



DOI: 10.5846/stxb202108042130

付秀梅, 李晓楠, 林春宇, 薛 诚, 陈睿姝, 鹿守本. 基于科学知识图谱的生态足迹研究演进、框架与前沿中外比较. 生态学报, 2022, 42(13): 5543-5557.

基于科学知识图谱的生态足迹研究演进、框架与前沿 中外比较

付秀梅¹, 李晓楠¹, 林春宇^{1,*}, 薛 诚², 陈睿姝¹, 鹿守本³

1 中国海洋大学经济学院, 青岛 266100

2 中国海洋大学海洋与大气学院, 青岛 266100

3 国家海洋局, 北京 100860

摘要:生态足迹是评估人类活动下生态可持续性的有效工具。基于 1999—2020 年 CNKI 中文核心期刊与 1994—2020 年 Web of Science 核心合集有关生态足迹研究文献共 5104 篇, 运用 CiteSpace 可视化软件, 绘制中外研究高频词时区、关键词聚类及突现词时间分布科学知识图谱, 梳理中外生态足迹相关研究演进路径、基本理论框架与动态前沿。研究表明: (1) 中外生态足迹研究演进路径均可分为三个阶段, 但演进方式有所差异, 且国内研究较国外相对滞后; (2) 中外生态足迹研究均已形成以生态足迹模型方法为工具、以足迹测算为基础、以生态安全为落脚点、以促进人与生态协调发展为目标的基础框架体系, 国外侧重基础框架构建, 宏观尺度研究与微观机制分析, 国内侧重模型和方法优化与外部环境分析; (3) 当前国外前沿方向为环境库兹涅茨曲线假设验证研究与生态网络分析, 国内为碳足迹和水资源足迹的测算、三维生态足迹模型下的自然资本评估以及生态补偿问题。

关键词:生态足迹; 科学知识图谱; 研究框架; 比较分析; CiteSpace

生态足迹 (Ecological Footprint, EF) 是指能够持续提供资源或消纳废物、具有生物生产能力的地域空间^[1], 是评估人类活动对生态系统影响的有效工具。世界自然基金会 (WWF) 在 2020 年《地球生命力报告》中表明, 人类正以前所未有的规模开发和破坏自然。国际环保组织《全球足迹网络》(GFN) 在 2019 年度报告中指出, 人类消耗自然资源的速度是地球生态系统再生速度的 1.75 倍, 且 2019 年是有史以来“地球透支日”出现最早的年份。目前全世界 80% 以上的人口生活在生态赤字 (即生态足迹超过生态承载力) 的国家, 到 2050 年, 可能至少需要 2.6 个地球才足够为我们提供资源并吸收废物^[2]。因此, 保护生态环境已成为世界各国的当务之急, 《中华人民共和国国民经济和社会发展第十四个五年规划和 2035 年远景目标纲要》中也提出, 要“推动绿色发展, 促进人与自然和谐共生”, 而客观评价人类活动的生态占用是促进生态可持续发展、维持全球生态稳定的必要前提。

生态足迹由不列颠哥伦比亚大学的 Mathis Wackernagel 和 William Rees 于 20 世纪 90 年代初期提出^[3], 之后逐渐衍生出水足迹^[4]、碳足迹^[5]以及能源足迹^[6]等相关概念。生态足迹概念最初与经济学相结合, 通过讨论边际价格、区域间风险、贸易条件和效率策略与生态之间的关系, 肯定了用生物物理学方法探索生态可持

基金项目:国家自然科学基金面上项目 (42076221, 42176126); 国家自然资源部海洋战略规划与经济司、中国海洋发展研究会项目 (CAMA201817)

