

DOI: 10.5846/stxb202010182654

陈义忠, 乔友凤, 卢宏伟, 夏军. 长江中游城市群水-碳-生态足迹变化特征及其平衡性分析. 生态学报, 2022, 42(4): 1368-1380.

Chen Y Z, Qiao Y F, Lu H W, Xia J. Water-carbon-ecological footprint change characteristics and its balance analysis in the Triangle of Central China. Acta Ecologica Sinica, 2022, 42(4): 1368-1380.

长江中游城市群水-碳-生态足迹变化特征及其平衡性分析

陈义忠¹, 乔友凤¹, 卢宏伟^{2,*}, 夏 军^{2,3}

1 河北工业大学经济管理学院, 天津 300401

2 中国科学院地理科学与资源研究所陆地水循环及地表过程重点实验室, 北京 100101

3 武汉大学水资源与水电工程科学国家重点实验室, 武汉 430072

摘要:长江中游城市群是长江经济带三大跨区域城市群支撑之一, 实现该区域高效协同发展对于打造全国重要增长极具有重要意义。基于水-碳-生态足迹评估长江中游城市群资源环境压力, 引入基尼系数分析城市群水-碳-生态足迹与经济、人口、水资源的平衡性, 并构建深度神经网络模型预测水-碳-生态足迹的未来变化趋势。结果表明: 长江中游城市群 2000—2015 年的人均生态足迹由 1.98hm²增至 4.06hm², 人均碳足迹由 0.27hm²增至 0.56hm², 年平均增幅分别为 6.56% 和 6.5%; 人均水资源生态足迹整体呈先下降后上升, 最后趋于平衡的变化趋势; 大部分城市的水资源超载指数为正值, 总体水资源状况良好, 湖南和江西水资源状况优于湖北。长江中游城市群面临巨大资源环境压力, 且大部分来自于碳排放压力。研究期内, 江西省资源环境压力由中上等级升至较高等级; 湖南省资源环境压力基本处于高等级; 湖北省资源环境压力均处于很高等级。城市群人口分布、经济发展、水资源分布与水-碳-生态足迹的匹配关系较差。从生态足迹角度来看, 综合基尼系数均值为 0.456, 处于“一般不匹配”范围, 研究期内呈现缓慢下降趋势, 表明区域间整体协调性增强; 从碳足迹角度来看, 人口、GDP 和水资源基尼系数均有逐年增加的趋势; 综合水资源生态足迹基尼系数达到了 0.421, 处于“一般不匹配”范围; 从资源环境压力角度来看, 水资源基尼系数年均值达到 0.774, 处于“严重不匹配”范围; 综合基尼系数逐年上升, 处于“严重不匹配”范围。而足迹预测结果显示长江中游城市群未来的人均水-碳-生态足迹变化幅度较小, 均值分别为 1.01、0.74、5.04hm², 湖北的整体生态环境仍不理想。通过分析区域水-碳-生态足迹变化特征和发展平衡性, 以为长江中游城市群经济、环境和资源之间的协调发展提供科学依据。

关键词:长江中游城市群; 水-碳-生态足迹; 资源环境压力; 匹配关系

Water-carbon-ecological footprint change characteristics and its balance analysis in the Triangle of Central China

CHEN Yizhong¹, QIAO Youfeng¹, LU Hongwei^{2,*}, XIA Jun^{2,3}

1 School of Economics and Management, Hebei University of Technology, Tianjin 300401, China

2 Key Laboratory of Water Cycle and Related Land Surface Processes, Institute of Geographic Science and Natural Resources Research, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China

3 State Key Laboratory of Water Resources & Hydropower Engineering Sciences, Wuhan University, Wuhan 430072, China

Abstract: Triangle of Central China (TOCC) is one of the three cross regional urban agglomerations in the Yangtze River economic belt. It is significant to realize the regional efficient coordinated development for enhancing important national growth. This study applies footprint family (water, carbon, and ecological footprints) for evaluating the regional resource-

基金项目:国家自然科学基金委重大项目(41890824); 河北省自然科学基金(E2020202117); 河北省普通高等学校青年拔尖人才计划项目(BJ2020019)

收稿日期: 2020-10-18; 网络出版日期: 2021-11-04

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: luhw@igsnr.ac.cn

environment pressure (REP) in the TOCC. The balance association with water, carbon, and ecological footprints can be measured through Gini coefficient from different perspectives of economy, populations, and resources. Future trend of water, carbon, and ecological footprints can be forecasted by a deep neural networks model. Results showed that the regional per capita ecological and carbon footprints kept rising from 1.98hm² to 4.06 hm² and from 0.27hm² to 0.56hm² during the periods, with average annual growth rates of 6.56% and 6.50%, respectively. From 2000 to 2015, the per capita water resources ecological footprint first declined, then increased, finally tended to balance. The water resources performance in most cities was satisfied due to their positive values of water resources overload index, especially in Hunan and Jiangxi. High REP can be observed in the TOCC, which mainly originated from the pressure of carbon emission. The REP in Jiangxi increased from the middle to higher level, and that in Hunan and Hubei was basically at a high level. There existed a poor relationship among water-carbon-ecological footprint and the social—economic performances. From the perspective of ecological footprint, its average comprehensive gini coefficient reached 0.456 with a general mismatch state and a slow downward trend, which indicated an improved overall coordination among regions. In terms of carbon footprint, its population, GDP, and water resource gini coefficients kept rising, which implied that the matching among carbon footprint, economic development, and population size was gradually weakening. The comprehensive gini coefficient reached 0.421 with a general mismatch state when it came to water resources ecological footprint. With respect to REP, its annual average gini coefficient of water resources reached 0.774 that was in the range of serious mismatch, and the comprehensive gini coefficient increased with a serious mismatch state. A steady trend of the per capita water-carbon-ecological footprint in the TOCC can be found according to the outputs from the deep neural networks model, with the averages of 1.01hm², 0.74 hm² and 5.04hm², respectively; but the overall ecological environment quality in Hubei is still unsatisfied. These findings can be expected to provide a scientific basis for achieving the coordinate development among economic activities, environment, and resources in the TOCC.

Key Words: Triangle of Central China; water-carbon-ecological footprint; resource-environment pressure; matching relationship

长江经济带建设是新时期中国三大国家发展战略之一,中游城市群是长江经济带建设的核心之一。然而,长江中游城市群工业化与城镇化的快速发展导致了诸多生态环境问题,如水资源短缺^[1],生态环境遭到破坏^[2-3],耕地面积锐减^[4-5]等,这严重阻碍了长江中游城市群绿色可持续发展。因此,亟需解决资源环境问题以推动长江经济带绿色发展。合理解决该问题的关键在于定量测量城市发展过程对资源环境的影响,而足迹类指标在此方面应用最为广泛。传统单一的足迹指标不能实现对环境的全面评估,不同足迹互为补充且反映出综合资源环境问题,由此产生了足迹家族的概念,其主要包括水足迹、碳足迹和生态足迹。水-碳-生态足迹能够从水圈、大气圈和生物圈 3 个关键的生态系统来追踪人类活动产生的温室气体排放以及淡水资源的消费和污染^[6-7]。

目前,常用的资源环境评价方法包括多指标综合评价法、模型法、足迹法等^[8]。例如,李龙^[9]和郑钧宁^[10]基于多指标综合评价法对资源环境压力进行评估;Duan^[11]和樊胜岳^[12]分别采用 PSR 和 STIRPAT 模型进行度量。但综合评价法的缺点在于评价因子的选取受人为因素影响大;就模型法而言,有的仅提供评价框架(如 PSR 模型),有的提供分析影响因子的模式(如 IPAT 模型),但评价因子的选择仍受人为因素的干扰^[8]。足迹法能够用于客观地评价人类活动对于资源环境的影响,从而实现社会可持续发展,其概念最初源自生态足迹分析法。生态足迹最初由 William 和 Wackernagel 提出并逐渐加以完善,此后国内外众多学者进行了深入的研究,在此基础上又发展形成了水足迹、碳足迹、能源足迹等一系列概念^[13]。在足迹测算维度上,经历了一维、二维和三维足迹的演进过程。三维足迹模型多用于区域自然资本核算,而传统的二维足迹模型则多用于评价区域资源环境压力。在过去的半个世纪里,国内外学者开展了诸多基于足迹家族的资源环境压力研

