

# 基于改进生态足迹因子的长株潭地区可持续发展

郭荣中<sup>1</sup>, 申海建<sup>2</sup>, 杨敏华<sup>3</sup>

(1.长沙环境保护职业技术学院, 长沙 410004; 2.湖南省测绘科技研究所,  
长沙 410004; 3.中南大学 地球科学与信息物理学院, 长沙 410083)

**摘 要:**可持续发展的标志是资源的永续利用和良好的生态环境。应用改进的生态足迹因子对长株潭地区 2002—2014 年的生态足迹及其可持续发展能力进行了定量评价,并构建灰色 GM(1,1)模型进行了预测。结果表明:长株潭地区生态足迹由期初的 2 120.50 万  $\text{hm}^2$  逐年增加到期末的 3 181.29 万  $\text{hm}^2$ ,同期可利用生态承载力由 488.02 万  $\text{hm}^2$  逐年增加到 493.15 万  $\text{hm}^2$ ,生态赤字由 -1 632.48 万  $\text{hm}^2$  逐年持续增加到 -2 688.14 万  $\text{hm}^2$ ;2002—2014 年长株潭地区的万元 GDP 生态足迹和生态适度人口呈现逐渐下降的趋势,生态足迹利用效率呈现逐渐快速上升的趋势,生态可持续指数呈前期下降,后期平稳波动趋势;同时根据预测得到 2026 年人均生态赤字将上升到 -2.340 6  $\text{hm}^2$ 。呼吁当地政府积极采取措施改善生态环境,以实现经济社会的可持续发展。

**关键词:**生态足迹; 均衡因子; 产量因子; 可持续发展; 长株潭地区

**中图分类号:**F301

**文献标识码:**A

**文章编号:**1005-3409(2019)05-0174-07

## Sustainable Development of Chang-Zhu-Tan Region Based on Improved Ecological Footprint Factors

GUO Rongzhong<sup>1</sup>, SHEN Haijian<sup>2</sup>, YANG Minhua<sup>3</sup>

(1.Changsha College of Environmental Protection Occupation and Technology,

Changsha 410004, China; 2.Hunan Institute of Mapping, Changsha 410004, China;

3.School of Info-Physics and Geomatics Engineering, Central South University, Changsha 410083, China)

**Abstract:** The sign of sustainable development is the sustainable use of resources and a good ecological environment. In the present study, the ecological footprint and ecological capacity of Chang-Zhu-Tan City are calculated and analyzed from 2002 to 2014 by use of the improved ecological footprint factor, as well as its developed trend is predicted by the grey model. The results show that during 2002—2014, its ecological footprint increased from  $2.120\ 50 \times 10^7\ \text{hm}^2$  to  $3.181\ 29 \times 10^7\ \text{hm}^2$ , the ecological carrying capacity gradually decreased from  $4.880\ 2 \times 10^6\ \text{hm}^2$  to  $4.931\ 5 \times 10^6\ \text{hm}^2$ , while the ecological deficit per capita increased from  $-1.632\ 48 \times 10^7\ \text{hm}^2$  in 2002 to  $-2.688\ 14 \times 10^7\ \text{hm}^2$  in 2014; from 2002 to 2014, the ecological footprint and ecological population of 10,000-yuan in the Changzhutan region showed a gradual decline, and the ecological footprint utilization efficiency showed a gradual and rapid trend; the ecological sustainability index showed a decline during the early stages but stable fluctuations during the later stages, the per capita ecological deficit has been predicted to be risen up to  $-2.340\ 6\ \text{hm}^2$  in 2026. Urgent calls on the local government actively are to take measures to improve the ecological environment in order to achieve sustainable economic and social development.

**Keywords:** ecological footprint; equilibrium factor; yield factor; sustainable development; Chang-Zhu-Tan region

当今社会可持续发展理念已经得到了广泛共识, 各国都积极致力于可持续发展的量化研究中, 其中

20 世纪 90 年代提出的生态足迹模型能很好的应用于可持续性发展的定量分析中。国外学者在理论<sup>[1]</sup>

收稿日期: 2018-12-03

修回日期: 2018-12-26

资助项目: 湖南省自然科学基金项目“长株潭地区生态系统服务价值评估及权衡协同研究”(2019JJ70013); 湖南省教育厅科研项目“环境伦理视域下长株潭地区生态足迹和生态承载力研究”(18C1801); 湖南省社会科学成果评审委员会课题“生态正义视域下澧水流域生态补偿机制研究”(XSP19YBC297)

第一作者: 郭荣中(1979—), 女, 湖南桂东人, 副教授, 高级工程师, 博士, 主要从事土地信息与土地生态研究。E-mail: 865495696@qq.com