收稿日期: 2021-08-04; 网络出版日期: 2022-03-18

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: linchunyu@stu.ouc.edu.cn

续性含义的必要性^[7];此后又基于国家和地区生态足迹计算原理,提出基于生态足迹的区域可持续发展指标,用以比较国家与地区之间的生态负荷情况^[8]。目前生态足迹被广泛应用于金融^[9-10]、旅游^[11-12]、农业^[13-14]、能源^[15-16]、教育^[17-18]、建筑^[19-20]等领域,旨在揭示生态足迹与经济可持续发展之间的关系,进而为促进全球可持续发展、减轻生态压力提供理论依据与决策支持。生态足迹计算方法主要包括投入产出分析方法^[21-22]、成分法^[23-24]和能值法^[16, 25]等,研究区间逐渐由单一静态评估^[3, 26]发展为时空动态评估^[27-28],研究方式也由历史数据分析演进至动态模拟与预测^[29-30]。在生态足迹科学知识图谱构造方面,有学者对 1992—2012 年国际生态足迹研究的 869 篇文献进行分析,对该领域国际研究的基本情况、国际合作、研究趋势和热点进行了可视化表达与剖析^[31];另有学者对 2000—2015 年国内“四大足迹”理论研究变化进行计量分析,梳理了生态足迹、碳足迹、水足迹和能源足迹的时间发展序列、研究内容的动态变化以及彼此间的关联性^[32]。在生态足迹研究的中外对比方面,有学者通过对 2000—2016 年中外生态足迹主题文献进行分类统计,从刊文量、X 指数、h 指数、篇均被引数、共现关键词和共被引文献 6 个方面对中外文献进行了评价和比较分析^[33];还有学者对 2000—2017 年生态足迹主题文献进行科学知识图谱与文献计量分析,总结了生态足迹研究的发文趋势、发文质量、作者群体、所属机构和期刊类型等特征,并绘制了关键词共现和文献共被引知识图谱^[34]。

综上,虽然已有学者基于科学知识图谱对生态足迹研究的发文情况、研究热点与发文机构等进行了中外对比分析,但是仅对科学知识图谱及文献计量结果进行了文献解释与事实说明,尚未对其发展历程进行阶段整理并对生态足迹相关理论框架进行全面的归纳总结。随着相关研究成果的不断增加,比较分析中外生态足迹的研究演进、理论框架及动态前沿,有利于把握其理论内涵及研究趋势所在,对推动全球可持续发展具有重要意义。本文将借助 CiteSpace 可视化软件,对中外生态足迹研究文献进行科学知识图谱分析,通过高频词时区、关键词聚类 and 突现词分布,梳理中外生态足迹研究演进路径、基本理论框架与动态前沿,以期对未来生态足迹研究方向提供有价值的参考。

1 研究方法 with 数据来源

1.1 研究方法

科学知识图谱是将知识域作为对象,用于显示科学知识发展进程及其结构关系的一种图像^[35],在刻画知识关系的同时又迸发出新的知识。在从简单的传统科学知识图谱发展到多维尺度分析图谱、寻求路径图谱等现代科学知识图谱的过程中,用于图谱绘制的工具也逐渐多元化^[36]。CiteSpace 是在科学计量学、数据可视化背景下逐渐发展起来的一款可视化分析软件,旨在对某一研究主题的文献进行科学知识图谱分析,通过选定作者、机构、关键词或共被引等特定信息得到可视化图谱,从中获取当前相关主题领域的研究现状、研究热点与前沿方向。

本文将运用科学知识图谱法,借助 CiteSpace 可视化软件,以关键词为核心进行计量分析,具体包括以下几个方面:(1) 中外发文量及其对比分析;(2) 发文机构统计及其分布特征;(3) 关键词与高频词时区图构建,通过筛选生态足迹相关文献关键词并对其进行分类整理,辅 with 高频时区图,分析生态足迹研究热点及其发展历程;(4) 关键词聚类,将不同文献进行分类聚集,梳理生态足迹基础理论框架;(5) 突现词分布,利用高频关键词所处的不同时期,探究生态足迹前沿所在。通过以上分析,以科学知识图谱形式梳理生态足迹研究演进路径、基本理论框架与动态前沿。

1.2 数据来源

本文数据包括国内与国外两个部分。国内数据来源于 CNKI 中文核心期刊,以“生态足迹”为关键词进行高级检索,共得到 2339 篇学术期刊文献,时间跨度为 1999—2020 年。国外数据来源于 Web of Science 核心合集,以“Ecological Footprint”为关键词进行高级检索,共得到 2765 篇学术期刊文献,时间跨度为 1994—2020 年。

