

长江经济带水资源生态足迹时空分析及预测

金昌盛¹, 邓仁健^{1,2}, 刘俞希³, 任伯帜¹, 肖化政¹

(1. 湖南科技大学 土木工程学院, 湖南 湘潭 411201; 2. 湖南科技大学 资源与安全学院矿业工程博士后流动站, 湖南 湘潭 411201; 3. 湖南科技大学 商学院, 湖南 湘潭 411201)

摘要: 基于生态足迹模型测算长江经济带及其各个省(市)的人均水资源生态足迹、人均水资源生态承载力以及人均水资源生态盈亏,并运用灰色神经网络模型预测2016–2025年的发展形势。研究结果表明:从时间趋势来看,长江经济带人均水资源生态足迹呈现先上升后趋于平稳的变化趋势,生态承载未出现超载现象,人均水资源生态足迹和水资源生态承载力均有较大时间上波动;从空间差异来看,人均水资源生态足迹的年均值总体呈现上游高下游低的空间分布特征(浙江省除外),人均水资源生态承载力的年均值受自然因素影响呈现明显的空间变化差异;从预测结果来看,人均水资源生态足迹有较大下降的为上海、浙江和湖南,水资源可持续利用状况不容乐观的有江苏、重庆以及云南。

关键词: 水资源; 生态足迹模型; 时空分布特征; 灰色神经网络模型; 长江经济带

中图分类号:TV213.4

文献标识码:A

文章编号:1672-643X(2018)04-0059-08

Research for spatio-temporal analysis and prediction of water resource ecological footprint in Yangtze River Economic Belt

JIN Changsheng¹, DENG Renjian^{1,2}, LIU Yuxi³, REN Bozhi¹, XIAO Huazheng¹

(1. School of Civil Engineering, Hunan University of Science and Technology, Xiangtan 411201, China;

2. School of Resource Environment and Safety Engineering, Hunan University of Science and Technology,

Xiangtan 411201, China; 3. Business college, Hunan University of science and Technology, Xiangtan 411201, China)

Abstract: Based on the ecological footprint model, this paper calculated the ecological footprint per capita, the ecological bearing capacity of water resource per capita and ecological surplus of water resources per capita among provinces (cities) in the Yangtze River Economic Belt. The development trend from 2016 to 2025 was forecasted using grey neural network model. The main conclusions are as follows. First, in terms of time trends, the ecological footprint of water resources per capita in Yangtze River Economic Belt experienced a process of rising first and then becoming stable. Ecological carrying did not appear overloaded. The ecological footprint per capita and the ecological carrying capacity of water resources per capita showed great temporal fluctuations. Second, in terms of spatial difference, the annual average value of water resources ecological footprint per capita in Yangtze River Economic Belt overall presented a spatial distribution characteristic of higher in the upper reaches and lower in the downstream regions (except for Zhejiang Province). The annual average value of water resources ecological carrying capacity per capita showed obvious spatial variation due to natural factors. Third, in terms of forecasted results, the value of water resources ecological footprint per capita in Shanghai, Zhejiang and Hunan is decreasing greatly. Sustainable utilization state of water resources is not optimistic in Jiangsu and Chongqing and Yunnan.

Key words: water resources; ecological footprint model; spatio-temporal distribution characteristics; grey neural network model; Yangtze River Economic Belt

收稿日期:2017-10-30; 修回日期:2018-02-10

基金项目:国家自然科学基金项目(41672350); 湖南省自然科学基金项目(2016JJ6041); 教育部人文社会科学研究项目(13YJCZH276); 湖南省教育厅一般项目(10CC0705)

作者简介:金昌盛(1994-),男,浙江绍兴人,硕士研究生,研究方向为水资源可持续开发、利用与保护等。

通讯作者:邓仁健(1980-),男,湖南郴州人,博士,副教授,硕士生导师,研究方向为水处理理论与技术及资源化回收利用、重金属废水处理理论与技术、矿山环境污染控制与评价等。

1 研究背景

水资源是社会可持续发展的重要自然资源,其不可替代的生态、经济和社会价值以及面临的稀缺、污染等现实问题使其可持续利用显得尤为重要,对以黄金水道为依托的长江经济带更是如此,因为不论是“生态文明建设的先行示范带”这一战略定位的实现,还是“中国经济新支撑带”这一战略目标的达成,都离不开长江经济带水资源保护与利用。但是以长江经济带为研究对象,对其水资源利用状况进行分析及预测的成果鲜有报道。构建合理的水资源可利用状况评价及预测方法是科学管理及可持续利用水资源的基础,也是目前的研究热点所在。Rees(1992)^[1]、Wackernagel 等(1999)^[2]提出的生态足迹分析法是目前分析区域资源可持续利用的主要方法之一,黄琳楠等(2008)^[3]为弥补该方法中水域对水资源功能描述的局限,建立水资源账户并纳入此分析框架,由此衍生出水资源生态足迹模型。此后,国内众多学者基于该模型开展了系列研究:其一,对水资源生态足迹模型进行了扩充与改进^[4-6];其二,从国家^[7-9]、省域^[10-12]、县市^[5, 13-14]及流域^[15-16]等不同层面视角开展了实证分析研究;其三,获得计算结果后,进一步进行预测^[17]或影响因素分析^[18]。但水资源生态足迹模型在应用中也存在一些不足,如多数未考虑时空变化,且计算参数的数据缺少时间上的更新^[3],导致计算结果误差较大,生态足迹预测精度仍有待提高。基于此,本文首先利用系数计算步骤进行数据的更新以实现水资源生态足迹评价模型的构建,并对长江经济带 11 个省(市)2004-2015 年的水资源生态足迹、生态承载力及生态盈亏指数等特征进行了分析计算,然后基于灰色神经网络模型对研究区各省(市)的水资源生态足迹相关指标的时间序列进行模拟预测,以期为研究区域科学管理与可持续利用水资源提供合理的建议。

