

“一带一路”共建国家自然资本利用 时空演变特征及影响因素

杨光明¹, 李大容¹, 秦艺支¹, 盛红霞¹, 彭国川²

(1.重庆理工大学 管理学院, 重庆 400054;

2.重庆社会科学院 生态安全与绿色发展研究中心, 重庆 400020)

摘要: [目的] 揭示“一带一路”共建国家自然资本利用的时空演化规律及驱动机制, 为区域可持续发展提供科学支撑。[方法] 基于改进的三维生态足迹模型, 融合空间自相关分析与Tobit回归, 构建“时空演变—空间关联—驱动机制”多维评估框架。[结果] ①人均生态足迹广度呈现梯度差异格局, 新加坡始终为最低, 而蒙古及拉脱维亚交替占据最高值; ②生态足迹深度两极分化明显, 新加坡长期为极高水平, 俄罗斯等国维持基准值; ③三维生态足迹呈现“发达国家高, 发展中国家低”的分化格局, 中国因能效优化增速趋缓, 为发展中国家提供转型范式; ④空间关联呈现动态强化特征, Moran's *I*指数从0.142升至0.298, 俄罗斯等区域存在“高-高集聚”, 南亚国家则以“低-低集聚”为主, 中国空间关联由“低-高”向不显著转变; ⑤城镇化率、贸易开放度、可再生能源占比及生态承载力对三维足迹具有显著正向驱动作用, 而净初级生产力和外商直接投资则呈抑制作用。[结论] “一带一路”共建国家自然资本利用呈现显著的空间异质性及路径依赖, 需通过协调城镇化生态边界、优化贸易生态成本分配及破解可再生能源技术锁定等策略, 推动差异化治理, 实现自然资本的可持续利用。

关键词: 三维生态足迹模型; “一带一路”; 自然资本; 多维评估; Moran's *I* 指数

文献标识码: A

文章编号: 1000-288X(2025)06-0298-11

中图分类号: X 22

文献参数: 杨光明, 李大容, 秦艺支, 等.“一带一路”共建国家自然资本利用时空演变特征及影响因素[J]. 水土保持通报, 2025, 45(6): 298-308. Yang Guangming, Li Darong, Qin Yizhi, et al. Spatio-temporal evolution characteristics and influencing factors of natural capital utilization in countries participating in Silk Road Initiative [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2025, 45(6): 298-308.

DOI: 10.13961/j.cnki.stbctb.2025.06.034

CSTR: 32312.14.stbctb.2025.06.034

Spatio-temporal evolution characteristics and influencing factors of natural capital utilization in countries participating in Silk Road Initiative

Yang Guangming¹, Li Darong¹, Qin Yizhi¹, Sheng Hongxia¹, Peng Guochuan²

(1.School of Management, Chongqing University of Technology, Chongqing 400054, China; 2.Research Center for Ecological Security and Green Development, Chongqing Academy of Social Sciences, Chongqing 400020, China)

Abstract: [Objective] The spatiotemporal evolution patterns and driving mechanisms of natural capital utilization in countries participating in the Silk Road Initiative were analyzed in order to provide scientific support for regional sustainable development. [Methods] Based on an improved three-dimensional ecological footprint model, this research integrates spatial autocorrelation analysis and Tobit regression to construct a multidimensional evaluation framework of ‘spatiotemporal evolution-spatial correlation-driving mechanisms’. [Results] ① The per capita ecological footprint breadth showed a gradient differentiation pattern, with Singapore consistently having the lowest, while Mongolia and Latvia having the highest values. ② The ecological footprint depth exhibited significant polarization, with Singapore maintaining an extremely high level over the long term, while countries

收稿日期: 2025-05-16

修回日期: 2025-08-23

采用日期: 2025-09-02

资助项目: 国家社会科学基金项目后期资助项目“长江国家文化公园(三峡库区段)协同建设机制与路径创新研究”(24FGLB092); 重庆市教委人文社会科学研究项目(23SKJD111); 重庆市教委科学技术研究计划项目(2024CJZ015); 重庆市高等教育教学改革研究项目(233337); 重庆市教育科学院规划项目(K23YG2110387); 2025年重庆市研究生科研创新项目(CYS25800); 重庆市人文社科重点研究基地项目(22SKJD113); 重庆市教委科学技术研究计划项目(KJQN202504022)

第一作者: 杨光明(1987—), 男(汉族), 重庆市奉节县人, 博士, 教授, 主要从事区域协调发展、资源环境管理研究。Email: yangguangming@cqut.edu.cn.

such as Russia at the baseline value. ③ The three-dimensional ecological footprint displayed a differential pattern of ‘high in developed countries and low in developing countries’. However, owing to energy efficiency optimization, China’s growth rate had slowed, providing a transformation paradigm for developing countries. ④ The spatial correlation demonstrated dynamic strengthening characteristics, with Moran’s I index increasing from 0.142 to 0.298. Regions such as Russia showed ‘high-high aggregation’, while South Asian countries were primarily characterized by ‘low-low aggregation’. China’s spatial correlation had shifted from ‘low-high’ to ‘insignificant’. ⑤ Urbanization rate, trade openness, renewable energy share, and ecological carrying capacity had considerable positive driving effects on the three-dimensional footprint, whereas net primary productivity and foreign direct investment exhibit inhibitory effects. [Conclusion] The utilization of natural capital in countries participating in the Belt and Road Initiative shows significant spatial heterogeneity and path dependence. Differentiated governance strategies, such as coordinating the ecological boundaries of urbanization, optimizing the allocation of ecological costs in trade, and overcoming technological lock-ins in renewable energy are required to promote the sustainable use of natural capital.

Keywords: three-dimensional ecological footprint model; Belt and Road; natural capital; multidimensional evaluation; Moran’s I

人类社会经济活动的增长与人口规模扩张正以前所未有的速度加剧全球自然资源消耗^[1]。这种需求往往超过自然资本的再生和吸收能力,导致高碳排放、土地退化与森林砍伐等生态危机与挑战^[2]。根据联合国环境规划署《2024年全球资源展望》数据显示,当前资源消耗速率已达地球再生能力的1.75倍,且若延续现有发展轨迹,至2060年全球资源开采量将较2020年增加60%,这种指数级扩张正以生态赤字的形式透支代际生存权利。作为生态系统服务的物质载体,自然资本包括可再生的流动资本和不可再生的存量资本,是由生态系统提供的自然资源和生态服务的总和^[3],兼具资源供给与生态调节的双重属性^[4]。自然资本评估不仅是量化可持续发展领域的一个参考核心点^[5],更是影响人类福祉和可持续发展水平的关键。然而当前评估体系在空间异质性解析、时间连续性追踪及代际公平性衡量等方面存在系统性缺陷,使得全球约75%的跨国生态补偿机制因缺乏科学核算基准而陷入治理困境^[6]。

“一带一路”倡议作为新型全球化的重要实践平台,其沿线区域涵盖全球65%的人口和40%的经济总量,同时承受着近70%的生态超载压力。这种特殊的地理经济格局使其成为研究自然资本利用规律的典型场域。一方面,基础设施互联互通加速了要素流动与产业转移,重塑着区域生态经济系统的空间关联;另一方面,发展阶段的梯度差异,即人均GDP差异显著与资源禀赋的结构性失衡,为揭示自然资本利用的影响机制提供了多维观测视角。该研究对于“一带一路”具体策略的实施以及推动中国和共建国家经济健康稳健发展,具有一定的现实意义。

