

引用格式: 陈义忠, 乔友凤, 郝灿, 等. 长江中游城市群生态足迹指标与社会经济发展的适配性[J]. 资源科学, 2022, 44(10): 2137–2152. [Chen Y Z, Qiao Y F, Hao C, et al. Coordination between ecological footprint index and socioeconomic development of the urban agglomeration in the middle reaches of the Yangtze River Basin[J]. Resources Science, 2022, 44(10): 2137–2152.] DOI: 10.18402/resci.2022.10.15

长江中游城市群生态足迹指标与社会经济发展的适配性

陈义忠¹, 乔友凤¹, 郝 灿¹, 卢宏伟², 彭 贺¹, 夏 军^{3,2}

(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:生态足迹是量化区域自然资本利用可持续性的关键指标。本文运用三维生态足迹模型评估长江中游城市群2000—2015年的可持续发展情况, 结合非均衡指数和环境库兹涅兹曲线分析生态足迹指标与社会经济发展的适配性。研究表明: ①长江中游城市群人均生态承载力下降而人均三维生态足迹不断增大(增幅6.81%), 区域生态赤字较为严重; 其中, 长株潭城市群和环鄱阳湖城市群人均三维生态足迹的变化拐点分别出现在2007年和2009年; 区域草地与耕地的资本存量消耗量(足迹深度)不断提升, 而林地和水域的资本流量(足迹广度)更新速度能够满足资源消费需求; 总体来看, 长江中游城市群资本存量损耗严重(但优于成渝和长三角城市群), 环鄱阳湖城市群自然资本可持续利用空间优于武汉城市圈和长株潭城市群。②足迹广度与足迹深度存在地域互补性, 即资源富饶的地区一般有较强的足迹广度和较低的足迹深度。聚类分析结果表明: 荆门、咸宁、襄阳等地区足迹广度大而足迹深度小, 其自然资本利用格局较优; 而武汉、鄂州、黄冈等地区而足迹广度小足迹深度大, 其生态可持续性差。③长江中游城市群人均三维生态足迹与水资源、人口的匹配度较差, 与GDP匹配度较高; 此外, 研究发现当城市群城镇化率达到某一阈值时, 其与人均三维生态足迹和足迹深度关系可能发生转变: 武汉城市圈、长株潭城市群和环鄱阳湖城市群的人均三维生态足迹与城镇化率间均呈现倒“U”型特征; 除环鄱阳湖城市群(城镇化率上升, 足迹深度增加)外, 武汉城市圈与长株潭城市群足迹深度与城镇化率符合环境库兹涅兹曲线的特点。研究结果能够为实现城市群自然资本可持续利用及绿色发展提供理论支持。

关键词: 长江中游城市群; 自然资本利用; 生态足迹; 城镇化率; 关联特征

DOI: 10.18402/resci.2022.10.15

1 引言

城市群是区域经济发展要素和生产要素在空间上的优化组合^[1]。长江通道作为中国国土开发最重要的东西轴线, 具有重要的战略地位。其中, 长江中游城市群地跨湖北、湖南、江西三省, 承东启西, 连接南北, 被定位为中国经济新增长极、中西部

新型城镇化先行区和“两型”社会建设引领区。然而, 自然资本的过度消耗及人口经济的高度密集导致了长江中游城市群生态脆弱、环境污染等问题, 严重制约了其社会经济发展进程^[2]。如何正确处理城市群发展进程中生态环境质量与社会经济适配性, 成为当前迫切需要解决的关键问题。

收稿日期 2022-04-07; 修订日期: 2022-07-15

基金项目: 国家自然科学基金青年基金项目(42107479); 国家自然科学基金重大项目(41890824); 2022年度中国科协科技智库青年人才计划项目(20220615ZZ07110045); 河北省软科学研究专项(22554204D)。

作者简介: 陈义忠, 男, 福建连江人, 讲师, 研究方向为区域可持续发展与资源环境管理。E-mail: 2019075@hebut.edu.cn

通讯作者: 卢宏伟, 女, 吉林延边人, 研究员, 研究方向为不确定性水资源管理、变化环境下的流域系统管理以及环境系统分析等方面。E-mail: luhw@jgsnrr.ac.cn

生态足迹理论将复杂的城市化过程简化为生态空间供需平衡问题,是协调城市群绿色发展与生态环境保护关系的一种有效方法,它能够揭示人类活动造成的资源环境压力及环境变化(如土地利用结构变化、土地退化、水污染、自然资本耗竭等)^[3]。自然资本是指自然界中自然资源的存量及其能够为人们带来利益或服务的流量^[4,5]。生态足迹是量化区域自然资本利用可持续性的重要指标,但传统生态足迹模型忽略了自然资本存量恒定对维持生态系统结构平衡与区域可持续发展所起的关键作用^[6]。为此,Niccolucci等^[7]创建了三维生态足迹模型,通过引入足迹深度和广度揭示人类活动对于资本存量的消耗及资本流量的占用程度。方恺等^[8]在2012年将三维生态足迹模型引入国内,用于分析不同地类之间的自然资本利用情况。国家、省市、区县尺度下三维生态足迹驱动的土地自然资本研究也逐渐丰富起来^[9-11],而城市群尺度相关的扩展性研究尚不多见。围绕城市群展开的研究多聚焦于经济空间格局演变^[12]、土地利用格局演变及驱动力分析^[13]、产业结构演变及政策取向分析^[14]、区域创新能力差异^[15]等。此外,社会经济-生态环境系统间作用机制错综复杂,社会经济快速发展带来产业结构升级、资源利用效率提升的同时,伴随着能源大量消耗、建设用地扩张、资源短缺等生态环境问题^[16,17],迫切需要依据长江中游城市群的生态环境质量与发展模式,探索城市群可持续发展的适应性对策。目前国内外学者对于生态环境与社会经济发展的适配性研究已逐渐由定性分析向定量评价方向转变,并基于不同视角提出了大量关于两者交互关系的评价模型^[18]。例如,环境库兹涅茨曲线(environmental Kuznets curve, EKC)能够揭示区域生态环境质量与社会经济发展的耦合关系^[18,19],而系统动力学模型可以刻画两者间的互馈机制^[20];非均衡指数、基尼系数等方法用于反映社会经济-生态环境系统间的匹配性^[21,22],而耦合协调度模型能够分析两者间的协调发展类型^[23]。可见当前对于生态环境与社会经济发展关系的研究已较为深入,但基于三维生态足迹模型,从土地自然资本可持续利用角度反映区域的生态环境质量,并分析其与社会经济发展适配性的研究明显不足。

本文应用三维生态足迹模型分析长江中游城市群2000—2015年的土地自然资本耗竭程度及其分类特征;引入非均衡指数解析市域三维生态足迹与人口、GDP和水资源的匹配特征,结合EKC探究三维生态足迹、足迹深度与城镇化间的关联特征,以为促进长江中游城市群生态环境与社会经济协同发展提供思路与理论基础。

2 研究区、数据与方法

2.1 研究区域

长江中游城市群共包含3个子城市群,分别为武汉城市圈、长株潭城市群及环鄱阳湖城市群^[24](图1),是推进新型城镇化和中部地区崛起的重点区域。2019年,长江中游城市群以全国约3.60%的土地面积,产出了全国约9.50%的经济总量,集聚了全国约9.40%的常住人口。区域内地形起伏较为平缓,空间上在西北—东南方向呈现“中间高、两端低”的特征。人口密度分布存在空间差异,高人口密度区主要有武汉、南昌、鄂州、长沙等大城市^[25]。水资源丰富,涵盖“一江两湖(长江、洞庭湖和鄱阳湖)”^[26]。虽然近年来政府在促进经济转型的同时全面贯彻绿色发展理念,但长江中游城市群整体上仍处于生态超载状态,区域内土地生态安全呈现出“南高北低”的分异特征。

2.2 数据来源

本文数据主要源于2001—2016年《中国能源统计年鉴》《湖南省经济年鉴》《江西省经济年鉴》《湖北省经济年鉴》《江西省统计年鉴》和《湖南省统计年鉴》等资料。参考相关文献^[27],结合长江中游城市群的地域特点及足迹计算过程中所需数据,主要收集了生物资源消费和能源消耗两类数据(表1和表2)。其中,耕地、林地、草地、水域和土地类型中核算指标的全球平均产量参考文献^[28],见表1;建设用地和化石燃料用地中能源消费所消耗的热量折算为建设用地和化石燃料土地面积所需要的具体参数见表2;均衡因子和产量因子参考文献^[29,30]对于中国各省市的计算结果。此外,成渝城市群和长三角城市群足迹广度与足迹深度数据源自前期研究成果^[31],国外发达地区的人均生态足迹数据源于Global Footprint Network^[32]。

