http://www.resourcesindustries.net.cn zycy@cugb.edu.cn

长江中游城市群生态足迹动态分解与区域差异

曹胜晟[1]，于 楠[1,2]，孙仁金[2]

（1. 中国石油大学（北京）未来能源学院，北京 102249；
2. 中国石油大学（北京）经济管理学院，北京 102249）

摘 要：首先论文基于2010—2022年长江中游城市群的生物资源消耗、能源消耗、经济社会发展等数据，计算了其生态足迹；然后采用三维生态足迹对其可持续性进行了分类，并构建LMDI模型确定了生态足迹的主要影响因素；最后利用基尼系数和泰尔指数分析长江中游城市群生态足迹主要影响因素的区域差异。研究结果显示：1）长江中游城市群生态足迹呈现“低足迹、低承载力”的特征，人均生态足迹（1.223 hm^2/人）远低于全国平均水平（3.737 hm^2/人）；2）2010—2022年长江中游城市群生态承载力持续微降，能源用地成为生态足迹的主导类型，在萍乡、新余等工业城市能源用地占比超过90%，而生态承载力构成以林地和耕地为主，但空间分布不均；3）基于生态足迹广度与深度的矩阵分类显示，研究期内仙桃、天门等城市的生态承载力由低可持续状态提升至中等水平，而武汉、鄂州等技术型重工业城市生态承载力仍处于不可持续状态，整体上中部城市可持续性较强，北部城市可持续性提升显著；4）LMDI分解进一步揭示，经济增长（贡献率45.3%）与技术进步（贡献率38.7%）是生态足迹扩大的主要驱动因素，技术进步并未整体抑制生态压力，说明工业扩张带来的资源需求抵消了绿色技术效益，反映出当前技术路径仍依赖高能耗模式，人口与土地结构影响微弱；5）区域技术经济差异分析表明，技术资源的空间分布在2015年前高度集中，基尼系数达0.76，随后因技术扩散与次级城市产业升级逐步改善，经济差异则整体稳步下降，尤其在2020年后趋于均衡，印证了区域协同政策在推动经济融合方面的积极作用。

关键词：长江中游城市群；三维生态足迹；生态承载力；LMDI模型；区域差异
中图分类号：F290 **文献标识码：**A **文章编号：**1673－2464（2026）04－0001－16

Dynamic Decomposition and Regional Differences of Ecological Footprint in the Urban Agglomeration of the Middle Reaches of the Yangtze River

CAO Shengsheng[1], YU Nan[1,2], SUN Renjin[2]

(1. *College of Energy Innovation, China University of Petroleum, Beijing* 102249, *China*;

收稿日期：2025－07－08；**修订日期：**2025－10－11；**责任编辑：**任宝琴。
网络出版地址：https://link.cnki.net/urlid/11.5426.TD.20260507.1006.002 **DOI：**10.13776/j.cnki.resourcesindustries.20260429.001
基金项目：国家自然科学基金面上项目（72273151）；中国石油大学（北京）校级博士后基金（2462025SZBH001）；东营市与重质油全国重点实验室碳中和联合研究院研发课题。
第一作者简介：曹胜晟，本科生，主要从事生态足迹核算、碳储科学研究。E-mail：2435521268@qq.com
通信作者简介：于楠，博士、讲师，主要从事能源生态足迹、能源－环境－经济及政策系统分析研究。E-mail：yunan@cup.edu.cn

引用格式：曹胜晟，于楠，孙仁金，2026. 长江中游城市群生态足迹动态分解与区域差异[J]. 资源与产业，28(4)：1－16.
CAO Shengsheng, YU Nan, SUN Renjin, 2026. *Dynamic decomposition and regional differences of ecological footprint in the urban agglomeration of the middle reaches of the Yangtze River*[J]. *Resources & Industries*, 28(4): 1－16.

2. *School of Economics and Management*, *China University of Petroleum*, *Beijing* 102249, *China*)

Abstract: Based on data on bio-resource consumption, energy consumption, and socio-economic development in the urban agglomeration of the middle reaches of Yangtze River from 2010 to 2022, this paper calculates the ecological footprint; classifies sustainability using the three-dimensional ecological footprint model; constructs an LMDI model to identify the main driving factors of the ecological footprint; and finally analyzes regional differences in these main factors using the Gini coefficient and the Theil index. The results show that: 1) the ecological footprint of the urban agglomeration is characterized by "low footprint, low carrying capacity", and the per-capita ecological footprint (1.223 hm^2/person) is far below the national level (3.737 hm^2/person); 2) the ecological carrying capacity of the urban agglomeration shows a slight continuous decline from 2010 to 2022, energy land is the dominant component of the ecological footprint, accounting for more than 90% in industrial cities such as Pingxiang and Xinyu, while ecological carrying capacity is mainly composed of forestland and cropland but is unevenly distributed spatially; 3) matrix classification based on ecological footprint breadth and depth shows that during the study period, cities such as Xiantao and Tianmen improved from low sustainability to a medium level, whereas technology-intensive heavy industrial cities such as Wuhan and Ezhou remain unsustainable. Overall, central cities show stronger sustainability, and northern cities exhibit significant improvements; 4) LMDI decomposition further reveals that economic growth (contribution rate 45.3%) and technological progress (contribution rate 38.7%) are the main drivers of ecological footprint expansion. Technological progress does not, on the whole, curb ecological pressure, indicating that resource demand from industrial expansion offsets the benefits of green technology. This suggests the current technological path still relies on a high-energy-consumption model, while the effects of population and land structure are relatively small; and 5) analysis of regional techno-economic differences indicates that the spatial distribution of technological resources was highly concentrated before 2015 (Gini coefficient 0.76), but subsequently improved as technology diffused and secondary cities upgraded their industries. Economic disparities declined steadily overall and tended to balance especially after 2020, confirming the positive role of regional coordination policies in promoting economic integration.

Key words: The urban agglomeration of the middle reaches of Yangtze River; three-dimensional ecological footprint; ecological carring capacity; LMDI model; regional difference

0 引言

"环境库兹涅茨曲线"假说指出，经济增长与环境退化之间存在"倒 U 型"关系，即经济初期往往伴随环境恶化，达到某一拐点后，环境质量会随经济增长而自然改善。基于此理论，诸多发达国家采取了"先污染后治理"的路径（Jahanger et al.，2022）。然而，日本水俣病、伦敦雾霾、洛杉矶光化学烟雾等事件警示我们，经济发展不应以牺牲环境为代价（Ullah et al.，2021），清澈的水源和葱郁的山川均是无价之宝。当前节约资源与环境保护已成为我国的基本国策。

"新型城镇化"是人口向城镇集中的过程，随着城镇数量增加与城市人口规模扩大，环境问题也随之凸显。中国提出的"新型城镇化"战略，引发了大量人口活动，导致土地无序扩张与资源高强度开发（马双等，2025），给生态环境带来了巨大压力，也给经济可持续发展带来了诸多挑战（许静等，2025）。可持续发展问题本质上关乎生态资本与人工资本的合理配置，其中生态资本常用生态足迹衡量，而人工资本通常用 GDP 衡量（Li et al.，2021）。因此，可持续发展问题亦是经济发展与生态足迹的协调问题。1992 年，加拿大经济学家 William 提出的生态足迹模型，通过将各类消费转化为相应的生物生产性土地面积，以评估生产活动与经济环境的关系（William，1992）。2004 年，Wackernagel et al.（2004）与 Monfreda et al.（2004）进一步优化了该模型，增强了其易用性与操作性。

目前生态足迹模型已被广泛应用于各类生产活动中，成为政府决策的重要依据。学者们也从全国到省级尺度，分析和评估了不同地区、不同年份的生态足迹。徐中民等（2000）率先开展了生态足迹核算的研究，为后续研究奠定了坚实基础。史丹等（2016）对中国 1991—2013 年生态足迹变化及成因进行了详细分析，揭示了人类活动对生态系统的影

响及其动态变化。王涛等（2017）对陕西省、李倩等（2023）对桂林市、陈义忠等（2022）对长江中游城市群、官冬杰等（2022）对长江流域、鲁钰等（2022）对西北地区的生态足迹也展开了深入研究，为地方经济可持续发展提供了科学依据。此外，该模型还被广泛应用于旅游、城市交通、森林、纺织、互联网等领域。章锦河等（2004）基于生态足迹理论，对黄山市的旅游生态足迹进行了实证分析；王中航等（2015）、Gassner et al.（2018）对城市交通的生态足迹进行了深入研究；Hu et al.（2006）测算了中国森林的生态足迹，揭示了森林资源利用与生态保护之间的关系；Costa et al.（2019）将生态足迹应用于葡萄牙的纺织业，为评估产业生态效率提供了新的方法；Das et al.（2020）测算了互联网设备的全球能源生态足迹，揭示了信息技术产业对全球能源消耗的贡献。

利用生态足迹模型评估不同城市及城市群的生态环境，可为城市可持续发展提供理论支撑。陈义忠等（2025）运用水资源生态足迹模型研究了长江经济带三大城市群绿色发展与水资源利用格局的时空特征。李涛等（2025）采用生态足迹模型分析了中原城市群自然资本利用特征，并结合熵权法对其综合生态安全状况进行了评价。Jiang et al.（2025）采用拓展的非线性 STIRPAT 模型，预测了关中平原城市群共享社会经济路径情景下的人口和城市化率，结果表明人均 GDP 和人口增长是三维生态足迹扩张的主要驱动力，并且在研究期内关中地区的生态足迹增加了 4.3 倍，同时生态承载力下降出现明显的生态赤字。Qu et al.（2020）采用能值生态足迹法评估了中国 17 个特大城市 2007—2016 年城市居民消费的可持续性，结果表明生态赤字主要存在于经济发达的京津冀、长三角和珠三角地区。