生态足迹理论由Rees等奠基,经Wackernagel

等^[7]完善后形成经典模型。Niccolucci等^[8]突破性地提出三维指标体系,通过区分存量与流量资本实现模型立体化转型。目前,国外研究主要聚焦于国家尺度下经济增长、地缘政治风险、可再生能源以及自然资源对生态足迹的影响^[9-11]。早期国内学者方恺等创新构建资本流量占用率等指标,优化土地生态核算。此后,大多数学者基于改进的三维生态足迹模型展开研究,呈现出区域精细化研究趋势。在省域尺度上,代亚婷等^[12]从产品-地类-地区三重尺度深入分析了陕西省20 a间土地自然资本利用状况及其与经济脱钩效应;李少坤等^[13]基于三维生态足迹视角探究了江西省自然资本可持续利用的时空演化规律及其关键驱动因素;吴健生等^[14]利用改进的三维足迹模型评估了关中地区土地自然资本利用状况。在跨省区域/城市群尺度上,徐秋怡等^[15]运用改进三维生态足迹模型解析了长江经济带2000—2020年生态安全演变,结合压力指数与协调指数揭示驱动机制;Li Jing等^[16]通过改进的生态足迹模型,进一步聚焦于长江经济带内部三个核心城市群自然资本利用的动态演变特征。在特定流域/库区尺度上,Zhang Zhongxun等^[17]创新性地将三维生态足迹模型与脱钩模型、GM(1,1)预测模型相结合,综合分析三峡库区土地自然资本利用的现状并预测其未来态势。在全国省级尺度上,Wu Feifei等^[18]利用改进的三维EF模型,并结合可持续性重分类方法和脱钩指数,系统评估了中国30个省份自然资本利用的可持续性水平及脱钩效应,代表了当前国内省级尺度的较为全面研究。此外,三维生态足迹模型也被用于耕地可持续利用等专项评价中^[19]。

综上所述,现有研究在揭示自然资本利用规律方面已取得重要进展,但绝大多数成果(特别是国内研究)仍高度集中于流域、省域及次区域尺度^[1,12-15,20-21]。尽管方恺等^[22-23]早期开创性地评估了 11 个主要国家以及 G20 国家的自然资本利用特征,但受限于其时效性、样本代表性与时空连续性,其结论的普适性在当前全球化新形势下受限,难以满足新型全球治理对动态、广泛数据支撑的需求。此外,传统生态足迹模型在刻画自然资本利用的时空异质性与代际公平维度方面存在方法论缺陷,难以有效支撑全球可持续发展治理的决策需求。在此背景下,本研究基于改进的三维足迹模型、空间自相关以及 Tobit 模型等方法,构建涵盖“一带一路”51 个共建国家的自然资本利用特征的多维评估框架,通过进一步优化计算方法并评估模型性能,从生物承载力和生态足迹等关键指标入手,分析比较沿线各国自然资本利用的时空特征及其影响因素,从而为全球生态治理贡献中国方案,即在“一带一路”这个最具复杂性的区域验证治理模型的适用性,进而为建立兼顾效率与公平的新型全球化范式提供实证支撑。

1 研究区域与数据来源

1.1 研究区域

“一带一路”是中国为深化全球互联互通与共同发展提出的重大国际合作框架。自 2013 年倡议启动以来,其合作范围已从亚欧大陆扩展至非洲、拉美及大洋洲,截至 2023 年 12 月,中国已与 152 个国家和 32 个国际组织签署共建协议。由于“一带一路”覆盖区域具有动态性与开放性,本研究基于倡议提出之初外交部公布的“一带一路”重点建设国家名单,结合世界银行、联合国统计署等国际机构的数据可得性,在剔除指标数据缺失严重的国家后,最终选定 51 个国家(含中国)作为研究区,其中由于中国香港、澳门以及台湾省数据缺失,未纳入中国的研究区域。部分缺失数据通过线性插值法完善。

1.2 数据来源

本研究基于数据完整性与可用性考量,采用世界自然基金会(WWF)、伦敦动物学会(ZSL)和全球足迹网络(GFN)联合发布的《地球生命力报告》标准化数据,收集了 2000—2022 年“一带一路”共建 51 个国家的人均生态足迹与生物承载力面板数据。数据严格遵循耕地、草地、林地、渔业用地和建设用地上五类土地账户分类标准,其中针对碳循环核算的系统性不确定问题^[24],特别将具有碳汇功能的林地统

一核算而未细分木材生产与碳中和用途。为维持人均生态足迹与生物承载力土地分类的同构性,进一步参照国际能源用地核算惯例,将矿产资源用地按功能等效原则纳入林地范畴。同时本研究的重点并非改进生态足迹的计算方法,而是基于生态足迹和生物承载力数据,进一步测算和分析“一带一路”共建各国生态足迹的广度和深度。

2 研究方法

2.1 三维生态足迹模型

本研究三维生态足迹模型主要参考方凯等^[22]的改进三维生态足迹模型,其在现有三维生态足迹模型的基础上进行了改进,修正了原模型框架中因忽略生态赤字/盈余的自然资本异质性所引发的空间评估偏差,显著提升了区域自然资本代谢特征的代表精度。改进后的模型引入了区域生态足迹广度($EF_{size, region}$)和区域生态足迹深度($EF_{depth, region}$)。区域生态足迹广度表征区域内可再生自然资本(流量资本)的可持续利用水平。该指标本质是反映区域对生态系统年度可再生能力的占用规模,其值越高表明区域依赖的流量资本规模越大,若未超过生物承载力,则仍处于生态可持续范围内^[1]。区域生态足迹深度衡量的是某一区域对自然资本的透支程度,即人类活动消耗的资源量超出该区域生态系统当年可再生能力(生物承载力)的部分。它反映了对存量自然资本(如地下水、森林、累积碳排放空间等不可再生或缓慢再生的资源)的依赖程度。计算公式如下:

$$EF_{size, region} = \sum_{i=1}^n \min\{EF_i, BC_i\} \quad (1)$$

$$EF_{depth, region} = 1 + \frac{\sum_{i=1}^n \max\{EF_i - BC_i, 0\}}{\sum_{i=1}^n BC_i} \quad (2)$$

式中: EF_i 为第*i*类土地的生态足迹; BC_i 为第*i*类土地的生物承载力。

区域三维生态足迹是足迹广度和足迹深度的乘积,综合反映了一个区域对自然资本的占用规模(空间维度)和透支强度(时间维度),计算公式为

$$EF_{3D, region} = EF_{size, region} \times EF_{depth, region} = \sum_{i=1}^n \min\{EF_i, BC_i\} \times \left(1 + \frac{\sum_{i=1}^n \max\{EF_i - BC_i, 0\}}{\sum_{i=1}^n BC_i} \right) \quad (3)$$