从中外生态足迹相关研究的发文量来看,外文期刊发文量(图 1)可以大致分为三个阶段:第一阶段处于

萌芽期(1994—2001年),此阶段有关生态足迹的年发文量较少,均为个位数;第二阶段处于形成期(2002—2011年),发文量呈现稳步增长趋势;第三阶段处于成熟期(2012—2020年),此阶段生态足迹外文发文量大幅增长,增速也在不断提高。中文期刊发文量(图2)也可以分为三个阶段,但是与外文发文趋势有明显差异:第一阶段为起步期(1999—2002年),发文量处于较低水平;第二阶段为快速增长期(2003—2010年),发文量呈现非常明显的增长趋势;第三阶段为稳定期(2011—2020年),生态足迹中文发文量总体呈下降趋势,但近年来下降趋势有所放缓且出现略微回升现象。不难发现,不论是中文还是外文,生态足迹相关研究发文量均经历了早期低水平状态和后来的迅速增长,说明研究开展均建立在初期摸索与后期消化和延伸的基础之上。

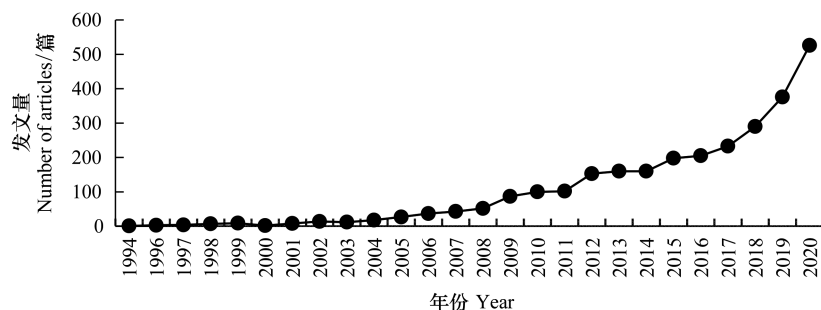


图1 1994—2020年“生态足迹”外文期刊发文量

Fig.1 The number of articles published in foreign journals on the research of “Ecological Footprint” from 1994 to 2020

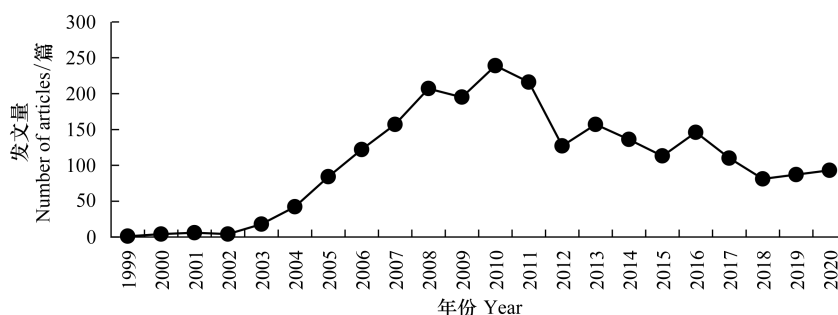


图2 1999—2020年“生态足迹”中文期刊发文量

Fig.2 The number of articles published in Chinese journals on the research of “Ecological Footprint” from 1999 to 2020

从发文机构来看(表1),发文量前十的国外机构有一半来自美国,发文量最高的为加州大学,加州大学伯克利分校自然资源学院在全球10大环境与生态学院中排名第一。国内机构主要集中在北京,发文量(包括外文发表)最高的为中国科学院,且机构间发文量存在较大差距。同时,近十年中文发文量呈下降趋势,与外文发文量差距扩大。一方面,通过分析检索结果,发现国内机构在外文期刊中的相关发文量明显高于国外机构,因此在国内期刊的发文量也会相对减少;另一方面是因为近年来有关碳足迹、水足迹以及能源足迹的研究逐渐增加,导致以传统生态足迹为主题的文献相对减少^[34]。

2 中外生态足迹研究的热点演进比较

首先,本文分别将检索到的2339篇中文文献和2765篇外文文献导入CiteSpace V,并选择关键词(keyword)进行可视化分析,从中得到不同词频下的关键词分布情况(表2),然后选择时区(timezone)进行生态足迹研究演进路径可视化分析,挖掘生态足迹研究热点的特征演化,并划分生态足迹研究演进阶段,形成研究热点动态演进路径知识图谱(图3,图4)。