随着生态足迹概念及其评估方法的不断完善，国内外学者对其研究已经不再局限于简单的测算和时空变化描述，而是深入到其背后的驱动机制研究。生态足迹的变化是经济、社会及人类活动共同作用的结果，准确分析其影响因素对快速调整政策、实现可持续发展至关重要。马晓蕾等（2023）构建了一套水生态足迹影响因素的指标体系，并运用 CFEM（cross-section fixed effects model）模型深入剖析了陕西省水生态足迹的形成原因。张婉玲等（2023）通过引入“省公顷”概念来修正水资源均衡因子，进而计算并探讨了 2000—2019 年长江中游城市群水资源生态足迹的时空演变特征，同时借助地理探测器探究其背后的驱动因素。Dong et al.（2020）采用托比特回归研究了影响全国及东部、中部、西部、东北 4 个地区的生态绩效的因素。上述文献使用的面板回归能够分析在某一特定时间点独立变量与因变量之间的关系，从而得出每个影响因素对生态足迹的影响程度。然而，面板回归无法得出研究期间每年的影响程度及其变化情况。此外，大多数研究尚未量化生态足迹影响因素的区域差异。因此，本文采用基尼系数和泰尔指数测度长江中游城市群生态足迹影响因素的区域差异，进而分析差异来源及影响因素的动态变化。

长江中游城市群，不仅是长江经济带高质量发展的核心驱动力，也是国家推进“双碳”战略与生态文明建设的关键区域（Xie et al., 2022）。然而，该区域快速的工业化与城镇化步伐显著加剧了资源消耗，导致生态承载力不断削弱，对区域可持续发展构成了严峻考验。生态足迹作为量化资源利用与生态压力的关键指标，虽已广泛应用于全球及国家级层面的研究，但在跨省域城市群尺度的核算与分析上仍显不足，尤其是在对长江中游城市群这一典型协同发展区域的长期动态监测与驱动机制解析上存在明显空白，进而影响了政策制定的精准性。

纵观已有研究，虽然生态足迹被广泛用于分析人类活动与生态环境之间的关系，但仍存在以下不足：1）在测算长江经济带或长江中游城市群整体生态足迹时，少有文献测算长江中游城市群各城市的生态足迹；2）大多研究侧重分析生态足迹的影响因素，少有研究引入三维生态足迹模型对长江中游城市群的可持续发展状况进行分类；3）子样本回归只能得到研究期间各地区影响因素的影响程度，但无法获得区域间的差异，也无法描述影响因素的动态变化情况。

本文的创新之处在于：1）构建长江中游城市群三维生态足迹模型，运用自然间断点分类法，将 31 个城市划分为 9 种可持续发展类型，为制定差异化发展策略提供依据；2）构建 LMDI 模型分解生态足迹的影响因素，确定各因素的年度影响程度，分析各影响因素的变化趋势，确定可持续发展的调整方向；3）运用基尼系数和泰尔指数分析主要影响因素的区域差异，识别不同区域影响因素的来源

和动态变化，为促进区域间的协调可持续发展提供理论支撑。

1 研究区概况与数据来源

1.1 研究区概况

2015 年 4 月，国务院批复同意的《长江中游城市群发展规划》明确长江中游城市群是以武汉城市圈、环长株潭城市群、环鄱阳湖城市群为主体形成的特大型城市群，规划范围包括湖北、湖南、江西 3 个省的 28 个地级城市及其部分县区，以及 3 个省直辖县级市（仙桃、潜江、天门），地理版图辽阔，战略地位举足轻重（图 1）。该城市群总面积约 32.6 万 km^2，占全国总面积的 3.4%，规模远超长三角城市群的 1.5 倍，更是珠三角城市群的 6 倍之巨，彰显出了巨大的发展潜力与空间优势。2022 年 2 月，《长江中游城市群发展“十四五”实施方案》提出的发展目标是“到 2025 年，长江中游城市群协同发展取得实质性进展，经济总量占全国比重进一步提升，支撑长江经济带发展、中部地区崛起乃至全国高质量发展能力显著增强”。2023 年，长江中游城市群经济实力再次跃上新台阶，经济总量 11.7 万亿元，占全国经济总量的份额为 9.3%。其中，武汉与长沙以破万亿的经济规模引领区域经济蓬勃发展。该城市群常住人口约 16 921.01 万人，占全国人口总数的 12%，庞大的人口基数为区域经济的持续繁荣提供了坚实后盾。

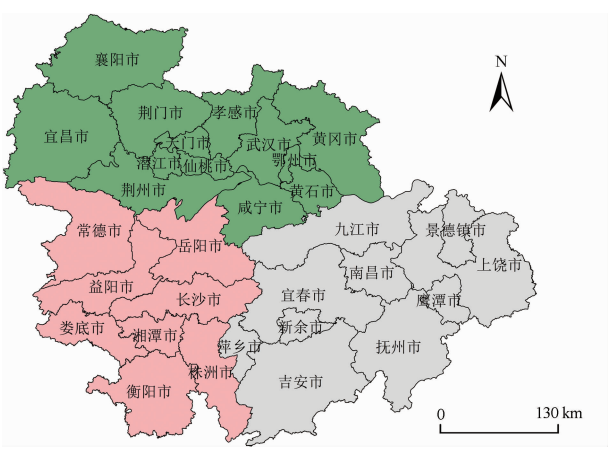


图 1 长江中游城市群的位置

Fig. 1 Location of the urban agglomeration in the middle reaches of the Yangtze River

长江中游城市群的人口规模呈现非均衡分布特征，武汉、长沙、南昌三大省会城市为核心人口集聚区，而潜江市人口规模最小（表 1）。2023 年长江中游城市群 GDP 总量约 11.7 万亿元，武汉市贡献率最高，达 17.2%，天门市经济总量最低。由于各城市发展不同，区域内部经济水平分化显著，人均 GDP 跨度也较大，人均 GDP 超过 10 万元的城市有 10 个，其中宜昌、武汉和长沙位居前三，人均 GDP 低于 5 万元的有黄冈和娄底。武汉和长沙城镇化率较高，约 84%，天门市最低，仅 47%。整体上长江中游城市群经济社会发展呈现“省会引领、梯度递减”的特征。

表 1 2023 年长江中游城市群主要社会经济指标

Table 1 Main socio-economic indicators of the urban agglomeration in the middle reaches of the Yangtze River in 2023

区域	人口/万人	GDP/亿元	人均 GDP/元	城镇化率	经济结构
南昌市	653.81	7 203.50	110 177	0.789 2	0.995 9
景德镇市	161.67	1 201.10	74 293	0.675 1	1.173 5
萍乡市	180.16	1 151.66	63 924	0.704 2	1.258 9
九江市	453.61	3 845.11	84 766	0.638 2	1.153 8
新余市	119.58	1 261.89	105 526	0.744 3	1.323 7
鹰潭市	115.09	1 282.25	111 412	0.671 3	0.827 3
吉安市	438.61	2 735.07	62 357	0.550 7	1.053 8
宜春市	494.43	3 467.48	70 130	0.591 8	1.193 8
抚州市	356.26	2 034.91	57 118	0.597 2	1.252 5
上饶市	639.60	3 401.60	53 183	0.570 6	1.344 4
武汉市	1 377.40	20 011.65	145 471	0.847 9	1.872 7
黄石市	243.95	2 108.96	86 450	0.682 4	1.062 6
宜昌市	392.40	5 756.35	146 696	0.653 2	1.257 5
襄阳市	583.66	5 842.91	100 108	0.641 5	1.122 5
鄂州市	107.22	1 266.03	118 078	0.679 0	1.290 9
荆门市	255.00	2 272.30	89 109	0.612 0	1.245 8
孝感市	417.18	2 919.85	69 873	0.628 3	1.226 0
荆州市	513.55	3 151.49	61 369	0.581 8	1.346 7
黄冈市	579.22	2 884.68	49 803	0.505 0	1.501 7
咸宁市	302.82	1 819.23	69 634	0.588 5	1.626 3
天门市	109.38	712.17	64 707	0.474 2	1.346 7
仙桃市	109.32	1 014.33	92 245	0.614 3	1.058 7
潜江市	84.17	904.92	106 624	0.578 3	1.219 6
长沙市	1 051.31	14 331.98	136 325	0.835 9	1.586 9
株洲市	385.20	3 667.90	94 983	0.728 3	1.101 6

续表 1

区域	人口/万人	GDP/亿元	人均GDP/元	城镇化率	经济结构
湘潭市	270.12	2 741.84	101 474	0.661 6	0.852 5
衡阳市	649.70	4 190.87	64 108	0.570 0	1.691 1
岳阳市	499.14	4 841.78	96 749	0.623 9	1.285 7
常德市	518.70	4 385.70	84 552	0.579 8	1.283 3
益阳市	375.92	2 136.21	56 567	0.526 7	0.914 3
娄底市	445.88	1 990.50	44 642	0.498 2	1.315 8

注：经济结构为第三产业增加值与第二产业增加值的比值

1.2　数据来源及处理

鉴于数据的可获得性及连续性，本文研究期间选为 2010—2022 年。生物资源消耗、能源消耗、土地利用面积、经济社会发展信息等原始数据均来自南昌、长沙、武汉等 31 个市的统计年鉴，个别缺失数据采用插值法填充；产量因子和均衡因子参考刘某承（2010）基于净初级生产力的计算结果。构建三维生态足迹评价指标体系时，将生物生产性土地细分为耕地、林地、草地、水域、建设用地和化石能源用地六大类，并进一步划分为 45 个具体的消费账户，涵盖了稻谷、柑橘、牛肉、海水产品、电力、煤炭等。具体如表 2 所示。