式中: $EF_{3D, region}$ 为区域三维生态足迹(hm^2)。本研究

根据已有研究对区域三维足迹的定义做出调整,以便使其与地类尺度的三维足迹计算原理相一致。在土地类别层面,生态足迹广度(EF_{size, i})和生态足迹深度(EF_{depth, i})的通用公式为

$$EF_{size, i} = \min\{EF_i, BC_i\} \quad (4)$$

$$EF_{depth, i} = 1 + \frac{\max\{EF_i - BC_i, 0\}}{BC_i} \quad (5)$$

式中:EF_{size, i}为第*i*地类的足迹广度;EF_{depth, i}为第*i*地类的足迹深度。

2.2 空间自相关分析

空间自相关分析用于探索数据的空间相关性程度,并反映其空间聚集特征,通常通过Moran's *I*指数进行分析^[25]。Moran's *I*分为全局Moran's *I*和局部Moran's *I*,二者是空间自相关分析的两种重要类型。全局Moran's *I*用于反映数据的整体空间聚集状态,其计算公式为

$$I = \frac{n \times \sum_{i=1}^n \sum_{j \neq 1}^n W_{ij} (x_i - \bar{x})(x_j - \bar{x})}{\left(\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n W_{ij} \right) \times \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} \quad (6)$$

式中:*n*表示样本国家数量;*x_i*,*x_j*分别表示在区域*i*,*j*位置的区域三维生态足迹; \bar{x} 表示区域三维生态足迹的平均值;*W_{ij}*表示国家*i*与*j*的邻域关系,若*i*与*j*邻近时,*W_{ij}*=1,若不相邻,*W_{ij}*=0。全局Moran's *I*的取值范围为[-1,1],大于0表示空间正相关,数值趋近1时空间集聚态势显著增强;小于0表示负向空间依赖,数值趋近-1则空间异质性呈极化分布;等于0符合空间随机分布特征,表示无系统性关联。

为了反映数据在空间上的具体集聚位置,进一步采用局部Moran's *I*探究生态足迹广度和深度在局部空间上的不均衡性,计算公式为

$$I_i = \frac{(x_i - \bar{x})}{m_0} \sum_j W_{ij} (x_j - \bar{x}) \quad (7)$$

式中:*x_i*表示国家*i*的耦合协调度值; \bar{x} 表示所有国家耦合协调度的平均值。*I_i*>0,为同质性空间关联模式,即高-高(H-H)或低-低(L-L)型聚类,表征区域呈现空间趋同演化;*I_i*<0,为质性空间关联模式,涵盖低-高(L-H)或高-低(H-L)型异常值,表征区域存在显著空间梯度差。

2.3 Tobit影响因素分析

分析三维生态足迹的影响因素有助于明确哪些是真正的驱动因素,这对于有效提升自然资本的可持续发展至关重要。然而,模型建立的必要条件是因变量的取值不应受到任何限制,但本研究所用的

三维生态足迹因变量的取值范围在[0,1]之间。此时,若使用普通最小二乘法(OLS)检验三维生态足迹的影响因素,可能导致回归结果偏向于0,即估计结果出现偏差。因此,选择Tobit模型进行估计可满足本研究的需求。

Tobit模型是基于因变量通常设定在[0,1]范围内的前提建立的。本研究以三维生态足迹作为因变量,自变量包括人均GDP(现价美元),净初级生产力[NPP,g/(m²·a),以C计],工业增加值占GDP比重(%),城镇化率(%),贸易占GDP比重(%),可再生能源占总能源消费比重(%),外商直接投资净流入(现价美元)以及生态承载能力(BiocapTotGHA,全球hm²),这些变量的选取具有理论与实证基础。在理论层面,环境库兹涅茨曲线(EKC)假说支撑人均GDP(*x₁*)的纳入,用以捕捉经济发展对资源消耗的非线性影响^[1];IPAT/STIRPAT模型为城镇化率(*x₁*)和工业增加值占比(*x₂*)提供了依据,强调人口结构与产业技术转型的核心作用;生态现代化理论则解释了外商直接投资(*x₃*)的选取,因其可能通过技术溢出降低生态强度;而自然资本代谢理论要求纳入生态承载力(*x₄*)与净初级生产力(*x₅*),二者分别表征资源供给上限与生态系统再生能力^[3-4]。在实证层面,贸易开放度(*x₆*)的选取得到全球价值链研究支持,证实其通过“污染天堂效应”加剧生态负担^[26];可再生能源占比(*x₇*)的争议性关联需结合“能源反弹效应”解释清洁能源推广可能因能效提升刺激消费反弹^[27];净初级生产力(*x₈*)的负向作用则被生态系统服务研究验证,植被固碳能力直接抵消生态赤字^[2]。基于此,本研究构建了Tobit模型,其基本表达形式如下:

$$Y_i^* = \alpha + \beta_1 x_1 + \beta_2 x_2 + \beta_3 x_3 + \beta_4 x_4 + \beta_5 x_5 + \beta_6 x_6 + \beta_7 x_7 + \beta_8 x_8 + \epsilon_{it} \quad (8)$$

$$\begin{cases} Y_i = Y_i^* & (\text{if } Y_i^* < 1) \\ Y_i = 1 & (\text{if } Y_i^* \geq 1) \end{cases}$$

式中:*Y_i*为Tobit模型中的观测变量;*Y_i*^{*}为模型中的潜变量,即三维生态足迹;*x₁*,*x₂*,*x₃*,*x₄*,*x₅*,*x₆*,*x₇*,*x₈*分别代表人均GDP(美元),净初级生产力[g/(m²·a),以C计],工业增加值占GDP比重(%),城镇化率(%),贸易占GDP的百分比(%),可再生能源占能源消费总量的比重(%),直接投资净流入(美元)、Biocap TotGHA生态承载力(全球hm²); $\beta_1, \beta_2, \beta_3, \beta_4, \beta_5, \beta_6, \beta_7, \beta_8$ 为模型中各个自变量的系数,其取值大小反映出各影响因素与三维生态足迹之间内在的联系; ϵ_{it} 为模型中的随机扰动项。

3 结果与分析

3.1 人均生态足迹广度

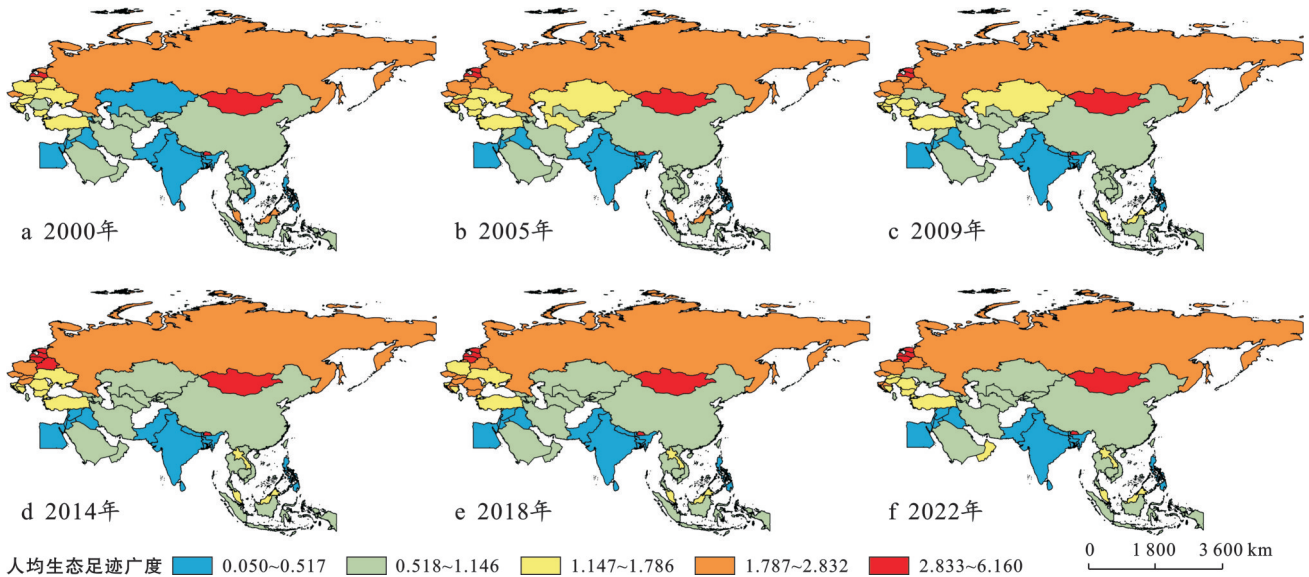
选取2000年、2005年、2009年、2014年、2018年、2022年6个时间节点,分析51个“一带一路”共建国家的人均足迹广度变化情况(表1,图1)。可以看出,多数国家的人均足迹广度呈现波动上升态势,但区域异质性显著。