表 1 “生态足迹”研究机构排名

Table 1 Ranking of “Ecological Footprint” research institutions

排序 Ranking	国外机构(国家) Foreign institutions	发文量/篇 Articles	国内机构 Chinese institutions	发文量/篇 Articles
1	加州大学(美国)	55	中国科学院	211
2	国家科学研究中心(法国)	53	中国科学院地理科学与资源研究所	141
3	全球足迹网络(美国)	38	北京师范大学	125
4	瓦格宁根大学(荷兰)	33	中国科学院大学	109
5	北卡罗莱纳大学(美国)	30	北京大学	102
6	佛罗里达州立大学(美国)	29	南京大学	59
7	法国国家农业食品与环境研究院(法国)	28	陕西师范大学	57
8	不列颠哥伦比亚大学(加拿大)	28	东北大学	57
9	亥姆霍兹联合会(德国)	27	中国地质大学	56
10	马里兰大学(美国)	27	兰州大学	44

表 2 国内外“生态足迹”研究领域前 20 位高频关键词

Table 2 Top 20 high-frequency keywords in Chinese and foreign “Ecological Footprint” research

排序 Ranking	年份 Year	关键词 Keywords	频次 Count	中介中心性 Centrality	排序 Ranking	年份 Year	关键词 Keywords	频次 Count	中介中心性 Centrality
1	1994	sustainability	444	0.08	1	2000	生态足迹	1467	0.43
2	1994	sustainable development	158	0.03	2	2000	可持续发展	530	0.35
3	1996	ecological footprint	1003	0.09	3	2001	生态承载力	595	0.34
4	1996	footprint	288	0.08	4	2001	生态赤字	223	0.14
5	1996	energy	192	0.06	5	2004	旅游生态足迹	43	0.02
6	1999	indicator	233	0.04	6	2004	中国	42	0.05
7	1999	land use	123	0.02	7	2004	生态经济	25	0.03
8	2001	china	198	0.03	8	2005	生态安全	89	0.07
9	2001	emission	134	0.03	9	2005	生态足迹模型	61	0.05
10	2002	economic growth	188	0.05	10	2005	生态补偿	44	0.03
11	2003	CO ₂ emission	197	0.05	11	2005	生态效率	41	0.02
12	2003	model	169	0.04	12	2007	生态压力	31	0.02
13	2004	climate change	203	0.02	13	2007	生态压力指数	27	0.01
14	2005	impact	309	0.05	14	2008	自然资本	34	0.04
15	2005	management	181	0.03	15	2008	能值分析	29	0.02
16	2006	consumption	290	0.02	16	2008	可持续利用	27	0.01
17	2006	system	131	0.03	17	2009	水资源	36	0.01
18	2007	life cycle assessment	160	0.02	18	2009	水足迹	27	0.03
19	2009	carbon footprint	170	0.02	19	2010	碳足迹	53	0.05
20	2011	energy consumption	159	0.02	20	2011	水资源生态足迹	32	0.02

2.1 国外热点演进

由生态足迹高频关键词(表 2)和研究热点动态演进路径知识图谱(图 3)可知,国外生态足迹相关研究起步较早,大致可以分为以下三个阶段:

1994—1999 年生态足迹概念认知阶段。这一时期学者们从生态压力与可持续发展的角度阐释生态足迹概念^[8],基于全球自然资本评估框架对单个国家或地区的生态足迹进行静态测算与比较^[3],开始探讨其相关指标与模型的适用性,并开始关注国家经济活动与环境影响之间的关系^[37]。此时生态足迹计算以投入产出法为主。

2000—2010 年生态足迹研究蓬勃发展阶段。此阶段高频关键词较多,属于承前启后的关键研究时期。

序列数据^[42],拓展了生态足迹的持续性研究。最后,研究方法与工具逐渐多样化,原有全球自然资本评估框架被不断改进以提高测算精准度,用于分析环境影响驱动力的分析工具也不断完善^[43],生命周期开始被纳入生态足迹相关研究范畴,并且出现投入产出分析以外的另一种足迹测算方法——能值法^[44]。

2011—2020 年生态足迹研究日趋成熟阶段。由高频关键词可知 2011 年后创新性研究逐渐饱和,有关生态足迹的研究日趋成熟,且多为前期研究的延伸。一方面生态足迹测算逐渐偏向面板数据,并结合系统动力学方法进行生态足迹动态预测^[45]。另一方面,生态足迹应用范围进一步扩大,分析层次也更加多元化,例如相关研究进一步验证了库兹涅茨假设的有效性^[46]。生态足迹开始成为生态网络分析的重要指标,用以研究自然区域可持续发展规划^[47]。同时,科技、能源等领域逐渐成为生态足迹研究的热点。