和应用<sup>[2-5]</sup>方面展开了大量的研究,深刻认识到保护环境的根本目的在于确保人类持续发展。国内学者基于生态足迹模型<sup>[6]</sup>分别从国家<sup>[7-8]</sup>、省域<sup>[9-12]</sup>、城市<sup>[13-16]</sup>等不同尺度对区域可持续发展进行了实证研究。研究表明,通过生态足迹与生态承载力的对比,可以确定区域对生态价值的消费程度。同时基于可持续发展观,探讨人们如何在生态系统承载力范围内高质量地生活,同时为其他生物留有健康的生存空间,可以评价生活质量发展水平和人类消费对生态系统需求的关系,定量判断某一区域目前可持续发展的状态。本文以长株潭地区为研究对象,为了充分体现地域特色,对生态足迹因子进行改进,对生态足迹计算的关键参数(均衡因子和产量因子)进行本地化修正。在对产量因子的修正上,根据本地区不同类型作物产量因子加权计算出了耕地的产量因子,并首次采用长株潭地区 2002—2014 年 13 a 耕地产量因子的算术平均数做为调整系数,在刘某承等<sup>[17]</sup>的研究基础上,同比修正长株潭地区区域内草地、林地、建筑用地、水域、CO<sub>2</sub>吸收的产量因子。在确定研究区域均衡因子时,直接采用刘某承等<sup>[18]</sup>的研究成果应用于生态足迹的计算中。并结合万元 GDP 生态足迹、生态适度人口、生态足迹利用效率、生态可持续指数对长株潭地区近 13 a 的可持续发展情况进行分析与评价,反映在经济发展的背景下研究区域资源的供需变化情况,以期为政府制定相关政策提供科学依据。

研究基础数据主要来源于 2003—2015 年的《湖南统计年鉴》、《湖南农村统计年鉴》。

## 1 研究区概况

长株潭地区位于湖南省中东部丘陵区,下辖 3 个地级市,共 12 个市辖区,4 个县级市,7 个县。2014 年,长株潭地区生产总值 11 735.39 亿元,经济总量占全省比重超过四成,人均地区生产总值 83 317 元,固定资产投资 8 776.20 亿元,地方财政收入 959.56 亿元,农林牧渔业总产值 956.03 亿元,规模以上工业总产值 15 387.54 亿元,社会消费品零售总额 4 361.22 亿元,城市化水平 65.99%。

## 2 研究方法

### 2.1 生态足迹

在计算生态足迹时,由于每一类土地类型的生产力不同,将各种类型的生物生产性土地面积乘以一个相应的均衡因子。首先是计算各类消费帐户的人均生态足迹( $A_i$ )。计算公式为:

$$A_i = C_i / Y_i = (P_i + I_i - E_i) / (Y_i \times N) \quad (1)$$

式中: $i$  为消费项目的类型; $N$  为人口数; $Y_i$  和  $C_i$  分别为第  $i$  种消费项目的世界平均产量和当地的人均消费量; $P_i$ 、 $I_i$ 、 $E_i$  分别为年生产量、年进口量、年出口量。

区域人均生态足迹( $ef$ )的计算公式:

$$ef = \sum r_i A_i = \sum r_i (P_i + I_i - E_i) / (Y_i \times N) \quad (2)$$

式中: $r_i$  为均衡因子,本文均衡因子直接采用刘某承等<sup>[18]</sup>的研究成果,即农地、林地、畜牧地、渔业水域、建筑用地、能源用地分别取值 1.32, 0.82, 0.71, 0.56, 1.32, 0.82。

区域总人口的生态足迹( $EF$ )计算公式:

$$EF = N \times (ef) \quad (3)$$

式中: $N$  为人口数。

### 2.2 生态承载力

在计算生态承载力时,为不同区域同类生物生产性土地面积可进行对比,将其面积乘以一个相应的产量因子。区域人均生态承载力( $ec$ )的计算公式:

$$ec = \sum C_j = \sum a_j \times r_j \times y_j \quad (4)$$

式中: $C_j$  为第  $j$  种消费项目的人均生态承载力分量; $a_j$  为生物生产面积; $y_j$  为产量因子; $r_j$  同上。

区域总生态承载力( $EC$ )的计算公式:

$$EC = N \times (ec) \quad (5)$$

式中: $N$  为人口数。

在对生态足迹模型产量因子的修正上,本文通过不同类型作物产量因子加权计算得耕地的产量因子实现研究区域耕地的产量因子修正。2014 年长株潭地区耕地产量因子计算结果见表 1,最终确定 2014 年度耕地产量因子为 2.164 5。