2022年10月

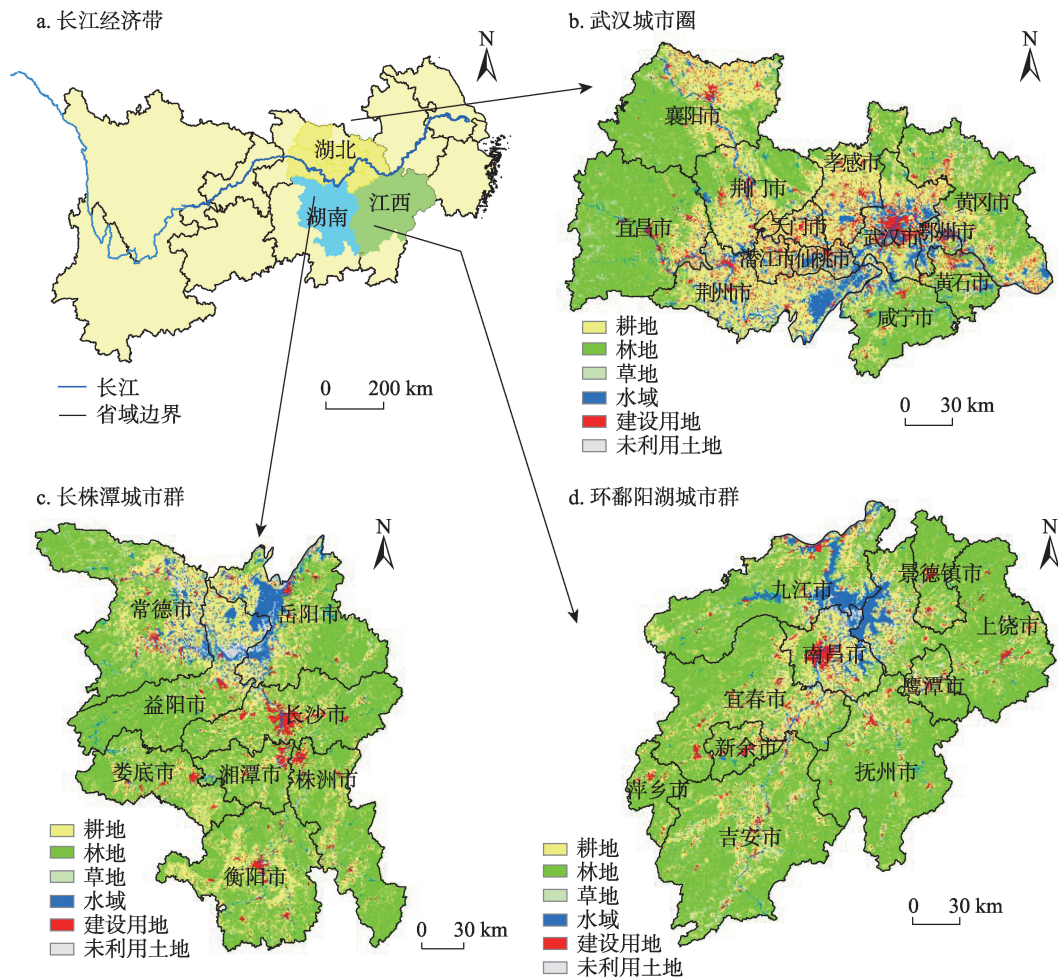


图1 研究区域概况图

Figure 1 Overview of the study area

2.3 研究方法

2.3.1 三维生态足迹模型

生态足迹是指吸纳一定区域人口生产生活产生的废物所需要的具有生物生产性的土地面积,而该区域所能提供的生物生产性土地面积称为生态承载力。本文将土地类型分为耕地、林地、草地、水域、建设用地以及化石燃料用地。此外,将生态足迹模型进行了部分简化,即假设以下三方面不予考虑:①资本存量消耗对土地生产率的影响;②不同土地类型的供需关系;③跨区域贸易对自然资本转移的影响^[33]。简化后的生态足迹模型如下:

$$EF = K \times \sum_{i=1}^n (e_j \times a_i) = K \times \sum_{i=1}^n e_j \left(\frac{c_i}{p_i} \right) \quad (1)$$

$$BC = K \times \sum_{j=1}^6 A_j \times e_j \times q_j \quad (2)$$

式中: EF 和 BC 分别代表生态足迹和生态承载力 (hm^2); K 为地区常住总人口数(人); e_j 为第 j 种土地利用类型所对应的均衡因子, $j=1, 2, \dots, 6$; a_i 为人均第 i 种消费物质换算的土地面积 ($\text{hm}^2/\text{人}$), $i=1, 2, \dots, n$; c_i 为第 i 种消费物质的人均消费量; p_i 为第 i 种消费物质的全球平均产量; A_j 为实际人均可利用的第 j 类土地利用类型面积 ($\text{hm}^2/\text{人}$); q_j 为第 j 种土地利用类型所对应的产量因子。

与传统二维模型相比,三维生态足迹(EF_{3D})通过足迹广度(EF_{size})和足迹深度(EF_{depth})相乘得到^[13]。其中,足迹广度和足迹深度分别表示不同地区同一时期和同一地区不同时期的资源消耗和生态服务的公平性差异,用于反映生态赤字对生态可持续性的显著影响。其从时间与空间的角度揭示足迹广度(代内公平)、足迹深度(代际公平)与生态足迹和

表1 生态足迹指标中生物资源消费账户

Table 1 Biological resource consumption account in the ecological footprint index

地类	核算指标	全球平均产量
耕地	小麦/t	2744 kg/hm ²
	水稻/t	2744 kg/hm ²
	棉花/t	1000 kg/hm ²
	蔬菜/t	18000 kg/hm ²
	猪肉/t	74 kg/hm ²
	禽蛋/t	400 kg/hm ²
林地	柑橘/t	3500 kg/hm ²
	其他水果(园林水果)/t	3500 kg/hm ²
	油桐籽/t	1600 kg/hm ²
	板栗/t	3000 kg/hm ²
	茶叶/t	566 kg/hm ²
	木材/m ³	1.99 m ³ /hm ²
草地	竹材/根	417 根/hm ²
	牛肉/t	33 kg/hm ²
	羊肉/t	33 kg/hm ²
水域	其他肉类(家禽)/t	33 kg/hm ²
	鱼类/t	29 kg/hm ²
	虾蟹类/t	29 kg/hm ²
	贝类/t	29 kg/hm ²
	其他水产品(养殖)/t	29 kg/hm ²

生态承载力的关系,并将区域发展过程中资本流量和资本存量的消耗以及二者的转化关系作为评估区域可持续发展的依据。计算公式如下:

$$EF_{depth} = \frac{EF}{BC} = 1 + \frac{ED}{BC} = 1 + \frac{\max\{EF - BC, 0\}}{BC} \quad (3)$$

$$EF_{size} = \min\{EF, BC\} \quad (4)$$

式中:理论上足迹深度 EF_{depth} 是指维持区域现有资源消费水平所需的土地面积倍数; ED 代表生态赤

字或生态盈余;1表示足迹深度原长,表明资本流量刚好能够满足资源消费需求。当 $EF \leq BC$ 时, $EF_{depth} = 1$ 。但上述公式仅适用于生态赤字的单一地类,如不是单一地类,可能会出现区域足迹广度偏大、足迹深度偏小的情况,改进后的公式(5)-(7)可以有效避免出现某些地类生态赤字被其他地类生态盈余补偿现象^[34]。

$$EF_{size, region} = \sum_{j=1}^6 EF_{size, j} = \sum_{j=1}^6 \min\{EF_j, BC_j\} \quad (5)$$

$$ED_{region} = \sum_{j=1}^6 ED_j = \sum_{j=1}^6 \max\{EF_j - BC_j, 0\} \quad (6)$$

$$EF_{depth, region} = 1 + \frac{\sum_{j=1}^6 ED_j}{\sum_{j=1}^6 BC_j} \quad (7)$$

式中: $EF_{size, region}$ 和 $EF_{size, j}$ 分别为区域足迹广度和第j种地类足迹广度; $EF_{depth, region}$ 为区域足迹深度; ED_{region} 为区域生态赤字或盈余(当 $ED_{region} > 0$,表现为区域生态赤字,反之为盈余); EF_j 、 BC_j 、 ED_j 分别为第j种地类的区域生态足迹、生态承载力和生态赤字(盈余)。当某一地类资本流量未被完全占用时,通过核算资本流量占用率(occupancy rates of capital flows, OR_{flow})能够揭示人类生产生活对资本流量的实际占有率。存量流量利用比(utilization ratio of stocks to flows, R_{flow}^{stock})则表明了存量与流量之间的关系,值越大,表明自然资本的可持续性越差。

$$OR_{flow} = \frac{EF_{size, region}}{BC} \times 100\% \quad (8)$$

$$R_{flow}^{stock} = \frac{EF - EF_{size, region}}{EF_{size, region}} = \frac{ED}{BC} = EF_{depth, region} - 1 \quad (9)$$

表2 生态足迹指标中能源消费账户

Table 2 Energy consumption account in the ecological footprint index

地类	核算指标	全球平均能源足迹/(GJ/hm ²)	折算系数
建设用地	电力/KW·h	1000	0.0036 GJ/(KW·h)
化石燃料用地	原油/t	93	41.868 GJ/t
	原煤/t	55	20.934 GJ/t
	汽油/t	93	43.124 GJ/t
	焦炭/t	55	28.470 GJ/t
	柴油/t	93	42.705 GJ/t
	燃料油/t	71	50.200 GJ/t
	液化石油气/t	71	50.200 GJ/t
	煤炭/t	55	20.934 GJ/t

2022年10月

2.3.2 SOFM 模型

为考察土地自然资本利用分类特征,利用SOFM(自组织特征映射网络,self-organizing feature map)对长江中游城市群进行了市域聚类分析。通过一个 n 维向量的输入及其对应的输出层节点,将输入的高维向量空间映射至二维平面。在本文中,输入向量为2维(即各城市的足迹广度和足迹深度值),输出为4维(即分类数)。 S_u 表示第 u 个城市的特征向量, $S_u=\{S_{u1}, S_{u2}\}$,其中, S_{u1} 、 S_{u2} 分别表示第 u 个城市的足迹广度和足迹深度值。通过网络中邻近单元的相互学习和竞争,从而自适应地形成对特定模式敏感的区域,最后通过给定的类别数量输出分类结果,具体工作原理及算法参考文献[35]。

2.3.3 匹配关联模型

本文采用非均衡指数 d_i 分析不同城市三维生态足迹与人口、GDP和水资源非均衡性特征^[36],公式如下:

$$d_i = \frac{\sqrt{2}}{2} \times (x_i - y_i) \quad (10)$$

式中: x_i 和 y_i 分别代表第 i 个城市三维生态足迹与人口(或GDP、水资源)占长江中游城市群整体的比重。 x_i 与 y_i 差异较小时与直线 $y=x$ 的距离更近,即二者匹配程度较高;反之,二者匹配程度较低。同时,利用EKC剖析三维生态足迹、足迹深度与城镇化率

的关联路径,其模型具体构建过程参考文献[37]。

3 结果与分析

3.1 生态足迹指标演变特征

3.1.1 人均三维生态足迹演变特征

2000—2015年长江中游城市群人均三维生态足迹整体呈上升趋势,年均增幅6.81%,且均明显高于区域生态承载力,生态可持续性较差(图2a)。就各子城市群来看,武汉城市圈人均三维生态足迹由2.478增加至5.642 hm^2 ,长株潭城市群由2.270增加至4.178 hm^2 ,环鄱阳湖城市群由1.514增加至3.262 hm^2 。武汉城市圈人均三维生态足迹持续增加,长株潭城市群和环鄱阳湖城市群则分别在2007年和2009年出现拐点,对应着长株潭城市群综合改革试验区获批和环鄱阳湖城市群“生态经济区”战略实施的时期。得益于地区发展政策导向作用,能源结构和人口规模得以优化,由此使得两个城市群人均三维生态足迹增速有所放缓。值得注意的是,长株潭城市群人均三维生态足迹在2009年后出现波动式上升,这是由于其人口规模在2009—2015年呈现“N”型变化趋势(年均增幅约为0.90%),引起区域相应时期建设用地口径的电力消耗量(年均增幅约为4.20%)、草地口径的羊肉消费量(年均增幅约为1.20%)、耕地口径的水稻产量(年均增幅约为0.90%)等因素变化。就各城市来看(图2b),鄂州市人