表 2　三维生态足迹评价指标体系

Table 2　3D ecological footprint evaluation index system

产品消费类型	土地利用类型	具体指标
生物资源消耗	耕地	稻谷、玉米、小麦、大豆、棉花、薯类、甘蔗、蔬菜、瓜果类、禽肉、猪肉、禽蛋、食用菌、烟叶、花生、油菜籽、芝麻、麻类
	林地	柑橘、梨、桃子、苹果、葡萄、核桃、茶叶、板栗、油茶籽、油桐籽、松脂、蚕茧
	草地	牛肉、羊肉、牛奶
	水域	海水产品、淡水产品
能源消耗	建设用地	电力
	化石能源用地	煤炭、焦炭、原油、汽油、柴油、煤油、燃料油、天然气、液化天然气

2　研究方法

2.1　二维生态足迹

二维生态足迹（ecological footprint，EF）量化了耕地、林地、草地、水域、建设用地和化石能源用地 6 种不同土地类型的资源消耗，然后将其转化为生物生产性土地面积。生态承载力（ecological carrying capacity，EC）代表了一个区域内能够持续支撑人类生存和发展的生物生产性土地面积。为全面评价可持续发展水平，常采用二维生态足迹模型对生态足迹和生态承载力进行比较分析，计算公式分别为

$$EF = P \times \sum_{i=1}^{6}\left(r_i \times \sum_{j=0}^{k}\frac{c_{ij}}{p_{ij}}\right), \tag{1}$$

$$EC = P \times \sum_{i=1}^{6}\left(\frac{s_i}{P} \times r_i \times y_i\right) \times (1 - 12\%), \tag{2}$$

式中：EF 为某区域生态足迹，hm^2；P 为某区域人口数量；i 为土地类型；j 为生产产品；r_i 为第 i 类生物生产性土地均衡因子；c_{ij} 为第 i 类生物生产性土地第 j 种产品人均年消费量，kg/人；p_{ij} 为第 i 类生物生产性土地第 j 种产品全球平均单位面积产量，kg/hm^2；EC 为某区域生态承载力，hm^2；y_i 为第 i 种土地利用类型产量因子；s_i 为第 i 类土地利用类型面积，hm^2。生态承载力计算时需扣除 12% 作为生态系统中生物多样性的保护面积。

2.2　三维生态足迹

生态足迹的本质是用面积大小表征人类的资源消费对生态环境的占用程度，旨在量化自然资本在可持续发展中的重要性，但并未对存量和流量作实质性区分，是一种二维平面概念（Yang et al.，2018）。为了克服这一局限，Niccolucci et al.（2009）创新性地构建了基于生态足迹深度和广度的三维生态足迹模型。该模型不仅阐明了城市自然资源流量与存量的枯竭状况，且更有效地估算了城市自然资源利用的生态安全性（Bi et al.，2021）。生态足迹深度表示为维持单位面积当前资源消耗所需土地的倍数；生态足迹广度表明人类在生态容量范围内利用自然资本流量的程度。其公式分别为

$$EF_{3D} = EF_{depth} \times EF_{size}, \tag{3}$$

$$EF_{depth} = 1 + \frac{\sum_{i=1}^{6}\max(EF_i - EC_i, 0)}{\sum_{i=1}^{6}EC_i}, \tag{4}$$

$$EF_{size} = \sum_{i=1}^{6}\min(EF_i, EC_i), \tag{5}$$

式中：EF_{3D} 为三维生态足迹，hm^2；EF_{depth} 为生态足

迹深度；EF_{size} 为生态足迹广度，hm^2；EF_i 为第 i 种土地利用类型的生态足迹，hm^2；EC_i 为第 i 种土地利用类型的生态承载力，hm^2。$EF_{depth} \leqslant 1$，表明该区域的自然资本流动足以满足人类需求，反之表明该区域处于不可持续发展状态。

2.3 LMDI 模型

因子分解常用于度量不同因素对某一指标的影响程度，以测量不同因素在变化过程中的贡献。因子分解方法通常包括结构分解分析（SDA）和指标分解分析（IDA）。IDA 方法包括 Laspeyres IDA 和 Divisia IDA。中国每五年发布一次的投入产出表的实际情况难以满足 Laspeyres IDA 的数据要求。Laspeyres IDA 方法残差较大，影响分解结果的准确性。Ang et al.（2001）提出了因子可逆、时间可逆、无残值、零值稳定的 LMDI 模型。其优点是可避免 Laspeyres IDA 方法的不完全分解，被广泛应用于能源消耗、资源消耗和碳排放等各种因素的分解研究中（De Boer et al., 2020）。本文采用 LMDI 方法将长江中游城市群生态足迹的变化分解为土地结构、技术、经济和人口 4 个因素，以比较不同影响因子的贡献，并讨论影响生态足迹变化的主要因素。LMDI 模型可分为加性模型和乘法模型（Pan et al., 2022）。本文采用 LMDI II 加性模型构建了生态足迹分解模型，其公式为

$$\mathrm{Eef} = \sum_{i=1}^{6} \mathrm{Eef}_i = \sum_{i=1}^{6} \frac{\mathrm{Eef}_i}{\mathrm{Eef}} \times \frac{\mathrm{Eef}}{\mathrm{GDP}} \times \frac{\mathrm{GDP}}{P} \times P = \sum_{i=1}^{6} S_i \times I \times F \times P, \quad (6)$$

式中：Eef_i 为第 i 类生物生产性土地类型的生态足迹；S_i 为第 i 类生物生产性土地的生态足迹与总生态足迹的比值，表示土地结构影响因素；I 为单位 GDP 的生态足迹，衡量生态环境利用效率，代表技术影响因素；F 为人均 GDP，衡量该地区的经济水平，代表经济的影响因素；P 为该区域的人口，代表人口影响因素。

生态足迹在 t 期内的变化及各影响因子的贡献为

$$\Delta\mathrm{Eef} = \mathrm{Eef}^t - \mathrm{Eef}^0 = \sum_{i=1}^{6} (S_i^t \times I^t \times F^t \times P^t) - \sum_{i=1}^{6} (S_i^0 \times I^0 \times F^0 \times P^0) = \Delta\mathrm{Eef}_s + \Delta\mathrm{Eef}_I + \Delta\mathrm{Eef}_F + \Delta\mathrm{Eef}_P, \quad (7)$$

式中：Eef^t 为第 t 期的生态足迹；Eef^0 为基期的生态足迹；$\Delta\mathrm{Ef}$ 为第 t 期相对于基期的生态足迹变化。分别用 $\Delta\mathrm{Eef}_s$、$\Delta\mathrm{Eef}_I$、$\Delta\mathrm{Eef}_F$、$\Delta\mathrm{Eef}_P$ 表示土地结构、技术、经济、人口对生态足迹的影响变化，其计算公式分别为

$$\Delta\mathrm{Eef}_s = \sum_{i=1}^{6} \frac{\mathrm{Eef}_i^t - \mathrm{Eef}_i^0}{\ln \mathrm{Eef}_i^t - \ln \mathrm{Eef}_i^0} \times \ln \frac{S_i^t}{S_i^0}, \quad (8)$$

$$\Delta\mathrm{Eef}_I = \sum_{i=1}^{6} \frac{\mathrm{Eef}_i^t - \mathrm{Eef}_i^0}{\ln \mathrm{Eef}_i^t - \ln \mathrm{Eef}_i^0} \times \ln \frac{I_i^t}{I_i^0}, \quad (9)$$

$$\Delta\mathrm{Eef}_F = \sum_{i=1}^{6} \frac{\mathrm{Eef}_i^t - \mathrm{Eef}_i^0}{\ln \mathrm{Eef}_i^t - \ln \mathrm{Eef}_i^0} \times \ln \frac{F_i^t}{F_i^0}, \quad (10)$$

$$\Delta\mathrm{Eef}_P = \sum_{i=1}^{6} \frac{\mathrm{Eef}_i^t - \mathrm{Eef}_i^0}{\ln \mathrm{Eef}_i^t - \ln \mathrm{Eef}_i^0} \times \ln \frac{P_i^t}{P_i^0}。 \quad (11)$$

2.4 基尼系数和泰尔指数

基尼系数（Gini coefficient）是经济学中的一个用来判断收入分配公平程度的量化指标（金菊良等，2023）。此方法在经济、社会、教育、环境等方面广泛应用，本文采用基尼系数计算长江中游城市群的技术经济差异。目前基尼系数的计算方法主要有定义法、梯形面积法、积分计算法等，本文采用梯形面积法（Xue et al., 2019），其公式为

$$G = 1 - \sum_{n-1}^{i} (x_i - x_{i-1})(x_i + x_{i+1}), \quad (12)$$

式中：G 为基尼系数；x_i 为第 i 年相关城市技术或经济指标，$i=1$ 时，$x_{i-1}=0$。

泰尔指数通过引入信息熵的概念来测度差异性，将总体不均衡性划分为各部分间以及各部分内部的差异性（阮泽景等，2025）。具体测算方法为

$$T_g = \sum_{i=1}^{n} W \ln \frac{W}{Y_i}, \quad (13)$$

$$\mathrm{TWR} = \sum_{g=1}^{k} W_g T_g, \quad (14)$$

$$\mathrm{TBR} = \sum_{g=1}^{k} W_g \ln \frac{W_g}{Y_g}, \quad (15)$$

$$T = \mathrm{TBR} + \mathrm{TWR}。 \quad (16)$$

式中：T_g 为区域 g 的泰尔指数；W 为区域 g 内城市样本个数的倒数；Y_i 为城市 i 的技术或经济值占区域内技术或经济值的比重；n 为区域 g 内城市个数；TWR 为区域内泰尔指数；W_g 为区域 g 内城市个数占样本总量的比重；k 为区域个数；TBR 为区域间泰尔指数；Y_g 为区域 g 内所有技术或经济值占样本技术或经济值的比重；T 为整体泰尔指数。