究。例如:马彩虹^[14]和赵先贵^[15]基于足迹家族对资源环境压力进行评估;Zhang 等^[16]通过计算新疆的水-生态足迹以评估水资源和环境所承受的人为压力;Chen 等^[17]通过核算水-碳-生态足迹全面评估了区域的资源环境压力;韦良焕等^[18]基于足迹家族理论构建资源环境压力评估体系,分析了新疆资源环境压力演变特征。足迹家族法不受主观因素的影响,且考虑了土地和水资源承载力、碳排放等可持续发展问题。然而,现有对于资源环境压力的研究大多是对单个省市^[18-20]或更小尺度^[21-22]的研究,对于城市群研究尺度相对较少。相比较于丰富的足迹核算研究,对于足迹预测的研究偏少。神经网络模型具有很强的非线性拟合能力^[23],采用该模型对长江中游城市群的水-碳-生态足迹进行时间序列的模拟与预测,可为区域的可持续发展提供科学依据和决策参考。此外,自然资源在时空分布上具有不平衡性,区域发展的平衡性对于支撑可持续发展至关重要^[24],因此,迫切需要提出一种判断足迹与经济发展是否协调的方法。基尼系数能够较好的评价区域资源配置及平衡性问题^[25-27]。例如,周芬等^[28]引入水资源分布基尼系数来量化浙江省水资源禀赋和经济要素的匹配程度。杨亚锋等^[29]以基尼系数为主要评价指数,从水资源负载指数、水土资源匹配系数和用水效益等 3 个方面综合考虑水资源空间均衡状况。长江中游城市群是长江经济带的重要组成部分,各区域及各省份之间资源禀赋、环境承载力不同,在经济发展、资源环境约束方面表现出较大的空间异质性^[30],对城市群地区的时空差异研究有助于国家及地方宏观调控政策和区域发展政策的制定^[31]。所以理清不同区域资源环境压力与经济发展之间的关系,制定合理的区域发展战略,有利于长江中游城市群的可持续健康发展。

因此,本文选取长江中游城市群为研究对象,采用足迹家族模型评估城市群水-碳-生态足迹变化特征,运用深度神经网络模型预测水-碳-生态足迹的未来变化趋势,据此剖析城市群资源环境压力;同时引入基尼系数分析水-碳-生态足迹的空间平衡性,以期为长江中游城市群改善生态环境、实现区域资源的有效配置提供理论依据。

1 研究方法

1.1 研究区域概况

长江中游城市群位于为 26° 03'—32° 38' N, 110° 45'—118° 21' E(图 1),以武汉、长沙、南昌为中心城市,包括湖北省、湖南省以及江西省。长江中游城市群属亚热带季风气候,年平均降水量约在 800—1943mm,海拔高度在 20—3105m 之间^[32],承东启西、连南接北,是长江经济带三大跨区域城市群支撑之一,也是实施促进中部地区崛起战略、全方位深化改革开放和推进新型城镇化的重点区域,2014 年国务院印发《关于依托黄金水道推动长江经济带发展的指导意见》,提出“把长江中游城市群建设成为引领中部地区崛起的核心增长极”,由此可见该区域在我国区域发展格局中占有重要地位。2017 年,长江中游城市群土地面积约 32.61 万平方公里,总人口 1.25 亿人,地区生产总值 7.90 万亿元。长江中游城市群以全国 3.4%的土地面积和 9.0%的人口数量创造了 9.6%的经济总量。2020 年 12 月 26 日通过的《长江保护法》彰显了长江经济带绿色及中游地区的发展理念。但随着经济发展和城镇快速崛起,长江中游城市群生态环境问题日益突出,叠加水、大气、土壤、生态等环境介质交织污染的影响,导致水污染、碳排放超标、土地利用失衡等问题,严重制约了城市群绿色发展。与此同时,长江中游城市群人均生态承载力(远小于人

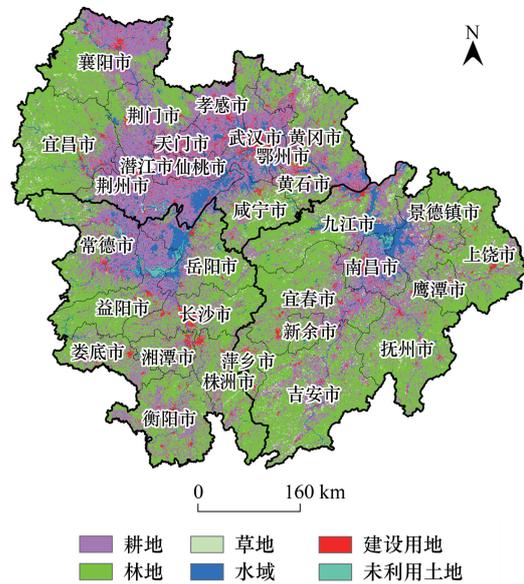


图 1 长江中游城市群位置示意图

Fig.1 Schematic diagram of the location of the city cluster in the Triangle of Central China

均生态足迹)呈现下降趋势,各省域间生态盈亏存在明显的差异^[5,33]。着力解决生态环境与区域资源均衡配置问题,推动长江中游城市群绿色协调发展刻不容缓。水-碳-生态足迹是反映长江中游城市群现有生态环境问题最具代表性的集成足迹成员。因此,亟需厘清长江中游城市群水-碳-生态足迹的演变特征及其与社会经济发展的平衡性,这能够为长江中游城市群的绿色发展模式探索与资源配置提供科学依据。

1.2 足迹家族指标

本文主要从生态足迹、碳足迹、水资源生态足迹 3 个指标来研究长江中游城市群资源环境压力^[34]。

生态足迹代表满足给定人口或特定活动的资源消耗所需要的生物生产性土地面积^[35],主要包括耕地、草地、林地、水域、建设用地和未利用土地六大类。该区域所能提供的生物生产性面积称为生态承载力。

$$EF_e = N \times ef_e = N \times \sum_{i=1}^n (r_j \times a_i) = N \times \sum_{i=1}^n r_j \left(\frac{c_i}{p_i} \right) \quad (1)$$

$$EC_e = N \times ec_e = N \times \sum_{j=1}^6 A_j \times r_j \times y_j (j = 1, 2, \dots, 6) \quad (2)$$

式中, i 为消耗的商品种类; j 表示土地利用类型; r_j 和 y_j 分别为均衡因子和产量因子,其数值参照刘燕等^[36]的结果; p_i 为第 i 种商品的平均生产能力; c_i 为第 i 种商品的人均消耗量; a_i 为人均第 i 种商品换算的土地面积(hm^2); N 为人口总数(人); A_j 为实际人均可利用的第 j 类生产性土地面积(hm^2); EF_e 和 EC_e 为区域总生态足迹和承载力(hm^2); ef_e 和 ec_e 分别为人均生态足迹和承载力($\text{hm}^2/\text{人}$)。

碳足迹是指吸收该区域所排放的二氧化碳所需要的生物生产性土地面积。

$$CF_g = \frac{\text{NCE}}{N} \left(\frac{P_f}{\text{NEP}_f} + \frac{P_g}{\text{NEP}_g} + \frac{P_a}{\text{NEP}_a} \right) \quad (3)$$

$$EC_g = \frac{\text{CA}}{N} \left(\frac{P_f}{\text{NEP}_f} + \frac{P_g}{\text{NEP}_g} + \frac{P_a}{\text{NEP}_a} \right) \quad (4)$$