2 水资源生态模足迹模型构建

2.1 研究区概况

长江经济带根据经济地理关系划分为上中下游地区,上游地区包括重庆市、四川省、贵州省、云南省,中游地区包括安徽省、江西省、湖北省、湖南省,下游地区包括上海市、江苏省、浙江省。长江经济带多年平均径流量 $9\,560 \times 10^8 \text{ m}^3$,地下水资源 $2\,463 \times 10^8 \text{ m}^3$,约占全国径流总量的 35%,人均占用量略

高于全国平均水平^[19],但随着社会经济的发展,区域水资源利用存在较大问题。

2.2 水资源生态足迹评价模型的构建

水资源生态足迹模型包含水资源生态足迹、生态承载力及衡量供需平衡状况指标的计算。水资源生态足迹指的是人类生活生产及自然环境维持自身进化所需要的水资源用地面积,根据用水特性可将其分为生活用水生态足迹、生产用水生态足迹以及生态环境用水生态足迹三个二级账户^[3]。与需求侧的水资源生态足迹相对应的是供给侧的水资源生态承载力,其反映水资源对生态和经济系统良性发展的支撑能力。衡量地区水资源供需平衡状况的指标主要有生态盈亏指数和生态压力指数。本文采用生态盈亏指数来分析地区水资源的盈余或赤字,具体计算过程如下^[20-23]:

(1) 水资源生态足迹计算

$$EF_w = N \cdot ef_w = N \cdot \gamma_w \cdot (W/P_w) \quad (1)$$

式中: EF_w 为水资源总生态足迹, hm^2 ; N 为人口数; ef_w 为人均水资源生态足迹, hm^2 ; γ_w 为水资源全球均衡因子,是全球水资源用地的平均生态生产力与全球所有生态生产性土地平均生态生产力的比值; W 为人均水资源消耗量, m^3 ; P_w 为水资源全球平均产量, m^3/hm^2 。

(2) 水资源生态承载力计算

$$EC_w = N \cdot ec_w = (1 - \alpha) \cdot \psi \cdot \gamma_w \cdot (Q/P_w) \quad (2)$$

式中: EC_w 为水资源承载力, hm^2 ; ec_w 为人均水资源承载力, hm^2 ; ψ 为水资源产量因子,是研究地区水资源平均产量与全球水资源平均产量的比值; Q 为区域水资源总量(区域内地表水与地下水扣除二者重复部分的总量), m^3 ; N 、 γ_w 、 P_w 同公式(1)。已有研究表明,地区水资源开发需预留 60% 用于维护生态环境^[7,24],因此参数 α 取为 0.6。

(3) 水资源生态盈亏指数计算

$$EB_w = EC_w - EF_w = N \cdot (ec_w - ef_w) \quad (3)$$

式中: EB_w 为水资源生态盈亏指数, hm^2 ; EB_w 大于 0 即地区处于水资源生态盈余,有利于可持续发展; EB_w 小于 0 即地区处于水资源生态赤字,不利于可持续发展; EB_w 等于 0 则地区处于水资源生态平衡状态。

2.3 水资源生态足迹灰色神经网络评价预测模型的构建

灰色模型(Gray Model, GM)具有样本量要求少

的优点,但主要适用于指数增长模式,且要求时间序列具有较强趋势性。而人工神经网络(Artificial Neural Network, ANN)具有强大的自适应学习、任意函数逼近的能力,但网络构造过程中只考虑系统的输入输出而忽视了某些可用的确定性信息,预测结果难以解释^[25]。灰色预测模型被广泛用于小样本时间序列分析,利用人工神经网络对其预测误差进行修正,可补充模型未能完全表达的信息,提高模型预测精度^[26]。近年来,该模型被国内外学者广泛应用于金融预测^[27-28]、能源消费预测^[29-31]、自然灾害预测^[32-33]等领域。其具体建模步骤如下:

(1) 运用GM(1,1)模型拟合原始数据并进行预测。

① 对原始时间序列 $x^{(0)} = \{x^{(0)}(1), x^{(0)}(2), \dots, x^{(0)}(n)\}$ 进行一次累加,得到一阶累加序列 $x^{(1)} = \{x^{(1)}(1), x^{(1)}(2), \dots, x^{(1)}(n)\}$ 。

$$x^{(1)}(k) = \sum_{i=1}^k x^{(0)}(i), \quad k = 1, 2, \dots, n \quad (4)$$

② 对 $x^{(1)}$ 相邻两数取平均值,得到紧邻均值生成序列 $z^{(1)} = \{z^{(1)}(2), z^{(1)}(3), \dots, z^{(1)}(n)\}$ 。

$$z^{(1)}(k) = \frac{1}{2}(x^{(1)}(k-1) + x^{(1)}(k)) \quad (5)$$

$$k = 2, 3, \dots, n$$

③ 建立白化微分方程,利用最小二乘法求得参数列 $\hat{a}$,并计算离散化解 $\hat{x}^{(1)}$ 。

$$\frac{dx^{(1)}}{dt} + ax^{(1)} = u \quad (6)$$

$$\hat{a} = \begin{bmatrix} a \\ u \end{bmatrix} = (B^T B)^{-1} B^T Y,$$

$$B = \begin{bmatrix} -z^{(1)}(2) & 1 \\ -z^{(1)}(3) & 1 \\ \vdots & \vdots \\ -z^{(1)}(n) & 1 \end{bmatrix},$$

$$Y = [x^{(0)}(2), x^{(0)}(3), \dots, x^{(0)}(n)]^T \quad (7)$$

$$\hat{x}^{(1)}(k+1) = (x^{(0)}(1) - \frac{u}{a})e^{-ak} + \frac{u}{a} \quad (8)$$

$$k = 1, 2, \dots, n$$

④ 对 $\hat{x}^{(1)}$ 进行累减还原,得到原始时间序列的预测值 $\hat{x}^{(0)} = \{\hat{x}^{(0)}(1), \hat{x}^{(0)}(2), \dots, \hat{x}^{(0)}(n)\}$ 。

$$\hat{x}^{(0)}(1) = \hat{x}^{(0)}(1), \hat{x}^{(1)}(k) - \hat{x}^{(1)}(k-1) \quad (9)$$

$$k = 2, 3, \dots, n$$

(2) 利用BP神经网络模型对GM(1,1)模型的预测误差进行修正与预测。

① 求原始值 $x^{(0)}(k)$ 与GM(1,1)预测值 $\hat{x}^{(0)}(k)$ 的残差序列 $e^{(0)} = \{e^{(0)}(1), e^{(0)}(2), \dots,$

$e^{(0)}(n)\}$ 。

$$e^{(0)}(k) = x^{(0)}(k) - \hat{x}^{(0)}(k) \quad (10)$$

$$k = 1, 2, \dots, n$$

② 从 $e^{(0)}$ 中提取训练样本 $\{e^{(0)}(1), e^{(0)}(2), \dots, e^{(0)}(m)\}$, $m < n$, 组成 $m-3$ 组训练集构建BP神经网络, 每组训练集由输入样本 $\{e^{(0)}(k-3), e^{(0)}(k-2), e^{(0)}(k-1)\}$ 和输出样本 $\{e^{(0)}(k)\}$ 构成。

③ 利用训练好的BP神经网络对残差序列 $e^{(0)}$ 进行拟合,得到残差模拟序列 $\hat{e}^{(0)}$,将GM(1,1)预测值 $\hat{x}^{(0)}(k)$ 与BP神经网络残差模拟值 $\hat{e}^{(0)}(k)$ 相加得到灰色神经网络模型的预测值 $\hat{X}^{(0)}(k)$ 。

$$\hat{X}^{(0)}(k) = \hat{x}^{(0)}(k) + \hat{e}^{(0)}(k) \quad (11)$$

(3) 模型精度检验。

① 计算原始值与模型预测值的残差并求出其与原始值的比值 e_i ,得到平均相对误差 q 。

$$q = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |e_i| \quad (12)$$

② 根据原始数据的均方差 S_1 和模型预测数据的均方差 S_2 得到后验方差比 C 。

$$C = \frac{S_1}{S_2} \quad (13)$$

2.4 模型参数及数据的取值

长江经济带水资源生态足迹分析的时间维度为2004-2015年,预测2016-2025年的相关指标。水资源均衡因子采用黄林楠等^[3]以WWF2000(世界自然基金会2000地球生命力报告)公布的均衡因子为基础计算出的水资源均衡因子 $\gamma_w = 5.19$,水资源全球平均产量也根据黄林楠等的研究取 $P_w = 31.4 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{km}^2$ 。将地区水资源平均产量的时间数据更新为2004-2015年以重新计算地区水资源产量因子。其余统计数据来源于中华人民共和国国家统计局国家数据网站以及相关年份的《中国统计年鉴》。

3 实证与分析

3.1 长江经济带水资源生态足迹时空特征

为分析长江经济带水资源生态足迹的时空特征,运用MATLAB软件进行2004-2015年长江经济带各省(市)相关指标的计算。运用公式(1)分生活用水、生产用水及生态环境用水计算水资源生态足迹及人均水资源生态足迹,运用公式(2)计算水资源生态承载力及人均水资源生态承载力,运用公