3　结果分析

3.1　长江中游城市群生态足迹时空变化

3.1.1　生态足迹变化趋势分析

从城市群尺度看，2010—2022 年，长江中游城市群人均废弃物排放和资源消耗相对较低，人均生态足迹明显低于全国平均水平，从 1.198 hm^2/人增加至 1.223 hm^2/人，而全国从 3.160 hm^2/人增加至 3.737 hm^2/人（图 2a）。长江中游城市群的人均生态承载力呈现微幅下降的趋势，从 0.283 hm^2/人下降至 0.278 hm^2/人（图 2b）。这可能是由于城市化进程中的土地利用变化、生态环境压力增大等因素导致的，但尽管如此，其整体水平仍远低于全国平均水平，显示出该城市群在生态环境保护方面仍面临较大挑战，需要持续加强生态保护与修复工作。

从省域尺度看，2010—2022 年，江西省各市的生态足迹组成和比例发生了显著变化。2010 年，江西省各市的生态足迹均以能源用地为主，主要原因是江西省各市的工业化进程加速，对能源的需求大幅增加。尤其是萍乡和新余，作为江西省的重要工业城市，其能源用地生态足迹占比均超过了 90%（图 3a），说明这两个城市在工业发展过程中对能源强烈依赖。耕地生态足迹在抚州的比例最高，达 56.6%。草地生态足迹在吉安和抚州的比例相对较高，均超过 10%，这可能与这些地区的畜牧业发展以及自然环境条件有关。其他土地类型的生态足迹占比相对较小，显示出当时江西省各市的土地利用结构相对单一。2022 年，江西省各市生态足迹的组成发生了显著变化（图 3b）。抚州的能源用地比例显著增加了 46.2%，然而尽管能源用地比例增加，但耕地生态足迹却普遍下降，这可能与城市化进程的加速以及农业产业结构调整有关。城市化导致大量耕地被占用，而农业产业结构调整则可能使得部分耕地转变为其他类型的用地。

2010—2022 年，湖北省各城市的生态足迹均有能源用地（图 3c、图 3d）。一方面，随着城市化步伐的加速，耕地被大量转用于其他建设项目，导致多数城市的耕地生态足迹占比呈现下降趋势，与此同时，多数城市的林地生态足迹占比虽有所增长，但增幅相对平缓。另一方面，受城市化推进及农业开发等多重因素影响，多数城市的草地生态足迹占比呈现缩减态势，而建设用地的生态足迹占比则显著攀升。此外，多数城市的能源用地生态足迹占比亦有所增加，这或许与日益增长的能源需求以及能源基础设施建设的加强密不可分。

2010—2022 年，湖南省大多数城市的各类生态足迹都有所变化，能源用地生态足迹在多数城市中占比较大，这表明能源消费是这些城市生态足迹的重要组成部分（图 3e、图 3f）。

从生态足迹构成看（图 4a），荆州与其他市差异较大，其人均生态足迹主要由耕地以及水域构成，两者合计占比超过 75%。吉安与襄阳、常德和长沙的人均生态足迹虽然仍以能源用地为主，但其耕地、草地的资源消耗也占据较高比例。荆州、天门、黄冈、仙桃、长沙的耕地资源消耗占比高于其他城市。从生态承载力构成看（图 4b），2000—

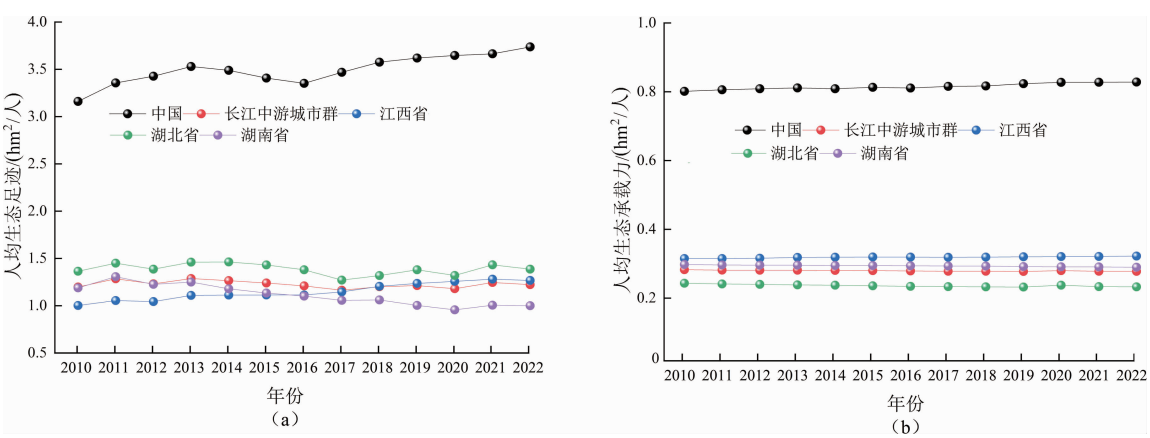


图 2　2010—2022 年长江中游城市群生态足迹时空演变

Fig. 2　Spatial and temporal evolution of ecological footprint of urban agglomerations in the middle reaches of the Yangtze River during 2010 – 2022

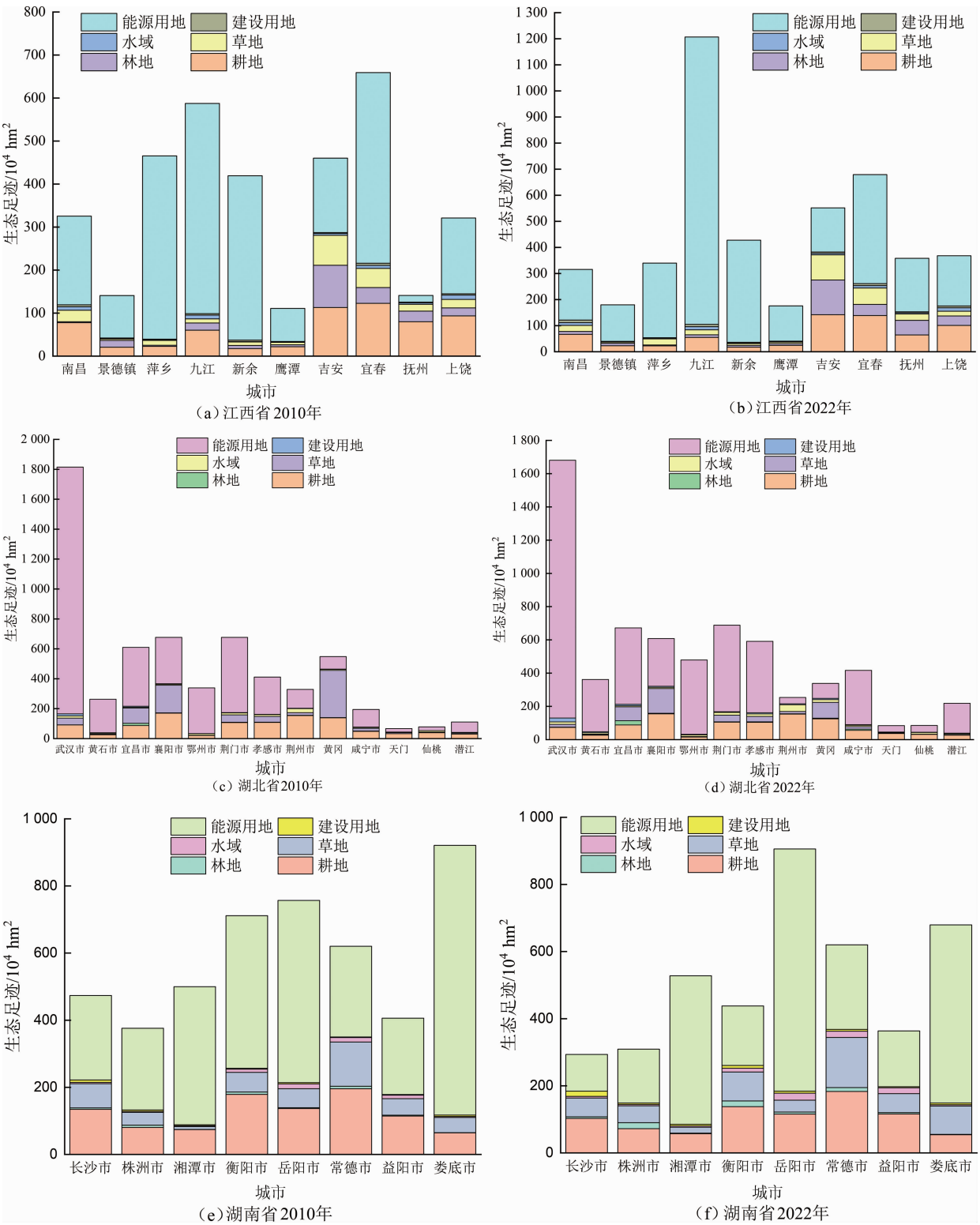


图 3 2010—2020 年长江中游城市群各城市各土地类型的生态足迹变化

Fig. 3 Changes of ecological footprint by land type in cities of the urban agglomerations in the middle reaches of Yangtze River during 2010 – 2020

2022 年长江中游城市群生态承载力总体呈稳定趋势，由 2000 年的 3 425.69 万 hm^2 增至 2022 年的 3 456.77万 hm^2。2000—2022 年，长江中游城市群生态承载力主要由林地以及耕地构成，建设用地、水域次之，能源用地与草地占比最小，这是因为草地大多分布于中国西南以及西北地区。武汉、鄂