式中, CF_g 为净碳排放总量(NCE)所产生的人均碳足迹($\text{hm}^2/\text{人}$); EC_g 为人均碳承载力($\text{hm}^2/\text{人}$);CA为碳吸收量(tc/a); P_f 、 P_g 、 P_a 分别表示森林、草地、耕地的碳吸收量在总量中的比例; NEP_f 、 NEP_g 和 NEP_a 分别表示森林、草地和耕地的固碳能力(t/hm^2); N 为人口总数(人)。

水资源生态足迹是指人类生活,生产和自然环境所需水资源面积。

$$EF_w = N \times ef_w = N \times R_w \times \frac{W}{P_w} \quad (5)$$

$$EC_w = N \times ec_w = (1 - \alpha) \times \beta \times R_w \times \frac{Q}{P_w} \quad (6)$$

式中, EF_w 与 EC_w 分别为为水资源总生态足迹和承载力(hm^2); N 为人口数(人); ef_w 与 ec_w 分别为人均水资源生态足迹和承载力($\text{hm}^2/\text{人}$); R_w 为水资源全球均衡因子; W 为人均水资源量消耗量(m^3); P_w 为水资源全球平均产量(m^3/hm^2); β 为水资源产量因子; Q 为区域水资源总量(m^3);现有研究表明地区水资源开发需预留 60% 用于维护生态环境,因此参数 α 取 0.6。

1.3 资源环境压力评价指标体系

基于足迹家族的原理,赵先贵等^[8]提出了由生态压力指数(ecological pressure index, EPI)、温室气体排放指数(GHG emission index, GEI)和水资源压力指数(water pressure index, WPI)综合而成资源环境压力指数(resource-environment pressure index, RPI)。EPI是某一区域生物质足迹与生物承载力的比率,反

映生态环境的可持续性^[37](表1);WPI是区域水资源生态足迹与水资源承载力的比值;GEI为区域碳足迹与碳承载力的比值。

$$\text{RPI} = W_e \times \text{EPI} + W_g \times \text{GEI} + W_w \times \text{WPI} \quad (7)$$

$$\text{EPI} = \frac{EF_e}{EC_e}; \quad \text{GEI} = \frac{CF_g}{EC_g}; \quad \text{WPI} = \frac{EF_w}{EC_w} \quad (8)$$

式中,根据熵权法确定权重 W_e 、 W_g 和 W_w 分别为 0.3330、0.3339 和 0.3331^[18]。

表 1 资源环境压力指数等级划分标准

Table 1 Classification standard of resource-environmental pressure index

等级 Grade	表征状态 State	亚级 Sub grade	RPI	表征状态 State
I	低压力	I a	<0.20	很低
		I b	0.20—0.35	较低
II	中等压力	II a	0.36—0.50	中下
		II b	0.51—0.65	中上
III	高压力	III a	0.66—0.80	较高
		III b	>0.80	很高

RPI: 资源环境压力指数 Resource-environment pressure index

1.4 发展平衡性评价

基尼系数是衡量一个国家或地区居民收入差距的常用指标^[38],介于 0—1 之间,0.4 通常作为“警戒线”^[25]。在本文中,基尼系数的大小反映人口、经济以及资源分布与水-碳-生态足迹要素的匹配程度。一般,基尼系数若低于 0.2 表示“绝对匹配”;0.2—0.29 表示“相对匹配”;0.3—0.39 表示“匹配”;0.4—0.59 表示“一般不匹配”;0.6 以上表示“严重不匹配”。由于人口、GDP 和水资源对于足迹的影响程度同等重要,3 个因子都可作为发展平衡性的评价指标,通过赋予同等重要的权重来计算综合基尼系数,来综合分析长江中游城市群发展平衡性。

$$G_i = 1 - \sum_{i=1}^n (X_i - X_{i-1})(Y_i + Y_{i-1}) \quad (9)$$

$$G_i = \frac{(G_1 + G_2 + G_3)}{3} \quad (10)$$

式中, G_i 为基尼系数; X_i 为人口、GDP、水资源量等影响因素指标的累计百分比; Y_i 为人均水、碳、生态足迹的累计百分比; i 为区域位置序号,且当 $i=1$ 时, (X_{i-1}, Y_{i-1}) 视为 $(0, 0)$; G_i 为综合基尼系数。

本文数据来源于 2001—2016 年《湖北省水资源公报》、《中国能源统计年鉴》、《江西省水资源公报》、《湖南省水资源公报》、《湖北省统计年鉴》、《江西省统计年鉴》和《湖南省统计年鉴》等资料。根据足迹的计算方法和长江中游城市群的实际情况,收集生物资源消费和能源消费两大类数据(表 2)。

表 2 足迹指标评价体系

Table 2 Footprint index evaluation system

产品消费类型 Types of product consumption	土地利用类型 Types of land use	指标细则 Index details
生物资源消费 Consumption of biological resources	草地	牛肉,羊肉,其他肉类(家禽)
	林地	柑橘,其他水果(园林水果),油桐籽,板栗茶叶,木材,竹材
	水域	鱼类,虾蟹类,贝类,其他水产品(养殖)
能源消费 Energy consumption	耕地	小麦,水稻,棉花,蔬菜,猪肉,禽蛋
	化石燃料用地	原油,原煤,汽油,焦炭,柴油,燃料油,液化石油气,煤炭
	建设用地	电力

2 结果分析

2.1 城市群水-碳-生态足迹变化趋势分析

长江中游城市群 2000—2015 年的人均生态足迹整体呈上升趋势,由 2000 年的 1.98hm² 逐年增加至 4.06hm²,增幅 105%,年平均增长率为 6.56%(图 2),其中增长率最大出现在 2004—2005 年(15%)。2000—

2015 年湖北、湖南和江西的人均生态足迹增长率为 133.12%、76.01% 和 149%; 人均生态承载力由 2000 年的 0.26hm^2 下降到 0.25hm^2 , 增幅 -0.04% , 2000—2015 年湖北、湖南和江西的人均生态承载力增幅分别为 0.01% 、 -0.03% 与 -0.08% , 值得注意的是, 湖南省在 2007 年综合改革试验区获批, 江西省 2009 年实施“生态经济区”战略, 使得 2008—2010 年长江中游城市群的生态承载力有所上升; 长江中游城市群人均生态赤字由 2010 年的 1.72hm^2 增加到 3.80hm^2 , 增幅 121.17% , 年平均增长率为 7.35% ; 2000—2015 年湖北、湖南和江西的人均生态赤字增幅分别为 147.81% 、 85.3% 和 139.86% 。生态赤字的不断提高, 说明长江中游城市群的生态需求已经超出了生态系统的承载能力, 人类活动对于自然环境的影响远远超出生态承载力所能承受的范围, 其发展是不可持续的。其中人均生态足迹高值出现在鄂州 (9.22hm^2)、荆门 (7.53hm^2) 和娄底 (6.36hm^2), 较低的有景德镇、九江 ($<2\text{hm}^2$), 其余地区的人均生态足迹均在 $2\text{—}6\text{hm}^2$ 之间; 人均生态承载力较高的有抚州 (0.403hm^2) 和吉安 (0.446hm^2), 武汉最低 (0.074hm^2), 其余地区居中; 人均生态赤字较高的有鄂州 (9.05hm^2)、荆门 (7.18hm^2) 和娄底 (6.12hm^2), 较低的有景德镇 (1.03hm^2)、九江 (1.40hm^2) 和上饶 (1.03hm^2), 其余地区居中。