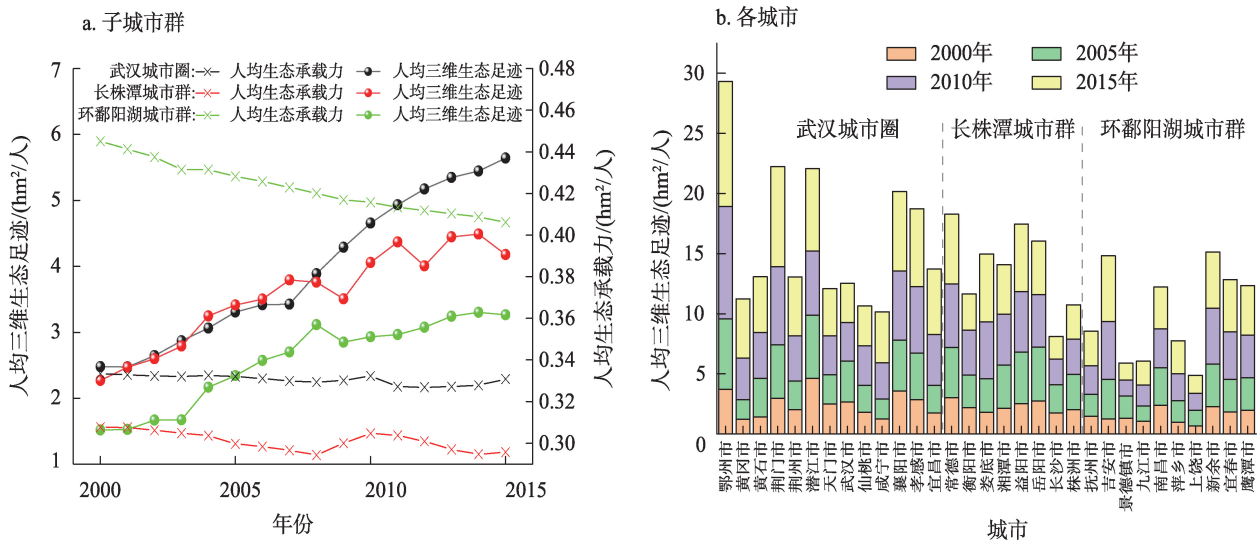


图2 长江中游城市群人均三维生态足迹与人均生态承载力变化趋势

Figure 2 Variations of per capita three-dimensional ecological footprint (EF_{3D}) and per capita biological capacity (BC) in the urban agglomeration of the middle reaches of the Yangtze River Basin (UAYRUA)

均三维生态足迹值最大,上饶最小。吉安的人均三维生态足迹年均增长率最高(21.37%),其次为黄冈(19.22%)、咸宁(15.27%)和黄石(14.49%);景德镇年均增长率最低(0.44%),其次为长沙(0.51%)和武汉(1.37%);其余城市年均增长率大致处于4.00%~12.00%之间。研究期间,长江中游城市群人均生态承载力(耕地和林地是其主要载体)逐年下降,主要是因为经济活动增加了对土地资源的需求,进而导致资源环境压力增大,区域生态承载负担加重。总体而言,虽然人均生态承载力呈现轻微下降趋势,但由于生态足迹的显著增加,生态赤字问题不断恶化(尤其是耕地和化石燃料用地),区域自然资本亏损严重。

3.1.2 生态足迹广度与足迹深度时空特征

由图3a可见,研究期内武汉城市圈人均生态足迹广度大致呈上升趋势,但仍处于低位;长株潭城市群呈现波动上升;环鄱阳湖城市群呈现先上升后下降,于2015年降低至长株潭城市群同等水平。武汉城市圈的人均生态足迹广度分别比环鄱阳湖城市群和长株潭城市群低0.030和0.026 $\text{hm}^2/\text{人}$,其区域资本流量流动性较弱;但武汉城市圈2015年的经济和人口规模分别约为环鄱阳湖城市群的1.3倍和1.9倍,约为长株潭城市群的1.2倍和1.3倍。由此可见,武汉城市圈的资本流量利用与社会经济发展匹

配性较差。

长江中游城市群2000—2015年生态足迹深度以5.58%增幅逐年增加,可持续发展面临较大压力(图3a)。长江中游城市群约85%的足迹深度来源于草地,其次是耕地(约10%)和建设用地(约5%),而大部分城市林地和水域的生态足迹深度值为1,表明相应的资本流量能够满足资源消费需求。3个子城市群2000—2015年生态足迹深度变化率基本大于0(图3b),说明对于自然资本存量的依赖性增加。其中,武汉城市圈变化率处于中等水平;2008年长株潭城市群变化率最低(-4.05%),得益于其2007年被批准为全国资源节约型和环境友好型社会建设综合配套改革试验区;2004年环鄱阳湖城市群变化率最高(16.14%),主要原因为经济发展速度加快,产业能源消费增长。整体来看,人均生态足迹广度的变化率曲线多处于生态足迹深度变化率曲线下方(图3b),说明长江中游城市群对于自然资本存量的消耗速度大于自然资本流量的更新速度,自然资本存量损耗严重。

不同时间节点的人均生态足迹广度的空间差异较小(图4),而高值区范围有扩大趋势,说明长江中游城市群整体的资源禀赋向好发展,且边缘城市的资源禀赋明显优于中心城市。就各子城市群来看,足迹广度从大到小为:环鄱阳湖城市群(0.209

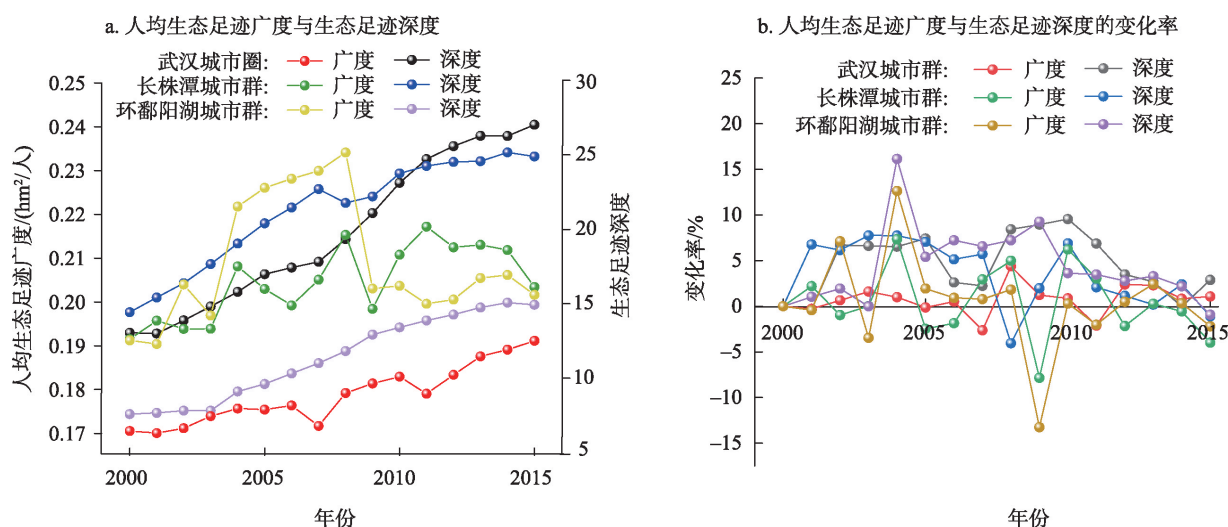


图3 长江中游城市群人均生态足迹广度与生态足迹深度变化趋势及其变化率

Figure 3 Variations and change rates of per capita ecological footprint size (EF_{size}) and ecological footprint depth (EF_{depth}) in the urban agglomeration of the middle reaches of the Yangtze River Basin (UAMRYR)

2022年10月

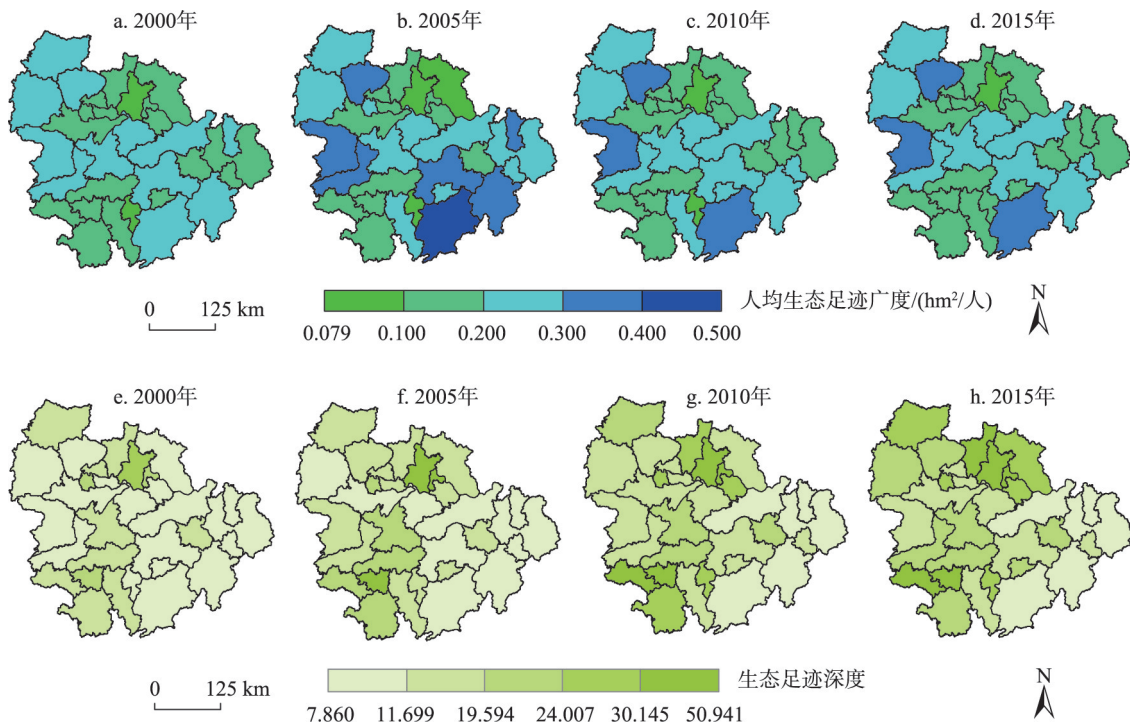


图4 长江中游城市群人均生态足迹广度和生态足迹深度空间变化

Figure 4 Spatial change of per capita ecological footprint size (EF_{size}) and ecological footprint depth (EF_{depth}) in the urban agglomeration of the middle reaches of the Yangtze River Basin (UAMRYR)