式(3)测算出水资源生态盈亏指数及人均水资源生态盈亏指数,计算结果如表1~3所示。

由表1可知,长江经济带2004~2015年人均水资源生态足迹呈现先上升后趋于平稳的时间变化趋势,主要是由于2004~2011年人均生产用水和生活用水量的增加,其中人均生产用水量增加了31.26 m³,年均增幅为1.20%,人均生活用水量增加了10.29 m³,年均增幅达到2.66%,此后,人均生产用水量从390.34 m³下降至376.84 m³,而人均生活用水和人均生态用水量几乎每年均有轻微上升,两者基本持平。长江经济带2004~2015年人均水资源生态承载力在2.1668~3.3883 hm²之间波动,究其原因主要是降水量、洪旱等自然因素的影响。2004~2015年人均水资源生态盈亏指数均为盈余值,表明

区域水资源生态承载未出现超载现象。

由表2~3可知,长江经济带2004~2015年各省市的人均水资源生态足迹变动存在一定差异,人均水资源生态承载力均有较大波动。上海、浙江的人均水资源生态足迹呈较为明显的下降趋势,原因可能与其作为全国加快实施最严格水资源管理制度的试点地区有关^[34],江苏、安徽、江西、湖北、贵州和四川等省人均水资源生态足迹由于经济社会发展等原因呈上升趋势,湖南和重庆先后经历了上升转为下降的过程。其中,湖南在2006年末全面启动的全省节水型社会试点工作,重庆在2010年末启动的“绿化长江重庆行动”水土保持生态建设示范工程起到了一定的促进作用,云南则由于水资源开发利用政策的实施及经济开发等原因呈波动下降。

表1 2004~2015年长江经济带人均水资源生态足迹、生态承载力与生态盈亏

hm²/人

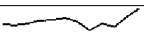
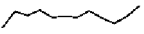
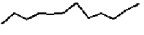
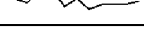
年份	人均生产用水足迹	人均生活用水足迹	人均生态用水足迹	人均水资源生态足迹	人均水资源生态承载力	人均水资源生态盈亏
2004	0.5935	0.0843	0.0110	0.6888	2.5436	1.8548
2005	0.6032	0.0877	0.0089	0.6998	2.9338	2.2340
2006	0.6169	0.0895	0.0097	0.7161	2.6068	1.8906
2007	0.6200	0.0922	0.0121	0.7243	2.7157	1.9914
2008	0.6287	0.0945	0.0137	0.7370	2.8495	2.1126
2009	0.6379	0.0975	0.0082	0.7437	2.4795	1.7358
2010	0.6383	0.1003	0.0088	0.7474	3.3883	2.6409
2011	0.6452	0.1013	0.0063	0.7528	2.1688	1.4161
2012	0.6430	0.0965	0.0064	0.7460	3.2615	2.5155
2013	0.6460	0.1000	0.0074	0.7535	2.5439	1.7904
2014	0.6273	0.1020	0.0075	0.7368	2.9540	2.2172
2015	0.6229	0.1069	0.0078	0.7376	3.1682	2.4306

表2 2004~2015年长江经济带各省(市)人均水资源生态足迹

hm²/人

地区	年 份												时间趋势图
	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	
上海	1.064	1.061	0.998	0.963	0.925	0.936	0.906	0.877	0.805	0.843	0.722	0.710	
江苏	1.155	1.132	1.180	1.195	1.189	1.162	1.160	1.164	1.152	1.201	1.228	1.191	
浙江	0.697	0.695	0.679	0.676	0.687	0.620	0.616	0.600	0.598	0.596	0.579	0.555	
安徽	0.557	0.562	0.654	0.627	0.718	0.787	0.813	0.816	0.808	0.811	0.739	0.777	
江西	0.785	0.798	0.783	0.889	0.880	0.900	0.888	0.968	0.890	0.968	0.944	0.889	
湖北	0.704	0.733	0.751	0.750	0.783	0.813	0.831	0.852	0.856	0.832	0.819	0.851	
湖南	0.799	0.858	0.854	0.843	0.838	0.832	0.818	0.818	0.819	0.821	0.816	0.805	
重庆	0.399	0.420	0.431	0.454	0.482	0.493	0.495	0.491	0.465	0.467	0.445	0.432	
四川	0.430	0.427	0.435	0.435	0.422	0.451	0.473	0.479	0.503	0.494	0.481	0.535	
贵州	0.399	0.431	0.448	0.446	0.468	0.469	0.482	0.457	0.478	0.434	0.449	0.457	
云南	0.550	0.545	0.534	0.549	0.557	0.552	0.530	0.524	0.539	0.528	0.524	0.523	

表 3 2004 – 2015 年长江经济带各省(市)人均水资源生态承载力 hm²/人

地区	年 份												时间趋势图
	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	
上海	0.122	0.116	0.126	0.150	0.155	0.169	0.143	0.079	0.128	0.104	0.174	0.238	
江苏	0.217	0.492	0.422	0.513	0.389	0.410	0.390	0.498	0.377	0.286	0.401	0.583	
浙江	2.816	4.172	3.657	3.553	3.368	3.624	5.271	2.799	5.415	3.478	4.220	5.215	
安徽	0.851	1.243	1.005	1.232	1.206	1.265	1.639	1.068	1.239	1.027	1.354	1.574	
江西	4.661	6.760	7.249	4.917	5.948	5.081	9.841	4.463	9.316	6.077	6.933	8.458	
湖北	1.678	1.688	1.160	1.838	1.869	1.489	2.286	1.358	1.454	1.406	1.623	1.791	
湖南	4.025	4.339	4.585	3.687	4.119	3.591	4.767	2.806	4.921	3.884	4.387	4.648	
重庆	2.634	2.399	1.783	3.100	2.676	2.100	2.119	2.321	2.132	2.103	2.829	1.991	
四川	3.196	3.780	2.426	3.006	3.250	3.026	3.400	2.955	3.804	3.236	3.337	2.875	
贵州	2.890	2.547	2.513	3.305	3.611	2.929	3.130	2.054	3.183	2.469	3.937	3.721	
云南	4.856	4.223	3.886	5.086	5.185	3.511	4.294	3.253	3.691	3.706	3.728	4.018	