数据显示,2000年51个国家的平均值为1.091,2022年波动上升至1.345,年均增长率为1.01%。平均值的上升暗示全球环境压力持续累积,但增速较缓,可能与能效提升和可持续发展政策的局部效果有关。同时,资源禀赋丰富的国家如蒙古、沙特阿拉

伯的波动性尤为突出,其年际变化幅度常超过100%;而人口密集国家如孟加拉国、印度等人均足迹广度的变化则相对平稳。

表1 研究区域2000—2022年人均生态足迹广度最大值
Table 1 Most important per capita ecological footprint breadth in study area from 2000 to 2022

年份	最高值(国家)	最低值(国家)	极差
2000	4.940(蒙古)	0.049(新加坡)	4.891
2005	3.919(拉脱维亚)	0.087(新加坡)	3.832
2009	4.324(蒙古)	0.088(新加坡)	4.236
2014	4.943(蒙古)	0.109(新加坡)	4.834
2018	5.093(蒙古)	0.112(新加坡)	4.981
2022	6.152(拉脱维亚)	0.108(新加坡)	6.044



注:基于中华人民共和国自然资源部标准地图服务网站GS(2016)1665号标准地图制作,底图边界无修改。下同。

图1 研究区2000—2022年人均生态足迹广度分布

Fig.1 Distribution of per capita ecological footprint breadth in study area from 2000 to 2022

由表1可知,最高值与最低值之间的极差呈现波动扩大趋势,凸显了国家间生态压力鸿沟的加深。2000年,蒙古以4.940的最高值与新加坡0.049的最低值形成了4.891的极差;2005年,拉脱维亚(3.919)与新加坡(0.087)形成3.832的极差;2009年,蒙古(4.324)与新加坡(0.088)将极差推至4.236;2014年,蒙古(4.943)与新加坡(0.109)的极差达到4.834;2018年,蒙古(5.093)与新加坡(0.112)产生4.981的极差;到2022年,拉脱维亚(6.152)与新加坡(0.108)将极差再次扩大至6.044。极差从2000年的4.891扩大至2022年的6.044,增幅为23.6%。这一扩大趋势主要是由自然资源禀赋型国家如蒙古、拉脱维亚的足迹广度快速增长所致,而低值国家如新加坡持续

处于较低水平,表明资源密集型经济体与人口密集型经济体在生态资源占用方面的分化日益加剧。

研究结果表明,高足迹广度国家多与自然资源密集型产业结构相关,而低足迹广度国家则可能受限于技术水平滞后或生态脆弱性。如蒙古、拉脱维亚等国家人均足迹广度长期占据高位,其共性在于矿业或林业在经济结构中占据主导地位,导致人均足迹广度常高于3.0。相比之下,新加坡的人均足迹广度持续偏低,反映了高人口密度和相对有限的资源利用广度。同时,不同国家的发展路径存在显著分化。增长型国家以中东欧和亚洲新兴经济体为主,如阿尔巴尼亚(从0.666增至1.146)和蒙古(从4.940增至5.262),驱动力包括工业化加速和消费升级。稳

定型国家如中国,人均足迹广度从2000年的0.705增至2022年的0.828,年均增速为0.74%,低于整体平均水平,呈现出区别于常规发展路径的相对稳态模式,或可归因于资源利用效率的提升及“双碳”目标的强化。下降型国家集中在中东和岛国,如文莱,从2000年峰值1.086跌至2022年的0.491,反映了能源依赖度过高导致转型困难。

高足迹广度国家的波动性主要源于其对资源密集型产业的依赖(如蒙古的矿业),而低足迹广度国家的相对停滞则可能受制于技术瓶颈或生态承载力的限制(如印度等国的传统农业模式),揭示了“一带一路”共建国家生态资源占用呈现两极分化的格局,

国家间的自然资源禀赋差异与人口压力等因素共同造成了这一不均衡的局面。

3.2 人均足迹深度

足迹深度反映了资源利用的集约化程度。图2表明,全球人均足迹深度整体呈缓慢波动下降趋势,但存在显著国别差异。2000—2022年,剔除极端值后全球平均值约为1.500,反映多数国家处于生态赤字状态。中东和东南亚国家(如新加坡、黎巴嫩)普遍高于均值,而东欧国家(如俄罗斯、乌克兰)多接近或等于1.000,显示生态压力分布不均。2020年全球均值短暂下降,但2022年基本恢复至疫情前水平。

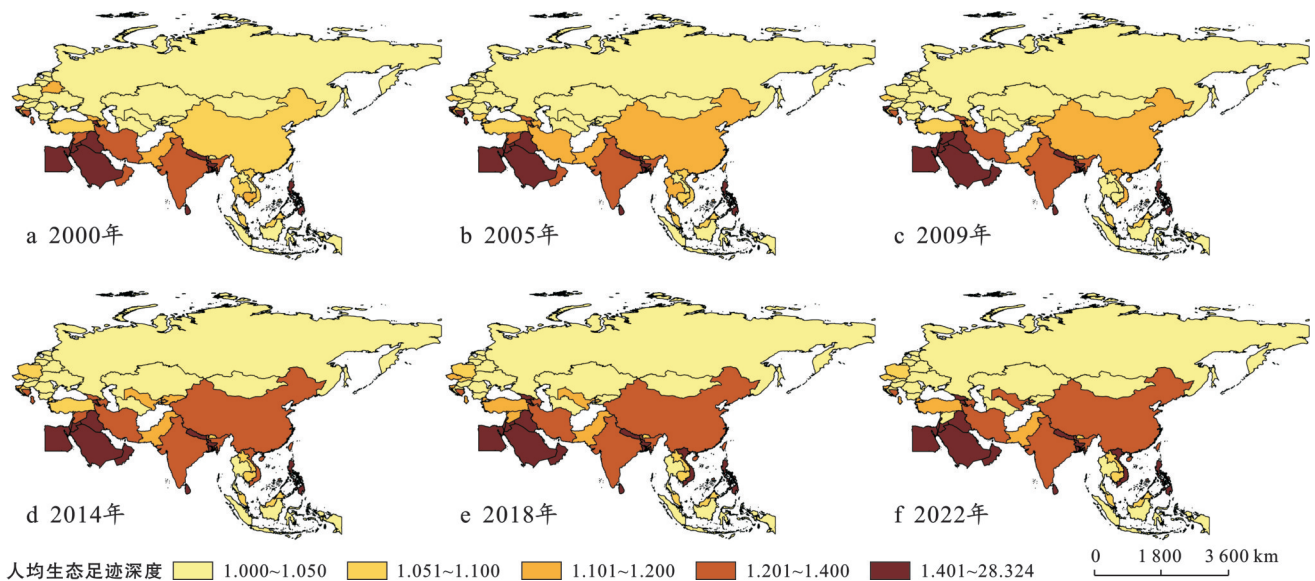


图2 研究区2000—2022年人均生态足迹深度分布

Fig.2 Depth distribution of per capita ecological footprint in study area from 2000 to 2022