2.2 国内热点演进

根据生态足迹研究文献中高频关键词(表 2)及研究热点动态演化路径(图 4),发现国内生态足迹研究演进也经历了三个阶段。

1999—2003 年生态足迹研究探索阶段。在此期间,通过借鉴国外相关研究,基于可持续发展指标框架对生态足迹的概念与模型予以阐述^[48],并对其作为测量人类利用自然程度、量化生态承载力的新方法进行优缺点评价^[49]。生态足迹测算率先应用于甘肃省,并推广至整个西北地区,此时同样使用单一静态数据进行测算^[50]。

2004—2010 年生态足迹研究快速发展阶段。首先,学者们基于前期对生态足迹的摸索以及国际热点研究的推动,开始将生态足迹及其衍生出的水足迹、碳足迹和能源足迹与经济发展挂钩,应用于以旅游业为典型代表的各个产业之中,通过测算生态足迹判断生态安全状态并借此评估某地区或产业现有发展模式的合理性^[51]。其次,国内生态足迹测算方法逐步完善,学者们不断对模型参数调整、项目计算、账户扩展等方面进行修正^[52],将基于净初级生产力的产量因子与均衡因子作为研究重点之一^[53],同时对成分法、投入产出法和能值法等进行改进^[54]。最后,其研究方式也由静态单一测算演变为动态测算与预测^[55],进一步为我国可持续发展路径提供决策依据。

2011—2020 年生态足迹研究逐步成熟阶段。此阶段虽然发文量开始呈现下降趋势,但研究内容与研究视角仍在不断创新。一方面,三维生态足迹模型逐步成为研究的重点,以此从时空两方面探究足迹广度与足迹深度^[56]。另一方面,基于原有生态足迹、水足迹以及碳足迹等相关概念与理论,首次提出普适性足迹家族概念并将其用于各省市资源与环境压力评估^[57],同时也出现了农田等生态系统的气候学足迹分析研究^[58]。

综上,1999 年之前,国外已经开始从生态足迹的概念、测算框架以及经济发展角度进行生态足迹研究;而此时国内相关研究尚未起步。此后至 2010 年期间,随着框架与模型的不断完善,国外生态足迹研究进入蓬勃发展时期,呈现研究广度和深度不断扩展、研究方法与工具逐渐多样化的动态研究趋势;国内则在这十年间实现了飞跃式发展,从初始阶段对生态足迹概念与模型的阐释和评价,到生态足迹模型改进与多领域应用,研究成果大幅增长。2010 年之后,国内外生态足迹研究高频关键词较少,研究达到了相对饱和的状态。库兹涅茨假设验证、科技和能源等领域研究逐渐成为国外热点;三维生态足迹模型等研究则成为国内热点。

国外生态足迹研究自上世纪九十年代中期萌芽,历经十年快速发展,以全球自然资本评估框架为开创点,在经济活动与生态环境的关系研究以及多学科融合中发展,聚焦能源社会的可持续发展与预测等领域,其研究深度与广度都在不断扩大;国内研究在引入国外既有概念与模型基础上,立足中国国情,在研究视角、内容和方法上均有创新突破,主要表现在三维生态足迹模型的多元化应用、足迹家族的普适性概念界定以及均衡因子和产量因子的差异化选取等方面。

3 中外生态足迹研究核心体系比较

本文通过对生态足迹中外文献进行关键词聚类分析(图 5,图 6),有助于形成较为系统的生态足迹相关知识理论体系,进而构建中外生态足迹核心理论框架。结果表明,中外生态足迹理论在框架构成上具有相似性,分别为模型方法、足迹测算、生态安全以及生态协调四个方面(表 3)。