根据自然断点法(Natural Breaks Jenks),将长江经济带各省(市)的水资源及其下属 3 个二级账户的人均生态足迹、水资源人均生态承载力以及水资源生态盈亏 6 个指标的年均值根据数据大小划分为 3 个等级组,且数值越小的等级越靠前。此后,运用 Arc-GIS 将等级划分结果可视化。长江经济带各省市水资源生态足迹及其下属二级账户的人均生态足迹年均值分级情况如图 1~4 所示,其等级越靠前,生态足迹越小。从整体的水资源人均生态足迹来看,上游地区的重庆市、四川省、贵州省、云南省的生态足迹均为第一等级,中游地区的安徽省、江西省、湖北省、湖南省生态足迹均为第二等级,下游地区的生态足迹则从江苏、上海到浙江逐级递增。其中浙江的生产用水生态足迹处于长江经济带第一等级,生活用水生态足迹处于第二等级,生态环境用水的生态足迹则处于长江经济带第三等级,四川、贵州水资源生态足迹的三个方面均处在第一等级。可见,长江经济带水资源生态足迹总体呈现上游小下游大的空间分布特征,但浙江省水资源生态足迹却十分小,其水资源利用方式等对其余地区有着极大的参考价值。

长江经济带各省(市)人均水资源生态承载力的年均值分级情况如图 5 所示,其等级越靠前,则生态承载力越小。由图 5 可知,上海、江苏、安徽和湖北的人均水资源生态承载力为 0.1420~1.6366 hm²,为第一等级,上游地区中重庆、四川、贵州的生态承载力在 1.6367~3.1908 hm² 之间,为第二等级。浙江、江西、湖南和云南在 3.1909~6.6421 hm² 之间,为第三等级,生态承载力呈现南高北低空间分布规律。从图 6 的人均水资源生态盈亏的年均值也呈现南高北低空间分布特征,上海、江苏、安徽和湖

北水资源可持续发展能力较低,其中江苏(−0.7608 hm²)和上海(−0.7589 hm²)处于亏损状态。重庆、四川和贵州处于中间水平,浙江、江西、湖南和云南的人均水资源生态盈亏的年均值分别为3.333、5.760、3.320 和 3.582 hm²/人,表明这些省市的水资源盈余较大,其可持续发展潜力较大。综上所述,水资源生态承载力受自然因素影响呈现明显的空间变化差异,而水资源生态盈亏与生态承载力又有明显的同步发展趋势,各地区需重视水资源利用基础设施的建设,以提供稳定的水资源保障。

3.2 长江经济带水资源生态足迹预测

为预测长江经济带水资源生态足迹的发展趋势,运用 MATLAB 软件对 2016–2025 年长江经济带各省(市)相关指标进行预测。首先,运用 2.3 节构建 GM(1,1)模型对原始数据进行拟合,得到 GM(1,1)模型的预测结果,然后运用 2.3 节构建的 BP 神经网络模型对 GM(1,1)模型的预测误差进行修正,得到 GM–BP 模型的预测结果,最后运用公式(12)~(13)分别对 GM(1,1)模型和 GM–BP 模型的预测结果进行精度检验对比。

其中运用 BP 神经网络对残差进行修正的过程中,相关求解参数如下:选取 2004–2012 年的序列数据作为训练样本,采用 3–10–1 的网络结构,隐含层的传输函数为 tansig 函数,输出层的传输函数为 pureline 函数,训练函数为 trainlm 函数,最大训练次数取 500,学习速率取 0.05,期望误差取 0.000001,检验结果如表 4 所示。由表 4 可知,用神经网络修正灰色模型使得平均相对误差和后验方差比平均分别减小了 39.08% 和 32.13%,表明灰色神经网络模型在水资源生态足迹和承载力预测中具有较

高的可信度,且对区域和流域尺度具有适用性,这与陈栋为等^[35]的研究结论是一致的。

由灰色神经网络模型预测得到长江经济带各省(市)2020 年和 2025 年人均水资源生态足迹、生态承载力的预测值如表 5 所示。由表 5 可知,2020 年和 2025 年各省(市)人均水资源生态足迹有较大的差异,其中下游地区上海、浙江均有较大的下降,而江苏将在比实际均值稍高的状态上保持稳定,说明下游地区的水资源可持续利用状况将有所改观。中游地区除湖南有轻微下降,其余均呈上升趋势,需重视水资源的高效使用。上游地区重庆和贵州将在实际均值上下浮动,水资源利用状况不稳定。从人均水资源生态承载力来看,仅浙江在两个时间节点上有连续提升,其余地区均有波动。