在极值分析中,足迹深度的最高值与最低值波动显著,反映全球资源利用效率的演变趋势(表2)。2000—2022年新加坡人均足迹深度始终处于首位,其具体数值从2000年的28.324波动下降为2022年13.202,尽管降幅达53%,但仍远超其他国家,反映其资源密集型产业转型的长期性与技术替代的滞后性。2000—2021年最低值为1.000,如哈萨克斯坦、俄罗斯长期稳定在最低值附近,显示资源利用效率较高。对数据具体分析可知,高压力极为新加坡(2000年28.3)、黎巴嫩(2009年4.9)、以色列(2020年6.4)等国家,其城市化与高能耗模式导致人均资源消耗远超地球承载力。尽管新加坡通过技术升级降低了人均足迹深度,但仍是全球平均的10倍。低压力极如俄罗斯、哈萨克斯坦等23国长期维持低值水平,成为可持续发展范本。脆弱波动区以叙利亚为代

表,战乱与经济震荡使其人均足迹深度由2010年的1.45降到2016年1.11,揭示了生态压力与社会稳定性高度相关。

综上所述,高深度国家面临“技术锁定”风险,具体而言,2022年新加坡深度值虽较其历史峰值降低,但仍远超全球均值,存在“高资源消耗—技术路径依赖”的恶性循环风险。低深度国家则可能陷入“低效均衡”,如柬埔寨2000—2022年人均足迹深度长期接近基准线但缺乏提升动力,原因可能在于技术投入不足或制度瓶颈。

3.3 人均三维生态足迹

3.3.1 人均三维生态足迹时空演变特征

人均三维生态足迹的测度整合了生态足迹深度与广度的协同作用,其数值表征区域自然资源开发程度的系统状态,其分布呈现显著区域聚类特征(图3),

表现为“发达国家高、发展中国家低”的分化倾向,发达国家人均三维生态足迹均值为 2.372,而发展中国家仅为 1.240。表 3 表明,2000—2022 年人均三维生态足迹高值区集中于欧洲国家如拉脱维亚,普遍超过 2.000,而低值区多为发展中国家(如孟加拉国、巴基斯坦),普遍低于 1.000。这种分化现象的根源在于工业化水平的巨大差异。高值国家往往拥有高能耗的产业体系,对自然资源的开发强度大;而低值国家虽资源总量有限,却面临着利用效率低下的困境,甚至隐含着生态贫困的风险。

极值演变轨迹凸显资源利用的差异。2000 年最大值(蒙古,4.972)与最小值(哈萨克斯坦,0.120)相差 4.853;至 2022 年,最大值(拉脱维亚,6.152)与最小值(巴基斯坦,0.378)差距扩大至 5.774。这种极差增

大的变化趋势,表明资源开发强度差异持续加深,高值国家资源消耗加剧,而低值国家发展受限。

表 2 研究区 2000—2022 年人均生态足迹深度极值
Table 2 Extremum of per capita ecological footprint depth in study area from 2000 to 2022

年份	最高值(国家)	最低值(国家)	极差
2000	28.324(新加坡)	1.000(多国)	27.324
2005	18.867(新加坡)	1.000(多国)	17.867
2009	17.465(新加坡)	1.000(多国)	16.465
2014	16.334(新加坡)	1.000(多国)	15.334
2018	14.586(新加坡)	1.000(多国)	13.586
2022	13.202(新加坡)	1.000(多国)	12.202

注:人均足迹深度=1.0 表示生态足迹≤生物承载力,无存量资本消耗。2000—2022 年维持此状态的国家包括俄罗斯、哈萨克斯坦、拉脱维亚、立陶宛、乌克兰、印度尼西亚等资源富裕型经济体。

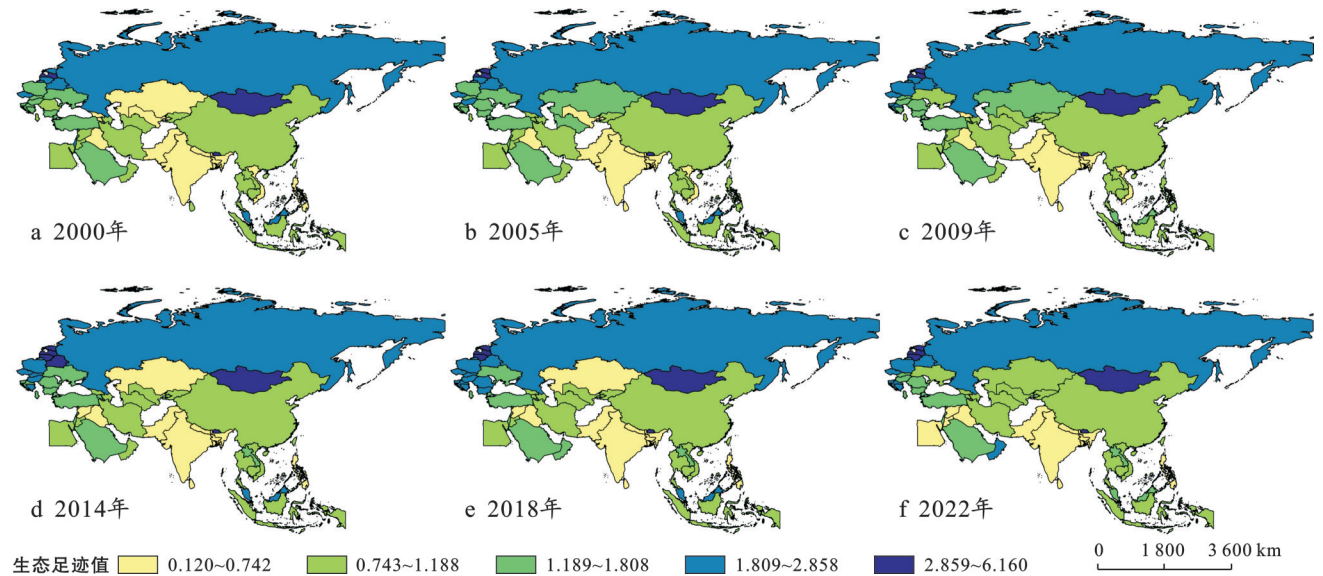


图 3 研究区 2000—2022 年人均三维生态足迹分布

Fig.3 Distribution of per capita 3 D ecological footprint in study area from 2000 to 2022

表 3 研究区 2000—2022 年人均三维生态足迹极值
Table 3 Extremum of per capita three-dimensional ecological footprint in study area from 2000 to 2022

年份	最高值(国家)	最低值(国家)	极差
2000	4.972(蒙古)	0.120(哈萨克斯坦)	4.853
2005	3.919(拉脱维亚)	0.300(孟加拉国)	3.619
2009	4.360(蒙古)	0.337(孟加拉国)	4.023
2014	4.943(蒙古)	0.371(孟加拉国)	4.572
2018	5.135(蒙古)	0.383(巴基斯坦)	4.752
2022	6.152(拉脱维亚)	0.378(巴基斯坦)	5.774