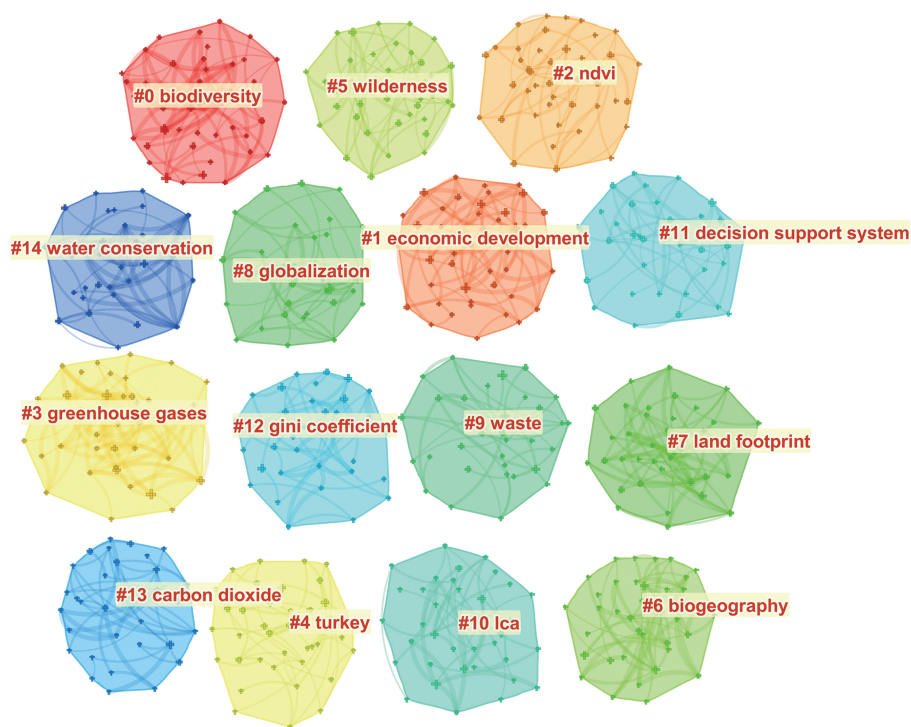


图 5 国外“生态足迹”文献关键词聚类

Fig.5 Keywords clustering in foreign articles on “Ecological Footprint”

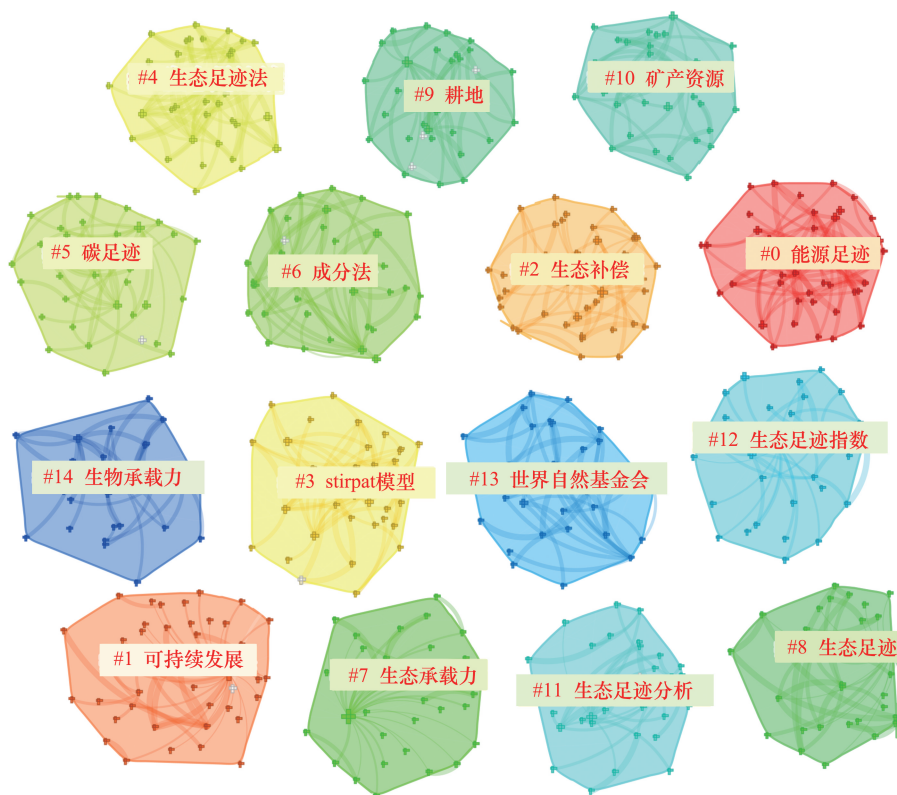


图 6 国内“生态足迹”文献关键词聚类

Fig.6 Keywords clustering in Chinese articles on “Ecological Footprint”

表 3 中外“生态足迹”文献内容对比

Table 3 Comparison of Chinese and foreign articles on “Ecological Footprint”