表 6 给出各省(市)2016 – 2025 年人均水资源

生态盈亏预测值,并与 2004 – 2015 年实际均值进行了比较。由表 6 可知,上游地区 2016 – 2025 年发展状况将有较大差异,上海、江苏的人均水资源生态盈亏预测值为负值,表明水资源生态承载均呈现超载现象,但是上海的生态亏损程度有所减弱,而江苏未见明显的改观,浙江的预测值与 2004 – 2015 年实际均值比基本呈上升趋势;中游地区 2016 – 2025 年波动发展,将预测期各年及平均值与 2004 – 2015 年实际均值进行比较可以发现,各省(市)在较多的年份有所上升,且其预测期平均值均呈上升趋势,表明这些区域的水资源生态承载有好转迹象;上游地区 2016 – 2025 年发展状况也不甚稳定,重庆、云南预测期年均值相较于比较期年均值呈下降趋势,且云南在预测期各年均有所下降,表明这些区域的水资源生态承载有变差的趋势。

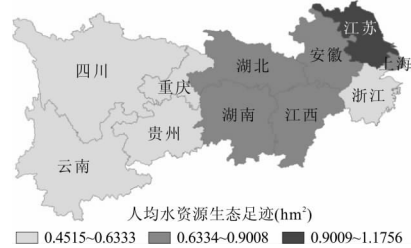


图 1 长江经济带人均水资源生态足迹

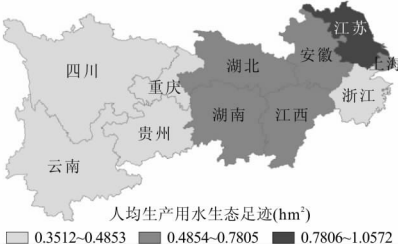


图 2 长江经济带人均生产用水生态足迹

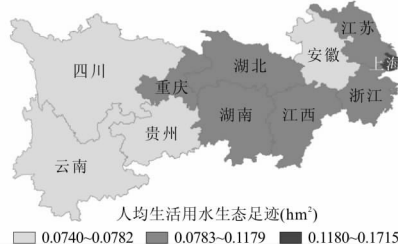


图 3 长江经济带人均生活用水生态足迹

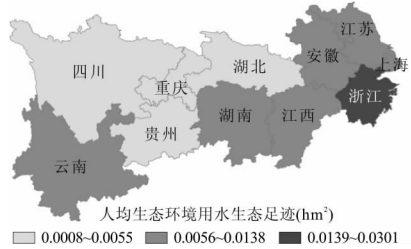


图 4 长江经济带人均生态环境用水生态足迹

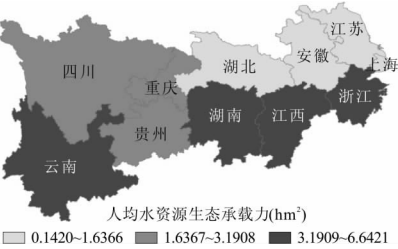


图 5 长江经济带人均水资源生态承载力

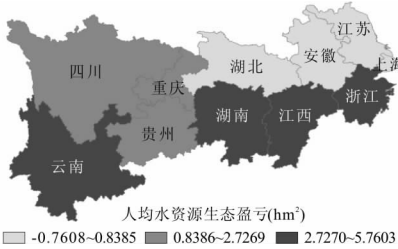


图 6 长江经济带人均水资源生态盈亏

表 4 灰色模型及灰色神经网络模型精度检验结果比较

地区	人均水资源生态足迹模拟				人均水资源生态承载力模拟			
	GM(1,1) 平均相对误差	GM(1,1) 后验方差比	GM – BP 平均相对误差	GM – BP 后验方差比	GM(1,1) 平均相对误差	GM(1,1) 后验方差比	GM – BP 平均相对误差	GM – BP 后验方差比
上海	0.0271	0.2387	0.0141	0.1876	0.2049	0.9083	0.1052	0.5945
江苏	0.0158	0.8448	0.0080	0.5456	0.1400	0.7782	0.0749	0.5158
浙江	0.0149	0.2665	0.0142	0.2016	0.1509	0.8532	0.0947	0.5850
安徽	0.0652	0.5809	0.0371	0.4083	0.1005	0.8013	0.0718	0.5426
江西	0.0341	0.6146	0.0233	0.4919	0.2014	0.8985	0.1037	0.6946
湖北	0.0216	0.4170	0.0105	0.2752	0.1373	0.9990	0.0880	0.5667
湖南	0.0044	0.2764	0.0034	0.1662	0.1172	0.9922	0.0457	0.4497
重庆	0.0442	0.8128	0.0257	0.5395	0.1163	0.9646	0.0902	0.6815
四川	0.0215	0.3842	0.0110	0.2297	0.0886	0.9980	0.0547	0.8245
贵州	0.0268	0.6847	0.0157	0.4151	0.1350	0.9234	0.0747	0.5112
云南	0.0123	0.6995	0.0095	0.5522	0.0961	0.8319	0.0565	0.6329