$\text{hm}^2/\text{人}$)>长株潭城市群($0.205 \text{ hm}^2/\text{人}$)>武汉城市圈($0.179 \text{ hm}^2/\text{人}$)。运用自然断点法将人均生态足迹广度划分为5个等级。其中,人均生态足迹广度高值区主要出现在环鄱阳湖城市群的抚州($0.270 \text{ hm}^2/\text{人}$)、吉安($0.353 \text{ hm}^2/\text{人}$)和宜春($0.241 \text{ hm}^2/\text{人}$)以及长株潭城市群的常德(年均值为 $0.327 \text{ hm}^2/\text{人}$)和岳阳(年均值为 $0.239 \text{ hm}^2/\text{人}$);低值区分布在武汉城市圈的武汉、黄石、黄冈和鄂州,年均值分别为 0.074 、 0.137 、 0.124 和 $0.158 \text{ hm}^2/\text{人}$ 。值得注意的是:武汉市人均生态足迹广度约为吉安市的1/5,发展可持续性最弱;景德镇的人均生态足迹广度有降低趋势(年降幅约为4%);南昌和岳阳2015年的人均生态足迹广度降为低值区,其有用生态换经济的不良发展趋势。绝大多数城市的耕地人均足迹广度占比超过60%,其中,天门市高达90.10%,潜江、孝感和南昌3市耕地占比均达80%,主要原因为人口密度较低,耕地资源较为充足,同时也表明农业生产仍是各城市重要的自然资本流量利用方式;咸宁、宜昌的林地足迹占比均高于耕地足迹占比,分别为44.00%和47.30%,表明林地是该地区最重要的自然

资本流量利用方式;受快速城市化进程的影响,武汉、南昌、长沙、鄂州等地区建设用人均足迹广度占比较大;鄂州、荆州、仙桃由于其特殊的地理位置,城市内含有大量湖泊等水资源,水域人均足迹广度偏大。

从空间上来看(图4),各地足迹深度均大于1,表明当前需消耗自然资本存量来满足社会经济发展的需求^[24]。足迹深度高值区整体上有逐年扩散的趋势,年均值依次为:长株潭城市群(21.34)>武汉城市圈(19.94)>环鄱阳湖城市群(11.55)。武汉城市圈的鄂州、武汉以及长株潭城市群的湘潭(钢铁产业发达,人口增长快,经济扩张)年均足迹深度分别高达34.150、33.562和34.950,这表明需要30多倍自身的土地面积才能独立支撑其资源消耗水平,资本存量消耗强度大;武汉城市圈的潜江(年均值为26.341)、孝感(年均值为24.162)以及长株潭城市群的娄底(年均值为27.486)对于资本存量消耗强度次之。足迹深度低值区主要分布在环鄱阳湖城市群的上饶、九江、景德镇和抚州,年均值分别为6.091、6.324、7.015和7.265。

此外,结合前期本文作者团队^[31]对成渝城市群和长三角城市群自然资本的核算结果,绘制出长江经济带三大城市群的足迹广度和足迹深度核密度分布曲线图(图5)。可以看到足迹广度在三大城市群均呈现出不同程度的右拖尾现象。其中,成渝城市群的主峰峰值最高,长江中游城市群次之,长三角城市群主峰峰值最低且存在多峰,其宽度也明显较大,这表明长三角城市群城市内部足迹广度的个体差异较大,存在一定的梯度效应,内部分化态势严重。长江中游城市群主峰较于其他两个城市群偏右,表明整体上该地区足迹广度较大。从足迹深度上,长江中游城市群主峰峰值最高,成渝城市群次之,长三角城市群最低且存在右拖尾现象,表明长三角城市群生态可持续性弱且区域间差异显著。相较于成渝城市群和长三角城市群,长江中游城市群自然资本利用格局较优:足迹广度较大(均值从大到小:长江中游城市群($0.195 \text{ hm}^2/\text{人}$)>成渝城市群($0.174 \text{ hm}^2/\text{人}$)>长三角城市群($0.159 \text{ hm}^2/\text{人}$)),足迹深度较小(均值从小到大:长江中游城市群(17.59)<成渝城市群(24.61)<长三角城市群(30.89))。

3.2 土地自然资本利用格局

足迹广度所表征的资本流量占用与足迹深度所表征的资本存量消耗存在地域互补现象,资源丰富的城市可供利用的自然资本流量较多,相应消耗的资本存量偏少,一般具有较高的足迹广度和较低

的足迹深度;而资源贫瘠的城市反之(图6)。其中,武汉($EF_{\text{depth}}=33.15$)、鄂州($EF_{\text{depth}}=35.10$)、湘潭($EF_{\text{depth}}=34.94$)三地的资本存量占用较大,而区域所能提供的资本流量(三地 EF_{size} 均值为 $0.12 \text{ hm}^2/\text{人}$)则较小。武汉的人均GDP和人口在长江中游城市群均处于前列,但其生态可持续较差(低足迹广度、高足迹深度)。咸宁($EF_{\text{size}}=0.22 \text{ hm}^2/\text{人}$)、宜昌($EF_{\text{size}}=0.23 \text{ hm}^2/\text{人}$)、常德($EF_{\text{size}}=0.33 \text{ hm}^2/\text{人}$)、益阳($EF_{\text{size}}=0.26 \text{ hm}^2/\text{人}$)、九江($EF_{\text{size}}=0.21 \text{ hm}^2/\text{人}$)、抚州($EF_{\text{size}}=0.27 \text{ hm}^2/\text{人}$)和吉安($EF_{\text{size}}=0.35 \text{ hm}^2/\text{人}$)是资本流量占用高值区,资本存量消耗较少(以上七市 EF_{depth} 均值为 10.91),生态可持续较强。对于常德、吉安和抚州而言,其足迹广度较大,但经济欠发达,亟需将地域的资源优势转变为经济优势,改变能源结构,带动经济发展。从人口和经济两个维度来看,长沙的足迹广度($0.13 \text{ hm}^2/\text{人}$)较低,足迹深度(21.35)处于中等偏高水平,并具有高密度人口和较大经济规模。黄冈和衡阳是人口大市,经济发展实力不强,资本流量占用较小(EF_{size} 分别为 0.12 和 $0.18 \text{ hm}^2/\text{人}$),资本存量消耗位于中等水平(EF_{depth} 均值为 18.90)。因此,黄冈亟需转变经济增长方式,实现农业主导型向工业主导型经济转变;衡阳则需根据现有资源优势进行产业定位,大力发展板块经济。天门和仙桃的人口规模、区域面积和自然资本利用格局差异不大,但人均GDP却相差甚远,分别为 11147 和 30887 元,主要原因为天门市农业基础薄弱、工业企

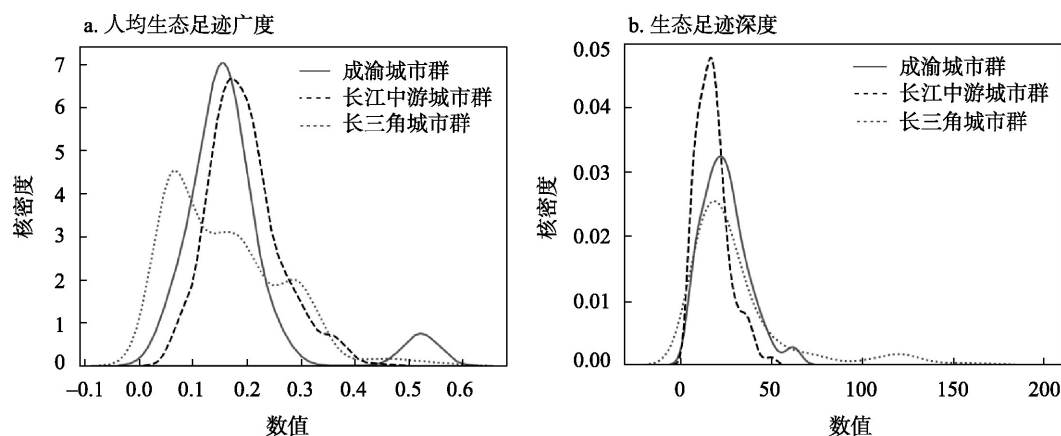


图5 长江经济带三大城市群人均生态足迹广度与生态足迹深度的分布

Figure 5 Distribution of per capita ecological footprint size (EF_{size}) and ecological footprint depth (EF_{depth}) in the three urban agglomerations of the Yangtze River Economic Belt