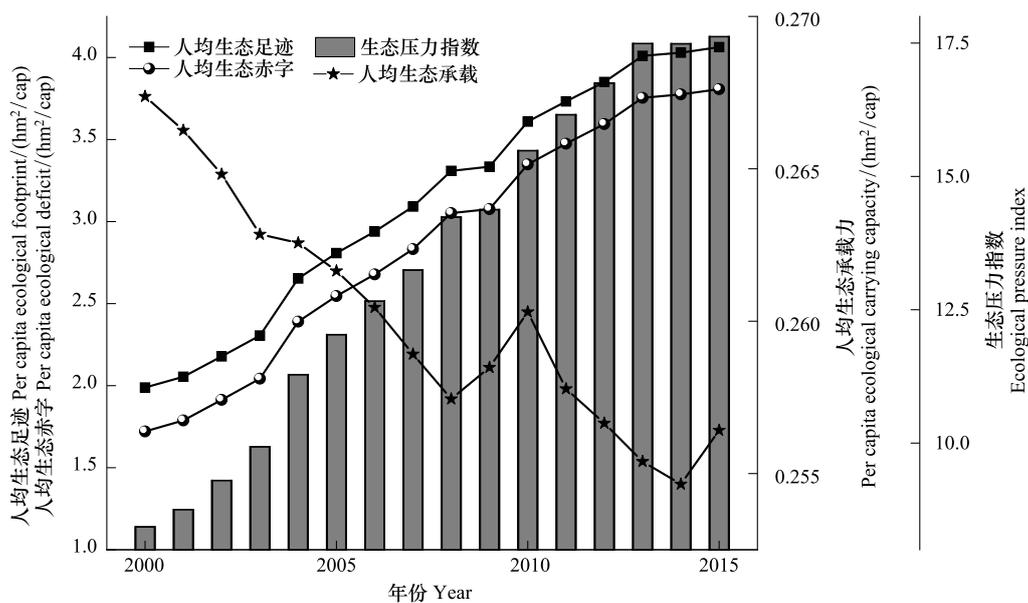


图 2 长江中游城市群生态足迹变化趋势图

Fig.2 Trend of Ecological Footprint in the Triangle of Central China

如图 3 所示, 长江中游城市群 2000—2015 年的人均碳足迹整体呈上升趋势, 由 2000 年的 0.27hm^2 增加至 0.56hm^2 , 增幅 104% , 年平均增长率为 6.5% 。2000—2015 年湖北、湖南和江西的人均碳足迹增幅分别为 94.4% 、 43.1% 和 169.7% ; 人均生态承载力由 2000 年的 0.025hm^2 逐年下降至 2015 年的 0.019hm^2 , 增幅 -21.9% , 年平均增长率为 -1.55% ; 同期湖北、湖南和江西的人均碳承载增幅分别为 1% 、 -36.9% 和 -26.8% ; 人均碳赤字由 2000 年的 1.72hm^2 增加至 3.81hm^2 , 增幅 121.1% , 年平均增长率为 7.56% , 湖北、湖南和江西的人均碳赤字增幅分别为 147.8% 、 85.3% 和 139.8% 。其中人均碳足迹高值区出现在娄底 (1.66hm^2) 和新余 (2.14hm^2), 较低的有黄冈 (0.10hm^2)、荆州 (0.17hm^2)、天门 (0.13hm^2)、仙桃 (0.02hm^2)、长沙 (0.01hm^2) 和抚州 (0.01hm^2), 其中抚州的人均碳足迹 2000—2010 年均处于负值, 整体来说是吸收温室气体的, 处于碳盈余状态; 人均碳承载较高的有抚州 (0.048hm^2)、吉安 (0.047hm^2) 和九江 (0.042hm^2), 荆州、咸宁和南昌均小于 0.005hm^2 , 其余地区的人均碳承载均在 $0.007\text{—}0.033\text{hm}^2$; 人均碳赤字较高的有鄂州 (9.05hm^2)、荆门 (7.18hm^2) 和娄底 (6.12hm^2), 较低的有景德镇 (1.03hm^2)、九江 (1.40hm^2) 和上饶 (1.03hm^2), 其余地区人均碳赤字均在 $2\text{—}6\text{hm}^2$ 之间。长江中游城市群人均碳赤字的逐年增加, 说明碳减排和森林保育工作仍需进一步加

强,尤其重在能源结构调整及清洁能源推广。

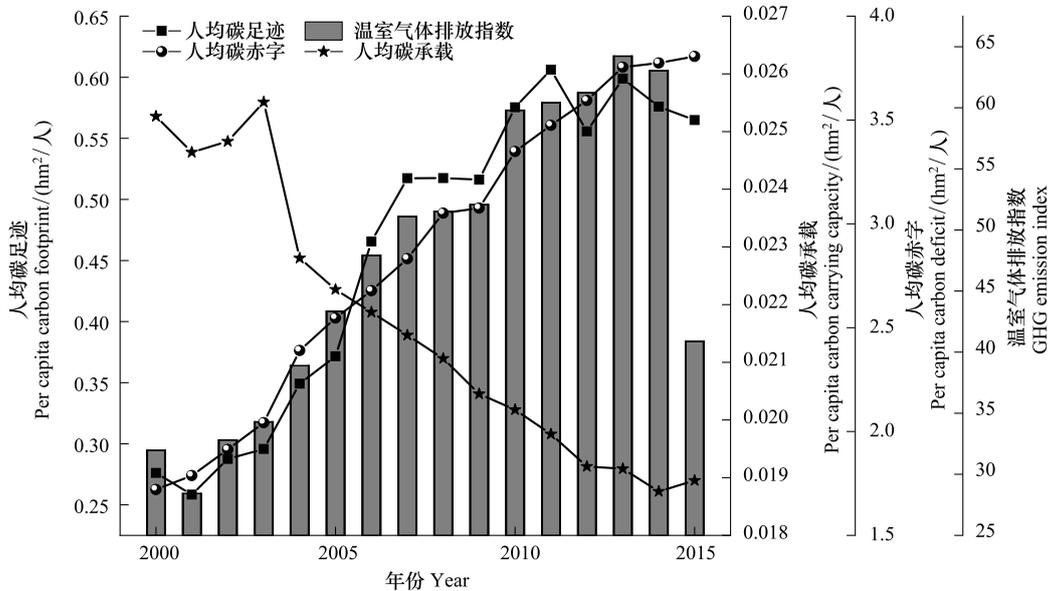


图3 长江中游城市群碳足迹变化趋势图

Fig.3 Trend of carbon footprint changes in the Triangle of Central China

长江中游城市群 2000—2015 年的人均水资源生态足迹整体呈先下降后上升,最后趋于平衡的变化趋势(图 4)。增长期主要出现在 2002—2008 年,这主要是由于该时期生产用水量和生活用水量急剧增加(分别增加 $5.22 \times 10^8 \text{ m}^3$ 和 $3.26 \times 10^8 \text{ m}^3$)。长江中游群的人均水资源生态足迹均值介于 0.000264 — 0.02814 hm^2 。就 2000—2015 年的人均水资源承载力而言,其在 0.4465 — 13.1512 hm^2 之间波动变化,大部分的高值出现在 2002 年、2010 年和 2012 年。长江中游城市群 2000—2015 年各城市的人均水资源生态足迹变动存在一定差异,人均水资源承载力均有较大的波动。湖北省 2000—2011 年的人均水资源生态足迹变化较为缓慢,2011 年后开始显著增加,其中武汉市的人均水资源生态足迹变化尤为明显。湖南省人均水资源生态足迹的增长期为 2003—2007 年、下降期为 2000—2002 年、稳定期为 2008—2015 年,其中长沙和株洲的人均水资源生态足迹均处于高值。这说明湖南省 2007 年初启动的全省节水型社会试点工作开始收到成效。长江中游大部分城市的水资源超载指数均值为正值,这说明这些城市水资源生态良好,其中抚州和上饶的超载指数均值超过 10;咸宁、吉安、景德镇、萍乡、宜春和鹰潭的超载指数均值介于 5 和 10 之间。总体而言,长江中游城市群水资源生态环境处于良好状态。处于南部的湖南和江西整体上处于水盈余状态,而处于北部的湖北的多个城市的水资源出现超载情况,包括荆门市 (-0.4949 hm^2)、天门市 (-0.2952 hm^2)、武汉 (-0.1762 hm^2)、襄樊市 (-0.3114 hm^2)、孝感市 (-0.3945 hm^2)。除武汉市,其他城市的经济发展还处于发展中水平,但大部分城市出现水赤字状况。根据生态补偿理论,水赤字的区域应对水盈余的区域进行生态补偿^[5],因此处于北部的湖北省应该给予南部的湖南省和江西省一定的生态补偿。