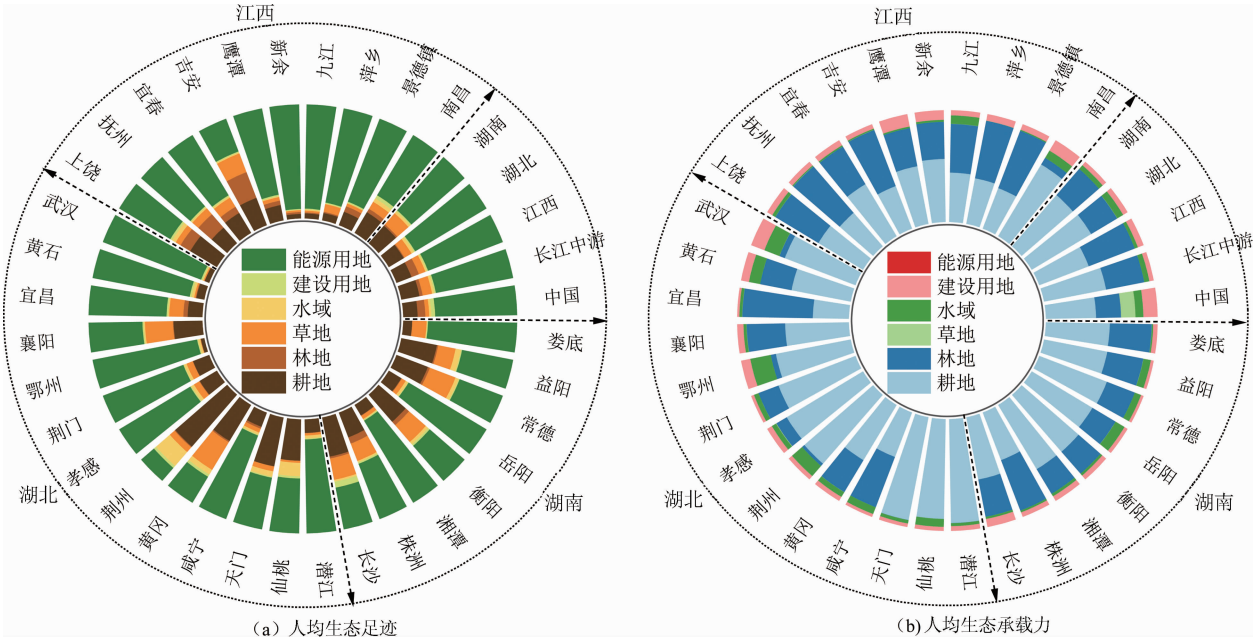


图 4　2022 年长江中游城市群人均生态足迹和生态承载力构成

Fig. 4　Per capita ecological footprint and ecological carrying capacity of urban agglomerations in the middle reaches of the Yangtze River in 2022

州、荆州、黄石等城市的水域生态承载力占比较高。天门、仙桃、潜江等传统农业区的生态承载力 80% 以上由耕地构成，其他土地类型占比极低。

3.1.2　生态足迹深度和广度变化分析

从城市群尺度看，生态足迹深度值自 2010 年的 4.236 持续上升至 2022 年的 4.401（图 5），表明该区域不可持续的发展状况正在不断恶化，且生态足迹深度值远高于 1 的界限，说明长江中游城市群当前处于不可持续发展状态。同时，2010—2022 年长江中游城市群的自然资本流量也展现出下滑态势，人均生态足迹广度从 0.283 hm^2/人微降至 0.278 hm^2/人（图 5）。

从城市尺度看（图 6），2022 年鄂州（31.743）、武汉（20.615）、新余（13.569）等城市生态足迹深度值较高，远超长江中游城市群平均水平。研究表明，鄂州作为鄂东南重要能源基地和钢铁重镇，其工业体系以高耗能、高排放的重工业为核心（杨一旸，2021），重工业依赖导致化石燃料用地、耕地和水域资源过度消耗，形成生态赤字。武汉作为湖北省会及工业中心，钢材、汽车、石化等产业快速发展，化石燃料用地需求激增（明玉洁，2020），化石燃料用地占比显著。此外，武汉作为华中第一大城市，流动人口弹性大（张辉等，2021），对农产品、能源及建设用地需

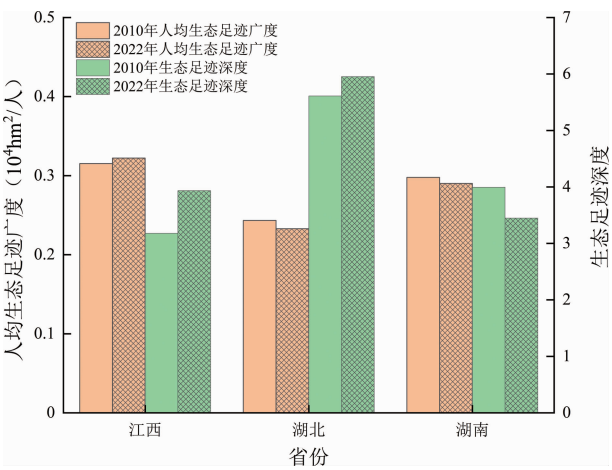


图 5　2010—2022 年长江中游城市群 3 省生态足迹深度和人均生态足迹广度

Fig. 5　Ecological footprint depth and per capita ecological footprint breadth of three provinces of urban agglomerations in the middle reaches of the Yangtze River during 2010 – 2022

求激增，反映出高耗能产业对资源存量的透支。新余因钢设市，因工兴业，钢铁产业长期占据经济主导地位，是碳排放的绝对主力。而上饶（1.776）、荆州（1.869）等城市以农业、轻工业为主，资源消耗低，人口较少或分布分散，资源需求压力小，叠加实施绿色发展理念，优化产业融合，减少高耗能产业依赖，因此生态足迹深度较低。在人均生态足迹广度方面，吉安、抚州、常德等地通过推动高

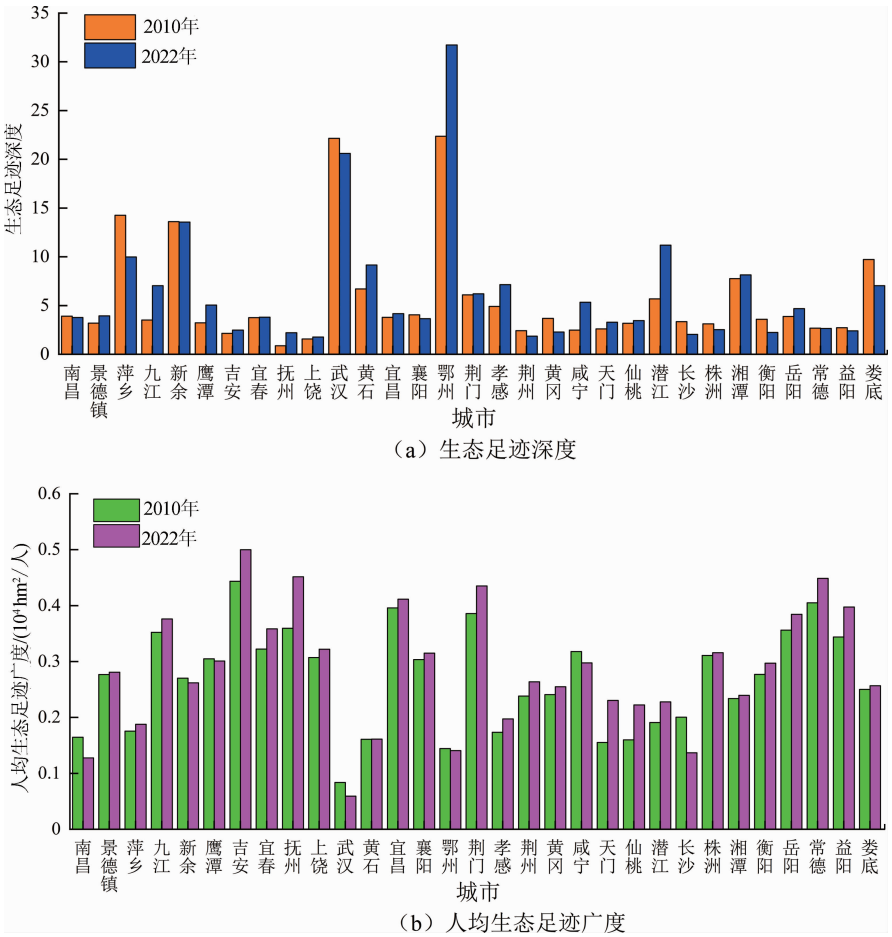


图 6 2010—2022 年长江中游城市群各城市生态足迹深度和人均生态足迹广度

Fig. 6 Ecological footprint depth and per capita ecological footprint breadth of the cities of urban agglomerations in the middle reaches of the Yangtze River during 2010 – 2022

新技术产业和绿色制造业的发展，显著提升了资源利用效率，通过矿山复绿、湿地修复、流域综合治理等工程，恢复了大量生态用地，提升了自然系统的碳汇能力和资源再生能力，因此人均生态足迹广度有所提升。武汉、南昌、长沙等省会城市在工业化和城市化进程中，钢铁、化工等高耗能产业对煤炭、石油等不可再生资源的需求持续攀升，导致资源流量无法匹配消耗速度，人均生态足迹广度较低。

3.2 基于生态足迹深度和广度的城市可持续性分类

为了具体量化自然资本存量的耗竭及自然资本流动的利用状况，三维生态足迹模型引入了生态足迹深度和生态足迹广度 2 个指标，分别用以表征自然资源的存量消耗和流量利用情况。城市的可持续性水平，在一定程度上可以通过这两个指标进行衡量。本文计算了 2010—2022 年长江中游城市群的平均生态足迹深度和人均生态足迹广度，采用自然间断点分类方法将两个指标划分为低（L）、中（M）和高（H）3 个等级。基于上述分类，进一步采用 3 ×3 矩阵分类法，将 31 个城市划分为 9 种不同的可持续发展类型，包括低广度 – 高深度（LH）、低广度 – 中深度（LM）、低广度 – 低深度（LL）、中广度 – 高深度（MH）、中广度 – 中深度（MM）、中广度 – 低深度（ML）、高广度 – 高深度（HH）、高广度 – 中深度（HM）以及高广度 – 低深度（HL）。在这些类型中，人均生态足迹广度较大的城市，其可持续性相对较好；生态足迹深度较深的城市，其可持续性相对较差。因此，LH 类型的城市在可持续性方面表现最差，而 HL 类型的城市则表现出最强的可持续性。

