张展羽，贾仁辅. 区域水资源可持续利用机理分析[J]. 水利学报，2006，37(1)：16-20.

[11] 孙远斌，高　怡，石亚东，等. 太湖流域水资源承载能力模糊综合评价[J]. 水资源保护，2011，27(1)：20-23.

[12] 曾现进，李天宏，温晓玲. 基于 AHP 和向量模法的宜昌市水环境承载力研究[J]. 环境科学与技术，2013，36(6)：200-205.

[13] 刘雅玲，罗雅谦，张文静，等. 基于压力-状态-响应模型的城市水资源承载力评价体系构建研究[J]. 环境污染与防治，2016，38(5)：100-104.

[14] 刘珊珊. 基于灰色预测的城市水资源可持续利用与管理研究：以济南市为例[D]. 济南：山东建筑大学，2016.

[15] 韩　美，杜　焕，张　翠，等. 黄河三角洲水资源可持续利用评价与预测[J]. 中国人口·资源与环境，2015，25(7)：154-160.

[16] 宜昌市水文水资源勘测局. 宜昌市水资源评价[R]. 宜昌：宜昌市水文水资源勘测局，2015.

（编辑：罗　娟）