表 5 长江经济带各省(市)人均水资源生态足迹、生态承载力预测 hm²/人

地区	人均水资源生态足迹			人均水资源生态承载力		
	2004 – 2015 年 实际均值	2020 年 预测值	2025 年 预测值	2004 – 2015 年 实际均值	2020 年 预测值	2025 年 预测值
上海	0.9008	0.6013	0.5600	0.1420	0.2127	0.1950
江苏	1.1756	1.2358	1.2117	0.4149	0.3445	0.3119
浙江	0.6333	0.4691	0.4404	3.9658	4.8636	7.0996
安徽	0.7224	1.0232	1.1420	1.2253	1.9581	1.7037
江西	0.8818	1.0383	1.0714	6.6421	6.1577	7.6857
湖北	0.7981	0.9132	1.0091	1.6366	1.6053	2.5134
湖南	0.8267	0.7796	0.7481	4.1467	3.8140	4.7682
重庆	0.4563	0.4757	0.4473	2.3489	2.6404	2.1978
四川	0.4639	0.5760	0.6352	3.1908	3.8284	3.0943
贵州	0.4515	0.4790	0.4709	3.0240	4.6286	2.7846
云南	0.5379	0.5157	0.5186	4.1197	3.6638	2.4149

注:考虑篇幅限制和研究目的,表中仅给出 2020 和 2025 年相关数据。

表 6 2016 – 2025 年长江经济带各省(市)人均水资源生态盈亏预测 hm²/人

地区	2004 – 2015 年	年 份									
	实际均值	2016	2017	2018	2019	2020	2021	2022	2023	2024	2025
上海	-0.759	-0.522	-0.627	-0.538	-0.484	-0.389	-0.375	-0.292	-0.300	-0.292	-0.365
江苏	-0.761	-0.920	-0.822	-0.866	-0.734	-0.891	-0.914	-0.876	-0.717	-0.889	-0.900
浙江	3.333	2.587	4.528	4.473	4.645	4.395	3.629	5.896	5.861	3.679	6.659
安徽	0.503	1.251	0.070	0.682	0.101	0.935	0.434	0.951	0.031	0.202	0.562
江西	5.760	4.511	7.693	4.703	13.665	2.366	10.960	7.154	5.012	7.125	10.307
湖北	0.839	0.966	1.348	0.795	1.398	0.692	0.922	0.949	1.237	0.780	1.504
湖南	3.320	3.030	3.342	2.669	3.809	3.034	3.746	2.761	4.253	2.885	4.020
重庆	1.893	2.409	0.589	2.904	1.446	2.328	0.529	2.890	1.441	2.320	0.504
四川	2.727	3.209	2.656	3.276	2.495	3.252	2.476	3.330	2.520	3.272	2.459
贵州	2.572	3.695	2.477	3.512	2.441	4.150	2.456	4.804	2.314	5.207	2.314
云南	3.582	3.519	3.103	3.228	2.683	3.148	2.263	2.634	1.793	2.452	1.896

4 结论与建议

(1)2004 – 2015 年长江经济带整体的人均水资源生态足迹呈现先上升后趋于平稳的变化趋势,稳定在 0.7368 ~ 0.7535 hm² 之间,人均水资源生态盈亏指数均为盈余,表明水资源生态承载未出现超载现象,2004 – 2015 年长江经济带各省(市)的人均水资源生态足迹和水资源生态承载力均有较大波动。

(2)长江经济带人均水资源生态足迹总体呈现上游小下游大的空间分布特征(浙江省除外),上游地区生态足迹为第一等级,中游地区为第二等级,下游地区的上海、江苏分别为第二和第三等级,但浙江省为第一等级。长江经济带水资源生态承载力具有南高北低空间分布特征,水资源生态盈亏与生态承

载力又有明显的同步发展趋势,各地区需重视水资源利用基础设施的建设,以提供稳定的水资源保障。

(3)根据灰色神经网络模型预测结果来看,长江经济带各省(市)水资源生态足迹有较大的差异,其中上海、浙江、湖南均有较大的下降,其余地区均呈上升趋势,因此须重视水资源的高效利用。2016 – 2025 年上海、江苏的人均水资源生态盈亏预测值为负值,且江苏未见明显的改观,重庆和云南呈现下降趋势。

参考文献:

[1] REES W E. Ecological footprints and appropriated carrying capacity: what urban economics leaves out [J]. Focus, 1992,6(2):121 – 130.