2010 年，长江中游城市群展现出 8 种不同的可持续发展类型（图 7），其中以 HL（9 个城市）、ML（8 个城市）、LL（6 个城市）3 种类型最为常

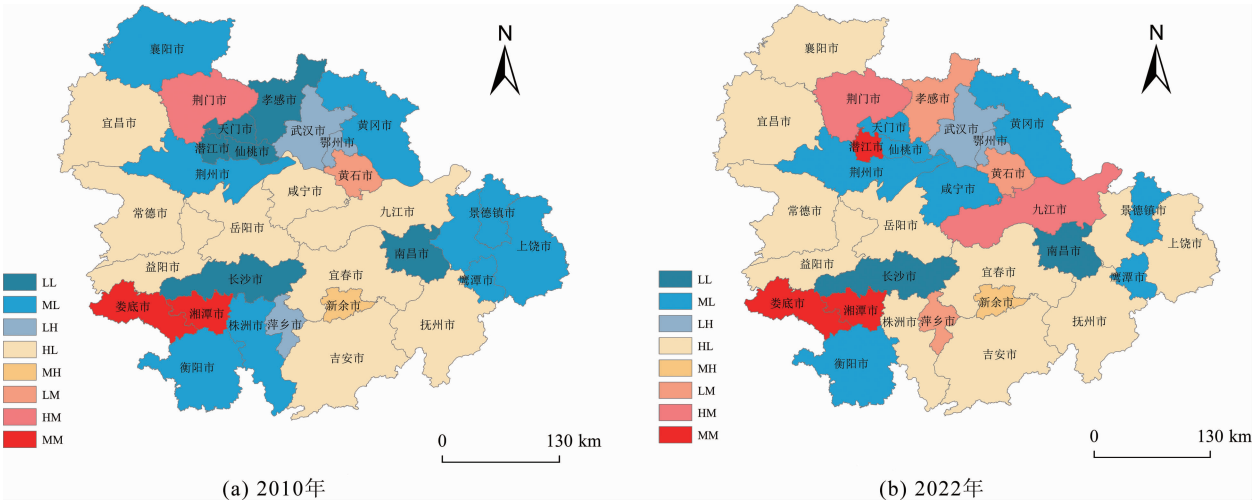


图 7　2010—2022 年长江中游城市群可持续类型

Fig. 7　Sustainable types of the urban agglomerations in the middle reaches of the Yangtze River during 2010 – 2022

见。2022 年，长江中游城市群的可持续发展类型无变化，但 LL 类型城市变少，其他类型城市有所增加或不变，而 HL（10 个城市）、ML（涵盖 8 个城市）类型城市仍然占据最主导地位。研究期内，共有 3 个城市的可持续性出现了下降，7 个城市在可持续性方面取得了进步。长江中游城市群整体可持续性较强，其中，可持续性较强的城市主要分布在中部地区，以 HL 类型为代表。在研究期间内，各城市的可持续性较为稳定，而北部城市其可持续性显著提升，如仙桃、天门从 LL 类型跃升至 ML 类型，可能原因是各城市通过政策驱动强化生态保护，同时利用绿色金融创新促进经济发展。

3.3　长江中游城市群生态足迹变化的影响因素

对长江中游城市群 2010—2022 年人均生态足迹的变化进行分解，结果见表 3。据 LMDI 分解结果，除 2019 年外，其余各年份经济因素、人口因素以及技术进步均对生态足迹的年度变化产生了正向推动，三者共同促进了生态足迹的扩张。其中，人口效应的贡献相较于经济效应与技术进步的贡献显得较为微弱。经济效应与技术进步作为长江中游城市群生态足迹增长的主要驱动力，对生态足迹的变动具有显著的正向影响。

具体而言，该城市群的人均 GDP 从 2010 年的 27 477.8 元跃升至 2022 年的 85 192.3 元，经济效

表 3　2010—2022 年长江中游城市群生态足迹动态分解

Table 3　Ecological footprint dynamic decomposition of the urban agglomeration in the middle reaches of the Yangtze River during 2010 – 2022

年份	ΔEef_s	ΔEef_I	ΔEef_F	ΔEef_P	ΔEef
2010—2011	0.216 182 369	1 973.069 540	2 983.035 226	70.366 578	5 026.687 529
2011—2012	−0.116 805 508	2 450.114 130	1 830.239 135	34.765 630	4 315.002 095
2012—2013	0.016 550 503	901.214 871	1 548.958 693	32.089 741	2 482.279 855
2013—2014	−0.019 826 671	1 671.427 390	1 419.562 491	37.491 224	3 128.461 277
2014—2015	−0.009 315 189	1 299.221 050	997.024 875	45.150 920	2 341.387 534
2015—2016	−0.008 954 748	1 503.431 300	1 149.707 797	49.310 044	2 702.440 184
2016—2017	−0.630 505 504	1 696.023 710	1 150.467 337	41.813 916	2 887.674 452
2017—2018	0.037 462 761	551.138 368	989.971 336	22.969 837	1 564.117 004
2018—2019	0.014 456 515	1 234.677 430	1 387.783 507	32.109 665	2 654.585 063
2019—2020	−0.046 707 029	1 215.339 320	818.452 486	−102.781 352	1 930.963 747
2020—2021	0.037 691 944	566.073 714	1 350.854 530	95.643 894	2 012.609 830
2021—2022	−0.021 611 080	1 219.385 230	946.680 945	24.079 705	2 190.124 266

应始终呈现积极态势，凸显出区域经济迅猛增长对资源与环境的高度依赖（Salman et al.，2022）。然而，其贡献值呈现出逐渐递减的趋势，表明中国正日益重视经济的可持续发展，通过政策调整逐步优化经济发展模式，旨在减轻资源依赖与环境压力。尽管如此，技术效应在多数年份中仍未能缓解经济发展与人口增长给生态环境带来的重负，反而促进了生态足迹的增长，这与学者 Gupta et al.（2022）的研究结论存在分歧。可能的原因在于，技术进步所促成的工业生产增加所导致的生态足迹增幅，超出了绿色技术开发所带来的生态足迹减幅。在多数年份里，土地结构的影响则呈现出负向特征，对生态足迹的增长起到了一定的抑制作用，但土地结构效应的贡献相对微小，对生态足迹的总体变化并未产生显著影响。因此，长江中游城市群应当加大绿色技术的研发力度，以减轻生态环境负担，推动该地区的可持续发展进程。

3.4 长江中游城市群生态足迹影响因素差异

LMDI 分解结果显示技术经济效应是影响长江中游城市群生态足迹变化的主导因素。衡量各城市的科技和经济发展水平对地方政府根据实际情况制定政策尤其重要。本文采用基尼系数和泰尔指数测度长江中游城市群生态足迹的主导影响因素的区域差异，即技术因素（T = Eef/GDP）和经济因素（E = GDP/P）。

3.4.1 城市技术、经济水平测算

对长江中游城市群的 31 个市 2010—2022 年的技术、经济水平进行了全面测算，结果如表 4 所示。从表 4 中可以看出，娄底、萍乡和荆门的技术水平相对较低，武汉、长沙和宜昌经济水平则位居前列。从城市层面看，长江中游地区呈现出技术发展与经济水平复杂多样的匹配关系。湖北荆门（0.476 9）和鄂州（0.455 2）的技术指标领先，但经济水平（分别为 5.507 8 和 7.891 6）并未同步领先，这可能源于其产业结构偏向传统制造业或高新技术产业尚未形成规模效应；湖南娄底的技术水平异常突出（0.767 4），但经济水平却处于低位（3.511 1），说明其可能依赖特定资源型或高能耗产业，提升了生产效率，但产业附加值低、辐射能力有限；武汉（10.771 0）和长沙（10.441 5）作为湖北和湖南的核心区域，经济集聚效应显著，但技术水平相对其经济地位并不突出，反映出其增长更多由投资、消费和服务业驱动，而非单纯依靠技术创新效率；江西萍乡（0.480 5）等城市技术指标较高但经济水平一般，可能与其陶瓷、煤炭等传统工业的技术升级有关，但这些产业面临市场饱和或环保约束，限制了经济效益的释放。总体而言，

表 4 2010—2022 年长江中游城市 T 值和 E 值

Table 4 Average values of T and E of the cities in the middle reaches of the Yangtze River during 2010 – 2022

湖北			江西			湖南		
城市	T	E	城市	T	E	城市	T	E
武汉	0.170 8	10.771 0	南昌	0.086 5	7.539 4	长沙	0.047 9	10.441 5
黄石	0.256 4	5.671 2	景德镇	0.242 1	4.997 3	株洲	0.158 6	6.217 1
宜昌	0.220 5	8.857 0	萍乡	0.480 5	4.820 3	湘潭	0.290 4	6.595 8
襄阳	0.215 7	6.781 7	九江	0.398 5	4.926 4	衡阳	0.230 5	3.930 2
鄂州	0.455 2	7.891 6	新余	0.436 0	8.177 5	岳阳	0.341 4	5.690 4
荆门	0.476 9	5.507 8	鹰潭	0.248 0	6.461 2	常德	0.232 5	5.200 8
孝感	0.320 0	3.645 3	吉安	0.402 8	3.363 5	益阳	0.309 5	3.481 0
荆州	0.217 5	3.357 8	宜春	0.419 8	3.744 1	娄底	0.767 4	3.511 1
黄冈	0.258 7	2.895 8	抚州	0.201 5	3.204 8	—	—	—
咸宁	0.280 8	4.650 0	上饶	0.206 9	2.955 4	—	—	—
天门	0.192 1	3.957 4	—	—	—	—	—	—
仙桃	0.107 8	5.727 7	—	—	—	—	—	—
潜江	0.320 5	6.692 2	—	—	—	—	—	—
平均值	0.268 7	5.877 4	平均值	0.312 2	5.019 0	平均值	0.297 3	5.633 5