2022年10月

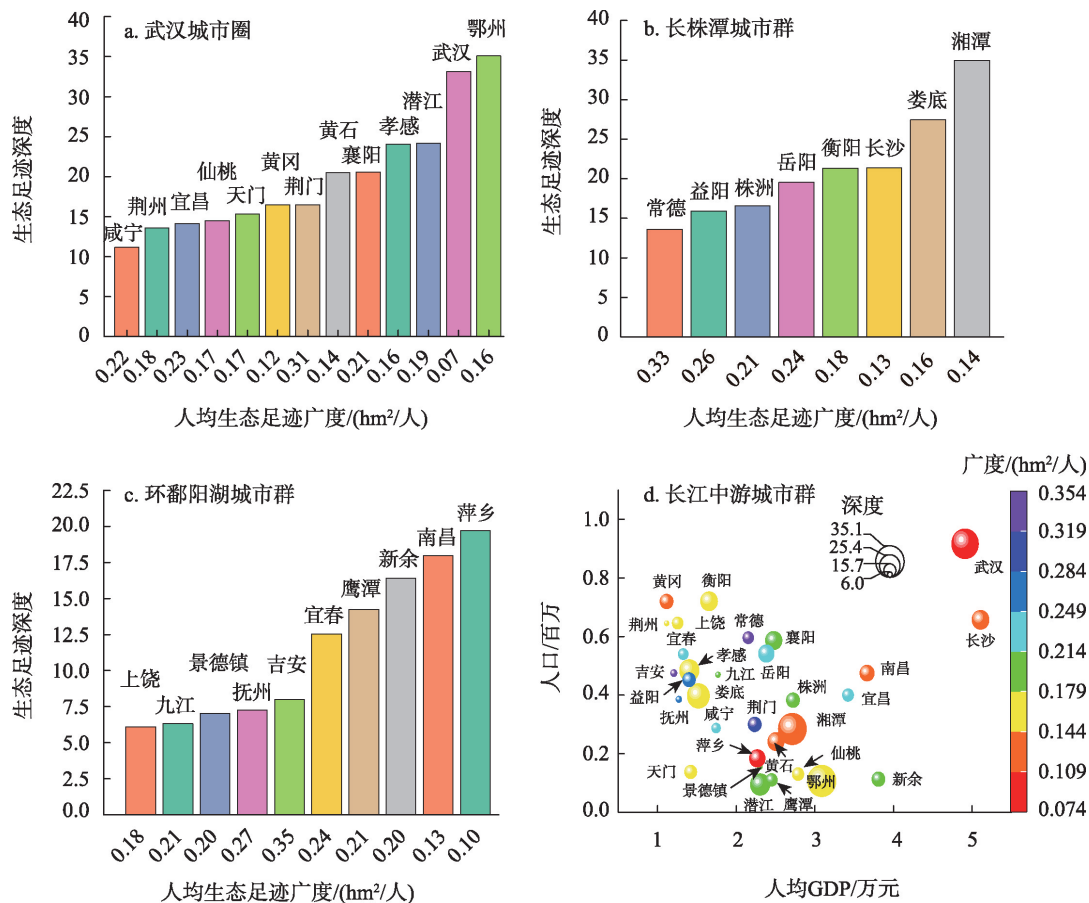


图6 长江中游城市群人均生态足迹广度与生态足迹深度综合比较

Figure 6 Comprehensive comparison of per capita ecological footprint size (EF_{size}) and ecological footprint depth (EF_{depth}) in the urban agglomeration of the middle reaches of the Yangtze River Basin (UAMRYR)

业素质不高、高新技术产品缺乏和第三产业发展不够等,亟需完善基础设施建设、加强科技创新及促进农业全面升级。

为进一步度量城市群土地自然资本的可持续性,测算了其资本流量占用率和存量流量利用比。综合来看,环鄱阳湖城市群自然资本利用空间较大,而武汉城市圈和长株潭城市群自然资本利用空间较小。如图7所示,资本流量占用率高值区分布在武汉城市圈的荆州(90.12%)、孝感(95.09%)和潜江(93.12%),长株潭城市群的常德(87.89%)和益阳(84.41%),环鄱阳湖城市群的南昌(82.86%),这些城市生态压力较大;资本流量占用率低值区主要分布在长株潭城市群和环鄱阳湖城市群,如上饶(58.76%)、萍乡(54.52%)和九江(59.65%),这类城市足迹广度大,资源禀赋条件好且人口消费需求低,生态压力较小。由于部分城市林地处于生态盈

余状态,长江中游城市群资本流量占用率均值为75.58%。就各子城市群而言,资本流量占用率均值:武汉城市圈(82.27%)>长株潭城市群(73.13%)>环鄱阳湖城市群(68.86%)。存量流量利用比高值区主要分布在武汉城市圈(18.93)和长株潭城市群(20.34),环鄱阳湖城市群则较低(10.55)。鄂州(34.10)、武汉(32.15)和湘潭(33.94)有着较高的存量流量利用比,其过度消耗资本存量以弥补资本流量的不足,区域自然资本利用可持续性差。此外,为了对区域更好地分区与管理,将长江中游城市群人均足迹广度和足迹深度进行标准化处理,利用SOFM展开聚类分析,进一步刻画城市群土地自然资本利用格局(图7)。由SOFM分类结果来看,I类城市(荆门、咸宁、襄阳、宜昌、常德、南昌、上饶等)人均足迹广度大(均值为0.23 hm^2 /人)而人均足迹深度小(均值为13.69),此类城市的生态可持续性

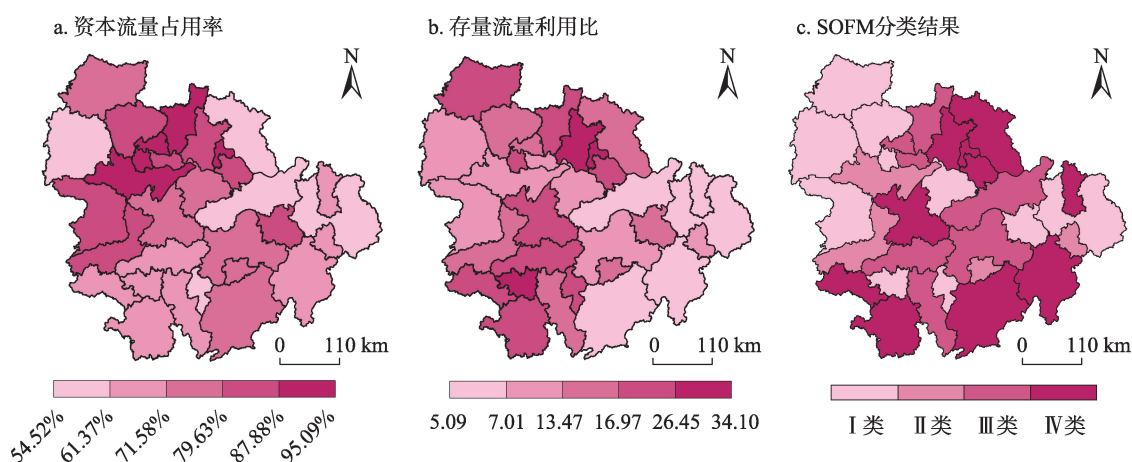


图7 长江中游城市群自然资本利用格局

Figure 7 Natural capital utilization pattern in the urban agglomeration of the middle reaches of the Yangtze River Basin (UAMRYR)

最强;Ⅱ类城市(荆州、益阳、新余、鹰潭等)人均足迹广度较大(均值为 $0.21 \text{ hm}^2/\text{人}$)而人均足迹深度较小(均值为15.03),生态可持续性处于较强水平;Ⅲ类城市(天门、仙桃、长沙、株洲、宜春等)人均足迹广度较小(均值为 $0.18 \text{ hm}^2/\text{人}$)而人均足迹深度较大(均值为16.05),此类城市生态可持续性较弱,资源存量消耗明显强于资本流量占用;Ⅳ类城市(武汉、鄂州、黄冈、黄石、衡阳、娄底等)人均足迹广度小(均值为 $0.13 \text{ hm}^2/\text{人}$)而人均足迹深度大(均值为25.66),此类城市的发展多建立在自然资本过度消耗的基础上,区域生态可持续性最差。

3.3 生态足迹指标与社会经济发展适配性

3.3.1 非均衡性指数变化

选取水资源总量、GDP、人口分别作为资源-经济-社会系统的代表性指标,探究其与三维生态足迹的非均衡性特征(图8)。①从水资源角度来看,长江中游城市群水资源非均衡指数整体多为负值(地区水资源比重高于三维生态足迹比重),说明长江中游城市群虽然三维生态足迹水平较高,但水资源储量本底状况较好。武汉城市圈中的鄂州(年均值-0.0471)、潜江(年均值-0.0381)和天门(年均值-0.0202)以及长株潭城市群中的常德(-0.0235)、岳阳(-0.0215)和益阳(-0.0229)制约了区域的水资源与三维生态足迹匹配度。整体上来看,环鄱阳湖城市群水资源与三维生态足迹匹配性优于武汉城市圈和长株潭城市群,新余(-0.0224)是造成其不均衡的主要原因。从时间上看,2000—2015年,武汉城

市圈均衡性有所恶化(年均下降率0.20%),而长株潭城市群水资源均衡性有所提升(年均增长率0.61%),环鄱阳湖城市群则变化不明显。②从GDP角度来看,长江中游城市群GDP非均衡指数整体在0上下浮动,两者匹配度相对较高。武汉(0.0938)、长沙(0.0676)和南昌(0.0248)的非均衡指数分别为3个子城市群的最大值,其GDP比重低于三维生态足迹比重,说明产生单位GDP所消耗的资源较多,资源效率较低,区域经济发展与生态环境胁迫压力较大。时间维度上,武汉城市圈、长株潭城市群和环鄱阳湖城市群GDP均衡性均有所增强,其年均增长率分别为0.17%、0.46%和3.26%。③从人口角度来说,人口与三维生态足迹非均衡指数多为正值,表明多数城市人口比重低于三维生态足迹比重,区域资源利用水平较低从而伴随较大的三维生态足迹,其发展重点在于提升资源利用效率。就各子城市群来看,鄂州和潜江非均衡指数年均值分别为-0.0424和-0.0332(人口比重高于三维生态足迹比重),是造成武汉城市圈人口与三维生态足迹匹配性差的主要地区,同时也表明提升该地区发展均衡性的重点在于降低人口密度^[38];衡阳和长沙(分别为0.0205和0.0227,均衡性差)是致使长株潭城市群匹配性差的主要地区;导致环鄱阳湖城市群人口与三维生态足迹匹配性较差的主要地区为上饶(0.0283)和新余(-0.0191)。从时间上来看,武汉城市圈和长株潭城市群人口均衡性呈现下降趋势(年均下降率为0.33%和0.81%),而环鄱阳湖城市群均衡性则向