横向对比揭示了异常波动国家的结构性风险(图 3)。高压集群(>3.0)如资源依赖型经济体蒙古,可能面临生态赤字扩大压力,需要平衡资源开发与生态承载力。中等压力区(1.0~2.0)如东欧工业国

(波兰、捷克)稳定在 1.800~2.000 之间。低压力区(<1.0)如南亚国家(印度、巴基斯坦)始终最低,人口密度高但人均消耗低;东南亚(菲律宾、柬埔寨)受限于发展水平,足迹增长缓慢。纵向分析显示,阿曼三维生态足迹在 2022 年升至 2.065,较 2000 年增长 171%,其主因可能是由于疫情后油气产业复苏与生态修复投入不足,暴露其增长模式的脆弱性;中国从 2000 年的 0.764 稳步升至 2022 年的 1.050,增速平缓且低于多数工业化国家,体现了其资源利用效率的逐步优化以及产业结构升级与可再生能源推广的成效;相比之下,孟加拉国生态足迹在 2022 年仅 0.410,反映“低水平均衡陷阱”风险,资源利用总量不足但效率停滞。因此,高生态足迹国家需警惕“高人均-低效率”的减排盲区,强化循环经济布局;低生态足迹国家应避免“先污

染后治理”路径,平衡基本需求与生态可持续性。

3.3.2 人均三维生态足迹空间相关性

由表 4 可知,所有年份的 p 值均接近 0,且 Z 值均大于 3.350,远超 1.960 的临界值,说明结果均通过了显著性检验水平。Moran's I 指数从 2000 年的 0.142 逐步上升至 2022 年的 0.287,仅 2012 年短暂回落至 0.298。表明研究区人均三维生态足迹的空间正相关性逐年增强,且高值与高值、低值与低值的空间聚集特征更加显著。图 4 表明,2000—2022 年俄罗斯的集聚特征波动较大,从高-高集聚到不显著交替变化,可能受到其资源依赖型经济的影响以及国际能源市场

波动导致三维生态足迹变化;而中亚和印度低-低集聚特征较为稳定,可能受当地环境约束以及资源利用效率的影响;中东部分地区 2000—2014 年及 2022 年为高-低集聚,2018 年短暂变为低-低集聚,呈现出中东地区(如沙特阿拉伯)生态足迹高值与周围低值区的空间异质性,2018 年的变化可能与区域政策调整如生态保护措施或资源利用模式改变有关,导致自身生态足迹降低,与周围同属低值;而中国地区从 2000 年的低-高集聚逐渐转变为不显著,可能与其产业升级以及国际资源供应链重构有关;其余国家均无集聚情况。

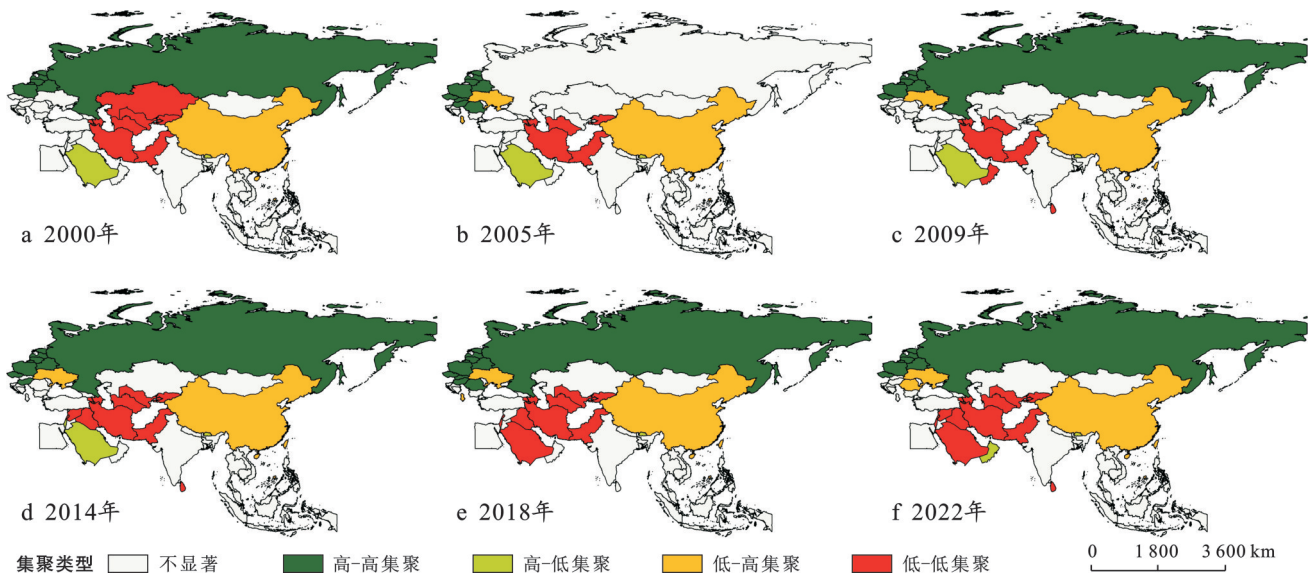


图 4 研究区 2000—2022 年局部 Moran's I 空间自相关集聚分布情况

Fig.4 Distribution of local Moran's I spatial autocorrelation agglomeration in study area from 2000 to 2022

表 4 研究区 2000—2022 年全球 Moran's I 指数空间自相关性检验结果

Table 4 Results of the global Moran's I index for spatial autocorrelation test in study area from 2000 to 2022

年份	Moran's I	$E(I)$	方差	Z 得分	p 值
2000	0.142	-0.02	2.34×10^{-3}	3.358	7.84×10^{-4}
2005	0.236	-0.02	2.47×10^{-3}	5.150	0
2009	0.184	-0.02	2.42×10^{-3}	4.145	3.40×10^{-5}
2014	0.268	-0.02	2.44×10^{-3}	5.838	0
2018	0.287	-0.02	2.42×10^{-3}	6.245	0
2022	0.298	-0.02	2.36×10^{-3}	6.550	0
平均	0.236	-0.02	2.41×10^{-3}	5.215	1.36×10^{-4}

3.4 研究区三维生态足迹影响因素分析

研究结果(表 5)表明,城镇化率、贸易开放度、可再生能源占比以及生态承载力(全球 hm^2)均在 1% 水平上显著正向影响三维生态足迹,其系数分别为 3.23×10^{-2} , 4.82×10^{-3} , 2.27×10^{-2} 以及 7.60×10^{-10} 。

城镇化进程可能与基础设施扩张与能源需求激增加剧生态压力相关,城市人口集聚进一步增大了高

碳活动的环境影响;贸易开放度提升可能通过资源密集型产品出口扩张及高生态足迹产品进口,引发生态成本的空间转移;可再生能源占比与生态足迹的正向关联则揭示了技术锁定效应与能源回弹效应的潜在作用,表明清洁能源推广需与能效提升协同推进;生态承载力提高通过资源的可持续利用、生态服务的增强及政策的推动等方面正向促进三维生态足迹。