采用上述产量因子计算方法,分别计算出长株潭地区 2002—2013 年年度耕地产量因子参数,最终取 13 a 算术平均数 2.180 4 为长株潭地区耕地产量因子,调整系数为 1.524 8,详见表 2。

结合刘某承等<sup>[17]</sup>的研究成果,即湖南省耕地、草地、林地、建筑用地、水域、CO<sub>2</sub>吸收的产量因子分别取值 1.43, 3.00, 1.10, 1.43, 3.00, 0.00。同时以表 2 计算出的长株潭地区耕地调整系数(2.180 4/1.43=1.524 8)为基准,同比将长株潭地区区域内草地、林地、建筑用地、水域、CO<sub>2</sub>吸收的产量因子同步修正为 4.574 4, 1.677 3, 2.180 4, 4.574 4, 0.000 0,修正结果详见表 3。

### 2.3 生态盈余/赤字

生态盈余/赤字是指生态足迹与生态承载力之差,计算公式如下:

$$ED = EF - EC = N \times (ef - ec) \quad (6)$$

式中: $EF$ 、 $EC$ 、 $N$ 、 $ef$ 、 $ec$  的含义同前。

若  $ED < 0$ , 就出现生态赤字; $ED > 0$ , 则表现为生态盈余。

表 1 2014 年长株潭地区耕地产量因子

作物 类型	2014 年 产量/t	种植面积/ (10 <sup>3</sup> hm <sup>2</sup> )	各类型作物平均产量/ (kg·hm <sup>-2</sup> )	全球平均产量/ (kg·hm <sup>-2</sup> )	各类型作物 产量因子	占耕地 比例/%	耕地产量 因子
稻谷	5559024	802.05	6931	2744	2.53	61.77	
小麦	993	0.35	2837	2744	1.03	0.03	
玉米	112846	19.92	5665	2744	2.06	1.53	
高粱(等谷物)	2858	0.89	3211	2744	1.17	0.07	
豆类	48639	16.88	2881	1856	1.55	1.30	
薯类	85658	19.62	4366	12607	0.35	1.51	
棉花	2965	2.04	1453	1000	1.45	0.16	2.1645
油料	170594	112.35	1518	1856	0.82	8.65	
麻类	1714	0.58	2955	1500	1.97	0.04	
甘蔗	6560	0.21	31238	18000	1.74	0.02	
烟叶	29170	13.24	2203	1548	1.42	1.02	
蔬菜	10234375	294.80	34716	18000	1.93	22.70	
瓜果类	454599	15.49	29348	18000	1.63	1.19	

表 2 2002—2014 年长株潭地区耕地产量因子

年份	2002 年	2003 年	2004 年	2005 年	2006 年	2007 年	2008 年
耕地产量因子	2.1095	2.1477	2.1923	2.2196	2.2394	2.2489	2.2731
调整系数	1.4752	1.5019	1.5331	1.5522	1.5660	1.5727	1.5896
年份	2009 年	2010 年	2011 年	2012 年	2013 年	2014 年	长株潭地区
耕地产量因子	2.2088	2.1513	2.1759	2.0898	2.1250	2.1645	2.1804
调整系数	1.5446	1.5044	1.5216	1.4614	1.4860	1.5136	1.5248

表 3 长株潭地区产量因子

因子类型	耕地	草地	林地	建筑用地	水域	CO <sub>2</sub> 吸收
产量因子	2.1804	4.5744	1.6773	2.1804	4.5744	0.0000

2.4 区域可持续发展评价

为了全面评价长株潭地区的生态可持续发展程度,本文引入了以下评价指标。

2.4.1 万元 GDP 生态足迹 万元 GDP 生态足迹可以表明单位面积生物生产性土地的产出率的高低。其计算公式为:

$$eg=ef/(GDP/N)$$
 (7)

式中:ef,N 的含义同前。

2.4.2 生态适度人口 生态适度人口是指在一定的条件下区域能够维持生态系统正常运转的人口数量。其计算公式为:

$$P=N\times(ec/ef)$$
 (8)

式中:ec,ef,N 的含义同前。

2.4.3 生态足迹利用效率 生态足迹利用效率是指在单位生态足迹下产生的经济量。其计算公式为:

$$EE=GDP/EF\times100\%$$
 (9)

式中:EF 的含义同前。

2.4.4 生态可持续指数 生态可持续指数(ESI)用来反映区域生态可持续利用的程度。计算公式为:

$$ESI=EC/(EC+EF)$$
 (10)