足迹系列数据的计算依赖于大量的基础统计数据,且计算较为复杂。受限于城市规模和统计范围的限制,部分数据会存在缺失。为此,本文构建了深度神经网络反演模型,具体的建模过程详见文献^[39]。该模型的输入为人口、GDP、能耗、水耗等要素,经过四个隐含层后得到水-碳-生态反演结果;在训练模型时,采用反向传播损失函数的倒数来优化每一层的权重值与偏置值,采用均方差作为损失函数。基于反演指标的模拟,预测了长江中游城市群未来的水-碳-生态足迹变化趋势(图 5)。预测结果表明:长江中游城市群未来的人均水-碳-生态足迹变化较为平稳,均值分别 1.01 、 0.74 hm^2 和 5.04 hm^2 。湖北的整体的生态环境质量依然不容乐观,其人均水-碳-生态足迹高达 1.13 、 0.82 hm^2 和 6.74 hm^2 ,尤其是鄂州市和襄樊市。

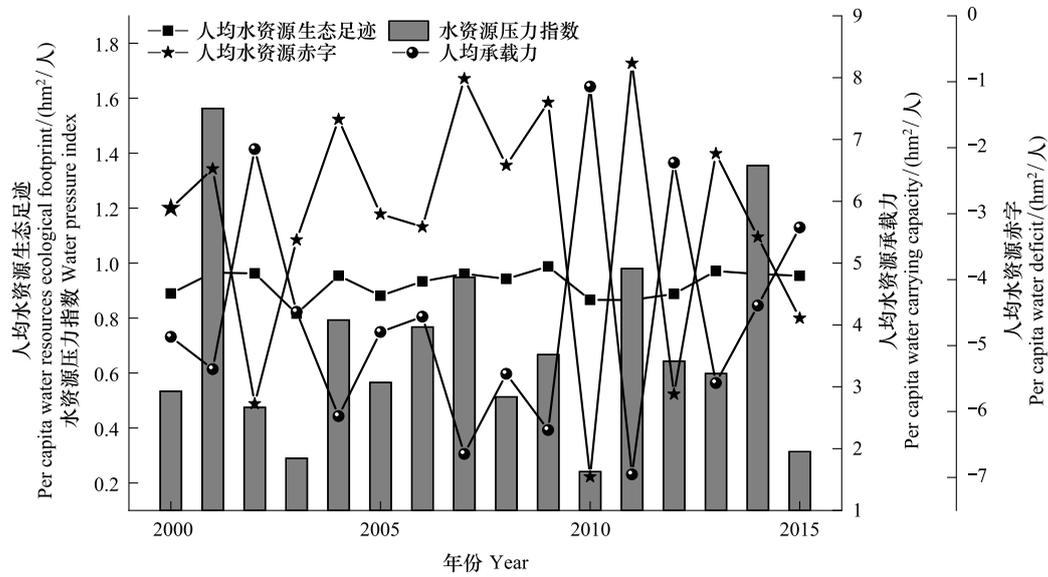


图4 长江中游城市群水资源生态足迹变化趋势图

Fig.4 Trend of water resources ecological footprint changes in the Triangle of Central China

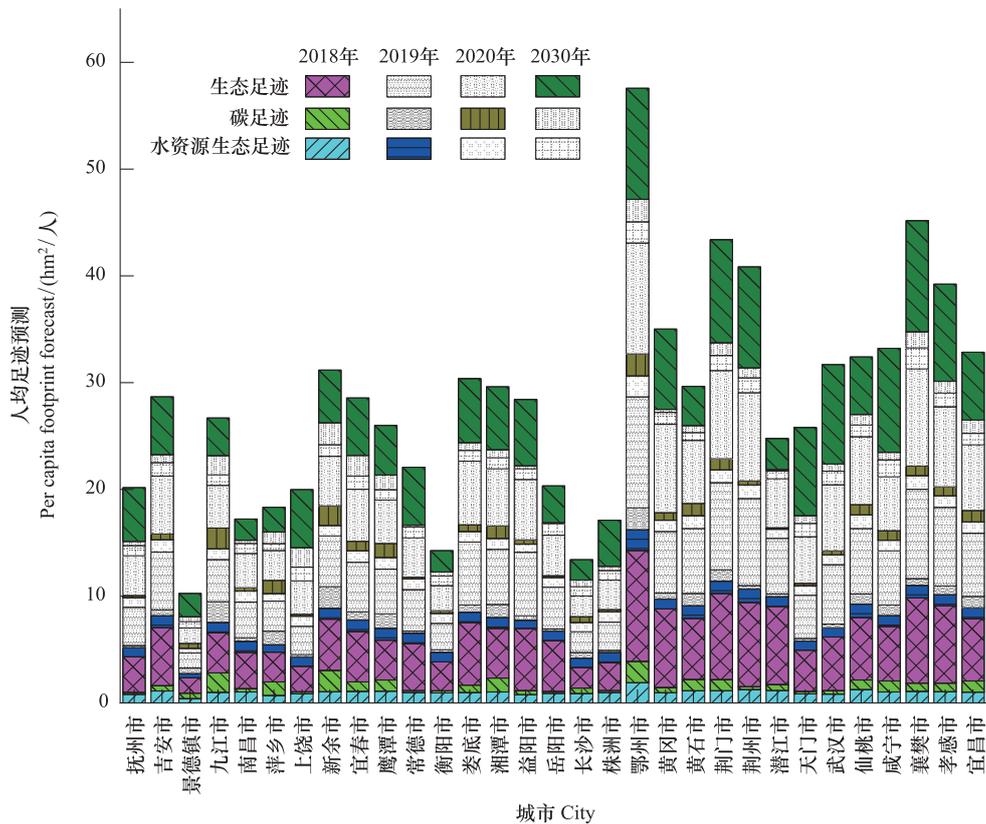


图5 长江中游城市群水-碳-生态足迹未来变化趋势

Fig.5 Future trends of water-carbon-ecological footprint of the Triangle of Central China

2.2 城市群资源环境压力分析

2000—2015 年长江中游城市群水资源压力指数、温室气体排放指数、生态压力指数和资源环境压力指数

年均值变化如图 6 所示。其中,水资源压力指数除 2001 年和 2014 年大于 1,其余年份的水资源压力指数波动幅度较小;温室气体排放指数和生态压力指数稳定上升,2000—2014 年温室气体排放指数增幅为 97.28%,2015 年出现明显下降;2000—2015 年生态压力指数增幅为 109%;2000—2014 年资源环境压力指数增幅为 100.12%,2015 年出现明显下降,这主要温室气体排放指数下降所造成的。相比较于水资源压力指数与生态压力指数,温室气体排放指数基数较大(长江中游城市群工业密集,城镇化速度加快),由式(7)、(8)可以看出资源环境压力由三种压力指数加权而成,图中温室气体排放指数和资源环境压力指数的变化趋势基本一致,说明长江中游城市群较高的资源环境压力是大部分来自于碳排放压力。各地区应当加速能源消费结构转型,推进产业发展和能源替代革命,谨慎发展高碳、高耗能产业,进一步完善碳减排的标准和政策体系。