表 5 研究区 2000—2022 年 Tobit 回归结果

Table 5 Tobit regression results in study area from 2000 to 2022

变量	系数	标准差	t 值	p 值
人均 GDP(现值美元)	4.17×10^{-6}	3.64×10^{-6}	1.14	0.252
净初级生产力/($g \cdot m^{-2} \cdot a^{-1}$,以 C 计)	$-3.33 \times 10^{-2***}$	3.94×10^{-3}	-8.44	0.000
业增加值占 GDP 比重/%	-2.61×10^{-3}	2.22×10^{-3}	-1.17	0.240
城镇化率/%	$3.22 \times 10^{-2***}$	2.30×10^{-3}	14.04	0.000
贸易占 GDP 的百分比/%	$4.82 \times 10^{-3***}$	5.81×10^{-4}	8.29	0.000
可再生能源占能源消费总量的比重/%	$2.27 \times 10^{-2***}$	1.77×10^{-3}	12.82	0.000
外国直接投资净流入(现价美元)	$-4.85 \times 10^{-12***}$	1.17×10^{-12}	-4.13	0.000
生态承载力(全球 hm^2)	$7.60 \times 10^{-10***}$	1.65×10^{-10}	4.60	0.000

注:***表示极显著, $p < 0.01$ 。

与此同时,净初级生产力与外商直接投资表现出显著负向影响作用,其系数分别为 -3.33×10^{-2} 与 -4.85×10^{-12} 。净初级生产力依托植被固碳能力增强生态系统的自我修复功能,外商直接投资则通过清洁技术溢出与产业结构升级降低资源消耗强度。值得注意的是,生态承载力的正向效应表明资源丰富地区易出现过度开发问题,印证了“资源诅咒”理论在生态领域的适用性。

人均 GDP 正向影响三维生态足迹,工业增加值负向影响三维生态足迹,但是并不显著,其系数分别为 4.17×10^{-6} 与 -2.61×10^{-3} ,说明在此情境下二者对三维生态足迹来说并不是关键的影响因素。其背后可能源于环境库兹涅茨曲线在不同发展阶段国家间的抵消效应,即高收入国家通过技术升级与环境规制实现生态压力缓解,而中低收入国家仍处于“经济增长—资源消耗”的强耦合阶段,导致整体关联性被稀释;而工业增加值占比的异质性关联则反映了产业结构的分化特征以及环保政策对资源利用强度的调节作用,进而削弱了该变量对三维生态足迹的影响效应。

以上结果表明,协调城镇化进程中的生态安全边界、优化贸易隐含生态成本分配机制、破解可再生能源推广中的技术锁定困境,是缓解三维生态足迹增长的关键路径。

4 结论与讨论

4.1 结论

(1) 研究区多数国家的人均足迹广度呈现波动上升趋势,但存在显著的区域差异,新加坡始终为最低值,而最高值由拉脱维亚、蒙古交替占据。

(2) 研究区域国家生态足迹深度呈现两极分化,多数国家集中在 1.0~3.0,但部分国家表现异常,如新加坡 2000—2022 年足迹深度最高,其资源利用强度远超其他国家,但差距在逐年缩小,而哈萨克斯坦、俄

罗斯等国长期稳定在 1.0 左右,资源利用效率较高。

(3) 研究区三维生态足迹时空变化多样,国家差异明显,整体呈现“发达国家高、发展中国家低”的分化特征。欧洲国家如拉脱维亚三维足迹长期领先,发展中国家如孟加拉国、巴基斯坦的三维足迹普遍低于 1.0,但中国三维足迹从 2000 年的 0.764 稳步升至 2022 年的 1.050,体现其资源利用效率的逐步优化。

(4) 研究区在全局空间方面呈现显著的正相关性,且逐年增强。在局部方面,俄罗斯、中东欧国家形成生态足迹“高-高集聚”区,而南亚部分国家则呈现“低-低集聚”,中东国家(如沙特阿拉伯)呈现“高低”异常值,中国从低高集聚逐渐转变为不显著,其余国家无集聚情况。

(5) 研究区三维生态足迹主要受城镇化、贸易开放度、可再生能源占比以及生态承载力(全球 hm^2)的正向影响,同时也受净初级生产力与外商直接投资的抑制作用。

4.2 讨论

本研究基于改进的三维生态足迹模型,系统揭示了“一带一路”51 个共建国家自然资本利用的时空分异规律及其驱动机制,为全球可持续发展治理提供了多维视角的理论支撑。研究结果表明,沿线区域生态足迹的分布与演变呈现出显著的异质性与动态性,其背后隐含的生态经济逻辑值得深入探讨。首先基于改进三维足迹模型,其修正传统模型忽略生态赤字/盈余的空间异质性导致的评估偏差。与未改进的模型相比(以 WWF, 2020《地球生命力报告》为例),传统模型将全球均衡因子统一应用于碳足迹核算,忽略“一带一路”共建国家林地碳汇能力的区域差异。改进模型通过本地化生物承载力核算,使俄罗斯的足迹深度从传统模型的 1.8 降至 1.0,更真实反映其生态盈余状态。同时,改进模型显式分离存量资本消耗(生态足迹深度)与流量资本占用

(生态足迹广度),以新加坡为例,传统模型显示其人均总足迹为8.2,而改进模型揭示其深度值高达13.2,表明86%的资源需求依赖存量资本透支,凸显代际不公平性^[7],此改进使结论更契合“一带一路”区域资源禀赋分异特征。

研究结果反映出的蒙古等高广度国家的生态赤字代际转移风险,印证了Wackernagel等关于“资源密集型经济体面临代际公平危机”的论断^[23],而高深度国家的存量资本透支可能引发长期不可逆损失。例如,新加坡的足迹深度值虽从2000年的28.324降至2022年的13.202,但仍远超全球平均水平,表明技术替代未能完全抵消资源依赖惯性。对比方凯等学者早期研究,其提出的“发达国家生态足迹普遍较高”结论在本研究中得到验证^[22],即欧洲国家如拉脱维亚、捷克等国的三维足迹长期领先。然而,现有研究对贸易隐含生态成本的核算仍不完善,需构建跨区域责任共担机制以破解治理碎片化困境。研究区生态足迹的全局空间自相关性增强,Moran's *I*从0.142升至0.298,与罗万云等^[29]关于“区域生态经济系统耦合度提升”的结论一致,但局部集聚模式揭示了更深层次的问题。俄罗斯的“高-高集聚”波动可能与中东欧产业转型滞后相关,而印度的“低-低集聚”稳态则反映生态贫困与制度惰性的叠加效应。这一发现挑战了传统“一刀切”治理范式,支持多中心治理理论,即需要构建差异化政策工具箱。基于Tobit模型结果,城镇化率、贸易开放度、可再生能源占比以及生态承载力对生态足迹具有正向驱动作用,显露出现行技术路径与制度框架的深层矛盾。同时,可再生能源占比与生态足迹的正相关性验证了Nattapan Kongbuamai^[27]得出的结论,即回弹效应加剧资源消耗。由于本研究对象集中于特定国家且缺乏对未来生态变化的预测,同时贸易隐含生态成本的核算尚未完善,未来需拓展研究时空范围、加强预测分析,构建跨区域生态责任共担机制,提升自然资本利用研究的系统性与实践指导价值。

参考文献 (References)