式中:EF,EC 的含义同前。0<ESI<1,当 ESI 值越

大,说明生态可持续性越强。

本文通过征询专家意见,将可持续发展程度分为 6 个等级<sup>[19]</sup>,具体划分标准见表 4。

表 4 生态可持续指数分级表

等级	ESI 指数	可持续发展程度
I	ESI≥0.80	强可持续
II	0.65≤ESI<0.80	中等可持续
III	0.50≤ESI<0.65	弱可持续
IV	0.35≤ESI<0.50	弱不可持续
V	0.20≤ESI<0.35	中等不可持续
VI	ESI≤0.20	强不可持续

2.5 灰色 GM(1,1)模型

本文利用灰色 GM(1,1)模型<sup>[20]</sup>,对长株潭地区的生态状况进行预测,即:

$$\hat{x}^{(1)}(t+1)=(x_{(1)}^{(0)}-\frac{u}{a}e^{-at})+\frac{u}{a},(x_{(0)}^{(1)}\supset x_{(1)}^{(0)})$$
 (11)

$$\hat{x}^{(0)}(t)=\hat{x}^{(1)}(t)-i\hat{x}^{(1)}(t-1)$$
 (12)

式中:e 为常量,其值为 2.718 28;t 为预测时间。

3 结果与分析

3.1 长株潭地区 2002—2014 年生态足迹和生态承载力动态变化

根据式(3)和式(5),计算出长株潭地区 2002—

2014 年生态足迹和生态承载力动态变化,结果详见表 5。由表 5 可知:长株潭地区生态足迹由 2002 年的 2 120.50 万 hm<sup>2</sup> 逐年增加到 2014 年 3 181.29 万 hm<sup>2</sup>; 同期生态承载力由 554.57 万 hm<sup>2</sup> 逐年持续上升到 560.40 万 hm<sup>2</sup>。其中湘潭市生态足迹增加最多,由 2002 年的 681.41 万 hm<sup>2</sup> 逐年增加到 2014 年 1 110.12 万 hm<sup>2</sup>, 长沙市的生态承载力上升最多,由 2002 年的 235.66

万 hm<sup>2</sup> 逐年持续上升到 2014 年的 240.06 万 hm<sup>2</sup>。研究期间,长株潭地区生态足迹呈上升发展趋势,生态承载力呈水平波动发展趋势。

3.2 可利用生态承载力和生态赤字动态变化

根据式(6),结合长株潭地区研究期间人口统计数据,可以计算出长株潭地区 2002—2014 年可利用生态承载力和生态赤字动态变化,结果详见表 6。

表 5 长株潭地区 2002—2014 年生态足迹及生态承载力

年份	生态足迹/(10 <sup>4</sup> hm <sup>2</sup> )				生态承载力/(10 <sup>4</sup> hm <sup>2</sup> )			
	长株潭	长沙市	株洲市	湘潭市	长株潭	长沙市	株洲市	湘潭市
2002	2120.50	863.45	575.64	681.41	554.57	235.66	210.54	108.37
2003	2275.84	907.77	630.00	738.08	553.76	235.72	210.09	107.95
2004	2605.39	1047.36	729.87	828.15	553.95	235.95	210.03	107.96
2005	2817.32	1148.79	797.10	871.43	554.20	236.13	210.08	107.99
2006	3016.67	1183.22	826.73	1006.72	554.78	236.84	210.14	107.79
2007	3106.15	1220.24	871.21	1014.69	555.17	237.13	210.22	107.82
2008	2946.93	1191.75	788.32	966.86	555.43	237.30	210.27	107.86
2009	3179.42	1213.36	824.08	1141.97	556.35	237.81	210.65	107.89
2010	3243.50	1226.52	843.81	1173.17	557.62	238.58	211.07	107.98
2011	3319.84	1233.44	838.12	1248.28	558.51	239.10	211.29	108.12
2012	3287.28	1259.58	835.10	1192.61	559.19	239.37	211.60	108.21
2013	3316.25	1269.90	838.71	1207.63	559.99	239.83	211.86	108.31
2014	3181.29	1251.97	819.20	1110.12	560.40	240.06	211.96	108.38