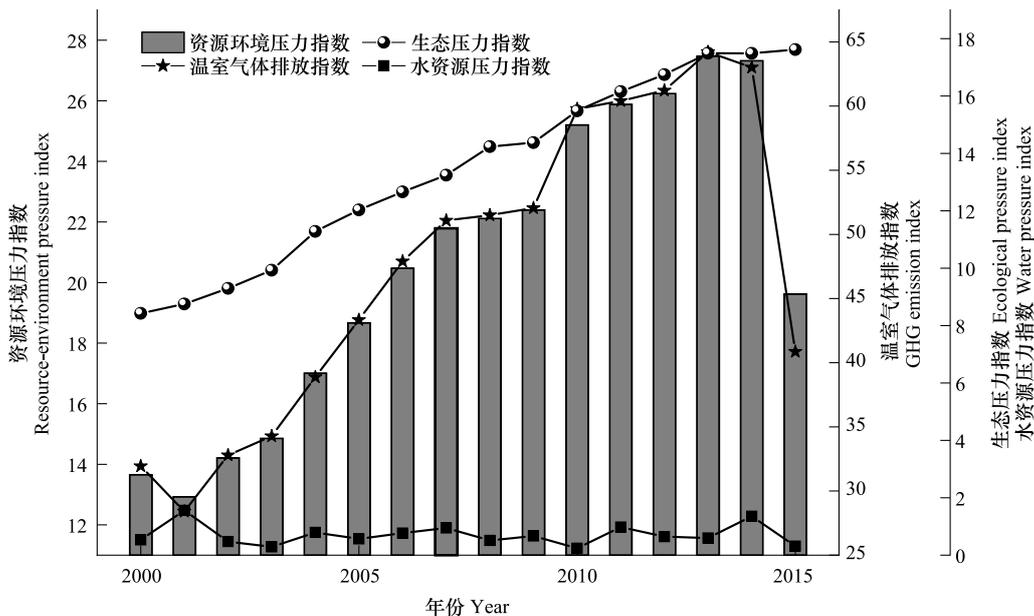


图 6 长江中游城市群不同压力变化趋势图

Fig.6 Trends of different pressure changes in the Triangle of Central China

长江中游城市群 2000—2015 年资源环境压力空间变化如图 7 所示,由此可知该地区资源环境压力整体上呈现“西高东低”的局面。具体而言,2000—2015 年,江西省资源环境压力由中上等级升至高等级,年增幅达到 6.5%。其中 2000—2003 年江西省的资源环境压力处于中上等级;2004—2005 年处于较高等级,而 2006 年以后资源环境压力急剧增加,达到高等级。对江西省资源环境压力增加贡献率较为显著的城市包括南昌市(资源环境压力年均值达到 2.13)、萍乡市(资源环境压力年均值达到 1.93)和新余市(资源环境压力年均值达到 2.43)。而抚州市(资源环境压力年均值达到 0.15)和吉安市(资源环境压力年均值达到 0.31)处于低压力等级。2000 年湖南省资源环境压力处于较高等级,2001 年后,湖南省的资源环境压力一直处于高等级,年增幅达到 4.1%。其中娄底市和湘潭市的资源环境压力较大,其年均值分别达到 2.39 和 2.02。然而,湖北省的资源环境压力均处于高等级,年均值达到 3.05。这主要是由于鄂州市(资源环境压力年均值达到 9.17)、潜江市(资源环境压力年均值达到 6.96)和武汉市(资源环境压力年均值达到 8.95)具有极高资源环境压力。以上结果表明:长江中游城市群的资源环境压力巨大,需要予以重视。今后的发展需要坚持绿色发展,在生态文明建设中需要着重处理好 3 个方面的关系:一是人与自然的关系,珍惜良好的自然环境,严格按照生态规律办事;二是发展与保护的关系,在经济高速发展中需要以保护生态环境为重要前提;三是生态文明建设与发展方式的关系,要大力发展低碳能源技术,全面提高全要素生产率。

2.3 长江中游城市群发展平衡性分析

城市群发展过程中的能源与生物资源的消费导致了水-碳-生态足迹(环境足迹),由此增加了区域资源环

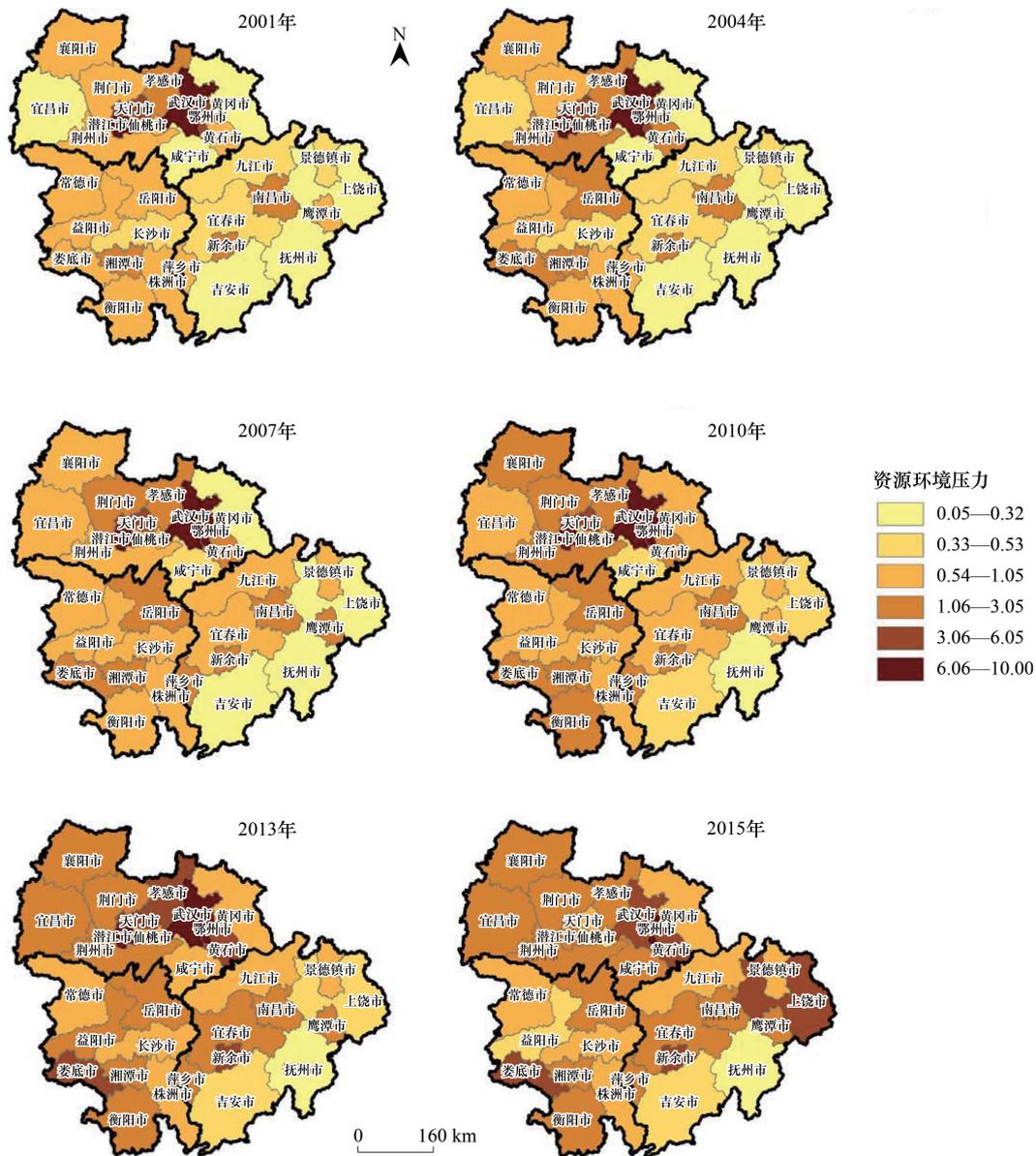


图 7 长江中游城市群 2000—2015 年资源环境压力的空间变化

Fig.7 Spatial changes of resource environmental pressure in the Triangle of Central China from 2000 to 2015

境压力。研究城市群发展中的水-碳-生态足迹与经济、人口、资源等要素的匹配特征能够刻画区域发展平衡性,在一定程度上促进城市群的水资源利用、碳减排和生态环境保护。本文以 2000—2015 年的水-碳-生态足迹数据为基础,选取 GDP、人口、水资源 3 个代表性社会经济因子刻画长江中游城市群发展平衡性。其中,环境足迹与 GDP 的匹配度反映一定比例的资源占用需要贡献相应比例的 GDP,描述环境足迹与经济发展之间的匹配程度;环境足迹与人口的匹配度表示不同地区间人均水资源利用、碳排放、生态占用的差异性;环境足迹与水源的匹配度凸显了不同地区间水资源利用、碳排放、生态占用与水资源自然分布的匹配程度。