- [1] Ahmed Z, Asghar M M, Malik M N, et al. Moving towards a sustainable environment: The dynamic linkage between natural resources, human capital, urbanization, economic growth, and ecological footprint in China [J]. *Resources Policy*, 2020, 67: 101677.
- [2] Lin D, Hanscom L, Murthy A, et al. Ecological footprint accounting for countries: Updates and results of the national footprint accounts, 2012 - 2018 [J]. *Resources*, 2018, 7(3): 58.
- [3] Daly H E. Operationalizing sustainable development by investing in natural capital [M]. *Investing in Natural Capital*. Island: Island Press, 1994.
- [4] Costanza R, d'Arge R, de Groot R, et al. The value of the world's ecosystem services and natural capital [J]. *Ecological Economics*, 1998, 25(1): 3-15.
- [5] Farley J, Daly H. Natural capital: the limiting factor: A reply to Aronson, Blignaut, Milton, and Clewell [J]. *Ecological Engineering*, 2006, 28(1): 6-10.
- [6] World Bank. Payments for ecosystem services: Lessons from global experience [R]. [https://Documents. Worldbank. Org/En/Publication/Documents. Reports/Documentdetail/105341468332352606/Payment-for-Ecosystem-Services](https://documents.worldbank.org/En/Publication/Documents/Reports/Documentdetail/105341468332352606/Payment-for-Ecosystem-Services), 2021.
- [7] Wackernagel M, Rees W E. Our ecological footprint: Reducing human impact on the earth [M]. New Society Publishers, 1996.
- [8] 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.
- [9] Ikram M, Xia Wanjun, Fareed Z, et al. Exploring the nexus between economic complexity, economic growth and ecological footprint: Contextual evidences from Japan [J]. *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, 2021, 47: 101460.
- [10] Uzar U, Eyuboglu K. Examining the hidden effects of democracy and natural sources on ecological footprint in South Africa: Fourier NARDL approach [J]. *Resources Policy*, 2025, 103: 105573.
- [11] Liu Chao, Niu Haoshuang, Hayyat M, et al. Understanding the relationship between ecological footprints and renewable energy in BRICS nations: An economic perspective [J]. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2025, 118: 46-57.
- [12] 代亚婷, 朱道林, 张晖, 等. 基于三维生态足迹的陕西省土地自然资本可持续利用与脱钩效应 [J]. *长江流域资源与环境*, 2022, 31(9): 1926-1937.
Dai Yating, Zhu Daolin, Zhang Hui, et al. Sustainable use of land natural capital and decoupling effect in Shaanxi Province based on three-dimensional ecological footprint [J]. *Resources and Environment in the Yangtze Basin*, 2022, 31(9): 1926-1937.
- [13] 李少坤, 王少军, 张志, 等. 三维生态足迹视角下江西省自然资本可持续利用演化及其驱动因素 [J]. *中国农业资源与区划*, 2022, 43(1): 110-123.
Li Shaokun, Wang Shaojun, Zhang Zhi, et al. Evolution and driving factors of sustainable utilization of natural capital in Jiangxi Province from the perspective of three-dimensional ecological footprint model [J]. *Chinese Journal of Agricultural Resources and Regional*

- Planning, 2022, 43(1):110-123.
- [14] 吴健生,李铠杨,赵宇豪.基于改进三维足迹模型的关中地区土地自然资本利用状况分析[J].地理科学进展,2020,39(8):1345-1355.
Wu Jiansheng, Li Kaiyang, Zhao Yuhao. The use of land natural capital in the Guanzhong region based on a revised three-dimensional ecological footprint model [J]. Progress in Geography, 2020, 39(8):1345-1355.
- [15] 徐秋怡,颜凤芹,丁智,等.基于三维生态足迹的长江经济带生态安全动态评价[J].地理科学进展,2024,43(6):1184-1202.
Xu Qiuyi, Yan Fengqin, Ding Zhi, et al. Dynamic assessment of ecological security in the Yangtze River economic belt based on three-dimensional ecological footprint [J]. Progress in Geography, 2024, 43(6):1184-1202.
- [16] Li Jing, Peng He, Chen Yizhong, et al. Dynamic evolution of urban resilience and its coupling mechanism with EF_{3D}-driven natural capital utilization: Case study in three typical urban agglomerations of China [J]. Environmental Impact Assessment Review, 2024, 106:107518.
- [17] Zhang Zhongxun, Zhu Zhiyong, Tang Lu, et al. Donor-side evaluation of the spatiotemporal variation in the rural land natural capital value and its influencing factors: A case study of Chongqing, China [J]. Ecological Indicators, 2022, 136:108640.
- [18] Wu Feifei, Yang Xiaohua, Shen Zhenyao, 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, 295:126486.
- [19] 郑皓洋,黄颖利.基于开放三维生态足迹的中国黑土区耕地可持续利用分析与评价[J].资源科学,2024,46(5):1018-1031.
Zheng Haoyang, Huang Yingli. Analysis and evaluation of sustainable utilization of cultivated land in China's black soil region based on open three-dimensional ecological footprint [J]. Resources Science, 2024, 46(5):1018-1031.
- [20] Shi Lei, Xu Jia. Capital accumulation and sustainable development in developing economies role of natural resources development [J]. Resources Policy, 2023, 86:104098.
- [21] 方恺,李焕承.基于生态足迹深度和广度的中国自然资本利用省际格局[J].自然资源学报,2012,27(12):1995-2005.
Fang Kai, Li Huancheng. Provincial pattern of China's natural capital use: A modification and application of ecological footprint depth and size [J]. Journal of Natural Resources, 2012, 27(12):1995-2005.
- [22] 方恺.基于改进生态足迹三维模型的自然资本利用特征分析:选取11个国家为数据源[J].生态学报,2015,35(11):3766-3777.
Fang Kai. Assessing the natural capital use of eleven nations: An application of a revised three-dimensional model of ecological footprint [J]. Acta Ecologica Sinica, 2015, 35(11):3766-3777.
- [23] 方恺.1999—2008年G20国家自然资本利用的空间格局变化[J].资源科学,2014,36(4):793-800.
Fang Kai. Changes in the spatial distribution of natural capital use among G20 countries from 1999 to 2008 [J]. Resources Science, 2014, 36(4):793-800.
- [24] 方精云,朱江玲,王少鹏,等.全球变暖、碳排放及不确定性[J].中国科学(地球科学),2011,41(10):1385-1395.
Fang Jingyun, Zhu Jiangling, Wang Shaopeng, et al. Global warming, carbon emissions and uncertainty [J]. Scientia Sinica (Terrae), 2011, 41(10):1385-1395.
- [25] 王凯,刘美伦,叶俊.中国省际共同富裕水平的时空演化及其影响因素[J].地域研究与开发,2025,44(1):23-28.
Wang Kai, Liu Meilun, Ye Jun. Spatio-temporal evolution and influencing factors of China's provincial common prosperity level [J]. Areal Research and Development, 2025, 44(1):23-28.
- [26] Zhang Zhongxun, Hu Baoqing, Shi Kaifang, et al. Exploring the dynamic, forecast and decoupling effect of land natural capital utilization in the hinterland of the Three Gorges reservoir area, China [J]. Science of the Total Environment, 2020, 718:134832.
- [27] Kongbuamai N, Bui Q, Nimsai S. The effects of renewable and nonrenewable energy consumption on the ecological footprint: The role of environmental policy in BRICS countries [J]. Environmental Science and Pollution Research, 2021, 28(22):27885-27899.
- [28] 罗万云,王福博,戎铭倩.国家重点生态功能区生态-经济-社会系统耦合协调的动态演化:以新疆阿勒泰地区为例[J].生态学报,2022,42(12):4729-4741.
Luo Wanyun, Wang Fubo, Rong Mingqian. Dynamic evolution of ecological-economic-social system coupling coordination in national key ecological function areas: Take the Altay region of Xinjiang as an example [J]. Acta Ecologica Sinica, 2022, 42(12):4729-4741.