表 6 长株潭地区 2002—2014 年可利用生态承载力和生态赤字

年份	可利用生态承载力/(10 <sup>4</sup> hm <sup>2</sup> )				生态赤字/(10 <sup>4</sup> hm <sup>2</sup> )			
	长株潭	长沙市	株洲市	湘潭市	长株潭	长沙市	株洲市	湘潭市
2002	488.02	207.38	185.27	95.37	−1632.48	−656.07	−390.37	−586.04
2003	487.31	207.44	184.88	94.99	−1788.53	−700.33	−445.12	−643.08
2004	487.47	207.64	184.83	95.01	−2117.91	−839.73	−545.04	−733.14
2005	487.70	207.79	184.87	95.03	−2329.63	−941.00	−612.23	−776.40
2006	488.20	208.42	184.92	94.86	−2528.47	−974.80	−641.81	−911.86
2007	488.55	208.68	184.99	94.88	−2617.60	−1011.56	−686.22	−919.81
2008	488.78	208.82	185.04	94.92	−2458.15	−982.93	−603.28	−871.95
2009	489.59	209.28	185.37	94.94	−2689.83	−1004.09	−638.71	−1047.03
2010	490.71	209.95	185.74	95.02	−2752.79	−1016.57	−658.07	−1078.15
2011	491.49	210.41	185.94	95.15	−2828.35	−1023.03	−652.19	−1153.14
2012	492.08	210.65	186.21	95.22	−2795.19	−1048.93	−648.88	−1097.38
2013	492.80	211.05	186.43	95.31	−2823.45	−1058.85	−652.28	−1112.32
2014	493.15	211.25	186.53	95.38	−2688.14	−1040.72	−632.67	−1014.75

注:可利用生态承载力是指生态承载力扣除了要预留的 12% 的生物多样性保护用地后的值。

由表 6 可知:长株潭地区可利用生态承载力由 2002 年的 488.02 万 hm<sup>2</sup> 逐年增加到 2014 年 493.15 万 hm<sup>2</sup>; 同期生态赤字由 −1 632.48 万 hm<sup>2</sup> 逐年持续下降到 −2 688.14 万 hm<sup>2</sup>。其中长沙市可利用生态承载力增加最多,由 2002 年的 207.38 万 hm<sup>2</sup> 逐年增加到 2014 年 211.25 万 hm<sup>2</sup>,湘潭市生态赤字下降最多,由 2002 年的 −586.04 万 hm<sup>2</sup> 逐年持续下降到 2014 年的 −1 014.75 万

hm<sup>2</sup>。研究期间,长株潭地区可利用生态承载力呈水平波动状态,生态赤字呈持续增加发展趋势。

3.3 长株潭地区可持续发展评价

3.3.1 万元 GDP 生态足迹评价 运用表 5 中长株潭地区 2002—2014 年生态足迹数据和 GDP 数据,根据式(7),计算出长株潭地区 2002—2014 年的万元 GDP 生态足迹,结果详见表 7。

表 7 长株潭地区万元 GDP 生态足迹

年份	GDP/亿元				万元 GDP 生态足迹/(hm <sup>2</sup> /万元)			
	长株潭	长沙市	株洲市	湘潭市	长株潭	长沙市	株洲市	湘潭市
2002	1478.62	861.05	355.27	262.30	1.4341	1.0020	1.6203	2.5979
2003	1580.26	929.49	383.09	267.69	1.4402	0.9758	1.6445	2.7572
2004	1919.14	1133.88	452.48	332.78	1.3573	0.9232	1.6131	2.4886
2005	2415.71	1524.73	524.14	366.84	1.1658	0.7532	1.5208	2.3755
2006	2818.00	1790.66	605.27	422.08	1.0377	0.6606	1.3659	2.3852
2007	3468.33	2190.25	751.26	526.81	0.8931	0.5567	1.1597	1.9261
2008	4467.15	2900.98	911.39	654.78	0.6578	0.4104	0.8650	1.4766
2009	5509.04	3744.76	1024.89	739.38	0.5753	0.3234	0.7806	1.4718
2010	6716.68	4547.19	1275.48	894.01	0.4840	0.2685	0.6432	1.2339
2011	8358.57	5670.16	1564.27	1124.14	0.3980	0.2163	0.5358	1.0295
2012	9501.00	6457.31	1761.30	1282.39	0.3462	0.1941	0.4669	0.8723
2013	10659.82	7240.27	1949.43	1470.11	0.3104	0.1745	0.4302	0.7649
2014	11735.39	7941.91	2161.01	1632.46	0.2711	0.1576	0.3791	0.6642

万元 GDP 生态足迹可以间接反映研究区域的资源利用效率,由表 7 可以看出,2002—2014 年长株潭地区的万元 GDP 生态足迹呈现逐渐下降的趋势,由 2002 年的 1.434 1 hm<sup>2</sup>/万元减少到 2014 年的 0.271 1 hm<sup>2</sup>/万元。其中湘潭市减少最多,由 2002 年的 2.597 9 hm<sup>2</sup>/万元减少到 2014 年的 0.664 2 hm<sup>2</sup>/万元。这说明长株潭地区的资源利用方式已由粗放型逐渐集约型转变,由消耗型逐渐向节约型转变,产业结构得到了一定程度的优化。