在生态足迹方面,GDP 基尼系数均值达到 0.457,处于“一般不匹配”范围内。由图 8 可以看出:2000—2015 年 GDP 基尼系数基本呈现下降趋势,这说明随着《关于促进中部地区崛起的若干意见》的提出以及战略地位的提升,长江中游城市群生态足迹与区域经济协调性不断加强;人口基尼系数均值达到 0.395,处于“匹配”范围,且近年来两者匹配性不断好转;水资源基尼系数均值为 0.516,处于“较不匹配”范围,这是因为城市

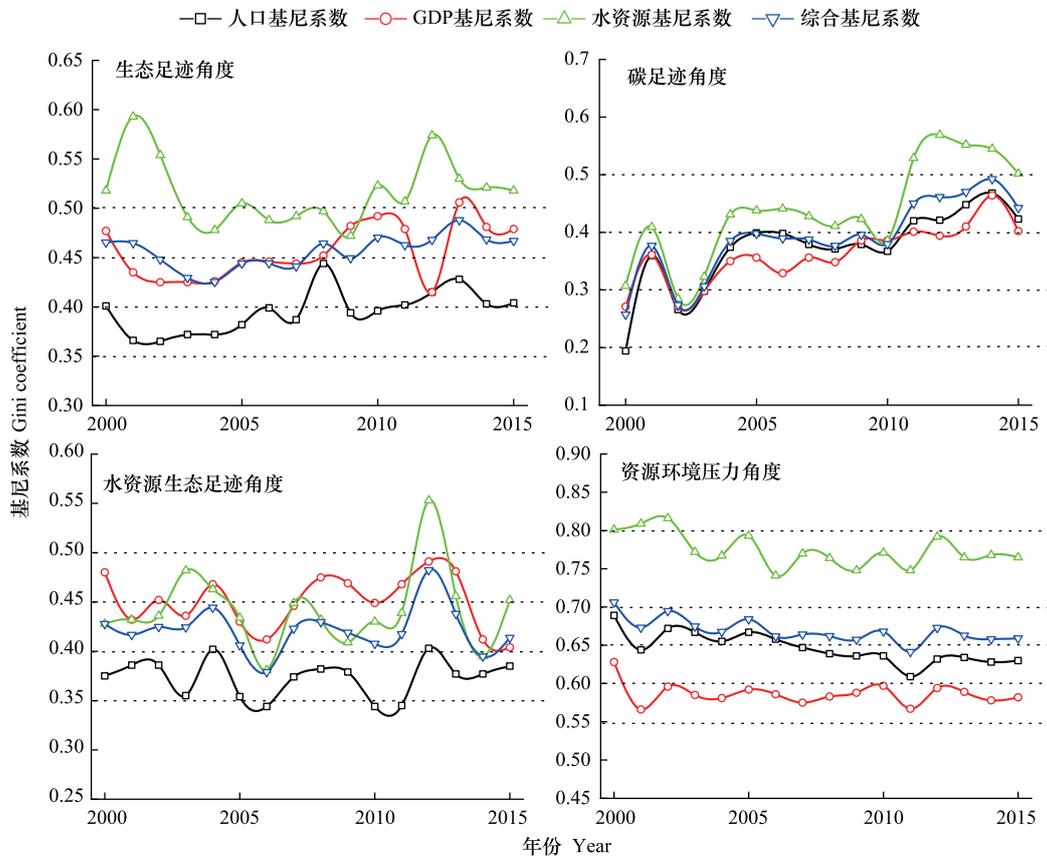


图8 长江中游城市群不同角度基尼系数变化

Fig.8 Gini coefficient changes from different angles in the Triangle of Central China

间水资源总量差异较大;综合基尼系数均值为 0.456,处于“一般不匹配”范围,2000—2015 年呈现缓慢下降趋势,这说明长江中游城市群区域间整体协调性逐渐上升。值得注意的是,GDP 基尼系数和水资源基尼系数均处于警戒值以上,而人口基尼系数则在 2011 后才高于警戒值。从碳足迹角度来看,人口基尼系数、GDP 基尼系数和水资源基尼系数有逐年增加的趋势。GDP、人口基尼系数 2000—2010 年在警戒值 0.4 以下,处于“匹配”范围,2011—2015 年均超过了警戒值,处于“一般不匹配”范围,说明碳足迹与经济发展、人口之间的匹配性逐渐减弱,这与湖北省和湖南省存在较高的第二产业比例,江西省存在相对较高的第一产业比例有关;水资源基尼系数大部分年份处于“一般不匹配”和“较不匹配”范围,而且连年呈现上升态势,主要是由于水资源总量变动幅度较大所致;综合基尼系数 2000—2015 年逐年上升,说明碳足迹与经济、人口、资源的匹配性降低。从水资源生态足迹角度来看,GDP 基尼系数年均值为 0.450,这说明水资源生态足迹与区域经济增长的匹配性较差,属于“一般不匹配”范围;人口基尼系数整体上变动幅度较小(年平均值为 0.373),基本在警戒值 0.4 以下,属于“匹配”范围;水资源基尼系数年均均为 0.442,除 2006 和 2014 年,其处于“匹配”范围,其他年份的基尼系数均超过警戒值 0.4,2012 年更是高达 0.553(处于“较不匹配”范围)。这主要是由于这些年份的降水量变化较大,而水资源生态足迹相对稳定,从而造成了水资源数量与水资源生态足迹时间上的不匹配。整体上来看,长江中游城市群人口分布、经济发展以及资源环境与水资源生态足迹的关系并不协调(综合水资源生态足迹基尼系数达到 0.421),发展关系并不对应。从资源环境压力角度来看,GDP 基尼系数年均均为 0.586,处于“一般不匹配”范围;人口基尼系数整体上变化幅度较小,但年均值为 0.646,处于“严重不匹配”范围;水资源基尼系数年均值达到 0.774,处于“严重不匹配”范围;综合基尼系数逐年上升,处于“严重不匹配”范围,说明长江中游城市群近年来各区域间的资源环境压力与经济发展、人口分布以及自然资源的匹配性变低,应当

通过调整产业结构、进行区域间资源调配等措施以增强其匹配性。

3 结论

基于 2000—2015 年面板数据,利用足迹家族原理,从水-碳-生态足迹分析了长江中游城市群的资源环境压力和发展平衡性,结论如下:(a)长江中游城市群人均碳足迹和生态足迹基本以年增幅为 6.5% 的趋势增加且明显超载;人均水资源生态足迹整体上变化浮动较大,但基本在可承受范围之内;长江中游城市群未来的人均水-碳-生态足迹变化较为平稳。但湖北的整体的生态环境质量依然不容乐观。(b)从 2000 年到 2015 年,长江中游城市群资源环境压力逐年增高。从空间上来看,2000—2015 年,江西省资源环境压力由中上等级(Ⅱ_b)升至较高等级(Ⅲ_b),湖南 2000 年的资源环境压力处于较高等级(Ⅲ_a);湖北省的资源环境压力均处于很高等级(Ⅲ_b)。(c)2000—2015 年水资源压力指数波动范围不大;生态压力指数呈逐年递涨趋势,增幅为 109%;温室气体排放指数远超于水资源压力指数、生态压力指数,说明资源环境压力在很大程度上是碳排放压力过大造成的。(d)长江中游城市群水-碳-生态足迹在空间分布上并不平衡。生态足迹角度处于“一般不匹配”状态;碳足迹角度,人口、GDP 和水资源基尼系数均有逐年增加的趋势;水资源生态足迹角度处于“一般不匹配”状态。资源环境压力角度处于“严重不匹配”范围。(e)降低长江中游城市群的资源环境压力根本措施在于控制 GHG 排放强度。该区域应积极调整能源消费结构,大力发展清洁能源,加强森林保育,提高碳汇能力以降低 GHG 排放。各地区之间应加强协作沟通促进区域经济协调发展,实现区域资源的有效配置,促进长江中游城市群健康有序发展。