2022年10月

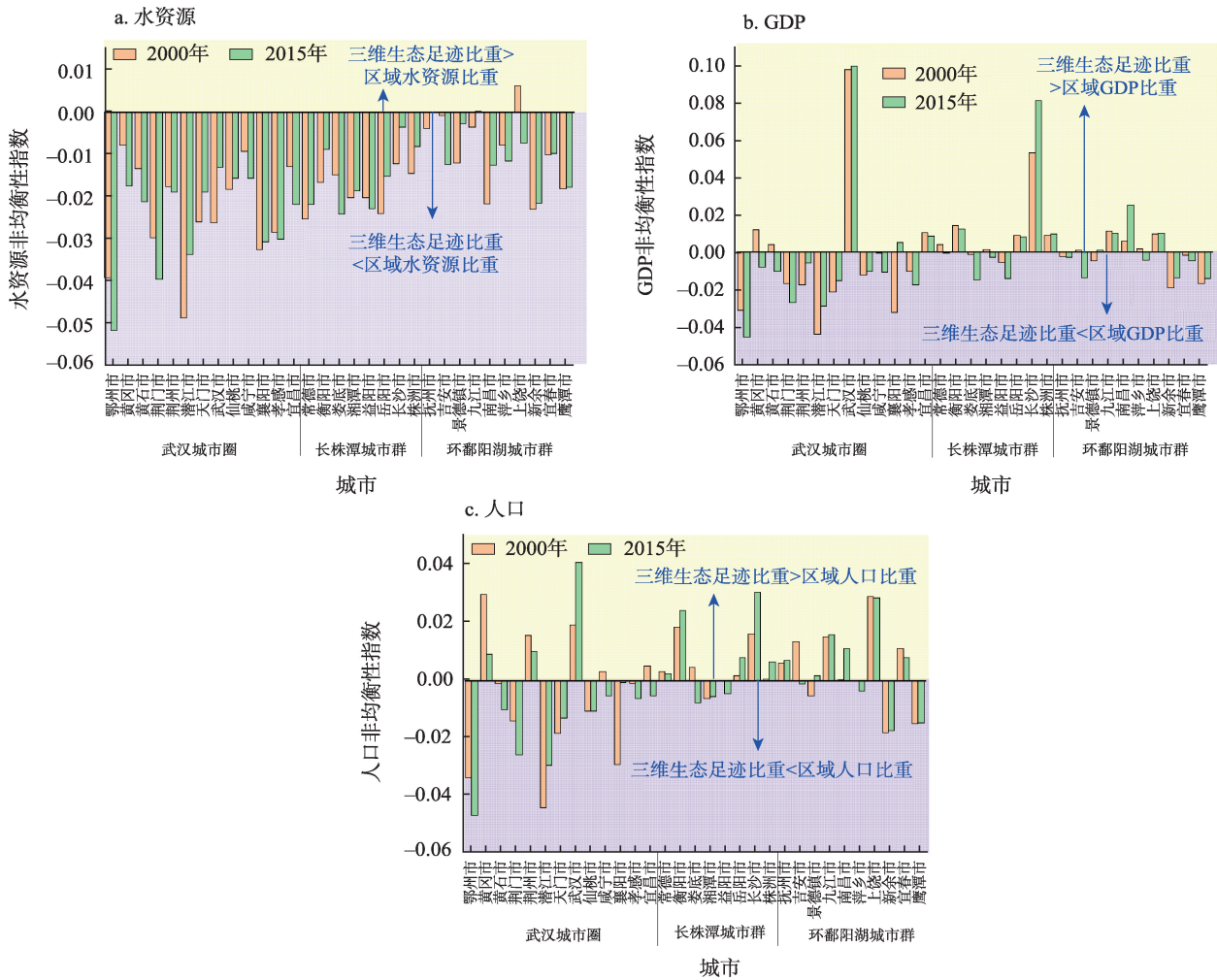


图8 三维生态足迹与水资源、GDP和人口非均衡指数时序变化

Figure 8 Changes in the disequilibrium indices of water resources, GDP, and three-dimensional ecological footprint (EF_{3D})

良性方向发展(年均增长率0.20%)。

3.3.2 生态足迹指标与城镇化关联特征

本文基于测算的人均三维生态足迹和足迹深度结果,以常住人口城镇化率表征城镇化发展进程,结合EKC探究了其城镇化间的关联(图9)。可以看到 R^2 值均达到0.9以上,拟合程度很高。武汉城市圈、长株潭城市群和环鄱阳湖城市群城镇化率与人均三维生态足迹均呈现倒“U”型关系,当城镇化率分别达到59.65%(2018年)、56.36%(2019年)和58.86%(2019年)时,曲线出现拐点;这说明当区域城镇化率达到某一个阈值时,其与人均三维生态足迹间的相互作用关系将会发生转变,人均三维生态足迹随城镇化率的增加而逐年下降。这一现象也验证了城市发展与环境演化关系理论,即在城

镇化的不同阶段对于环境影响的表现形式有所不同。当城镇化由初期发展到中期阶段,第一产业比重下降,以高污染高耗能为特点、以重工业和制造业为主的第二产业逐步成为区域经济的主导产业,其所带来的生态环境压力也随之增大。但传统的粗放型发展方式衍生了一系列生态环境问题,难以为继。亟需将传统的粗放、高耗能性产业向集约、绿色可持续发展产业转型,由此带来的能源消费结构改善和资源利用效率提升显著降低了生态环境影响^[39,40],城镇化由此进入到下一阶段,以上即是拐点产生的过程。

从足迹深度角度来看,武汉城市圈和长株潭城市群足迹深度与城镇化率呈现倒“U”型关系;当其城镇化率越过58.19%(2016年)和53.14%(2017年)

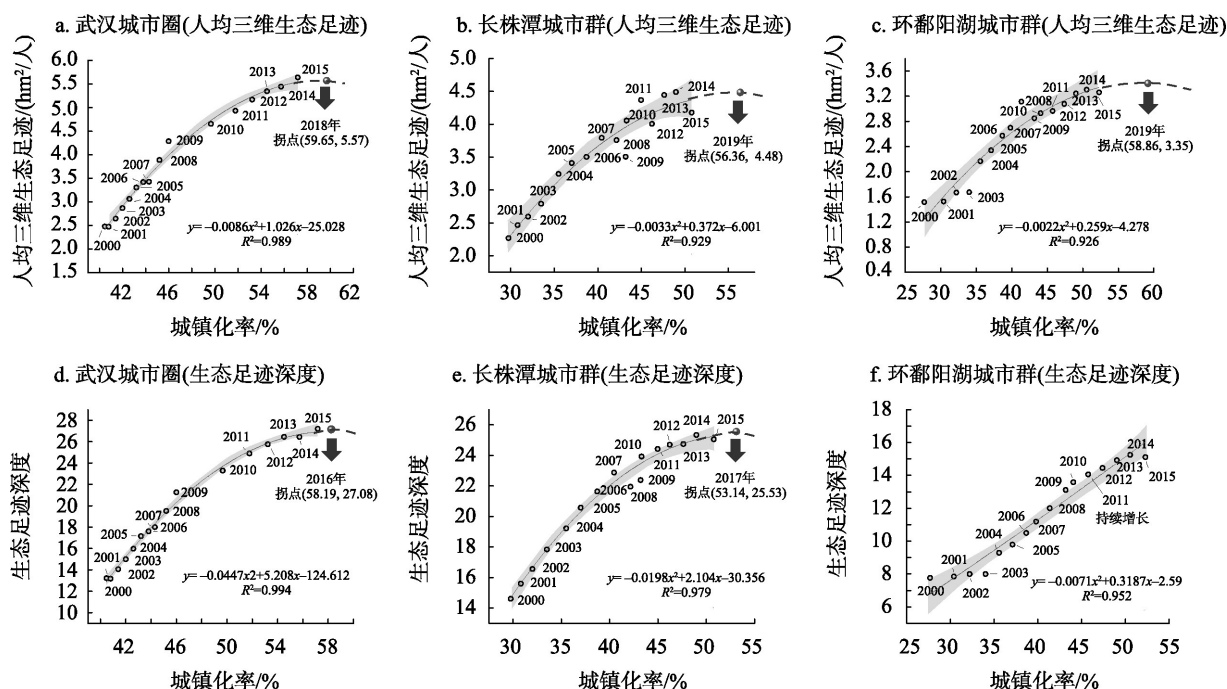


图9 城镇化率与生态足迹指标关联特征

Figure 9 Correlation between urbanization rate and ecological footprint indices

时,足迹深度随城镇化率的上升而下降。而环鄱阳湖城市群城镇化率与足迹深度均呈上升趋势,并未出现拐点,处于库兹涅茨曲线的左半部分(即生态环境与城镇化进程相矛盾的阶段)。其原因可能为:环鄱阳湖城市群所在的江西省为传统农业大省,早期以第一产业为主导,经济发展状况较为落后,且资源利用效率低。后期随着产业结构调整(第二产业比重上升),经济发展速度加快,生态环境压力也随之增大。但在研究期间,环鄱阳湖城市群的足迹深度年增长率呈现先上升后下降的趋势,于2004年出现峰值(16.13%),而2010年后,得益于2009年国务院颁布的《鄱阳湖生态经济区规划》,足迹深度的年均增长率仅为2.41%。

4 结论、政策建议与研究展望

4.1 结论

本文以长江中游城市群为研究对象,利用三维生态足迹模型评估其生态可持续性,通过存量流量利用比和资本流量占用率刻画其自然资本利用可持续性现状,并利用聚类分析进一步明晰城市群自然资本利用分类特征;在此基础上,探究生态足迹指标与社会经济发展之间的匹配关联特征。主要结论如下:

(1)长江中游城市群人均三维生态足迹不断增大(年均增幅6.81%),而人均生态承载力呈现下降趋势,导致区域生态赤字严重;其中,长株潭城市群和环鄱阳湖城市群人均三维生态足迹的变化受区域政策的影响,分别在2007年和2009年出现拐点;此外,自然资本流动性则有所增强,资源禀赋朝良性方向发展,其足迹广度呈现:环鄱阳湖城市群>长株潭城市群>武汉城市圈,资本流量低值区主要分布在武汉、黄石、黄冈和鄂州;城市群对于资本存量的消耗量不断增加,特别是草地、耕地,而大部分城市林地和水域的资本流量刚好能够满足相应的资源消费需求。