3.3.2 生态适度人口 根据式(8),运用长株潭地区 2002—2014 年人口规模、人均生态足迹和人均生态承载力数据,计算出长株潭地区 2002—2014 年生态适度人口,结果详见表 8。由表 8 可知,2002—2014 年长株潭地区的实际人口规模持续上升,人口增加主要集中在省会长沙市。同期生态适度人口呈现逐渐下降的趋势,由 2002 年的 326.82 万人减少到 2014 年的 248.12 万人。其中株洲市下降最多,由 2002 年的 129.74 万人减少到 2014 年的 94.13 万人。

表 8 长株潭地区生态适度人口

年份	人口规模/万人				生态适度人口/万人			
	长株潭	长沙市	株洲市	湘潭市	长株潭	长沙市	株洲市	湘潭市
2002	1249.66	595.46	373.03	281.17	326.82	154.55	129.74	42.53
2003	1257.39	601.76	373.60	282.03	305.95	148.43	118.34	39.18
2004	1267.04	610.38	373.84	282.82	269.39	131.38	102.78	35.23
2005	1289.50	620.92	377.96	290.62	253.66	122.97	95.98	34.70
2006	1299.44	628.80	379.00	291.64	238.97	118.68	90.84	29.45
2007	1309.96	637.36	379.90	292.70	234.13	117.58	87.02	29.53
2008	1320.28	645.14	381.15	293.99	248.84	121.58	96.22	31.04
2009	1329.65	651.59	382.80	295.26	232.67	117.24	89.82	25.61
2010	1365.00	704.07	385.71	275.22	234.67	124.20	87.50	22.97
2011	1373.60	709.07	388.08	276.45	231.09	122.53	87.21	21.35
2012	1383.42	714.66	390.66	278.10	235.33	122.91	89.58	22.84
2013	1395.55	722.14	393.45	279.96	235.66	123.20	89.78	22.68
2014	1408.52	731.15	396.09	281.28	248.12	128.76	94.13	25.22

3.3.3 生态足迹利用效率和生态可持续发展指数 根据式(9)和式(10),运用长株潭地区 2002—2014 年 GDP 和生态足迹数据,计算出长株潭地区 2002—2014 年生态足迹利用效率和生态可持续指数,结果详见表 9。由表 9 可知,2002—2014 年长株潭地区的生

态足迹利用效率呈现逐渐快速上升的趋势,由 2002 年的 0.70%增加到 2014 年的 3.69%。其中长沙市上升最快,由 2002 年的 1.00%增加到 2014 年的 6.34%。  
由表 9 可知,长株潭地区的生态可持续指数呈前期下降,后期平稳波动趋势,ESI 指数具体由 2002 年



0.207 3 下降到 2007 年的 0.151 6, 之后一直呈平稳波动状态, 到 2014 年 ESI 指数下降到 0.149 8。对比表 4 的生态可持续分级表可以看出, 2002 年研究区域处于中等不可持续状态, 2003 年已经下降为强不可持续状态, 2008—2014 年未持续恶化, 呈平稳波动态势。

表 9 长株潭地区生态足迹利用效率和生态可持续发展指数

年份	生态足迹利用效率/%				生态可持续指数			
	长株潭	长沙市	株洲市	湘潭市	长株潭	长沙市	株洲市	湘潭市
2002	0.70	1.00	0.62	0.38	0.2073	0.2144	0.2678	0.1372
2003	0.69	1.02	0.61	0.36	0.1957	0.2061	0.2501	0.1276
2004	0.74	1.08	0.62	0.40	0.1753	0.1839	0.2235	0.1153
2005	0.86	1.33	0.66	0.42	0.1644	0.1705	0.2086	0.1103
2006	0.96	1.51	0.73	0.42	0.1553	0.1668	0.2027	0.0967
2007	1.12	1.80	0.86	0.52	0.1516	0.1627	0.1944	0.0960
2008	1.52	2.44	1.16	0.68	0.1586	0.1661	0.2106	0.1004
2009	1.74	3.09	1.28	0.68	0.1489	0.1639	0.2036	0.0863
2010	2.07	3.72	1.55	0.81	0.1467	0.1628	0.2001	0.0843
2011	2.51	4.62	1.87	0.97	0.1440	0.1624	0.2013	0.0797
2012	2.89	5.15	2.14	1.15	0.1454	0.1597	0.2022	0.0832
2013	3.22	5.73	2.32	1.31	0.1445	0.1589	0.2017	0.0823
2014	3.69	6.34	2.64	1.51	0.1498	0.1609	0.2056	0.0889