聚类 Clusters	聚类标签 Labels	国外文献关键词 Keywords of foreign articles	聚类标签 Labels	国内文献关键词 Keywords of Chinese articles
I 模型方法 Model and method	#2 ndvi	input output analysis, LCA, classification, framework, index, design, performance, eco-efficiency, model, lidar, altimeter	#3 stirpat 模型	stirpat 模型, 时间序列, 预测, ipat 等式, 生态足迹法, stirpat, 产量因子, 能值生态足迹, 成分法
	#7 land footprint		#4 生态足迹法	
	#10 lca		#6 成分法	
	#11 decision support system			
II 足迹测算 Footprint measurement	#5 wilderness	carbon emission, carbon footprint, ecological footprint, human footprint, diet, urban, emergy	#0 能源足迹	生态足迹, 水生态足迹, 能源足迹, 碳足迹, 乡村旅游, 农田生态系统, arima, 生态压力指数, 生态效率
	#14 water conservation		#5 碳足迹	
III 生态安全 Ecological security		carring capacity, emission, biodiversity, conservation, climate change, land use, energy, CO ₂ emission, greenhouse gases, coal consumption, population, abundance, biocapacity, evolution, ecology, carbon dioxide	#8 生态足迹	
	#0 biodiversity		#1 可持续发展	可持续发展, 动态预测, 生态补偿, 生态价值, 生态服务系统价值, 生态承载力, 城市可持续发展, 人均生态赤字, 环境保护, 耕地, 粮食安全, 生态安全, 区域可持续发展, 生态整体性, 环境可持续性指数, 生态赤字, 生态容量, 生态盈余, 生态系统, 世界自然基金会
	#3 greenhouse gases		#2 生态补偿	
	#4 turkey		#7 生态承载力	
	#6 biogeography		#9 耕地	
	#9 waste		#11 生态足迹分析	
	#13 carbon dioxide		#12 生态足迹指数	
IV 生态协调 Ecological coordination		appropriation, international trade, benefit, urbanization, economic growth, cross-national, equity, economics, income inequality, allocation, nation, agricultural intensification, trade	#13 世界自然基金会	
	#1 economic development		#10 矿产资源	生态经济, 产业结构, 人类发展指数, 地球生命力指数, 经济增长, 生态福利绩效, 生态地租, 协整
	#8 globalization		#14 生物承载力	
	#12 gini coefficient			

3.1 模型方法

根据生态足迹中外文献关键词聚类分析结果, 聚类 1 为生态足迹的模型方法。此类研究主要包括生态足迹模型、生态足迹测算方法、外部因素协调分析方法以及辅助分析工具与算法等, 以此构成生态足迹应用中的模型与方法体系并不断加以改进。模型方法是生态足迹研究的基础条件, 由聚类可知, 国外生态足迹模型方法研究比较注重相关指标的选取及其测算框架的构建, 而国内更加注重对生态足迹模型与方法的修正与改进。

(1) 国外研究

国外有关生态足迹模型方法的研究主要是生态足迹指标(包括生态足迹测算涉及的生态、环境、资源等指标, 以及国内生产总值、人类发展指数等经济与社会发展相关指标)的数据获取与测算框架构建^[3], 聚类关键词为“input output analysis, LCA, framework, index, model, lidar, altimeter, design, classification, performance, eco-efficiency”。部分研究基于既有生态足迹账户, 通过遥感、土地调查、GIS 信息等途径获取更加精确的城市、家庭等相关数据并进行建模分析, 进而利用投入产出分析、生命周期分析等方法量化生态足迹^[59]。同时, 研究还将生态足迹指标与生态效率模型结合评估经济活动的生态效益, 与生态系统服务价值结合探究生态系统服务的供给、需求和预算等^[60]。

(2) 国内研究

国内有关生态足迹模型方法的研究主要分为两类。第一是生态足迹测算方法及其改进, 聚类关键词为“生态足迹法、产量因子、成分法、能值生态足迹、时间序列、预测”。相关研究利用改进的生态足迹模型测算方法(包括产量因子、均衡因子等重要参数的适应性调整以及成分法、能值法与三维模型修正演变等)测算生态足迹以评估区域、产业、资源等可持续发展状况^[61], 并进一步利用 ARIMA、GRNN、BP 神经网络等模型进行可持续发展预测^[62]。第二是 STIRPAT 模型的应用与修正, 聚类关键词为“stirpat 模型、ipat 等式、stirpat”。此类研究借助 STIRPAT 模型(即 IPAT 模型的扩展模型)实证分析社会、经济、人文等要素对生态足迹的影响情况, 涉及经济增长、产业结构、能源消费、城镇化水平、科技水平和开放水平等^[63]。