(2)总体来看,长江中游城市群土地自然资本存量损耗严重,但优于成渝城市群和长三角城市群。一般而言,资源丰裕的地区可供占用的自然资本流量较多,相应资本存量消耗较少,如环鄱阳湖城市群有着较低的资本流量占用率和存量流量利用比,自然资本可持续利用空间较大;而武汉城市圈有着较高的存量流量利用比和资本流量占用率,可持续发展状况堪忧。分城市来看,荆门、咸宁、襄阳等地区自然资本利用格局优,而武汉、鄂州、黄冈等地区生态可持续性差。

2022年10月

(3)长江中游城市群三维生态足迹与水资源整体适配性较差,鄂州、潜江、常德和岳阳等地区制约了其均衡性;城市群三维生态足迹与GDP整体适配性较好,但省会城市经济发展与生态环境胁迫压力较大;城市群三维生态足迹与人口整体适配性较差,其中,武汉城市圈和长株潭城市群两者间的适配性呈现下降趋势,而环鄱阳湖城市群则向良性方向发展;此外,武汉城市圈、长株潭城市群人均三维生态足迹、足迹深度与城镇化率均呈现倒“U”型关系,符合EKC特征;环鄱阳湖城市群人均三维生态足迹与城镇化率呈现倒“U”型关系,而足迹深度随着城镇化率的上升而增加。

4.2 政策建议

基于以上结论,本文提出以下的政策建议:

(1)优化土地利用结构,实现城市群自然资本可持续利用。耕地和林地作为生态承载力的主要承担者,应当加强保护力度。对于耕地,可以从提升其质量的角度出发,构建与生态承载力相匹配的现代化农业产业体系,发展优质生态农业,优化农业生产过程,最大限度地减少对耕地的损害;对于林地,落实林地产权制度,加强林地的经营和管理,做好资源监测和监督,除特殊情况外,严禁采伐、更改造林树种,促进林地资源保护。此外,针对草地和耕地生态赤字严重的问题,应充分改造未利用地,协调城市工业化发展与耕地和草地退化之间的矛盾以减小足迹深度。

(2)探索市场化的生态补偿模式,促进生态系统良性循环。以生态足迹核算结果为导向,将生态足迹与生态承载力指标作为考核依据,构建一套基于生态资产核算的城市群生态补偿策略。以中国生态服务总金额为标准,分析生态资源现状以及能否提供人类生活所需的生态服务,对生态保护力度大、生态环境质量改善成效好的区域给予政策倾斜,依据“谁受益、谁补偿”的原则,从而确定生态补偿的支付方和受偿方。

(3)加快产业生态化,逐步逼近良性拐点。与武汉城市圈和长株潭城市群相比,环鄱阳湖城市群的生态状况较好,而经济发展状况较差,其足迹深度拐点迟迟未出现。这说明环鄱阳湖城市群在未来的城镇化发展进程中可能仍需付出较大的环境

代价。因此,在今后的城镇化进程中,环鄱阳湖城市群应当更加注重经济发展方式,加快产业生态化、农业产业化、规模化与集约化,实现城镇发展与环境保护的良性互动,以期出现良性拐点。

(4)优化产业结构,提高资源利用效率。应优先发展现代农业,实现农业高度机械化以提高农业生产效率,缩减农业人口,为二、三产业的发展提供劳动力;提高区域科技创新能力为产业转型提供智力支持,加速产业优化组合,提高技术水平和资源利用效率。

4.3 研究展望

本文仍存在一些不足之处,需要在后续研究中进行改进。因此,进行如下研究展望:

(1)本文所涉及的资源类型有限,水资源等自然资源类型并未包括在内,在未来研究中可以考虑将三维水足迹、碳足迹等其他足迹指标纳入其中,构建较为完善的足迹家族体系。

(2)从生态足迹的核算指标来看,本文主要基于生物资源消耗和能源消耗两部分核算生态足迹,但忽略了生产、生活活动产生的污染物(废气,废水,固体废弃物)所占用的生态足迹,在未来研究中有必要对模型进行扩展,增加污染物账户用于反映区域污染物排放所占用的生态足迹。

(3)受到数据缺失及数据收集困难的限制,未能对生态足迹核算账户所包含的消费产品类型进行很好的涵盖与分类(如土地利用方式“耕地”中,只考虑了水稻、棉花等农作物,而忽略了油菜、玉米等其他较为常见的作物,也未将牛肉和羊肉产量按照一定比例分摊到耕地和草地所对应生态足迹中),在后续研究中可根据地区数据获取情况进行整合与分类。

(4)本文重点关注城市群内部城市及各子城市群之间的差异,今后可以在城市群内涵基础上,基于城市群社会经济特征和空间联系角度作进一步的分析。

参考文献(References):

- [1] Zhu Z, He Q Y. Spatio-temporal evaluation of the urban agglomeration expansion in the middle reaches of the Yangtze River and its impact on ecological lands[J]. Science of the Total Environment,

- 2021, DOI: 10.1016/j.scitotenv.2021.148150.
- [2] 曹广忠, 陈思创, 刘涛. 中国五大城市群人口流入的空间模式及变动趋势[J]. 地理学报, 2021, 76(6): 1334–1349. [Cao G Z, Chen S C, Liu T. Changing spatial patterns of internal migration to five major urban agglomerations in China[J]. *Acta Geographica Sinica*, 2021, 76(6): 1334–1349.]
- [3] Hoekstra A Y, Wiedmann T O. Humanity's unsustainable environmental footprint[J]. *Science*, 2014, 344(6188): 1114–1117.
- [4] Bateman I J, Mace G M. The natural capital framework for sustainably efficient and equitable decision making[J]. *Nature Sustainability*, 2020, 3(10): 776–783.
- [5] 郭韦杉, 李国平, 王文涛. 自然资源资产核算: 概念辨析及核算框架设计[J]. 中国人口·资源与环境, 2021, 31(11): 11–19. [Guo W S, Li G P, Wang W T. Accounting for natural resource assets: Concepts and accounting framework design[J]. *China Population, Resources and Environment*, 2021, 31(11): 11–19.]
- [6] 靳相木, 柳乾坤. 自然资源核算的生态足迹模型演进及其评论[J]. 自然资源学报, 2017, 32(1): 163–176. [Jin X M, Liu Q K. Evolution of ecological footprint models for natural resources accounting[J]. *Journal of Natural Resources*, 2017, 32(1): 163–176.]
- [7] Niccolucci V, Bastianoni S, Tiezzi E B P, et al. How deep is the footprint? A 3D representation[J]. *Ecological Modelling*, 2009, 220(20): 2819–2823.
- [8] 方恺, Reinout H J. 自然资本核算的生态足迹三维模型研究进展[J]. 地理科学进展, 2012, 31(12): 1700–1707. [Fang K, Reinout H J. A review on three-dimensional ecological footprint model for natural capital accounting[J]. *Progress in Geography*, 2012, 31(12): 1700–1707.]
- [9] 马维兢, 刘斌, 杨德伟, 等. 基于三维生态足迹模型的流域自然资本动态评估: 以福建省九龙江流域为例[J]. 资源科学, 2017, 39(5): 871–880. [Ma W J, Liu B, Yang D W, et al. Dynamic evaluation of natural capital using the three-dimension ecological footprint model: The Jiulong River Basin in Southeast China[J]. *Resources Science*, 2017, 39(5): 871–880.]
- [10] Wu F F, Yang X H, Shen Z Y, et al. Exploring sustainability and decoupling effects of natural capital utilization in China: Evidence from a provincial three-dimensional ecological footprint[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2021, DOI: 10.1016/j.jclepro.2021.126486.
- [11] Xun F F, Hu Y C. Evaluation of ecological sustainability based on a revised three-dimensional ecological footprint model in Shandong Province, China[J]. *Science of the Total Environment*, 2019, 649: 582–591.
- [12] 金梦婷, 徐丽萍, 李鹏辉. 南北疆区域经济差异化三维生态足迹自然资本利用的时空演变[J]. 生态学报, 2020, 40(13): 4327–4339. [Jin M T, Xu L P, Li P H. Spatial and temporal evolution of natural capital utilization in the three-dimensional ecological footprint under the regional economic differentiation in north and south Xinjiang[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2020, 40(13): 4327–4339.]
- [13] 董建红, 张志斌, 张怀林, 等. 生态脆弱区自然资本可持续利用及驱动机制: 以宁夏为例[J]. 中国人口·资源与环境, 2021, 31(2): 162–173. [Dong J H, Zhang Z B, Zhang H L, et al. Sustainable utilization and driving mechanism of natural capital in ecologically fragile areas: A case study of Ningxia[J]. *China Population, Resources and Environment*, 2021, 31(2): 162–173.]
- [14] Tang Z L, Sun G, Fu M, et al. Research on the industrial energy eco-efficiency evolution characteristics of the Yangtze River economic belt in the temporal and spatial dimension, China[J]. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 2019, DOI: 10.3390/ijerph17010268.
- [15] 骆康, 郭庆宾, 刘耀彬. 长江经济带科技创新资源集聚能力空间格局及网络结构[J]. 长江流域资源与环境, 2021, 30(8): 1783–1794. [Luo K, Guo Q B, Liu Y B. Research on spatial pattern and network structure analysis of science and technology innovation resources aggregating ability in the Yangtze River economic belt[J]. *Resources and Environment in the Yangtze Basin*, 2021, 30(8): 1783–1794.]
- [16] Lu Y L, Zhang, Y Q, Cao X H, et al. Forty years of reform and opening up: China's progress toward a sustainable path[J]. *Science Advances*, 2019, DOI: 10.1126/sciadv.aau9413.
- [17] He C Y, Liu Z F, Wu J G, et al. Future global urban water scarcity and potential solutions[J]. *Nature Communications*, 2021, 12(1): 1–11.
- [18] 彭红松, 郭丽佳, 章锦河, 等. 区域经济增长与资源环境压力的关系研究进展[J]. 资源科学, 2020, 42(4): 593–606. [Peng H S, Guo L J, Zhang J H, et al. Research progress and implication of the relationship between regional economic growth and resource-environmental pressure[J]. *Resources Science*, 2020, 42(4): 593–606.]
- [19] Ansari M A, Haider S, Khan N A. Environmental Kuznets curve revisited: An analysis using ecological and material footprint[J]. *Ecological Indicators*, 2020, DOI: 10.1016/j.ecolind.2020.106416.
- [20] Schlüter M, Haider L J, Lade S J, et al. Capturing emergent phenomena in social-ecological systems: An analytical framework[J]. *Ecology and Society*, 2019, DOI: 10.5751/ES-11012-240311.
- [21] 韩雁, 贾绍凤, 鲁春霞, 等. 水资源与社会经济发展要素时空匹配特征: 以张家口为例[J]. 自然资源学报, 2020, 35(6): 1392–1401. [Han Y, Jia S F, Lu C X, et al. Spatiotemporal matching between water resources and social economy: A case study in Zhangjiakou[J]. *Journal of Natural Resources*, 2020, 35(6): 1392–1401.]
- [22] 王良栋, 吴乐英, 陈玉龙, 等. 经济平稳增长下黄河流域相关省区碳达峰时间及峰值水平[J]. 资源科学, 2021, 43(11): 2331–