3.4 长株潭地区生态足迹的预测分析

以 2002—2014 年长株潭地区人均生态足迹、人均可利用生态承载力为基础, 利用灰色 GM(1, 1) 模

其中长沙市 ESI 指数由 2002 年的 0.214 4 下降为 2014 年的 0.160 9; 株洲市 ESI 指数由 2002 年的 0.267 8 下降为 2014 年的 0.205 6; 湘潭市 ESI 指数由 2002 年的 0.137 2 下降为 2014 年的 0.088 9。当地政府应该积极采取措施加大生态环境保护力度, 走可持续发展道路。

型即式(11)和式(12), 预测研究区域 2017—2026 年生态赤字状况, 预测模型见表 10。

表 10 长株潭地区生态足迹预测模型

预测类型	灰色预测模型		模型检验	相对误差值/%
人均生态足迹	$\hat{x}^{(1)}(t+1)=75.81350777e^{0.0283t}-74.11660777$	$(t=1,2,\cdots,n)$	1 级	0.32
人均可利用生态承载力	$\hat{x}^{(1)}(t+1)=-13.91747101e^{-0.0276t}+14.30797101$	$(t=1,2,\cdots,n)$	1 级	0.20
人均生态承载力	$\hat{x}^{(1)}(t+1)=-16.21047509e^{-0.0269t}+16.65427509$	$(t=1,2,\cdots,n)$	1 级	0.20

通过计算相对误差来检验预测模型的精度, 相对误差越小, 表示精度越高。由表 10 可知, 人均生态足迹、人均可利用生态承载力、人均生态承载力的相对误差值分别为 0.32%, 0.20%, 0.20%, 这表明预测模型可信度高。同时, 为了进一步验证预测模型的准确性, 本文将通过预测模型计算出来的 2014 年的人均生态足迹、人均生态承载力、人均可利用生态承载力与实际值进行比较, 并计算出相对误差, 见表 11。计算结果表明, 相对误差均小于 5%, 模型通过检验。

根据表 10 中的预测模型预测长株潭地区 2017—2026 年生态状况, 预测结果见表 12, 到 2026 年人均生态足迹达到 2.652 9 hm<sup>2</sup>, 人均可利用生态承载力为 0.312 3 hm<sup>2</sup>, 生态赤字由期初的 -2.097 7 hm<sup>2</sup> 持续上升到期末的 -2.340 6 hm<sup>2</sup>。由此可见, 必须采取一系列有效的措施改善生态环境。

表 11 2014 年人均生态足迹与人均生态承载力模型值与实际值对比

生态足迹	人均生态足迹/ (hm <sup>2</sup> /人)	人均生态承载力/ (hm <sup>2</sup> /人)	人均可利用生态承载力/ (hm <sup>2</sup> /人)
模型值	2.3690	0.3969	0.3488
实际值	2.2586	0.3979	0.3501
相对误差/%	4.89	0.25	0.38

表 12 2017—2026 年人均生态足迹与人均可利用生态承载力预测

年份	人均生态足迹/ (hm <sup>2</sup> /人)	人均可利用生态承载力/ (hm <sup>2</sup> /人)	人均生态赤字/ (hm <sup>2</sup> /人)
2017	2.4370	0.3393	-2.0977
2020	2.5069	0.3300	-2.1769
2023	2.5789	0.3210	-2.2579
2026	2.6529	0.3123	-2.3406

## 4 讨论与结论

### 4.1 讨论

生态足迹方法是基于土地面积的、最具代表性的可持续发展的量化指标,提供了一种直接的、可比的评价资源可持续利用的手段。本文实现了对生态足迹计算中关键参数的本地化修正,但是没有深入对项目计算、账户扩展等方面的研究,从而影响了研究结果的指导意义。而且由于数据的可获取性和统计年鉴的局限性,本文在计算生态足迹时,没有考虑研究区域的贸易数据,影响了计算结果的准确性,需要在以后的工作中做进一步研究。

### 4.2 结论

(1) 在2002—2014年,长株潭地区生态足迹由2002年的2 120.50万 $\text{hm}^2$ 逐年增加到2014年3 181.29万 $\text{hm}^2$ ;可利用生态承载力由2002年的488.02万 $\text{hm}^2$ 逐年增加到2014年493.15万 $\text{hm}^2$ ;同期生态赤字由-1 632.48万 $\text{hm}^2$ 逐年持续增加到-2 688.14万 $\text{hm}^2$ 。研究期间生态足迹一直存在生态赤字。