参考文献 (References):

- [1] 杨敏,毛德华,刘培亮,刘文. 1951—2015 年洞庭湖水沙演变及人类活动对径流影响的定量评估. 中国水土保持, 2019, (1): 38-43.
- [2] 王伟,张阿曼,李怡. 基于区域梯度式学习情景的长江经济带环境治理研究. 中国环境管理, 2018, 10(6): 113-120.
- [3] 王坤,何军,陈运帷,姚瑞华,郑丙辉,姜霞. 长江经济带上下游生态补偿方案设计. 环境保护, 2018, 46(5): 59-63.
- [4] 刘殿锋,周泊远,何建华,孔雪松,刘耀林. 空间交互视角下中国城市群耕地变化影响因素分析. 农业工程学报, 2019, 35(16): 274-283.
- [5] 杨一昀,卢宏伟,梁东哲,陈义忠,田沛佩,夏军. 基于三维生态足迹模型的长江中游城市群平衡性分析与生态补偿研究. 生态学报, 2020, 40(24): 9011-9022.
- [6] 方恺. 足迹家族: 概念、类型、理论框架与整合模式. 生态学报, 2015, 35(6): 1647-1659.
- [7] Galli A, Wiedmann T, Ercin E, Knoblauch D, Ewing B, Giljum S. Integrating ecological, carbon and water footprint into a "Footprint Family" of indicators: definition and role in tracking human pressure on the planet. Ecological Indicators, 2012, 16: 100-112.
- [8] 赵先贵,赵晶,马彩虹,肖玲,申焯红. 基于足迹家族的广西壮族自治区资源与环境压力评价. 中国土地科学, 2016, 30(3): 71-77.
- [9] 李龙,吴大放,刘艳艳,冯兆华. 多功能视角下县域资源环境承载能力评价——以湖南省宁远县为例. 生态经济, 2020, 36(8): 146-153.
- [10] 郑钧宁,徐红. 迁入地资源环境压力指标体系构建与评价——以贵州省纳雍县为例. 测绘通报, 2020, (8): 126-130.
- [11] Duan L S, Xiang M S, Yang J, Wei X H, Wang C J. Eco-environmental assessment of earthquake-stricken area based on pressure-state-response (P-S-R) model. International Journal of Design & Nature and Ecodynamics, 2020, 15(4): 545-553.
- [12] 樊胜岳,刘天文,周宁. 基于 STIRPAT 模型的内蒙古沙漠化地区环境压力分析. 中国沙漠, 2019, 39(3): 117-125.
- [13] Fang K, Heijungs R, de Snoo G R. Theoretical exploration for the combination of the ecological, energy, carbon, and water footprints: overview of a footprint family. Ecological Indicators, 2014, 36: 508-518.
- [14] 马彩虹,赵晶. 基于足迹家族的青海省资源环境压力定量评估. 应用生态学报, 2016, 27(4): 1248-1256.
- [15] 赵先贵,赵晶,马彩虹,肖玲,李爱英. 基于足迹家族的甘肃省生态文明建设评价. 干旱区研究, 2016, 33(6): 1254-1261.
- [16] Zhang P, Deng M J, Long A H, Deng X Y, Wang H, Hai Y, Wang J, Liu Y D. Coupling analysis of social-economic water consumption and its effects on the arid environments in Xinjiang of China based on the water and ecological footprints. Journal of Arid Land, 2020, 12(1): 73-89.
- [17] Chen Y Z, Lu H W, Yan P D, Yang Y Y, Li J, Xia J. Analysis of water-carbon-ecological footprints and resource-environment pressure in the Triangle of Central China. Ecological Indicators, 2021, 125: 107448.
- [18] 韦良焕,杨茜,鞠美庭,赵先贵. 基于足迹家族的新疆资源环境压力评估. 生态经济, 2017, 33(11): 167-171.
- [19] 王佳韡,祁新华,伍世代. 中国资源环境与区域发展关系演化: 脉络、局限与趋势. 生态学报, 2019, 39(24): 9408-9415.

- [20] 赵先贵, 赵晶, 马彩虹, 肖玲, 马彩芳, 王晓宇. 基于足迹家族的云南省资源与环境压力评价. 生态学报, 2016, 36(12): 3714-3722.
- [21] 谭琨, 严直慧, 赵祖军, 普军伟, 李思楠, 苗培培, 赵筱青. 基于模糊评价的喀斯特山区文山市资源环境承载力评价. 水土保持研究, 2021, 28(1): 218-227.
- [22] 郝汉舟, 郑威, 钟学斌, 汤民, 陈薇伊. 武汉市城市化过程中资源环境压力测度与分析. 长江流域资源与环境, 2017, 26(12): 2040-2048.
- [23] 胡振, 龚薛, 刘华. 基于 BP 模型的西部城市家庭消费碳排放预测研究——以西安市为例. 干旱区资源与环境, 2020, 34(7): 82-89.
- [24] 杨屹, 樊明东. 中国丝绸之路经济带沿线省份生态足迹时空差异及公平性分析. 生态学报, 2019, 39(14): 5040-5050.
- [25] 杨展, 胡晓, 陈饶, 任晓晖. 我国基层医疗卫生资源配置公平性研究. 中国卫生资源, 2017, 20(2): 106-109, 122-122.
- [26] 黄和平. 基于多角度基尼系数的江西省资源环境公平性研究. 生态学报, 2012, 32(20): 6431-6439.
- [27] Ma G, Li X, Zheng J P. Efficiency and equity in regional coal de-capacity allocation in China: a multiple objective programming model based on gini coefficient and data envelopment analysis. Resources Policy, 2020, 66: 101621.
- [28] 周芬, 魏婧, 王贝, 王丽婷. 浙江省区域水资源承载力分析及强载措施研究. 水利规划与设计, 2020, (8): 39-43, 67-67.
- [29] 杨亚锋, 巩书鑫, 王红瑞, 赵自阳, 杨博. 水资源空间均衡评估模型构建及应用. 水科学进展, 2021, 32(1): 33-44.
- [30] 崔奇, 俞海, 王勇, 李海英, 赵子君. 长江经济带绿色发展: 关于状态、特征与制约的文献综述. 环境与可持续发展, 2020, 45(3): 79-85.
- [31] 周克昊, 刘艳芳, 谭荣辉. 长江中游城市群综合发展水平时空分异研究. 长江流域资源与环境, 2014, 23(11): 1510-1518.
- [32] 沈威, 鲁丰先, 秦耀辰, 谢志祥, 李阳. 长江中游城市群城市生态承载力时空格局及其影响因素. 生态学报, 2019, 39(11): 3937-3951.
- [33] 张津瑞, 施国庆. 长江中游城市群生态承载力差异的比较研究. 长江流域资源与环境, 2020, 29(8): 1694-1702.
- [34] 方恺. 足迹家族研究综述. 生态学报, 2015, 35(24): 7974-7986.
- [35] Wood R, Garnett S. An assessment of environmental sustainability in Northern Australia using the ecological footprint and with reference to Indigenous populations and remoteness. Ecological Economics, 2009, 68(5): 1375-1384.
- [36] 刘燕, 何有华, 孙浩峰, 周建海. 陇西县 2015 年生态足迹计算与发展能力分析. 环境生态学, 2020, 2(9): 61-65.
- [37] 赵先贵, 马彩虹, 高利峰, 韦良焕. 基于生态压力指数的不同尺度区域生态安全评价. 中国生态农业学报, 2007, 15(6): 135-138.
- [38] Semieniuk G, Yakovenko M V. Historical evolution of global inequality in carbon emissions and footprints versus redistributive scenarios. Journal of Cleaner Production, 2020, 264: 121420.
- [39] 刘林钰, 张永军, 李彦胜, 刘欣怡, 万一. 基于深度学习的华东地区 PM_{2.5} 浓度遥感反演. 环境科学, 2020, 41(4): 1513-1519.