[2] WACKERNAGEL M, REES W E. Perceptual and structural

- barriers to investing in natural capital: Economics from an ecological footprint perspective[J]. *Ecological Economics*, 1997, 20(1): 3-24.
- [3] 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*, 2008, 28(3): 1279-1286.
- [4] 张义, 张合平, 李丰生, 等. 基于改进模型的广西水资源生态足迹动态分析[J]. *资源科学*, 2013, 35(8): 1601-1610.
- [5] 程超, 童绍玉, 彭海英, 等. 滇中城市群水资源生态承载力的平衡性研究[J]. *资源科学*, 2016, 38(8): 1561-1571.
- [6] 王俭, 张朝星, 于英谭, 等. 城市水资源生态足迹核算模型及应用——以沈阳市为例[J]. *应用生态学报*, 2012, 23(8): 2257-2262.
- [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.
- [8] 陈冬冬, 刘伟, 钱骏. 中国水资源生态足迹与生态承载力时空分析[J]. *成都信息工程学院学报*, 2014, 29(2): 202-207.
- [9] 李兴正, 林爱文, 杨倩, 等. 基于生态足迹的中国水资源生态承载力供需平衡分析[J]. *湖北农业科学*, 2015, 54(20): 5008-5014.
- [10] 孟丽红, 叶志平, 袁素芬, 等. 江西省 2007-2011 年水资源生态足迹和生态承载力动态特征[J]. *水土保持通报*, 2015, 35(1): 256-261.
- [11] 马剑锋, 秦腾, 佟金萍. 干旱区水资源生态足迹变动及影响因素的分析[J]. *统计与决策*, 2016(18): 100-103.
- [12] 吴全志, 苏喜军, 龙林玲. 基于生态足迹模型的贵州省水资源可持续利用分析[J]. *华北水利水电大学学报(自然科学版)*, 2016, 37(3): 36-40.
- [13] 王文国, 何明雄, 潘科, 等. 四川省水资源生态足迹与生态承载力的时空分析[J]. *自然资源学报*, 2011, 26(9): 1555-1565.
- [14] 赵春芳, 董朝阳, 伍磊, 等. 浙江省水资源生态足迹时空格局[J]. *水土保持通报*, 2016, 36(1): 242-248.
- [15] 张军, 周冬梅, 张仁陟. 黑河流域 2004-2010 年水足迹和水资源承载力动态特征分析[J]. *中国沙漠*, 2012, 32(6): 1779-1785.
- [16] 张军, 张仁陟, 周冬梅. 基于生态足迹法的疏勒河流域水资源承载力评价[J]. *草业学报*, 2012, 21(4): 267-274.
- [17] 李玉平, 王晓妍, 朱琛, 等. 邢台市水资源生态足迹核算与预测研究[J]. *水土保持研究*, 2014, 21(3): 227-230.
- [18] 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): 37-42.
- [19] 曾刚. 长江经济带协同发展的基础与谋略[M]. 北京: 经济科学出版社, 2014.
- [20] 孙才志, 张智雄. 中国水生态足迹广度、深度评价及空间格局[J]. *生态学报*, 2017, 37(21): 7048-7060.
- [21] 卢新海, 柯善淦. 基于生态足迹模型的区域水资源生态补偿量化模型构建——以长江流域为例[J]. *长江流域资源与环境*, 2016, 25(2): 334-341.
- [22] 赵忠瑞, 解传奇, 丹曲, 等. 西藏水资源生态足迹评价与动态预测[J]. *浙江大学学报(理学版)*, 2015, 42(5): 559-566.
- [23] 晓兰, 王丹丹, 王塔娜, 等. 内蒙古东部地区水资源生态足迹比较分析[J]. *环境科学与技术*, 2016, 39(7): 193-199.
- [24] 张岳. 中国水资源与可持续发展[M]. 南宁: 广西科学技术出版社, 2000.
- [25] 周志刚, 郭科, 陈丽红. 时序数据预测的灰色神经网络技术[J]. *统计与决策*, 2007(1): 128-129.
- [26] ZHOU D Q. Optimization modeling for GM(1,1) model based on BP neural network[J]. *Computer Network and Information Security*, 2012, 4(1): 24-30.
- [27] 于志军, 杨善林, 章政, 等. 基于误差校正的灰色神经网络股票收益率预测[J]. *中国管理科学*, 2015, 23(12): 20-26.
- [28] LI Juan. Application of grey neural network to forecasting of ceramic industrial output[J]. *Journal of Theoretical and Applied Information Technology*, 2013, 51(1): 97-101.
- [29] LIU X L, BLANCA M, ANA S G. A grey neural network and input-output combined forecasting model. Primary energy consumption forecasts in Spanish economic sectors[J]. *Energy*, 2016, 115(1): 1042-1054.
- [30] 刘永超, 郭怀成, 代超. 生态足迹预测模型优选——以武汉市为例[J]. *北京大学学报(自然科学版)*, 2015, 51(5): 897-904.
- [31] NIU D X, WEI Y N, QIAO H H, et al. Combined forecast for wind power short-term load based on gray neural network trained by particle swarm optimization[J]. *Advances in Computer Science, Intelligent System and Environment*, 2011, 106(3): 383-387.
- [32] 袁朋伟, 宋守信, 董晓庆. 基于灰色神经网络优化组合模型的火灾预测研究[J]. *中国安全生产科学技术*, 2014, 10(3): 119-124.
- [33] 陆勉. 基于灰色神经网络的郁江流域灾害性洪水预测[D]. 南宁: 广西大学, 2012.
- [34] 长江. 上海将水面率列入最严格水资源管理考核[J]. *人民长江*, 2014, 45(7): 17.
- [35] 陈栋为, 陈晓宏, 孔兰. 基于生态足迹法的区域水资源生态承载力计算与评价——以珠海市为例[J]. *生态环境学报*, 2009, 18(6): 2224-2229.