(2) 通过计算出长株潭地区2002—2014年万元GDP生态足迹、生态适度人口、生态足迹利用效率和生态可持续指数等指标,对长株潭地区的可持续发展状态进行评价。结果表明:2002—2014年长株潭地区的万元GDP生态足迹和生态适度人口呈现逐渐下降的趋势。生态足迹利用效率呈现逐渐快速上升的趋势。生态可持续指数呈前期下降,后期平稳波动趋势,ESI指数具体由2002年0.207 3下降到2007年的0.151 6,之后一直呈平稳波动状态,到2014年ESI指数下降到0.149 8。由此可见研究期间研究区域已经由中等不可持续状态向强不可持续状态发展。

(3) 利用灰色GM(1,1)模型,对研究区域2017—2026年生态赤字情况进行预测。结果表明,该区域到2026年人均生态赤字将上升到-2.340 6 $\text{hm}^2$ 。呼吁当地政府必须采取有效措施改善生态环境。

### 参考文献:

- [1] Rees W E. Ecological footprints and appropriated carrying capacity: what urban economics leaves out[J]. *Environment and Urbanization*, 1992, 4(2): 121-130.
- [2] Global Footprint Network. Ecological Footprint Atlas 2010 [R]. Global Footprint Network, Oakland B Ewing, D Moore, S Goldfinger, A Oursler, 2010.
- [3] Moore J, Kissinger M, Rees W E. An urban metabolism and ecological footprint assessment of Metro Van-

- couver [J]. *Journal of Environmental Management*, 2013, 124(2): 51-61.
- [4] Duro J A, Teixidó-Figueras J., Ecological footprint inequality across countries: The role of environment intensity, income and interaction effects[J]. *Ecological Economics*, 2013, 93(3): 34-41.
- [5] Salvo G, Simas M S, Pacca S A, et al. Estimating the human appropriation of land in Brazil by means of an Input-Output Economic Model and Ecological Footprint analysis[J]. *Ecological Indicators*, 2015, 53: 78-94.
- [6] 张志强, 徐中民, 程国栋. 生态足迹的概念及计算模型[J]. *生态经济*, 2000(10): 8-10.
- [7] 刘宇辉, 彭希哲. 中国历年生态足迹计算与发展可持续性评估[J]. *生态学报*, 2004, 24(10): 2257-2262.
- [8] 黄宝荣, 崔书红, 李颖明. 中国2000—2010年生态足迹变化特征及影响因素[J]. *环境科学*, 2016, 37(2): 420-426.
- [9] 宋豫秦, 王群超. 基于能值生态足迹的浙江省可持续发展分析[J]. *长江流域资源与环境*, 2011, 20(11): 1285-1290.
- [10] 宫继萍, 潘竞虎, 石培基. 基于生态足迹和灰色关联度的甘肃省可持续发展研究[J]. *水土保持研究*, 2011, 18(2): 198-201.
- [11] 王群超. 基于能值生态足迹的浙江省可持续发展分析[J]. *长江流域资源与环境*, 2011, 20(11): 1285-1290.
- [12] 高标, 房骄, 何欢. 吉林省生态足迹动态变化与可持续发展状况评价分析[J]. *农业现代化研究*, 2013, 34(1): 95-99.
- [13] 董朝阳, 伍磊, 童亿勤. 生态足迹视角下的宁波市水资源可持续利用评价[J]. *农业现代化研究*, 2014, 35(3): 349-352.
- [14] 张佳琦, 段玉山, 伍燕南. 基于生态足迹的苏州市可持续发展动态研究[J]. *长江流域资源与环境*, 2015, 24(2): 177-184.
- [15] 胡美娟, 周年兴, 李在军, 等. 南京市三维生态足迹测算及驱动因子[J]. *地理与地理信息科学*, 2015, 31(1): 91-95.
- [16] 秦伟明, 祝安娜, 陈慧, 等. 基于生态足迹模型的新晃县可持续发展能力评价[J]. *环境与可持续发展*, 2015, 40(2): 116-121.
- [17] 刘某承, 李文华, 谢高地. 基于净初级生产力的中国生态足迹产量因子测算[J]. *生态学杂志*, 2010, 29(3): 592-597.
- [18] 刘某承, 李文华. 基于净初级生产力的中国各地生态足迹均衡因子测算[J]. *生态与农村环境学报*, 2010, 26(5): 401-406.
- [19] 郭荣中, 申海建. 基于生态足迹的株洲市可持续发展研究[J]. *湖北农业科学*, 2017, 56(20): 3955-3959.
- [20] 程建权. 城市系统工程[M]. 武汉: 武汉大学出版社, 1999.