各城市在资源禀赋、产业结构和区域分工中的不同定位，导致了技术与经济发展水平的错位。

3.4.2　城市技术、经济水平差异测算

基于长江中游城市群 31 个市的技术经济水平数据，进一步计算了该区域 2010—2022 年的基尼系数与泰尔指数，结果如图 8 所示。基尼系数与泰尔指数作为衡量区域差异的重要指标，其值越低，即表明区域间的发展差异越小，区域发展愈发均衡。长江中游城市群的技术经济差异，是资源禀赋、地理位置及市场条件等多重因素长期共同作用的结果（Zambrano-Monserrate et al.，2020）。从长江中游区域的技术经济差异演变来看，技术水平的基尼系数（0.76）和泰尔指数（0.12）在 2015 年前后达到峰值，表明该时期技术资源在城市间分布极不均衡，这可能源于早期科技创新资源高度集中于武汉、长沙等核心城市，导致与周边城市的技术差距拉大；而经济水平的差异虽在 2015 年因泰尔指数骤升出现短暂扩大，但整体呈稳步下降趋势，尤其是 2020 年后基尼系数降至 0.17，反映出产业转移、基础设施互联互通等区域协同发展政策有效促进了经济活动的空间均衡分布。值得注意的是，2015 年后技术差异显著收窄，可能与技术扩散、人才流动以及次级城市产业升级加速有关，最终推动区域走向更均衡的技术－经济发展路径。

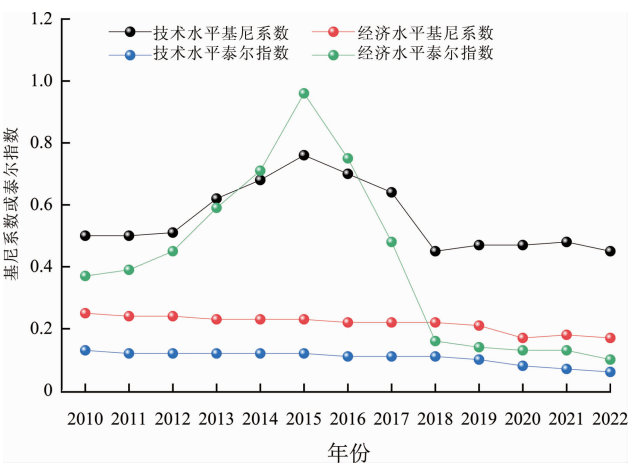


图 8　2010—2022 年长江中游区域技术经济差异

Fig. 8　Technical and economic differences in the middle reaches of the Yangtze River during 2010－2022

4　结论与启示

本文基于三维生态足迹模型，系统阐释了 2010—2022 年长江中游城市群生态足迹时空演变特征，采用 LMDI 模型分解了生态足迹变化的影响因素，并通过基尼系数和泰尔指数分析了技术与经济水平的区域差异。

1）长江中游城市群生态呈现“低足迹、低承载力”特征。其人均生态足迹虽远低于全国平均水平且增长缓慢，但人均生态承载力亦微幅下降，生态压力持续。从城市尺度看，生态足迹结构差异显著，能源用地占比普遍扩大并成为主导，而耕地因城市化占用普遍萎缩，建设用地占比显著攀升。生态承载力总体稳定，以林地和耕地为主，城市间构成各异。

2）基于人均生态足迹广度与生态足迹深度的矩阵分析结果显示，仙桃、天门等城市已从低可持续性类型提升至中等可持续性类型；而娄底、衡阳等重工业城市仍属于“低广度－高深度”类型，亟需加快转型升级步伐。整体来看，中部城市的可持续性水平一直较高，北部城市的可持续性提升尤为显著。

3）LMDI 分解结果表明，经济效应与技术效应是推动生态足迹增长的主要正向驱动因素，贡献率分别为 45.3% 和 38.7%。技术进步在一定程度上缓解了生态压力，但工业化扩张所带来的负面效应抵消了绿色技术带来的正面效益，导致技术效应对生态足迹仍呈现正向影响。人口因素的正向影响相对较小，土地结构效应的抑制作用较为有限。

4）长江中游区域技术差异经历了先扩大后缩小的过程，2015 年达到峰值后持续回落，反映出技术资源从早期高度集中逐步向周边城市扩散；而经济差异整体呈稳步下降态势，尤其在 2020 年后趋于平缓，表明区域协同发展战略有效推动了经济均衡发展。总体而言，该区域正逐步走向技术—经济协同融合、空间分布更为均衡的高质量发展路径。

根据以上研究结论，提出如下建议。

1）通过土地利用总体规划，明确禁止和限制开发区域，重点控制武汉、南昌、九江等城市的能源用地无序扩张。建立高耗能项目准入负面清单，对钢铁、化工等行业新增产能实施“能耗双控”前置审批，禁止能效不达标项目落地。同时，应持续推动新能源产业发展，促进可再生能源替代化石燃料，推广循环经济与清洁生产技术应用。

2）构建跨省技术共享平台，打造集技术对接、

成果转化与政策发布为一体的区域性绿色技术交易市场，并成立由三省科技厅、发改委组成的联合管理委员会，统筹战略规划与资源协调。加快武汉光电子、长沙智能制造等先进技术向娄底、衡阳等技术滞后城市转移扩散。实施“多极发展”战略，避免资源过度集中于省会城市，积极支持赣江新区、长株潭一体化等区域协同项目，促进区域均衡发展。

3）推行差异化生态补偿机制，健全横向转移支付体系，对生态赤字严重地区给予必要补偿，并通过财政补贴引导产业绿色转型。推动碳排放权跨省交易，支持南昌、武汉等城市向长沙等城市购买林业碳汇指标。将生态赤字纳入地方政府考核体系，强化生态红线管控，利用“卫星遥感 + 无人机巡护”建立湿地动态监测系统，实现非法围垦行为“早发现、早处置”，切实保障生态安全。

4）持续加强长江流域生态修复与中游地区耕地保护，严控建设用地无序扩张，提升水域与耕地生态承载力。可开展“互联网 + 全民义务植树”活动，建立个人碳积分账户并允许兑换公共交通优惠，引导公众参与。

5）重视技术与人才交流合作，加大对绿色创新企业的支持，推动绿色技术研发与应用，培育新质生产力，实现经济绿色发展。最终通过技术进步带动产业结构优化，推动长江中游地区经济社会可持续发展。

参考文献

陈义忠，贺鹏明，张思思，等，2025. 水资源利用视角下绿色发展门槛效应及其空间异质性：以长江经济带三大城市群为例[J]. 水资源与水工程学报，36(1)：105-117，128.〔Chen Yizhong，He Pengming，Zhang Sisi，et al.，2025. Green development threshold effect and its spatial heterogeneity from the perspective of water resources utilization：A case study of three urban agglomerations in the Yangtze River Economic Belt[J]. Journal of Water Resources and Water Engineering，36(1)：105-117，128.〕

陈义忠，乔友凤，郝灿，等，2022. 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，44(10)：2137-2152.〔Chen Yizhong，Qiao Youfeng，Hao Can，et al.，2022. Coordination between ecological footprint index and socio economic development of the urban agglomeration in the middle reaches of the Yangtze River basin [J]. Resources Science，44(10)：2137-2152.〕

官冬杰，姜亚楠，严聆云，等，2022. 基于生态足迹视角的长江流域生态补偿额度测算[J]. 生态学报，42(20)：8169-8183.〔Guan Dongjie，Jiang Yanan，Yan Lingyun，et al.，2022. Calculation of ecological compensation amount in the Yangtze River basin from the perspective of ecological footprint[J]. Acta Ecologica Sinica，42(20)：8169-8183.〕

金菊良，孙增金，崔毅，等，2023. 基于子区域基尼匹配系数与减法集对势的水资源空间均衡评价方法[J]. 华北水利水电大学学报(自然科学版)，44(5)：61-70.〔Jin Juliang，Sun Zengjin，Cui Yi，et al.，2023. Spatial equilibrium evaluation method of water resources based on sub-regional Gini matching coefficient and subtraction set pair potential[J]. Journal of North China University of Water Resources and Electric Power(Natural Science Edition)，44(5)：61-70.〕

李倩，马姜明，2023. 2009—2018 年桂林市生态足迹动态变化与驱动力分析[J]. 广西师范大学学报(自然科学版)，41(4)：178-188.〔Li Qian，Ma Jiangming，2023. Dynamic changes and driving forces analysis of ecological footprint in Guilin，China，from 2009 to 2018 [J]. Journal of Guangxi Normal University (Natural Science Edition)，41(4)：178-188.〕

李涛，蒋琼，杨亚琳，等，2025. 基于生态足迹模型的中原城市群生态安全评价及驱动因素分析[J]. 中国环境科学，45(12)：6841-6857.〔Li Tao，Jiang Qiong，Yang Yalin，et al.，2025. Evaluation of ecological security and analysis of driving factors based on ecological footprint model in Central Plains urban agglomeration [J]. China Environmental Science，45(12)：6841-6857.〕

刘某承，2010. 中国生态足迹的时间动态与空间格局[D]. 北京：中国科学院研究生院.〔Liu Moucheng，2010. Temporal dynamics and spatial patterns of China's ecological footprint[D]. Beijing：Chinese Academy of Sciences.〕

鲁钰，赵银娣，董霁红，2022. 西北地区三维生态足迹生态安全评价及驱动力分析[J]. 生态学报，42(4)：1354-1367.〔Lu Yu，Zhao Yindi，Dong Jihong，2022. Ecological security evaluation and driving force analysis of three-dimensional ecological footprint in northwestern China [J]. Acta Ecologica Sinica，42(4)：1354-1367.〕

马双，胡雯镟，2025. 新型城镇化与工商资本下乡：基于新型城镇化建设的准自然实验[J]. 经济科学(1)：92-118.〔Ma Shuang，Hu Wenxuan，2025. New urbanization and industrial and commercial capital going to the countryside：A quasi-natural experiment based on new urbanization construction [J]. Economic Science (1)：92-118.〕

马晓蕾，乔雅琦，王婕，等，2023. 陕西省水生态足迹深度与广度时空格局及影响因素[J]. 干旱区研究，40(3)：469-480.〔Ma Xiaolei，Qiao Yaqi，Wang Jie，et al.，2023. The spatiotemporal patterns of water ecological footprints，depth，size，and influencing factors in Shaanxi province [J]. Arid Zone Research，40(3)：469-480.〕

明玉洁，2020. 基于生态足迹模型的武汉市可持续发展研究[D]. 武汉：湖北省社会科学院.