2022年10月

2341. [Wang L D, Wu L Y, Chen Y L, et al. Carbon peak time and peak level of relevant provinces in the Yellow River Basin under stable economic growth[J]. Resources Science, 2021, 43(11): 2331-2341.]
- [23] 赵建吉, 刘岩, 朱亚坤, 等. 黄河流域新型城镇化与生态环境耦合的时空格局及影响因素[J]. 资源科学, 2020, 42(1): 159-171. [Zhao J J, Liu Y, Zhu Y K, et al. Spatiotemporal differentiation and influencing factors of the coupling and coordinated development of new urbanization and ecological environment in the Yellow River Basin[J]. Resources Science, 2020, 42(1): 159-171.]
- [24] Yang Z Z, Xia J, Zou L, et al. Efficiency and driving force assessment of an integrated urban water use and wastewater treatment system: Evidence from spatial panel data of the urban agglomeration on the middle reaches of the Yangtze River[J]. Science of the Total Environment, 2022, DOI: 10.1016/j.scitotenv.2021.150232.
- [25] 陈义忠, 乔友凤, 卢宏伟, 等. 长江中游城市群水-碳-生态足迹变化特征及其平衡性分析[J]. 生态学报, 2022, 42(4): 1368-1380. [Chen Y Z, Qiao Y F, Lu H W, et al. Water-carbon-ecological footprint change characteristics and its balance analysis in the Triangle of Central China[J]. Acta Ecologica Sinica, 2022, 42(4): 1368-1380.]
- [26] Dai X, Wang L C, Huang C B, et al. Spatio-temporal variations of ecosystem services in the urban agglomerations in the middle reaches of the Yangtze River, China[J]. Ecological Indicators, 2020, DOI: 10.1016/j.ecolind.2020.106394.
- [27] 李姣, 周翠烟, 张灿明, 等. 基于生态足迹的湖南省洞庭湖生态经济区全要素生态效率研究[J]. 经济地理, 2019, 39(2): 199-206. [Li J, Zhou C Y, Zhang C M, et al. Total-factor ecological efficiency of Dongting Lake Ecological and Economic Zone in Hunan Province on the basis of ecological footprint[J]. Economic Geography, 2019, 39(2): 199-206.]
- [28] 徐中民, 张志强, 程国栋. 甘肃省1998年生态足迹计算与分析[J]. 地理学报, 2000, 55(5): 607-616. [Xu Z M, Zhang Z Q, Cheng G D. The calculation and analysis of ecological footprints of Gansu Province[J]. Acta Geographica Sinica, 2000, 55(5): 607-616.]
- [29] 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. [Liu M C, Li W H. Calculation of equivalence factor used in ecological footprint for China and its provinces based on net primary production[J]. Journal of Ecology and Rural Environment. 2010, 26(5): 401-406.]
- [30] 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]. 生态学报, 2010, 29(3): 592-597. [Liu M C, Li W H, Xie G D. Estimation of China ecological footprint production coefficient based on net primary productivity[J]. Chinese Journal of Ecology, 2010, 29(3): 592-597.]
- [31] Chen Y Z, Qiao Y F, Yan P D, et al. Spatial-temporal variation and nonlinear prediction of environmental footprints and comprehensive environmental pressure in urban agglomerations[J]. Journal of Cleaner Production, 2022, DOI: 10.1016/j.jclepro.2022.131556.
- [32] Global Footprint Network. Footprint for Nations[DB/OL]. (2022-05-28) [2022-07-15]. <http://data.footprintnetwork.org>.
- [33] 方恺. 生态足迹深度和广度: 构建三维模型的新指标[J]. 生态学报, 2013, 33(1): 267-274. [Fang K. Ecological footprint depth and size: New indicators for a 3D model[J]. Acta Ecologica Sinica, 2013, 33(1): 267-274.]
- [34] 方恺, 高凯, 李焕承. 基于三维生态足迹模型优化的自然资本利用国际比较[J]. 地理研究, 2013, 32(9): 1657-1667. [Fang K, Gao K, Li H C. International comparison of natural capital use: A three-dimensional model optimization of ecological footprint[J]. Geographical Research, 2013, 32(9): 1657-1667.]
- [35] 毛祺, 彭建, 刘焱序, 等. 耦合SOFM与SVM的生态功能分区方法: 以鄂尔多斯市为例[J]. 地理学报, 2019, 74(3): 460-474. [Mao Q, Peng J, Liu Y X, et al. An ecological function zoning approach coupling SOFM and SVM: A case study in Ordos[J]. Acta Geographica Sinica, 2019, 74(3): 460-474.]
- [36] 杨鑫, 穆月英. 中国粮食生产与水资源的空间匹配格局[J]. 华南农业大学学报(社会科学版), 2019, 18(4): 91-100. [Yang X, Mu Y Y. Spatial-temporal matching patterns of grain production and water resources[J]. Journal of South China Agricultural University (Social Science Edition), 2019, 18(4): 91-100.]
- [37] 李水平, 张丹. 湖南省城镇化与环境污染的库兹涅茨曲线[J]. 系统工程, 2014, 32(1): 152-158. [Li S P, Zhang D. The EKC Research on the relationship between urbanization development and environmental pollution of Hunan Province[J]. Systems Engineering, 2014, 32(1): 152-158.]
- [38] 徐浩林, 杨培岭, 邢伟民, 等. 湖北省2008-2017年人类活动净氮输入状况[J]. 中国环境科学, 2020, 40(9): 4017-4028. [Xu H L, Yang P L, Xing W M, et al. Net anthropogenic nitrogen accumulation in Hubei Province from 2008 to 2017[J]. China Environmental Science, 2020, 40(9): 4017-4028.]
- [39] 孟望生. 经济增长方式转变与能源消费强度差异的收敛性: 基于中国2001-2016年省级面板数据[J]. 资源科学, 2019, 41(7): 1295-1305. [Meng W S. Convergence analysis of interregional differences of economic growth pattern and energy intensity: An empirical study based on provincial data from 2001 to 2016 in China[J]. Resources Science, 2019, 41(7): 1295-1305.]
- [40] 柳清瑞, 唐璐. 城镇化对能源消费的推拉效应及其影响因素: 基于门槛效应模型的实证检验[J]. 资源科学, 2022, 44(5): 1022-1035. [Liu Q R, Tang L. Push-pull effect of urbanization on energy consumption and its influencing factors: An empirical test with threshold effect model[J]. Resources Science, 2022, 44(5): 1022-1035.]

Coordination between ecological footprint index and socioeconomic development of the urban agglomeration in the middle reaches of the Yangtze River Basin

CHEN Yizhong¹, QIAO Youfeng¹, HAO Can¹, LU Hongwei², PENG He¹, XIA Jun^{3,2}

(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 Sciences and Natural Resources Research, CAS, Beijing 100101, China; 3. State Key Laboratory of Water Resources & Hydropower Engineering Sciences, Wuhan University, Wuhan 430072, China)

Abstract: Ecological footprint is a key index to quantify the sustainability of regional natural capital utilization. Based on a three-dimensional ecological footprint (EF_{3D}) model, this study evaluated the sustainable development of the urban agglomeration in the middle reaches of the Yangtze River Basin (UAMRYR), and introduced the disequilibrium index and environmental Kuznets curve to analyze the coordination between the ecological footprint index and socioeconomic development. The results show that: (1) Per capita biological capacity of the UAMRYR was decreasing while its per capita EF_{3D} presented an increasing trend with an average annual growth rate of 6.81%, which led to serious ecological deficit. The inflection points of per capita EF_{3D} of the Changsha-Zhuzhou-Xiangtan City Group (CZTCG) and Poyang Lake City Group (PYLCG) appeared in 2007 and 2009, respectively. The capital stock of regional grassland and cultivated land showed an increasing trend, while the capital flow of forestland and water areas could meet the demand of resource consumption. A serious loss of capital stock can be found in the UAMRYR, but the situation was better than that of the Chengdu-Chongqing and Yangtze River Delta City Groups. The sustainable utilization space of natural capitals in the PYLCG was better than that in the Wuhan urban agglomeration (WUG) and CZTCG. (2) There was a regional complementarity between footprint size (EF_{size}) and footprint depth (EF_{depth}), and areas with rich resources generally had lower EF_{size} and larger EF_{depth} . Cluster analysis showed that Jingmen, Xianning, and Xiangyang had a better pattern of natural capital utilization owing to their large EF_{size} and small EF_{depth} , while Wuhan, Ezhou, and Huanggang had a poor ecological sustainability owing to their small EF_{size} and large EF_{depth} . (3) The matching degrees of EF_{3D} with water resources and population were poor. In comparison, a high matching degree was observed between EF_{3D} and GDP. When the urbanization rate of the urban agglomeration reached a certain threshold, its relationship with per capita EF_{3D} and EF_{depth} may change. The correlation between per capita EF_{3D} and urbanization rate of the WUG, CZTCG, and PYLCG showed an inverted U shape. In addition, EF_{depth} of the PYLCG increased with the increase of urbanization rate, and the correlation between EF_{depth} and urbanization rate of the WUG and CZTCG accorded with the Kuznets curve. Findings can provide theoretical support for the sustainable use of natural capital and green development in the UAMRYR.

Key words: urban agglomeration in the middle reaches of the Yangtze River Basin; natural capital utilization; ecological footprint; urbanization rate; correlation characteristics