阮泽景，魏守月，郑淑妮，2025. 我国省域公路交通发展均衡性评价研究：基于浙江省区域公路发展数据分析[J]. 价格理论与实践(6)：225-231，239.〔Ruan Zejing，Wei Shouyue，Zheng Shuni，

2025. Research on the evaluation of the balance for provincial highway transportation development in China: Based on the analysis of regional highway development data in Zhejiang province [J]. Price: Theory & Practice(6): 225-231,239.〕

史丹, 王俊杰, 2016. 基于生态足迹的中国生态压力与生态效率测度与评价[J]. 中国工业经济(5): 5-21.〔Shi Dan, Wang Junjie, 2016. Measurement and evaluation of China's ecological pressure and ecological efficiency based on ecological footprint [J]. China Industrial Economics(5): 5-21.〕

王涛, 冯杰, 2017. 陕西省能源足迹动态变化与影响因素分析[J]. 中国矿业, 26(2): 83-87, 105.〔Wang Tao, Feng Jie, 2017. Dynamic change of energy ecological footprint and its influencing factors in Shaanxi province [J]. China Mining Magazine, 26(2): 83-87,105.〕

王中航, 周传斌, 王如松, 等, 2015. 中国典型特大城市交通的生态足迹评价[J]. 生态学杂志, 34(4): 1129-1135.〔Wang Zhonghang, Zhou Chuanbin, Wang Rusong, et al., 2015. Assessment on traffic ecological footprint of typical megalopolises in China[J]. Chinese Journal of Ecology, 34(4): 1129-1135.〕

徐中民, 张志强, 程国栋, 2000. 甘肃省 1998 年生态足迹计算与分析[J]. 地理学报, 55(5): 607-616.〔Xu Zhongmin, Zhang Zhiqiang, Cheng Guodong, 2000. The calculation and analysis of ecological footprints of Gansu province [J]. Acta Geographica Sinica, 55(5): 607-616.〕

许静, 杨斌, 2025. 甘肃省新型城镇化与生态安全耦合协同及其驱动因素非平稳性[J]. 干旱区地理, 48(8): 1432-1444.〔Xu Jing, Yang Bin, 2025. Coupling coordination of new urbanization and ecological security and spatial-temporal non-stationarity of its driving factors in Gansu province [J]. Arid Land Geography, 48(8): 1432-1444.〕

杨一旸, 2021. 长江经济带城市群三维生态足迹时空演变与生态补偿策略研究[D]. 北京: 华北电力大学.〔Yang Yiyang, 2021. Research on the spatial-temporal evolution of the 3D ecological footprint and ecological compensation strategies of urban agglomerations in the Yangtze River Economic Belt [D]. Beijing: North China Electric Power University.〕

张辉, 朱勤东, 徐芳, 等, 2021. 武汉市人口集聚特征及其空间分异机制分析[J]. 测绘与空间地理信息, 44(11): 43-47.〔Zhang Hui, Zhu Qindong, Xu Fang, et al., 2021. Analysis on the characteristics of Wuhan population agglomeration and its spatial differentiation mechanism [J]. Geomatics & Spatial Information Technology, 44(11): 43-47.〕

张婉玲, 邹磊, 夏军, 等, 2023. 长江中游城市群水资源生态足迹时空演变及其驱动因素分析[J]. 长江流域资源与环境, 32(1): 83-92.〔Zhang Wanling, Zou Lei, Xia Jun, et al., 2023. Spatial-temporal evolution and driving factors analysis of water resources ecological footprint of urban agglomeration in middle reaches of Yangtze River [J]. Resources and Environment in the Yangtze Basin, 32(1): 83-92.〕

章锦河, 张捷, 2004. 旅游生态足迹模型及黄山市实证分析[J]. 地理学报, 59(5): 763-771.〔Zhang Jinhe, Zhang Jie, 2004. Touristic ecological footprint model and analysis of Huangshan City in 2002 [J]. Acta Geographica Sinica, 59(5): 763-771.〕

Ang B W, Liu F L, 2001. A new energy decomposition method: Perfect in decomposition and consistent in aggregation[J]. Energy, 26(6): 537-548.

Bi Meiling, Yao Chengyong, Xie Gaodi, et al., 2021. Improvement and application of the three-dimensional ecological footprint model[J]. Ecological Indicators, 125: 107480.

Costa I, Martins F G, Alves I, 2019. Ecological footprint as a sustainability indicator to analyze energy consumption in a portuguese textile facility[J]. International Journal of Energy and Environmental Engineering, 10(4): 523-528.

Das S, Mao E, 2020. The global energy footprint of information and communication technology electronics in connected internet-of-things devices[J]. Sustainable Energy, Grids and Networks, 24: 100408.

De Boer P, Rodrigues J F D, 2020. Decomposition analysis: When to use which method? [J]. Economic Systems Research, 32(1): 1-28.

Dong Fugui, Zhang Yanqiu, Zhang Xinyu, 2020. Applying a data envelopment analysis game cross-efficiency model to examining regional ecological efficiency: Evidence from China[J]. Journal of Cleaner Production, 267: 122031.

Gassner A, Lederer J, Kanitschar G, et al., 2018. Extended ecological footprint for different modes of urban public transport: The case of Vienna, Austria[J]. Land Use Policy, 72: 85-99.

Gupta M, Saini S, Sahoo M, 2022. Determinants of ecological footprint and PM2. 5: Role of urbanization, natural resources and technological innovation[J]. Environmental Challenges, 7:100467.

Hu Xiaofei, Dai Limin, Gu Huiyan, et al., 2006. Forestry ecological footprint in China during 1973 - 2003 [J]. Journal of Forestry Research, 17(2): 87-92.

Jahanger A, Usman M, Murshed M, et al., 2022. The linkages between natural resources, human capital, globalization, economic growth, financial development, and ecological footprint: The moderating role of technological innovations[J]. Resources Policy, 76: 102569.

Jiang Ruirui, Fei Liangjun, Kang Shouxuan, 2025. Analysis and prediction of urban agglomeration ecological footprint based on improved three-dimensional ecological footprint and shared socioeconomic pathways[J]. Ecological Indicators, 170: 113079.

Li Penghui, Zhang Ruqian, Wei Hong, et al., 2021. Assessment of physical quantity and value of natural capital in China since the 2lst century based on a modified ecological footprint model[J]. Science of the Total Environment, 806: 150676.

Monfreda C, Wackernagel M, Deumling D, 2004. Establishing national natural capital accounts based on detailed Ecological Footprint and biological capacity assessments [J]. Land Use Policy, 21(3): 231-246.

Niccolucci V, Bastianoni S, Tiezzi E B P, et al., 2009. How deep is the footprint? A 3D representation[J]. Ecological Modelling, 220(20): 2819-2823.

Pan Xiongfeng, Guo Shucen, Xu Haitao, et al., 2022. China's carbon intensity factor decomposition and carbon emission decoupling analysis[J]. Energy, 239: 122175.

Qu Ying, Liu Yue, Wang Wenhua, et al., 2020. Sustainability assessment of urban residential consumption in China megacity[J]. Environment, Development and Sustainability, 23(5): 7509-7523.

Salman M, Zha D L, Wang G M, 2022. Indigenous versus foreign innovation and ecological footprint: Dynamic threshold effect of corruption [J]. Environmental and Sustainability Indicators, 14: 100177.

Ullah A, Ahmed M, Raza S A, et al., 2021. A threshold approach to sustainable development: Nonlinear relationship between renewable energy consumption, natural resource rent, and ecological footprint [J]. Journal of Environmental Management, 295: 113073.

Wackernagel M, Monfreda C, Schulz N B, et al., 2004. Calculating national and global ecological footprint time series: Resolving conceptual challenges[J]. Land Use Policy, 21(3): 271-278.

William E R, 1992. Ecological footprints and appropriated carrying capacity: What urban economics leaves out[J]. Environment and Urbanization, 4(2): 121 – 130.

Xie Zhongqi, Zhang Ying, Fang Zhiqiang, 2022. High-quality development evaluation and spatial evolution analysis of urban agglomerations in the middle reaches of the Yangtze River [J]. Sustainability, 14(22): 14757.

Xue Han, Sayama T, Takara K, et al., 2019. Non-point source pollution estimation in the Pingqiao River Basin, China, using a spatial hydrograph-separation approach[J]. Hydrological Sciences Journal, 64(8): 962-973.

Yang Yi, Ling Sun, Zhang Ting, et al., 2018. Three-dimensional ecological footprint assessment for ecologically sensitive areas: A case study of the Southern Qin Ling piedmont in Shaanxi, China[J]. Journal of Cleaner Production, 194: 540-553.

Zambrano-Monserrate M A, Ruano M A, Ormeno-Candelario V, et al., 2020. Global ecological footprint and spatial dependence between countries[J]. Environment Management, 272: 111069.