3.2 足迹测算

根据生态足迹中外文献关键词聚类分析结果,聚类 2 为足迹测算。相关研究主要基于聚类 1 生态足迹模型方法进行不同尺度、不同对象、不同行业、不同层面的足迹量化。足迹测算是生态足迹应用的基础,生态足迹测算是将人类消费的资源 and 产生的废弃物转换为生产性土地面积,碳足迹研究人类生产活动所产生的碳排放量,水足迹则是衡量人类生产生活所需要的水资源消耗量,足迹代表人类活动对生态的“需求”情况。

(1) 国外研究

相较于国内,国外研究偏向足迹测算框架的勾勒及其多元化应用。相关研究主要集中在碳足迹(涉及国家、城市、社会经济部门、家庭、旅游地、饮食、建筑等)、人类足迹(主要为全球保护区、世界自然遗产等)以及特定区域(城市、荒野)或行业(运输、食品等)的生态足迹测算方面,主要测算方法为能值法和生命周期法,聚类关键词为“carbon emission, carbon footprint, ecological footprint, human footprint, diet, urban, emergy”。其中,荒野(即不受人类压力影响且连续面积需超过 10000 平方千米的地区,包括陆地荒野和海洋荒野)和有关水资源保护的生态足迹研究较为突出。一方面,结合沙漠生态区、海洋、极地等地区的保护情况,通过生态足迹分析人类活动与荒野衰退之间的关系,将生态足迹作为调整荒野保护和维持生物多样性环境保护的有利工具^[64]。另一方面,基于生态足迹模型对包括农业用水、人类食物消费中的水资源、人类所有生产生活用水以及与水资源相关的水电工程等进行足迹量化,以此判断水资源利用与保护状态,为促进水资源可持续发展提供现实依据^[65]。

(2) 国内研究

国内关于生态足迹测算的研究主要分为足迹量化和相关指数分析。足迹量化是单纯基于足迹框架测算某一行业或区域等不同尺度的生态足迹值,聚类关键词为“水生态足迹、能源足迹、驱动因子、碳足迹、乡村旅游、农田生态足迹”。其研究范围包括国家、省市、特色区域(矿业地区、旅游地区、资源型地区、农业地区、荒漠地区等)以及家庭等,研究对象包括资源(土地、水、能源等)、产业(旅游业、养殖业、餐饮业、贸易等),足迹种类则分为生态足迹、碳足迹、水资源足迹、能源足迹^[57]。相关指数分析是基于生态足迹测算,辅以动态预测或其他相关生态指数(生态承载力、生态赤字、生态足迹压力指数、生态效率等)进行可持续性评估,聚类关键词为“arima、生态压力指数、生态效率”。一方面,研究通过动态预测分析生态足迹未来变化趋势^[62];另一方面,通过计算生态压力指数、生态效率等评估可持续发展状况并挖掘造成可持续发展非理想状态的深层因素^[66]。

3.3 生态安全

根据生态足迹中外文献关键词聚类分析结果,聚类 3 为生态安全。相关研究基于生态足迹理论与分析方法评估人类活动下区域、行业、经济或社会等方面的可持续发展情况。良好的生态安全状态是人类得以持续、健康发展的前提条件,基于生态足迹评估生态安全状况能够有效甄别生态安全威胁要素,为促进人与自然和谐发展提供理论依据。

(1) 国外研究

国外有关生态安全的研究可以大致分为三类。第一类是整体生态安全,包括各级行政区生态安全、特定典型区域生态安全以及国家生态安全,聚类关键词为“carring capacity, land use, biocapacity, ecology”。相关研究以生态足迹表示人类对生态系统的总需求,以生态承载力表示生态系统的资源服务供给,通过对比两者结果判断可持续发展现状和趋势,为实现可持续发展目标提供政策依据。第二类是物种安全,聚类关键词为“biodiversity, abundance, population, conservation, evolution”。研究通过分析生态足迹与生物多样性之间的关系,探究人类对物种安全(包括鱼类、鸟类、藻类、土壤昆虫群落、哺乳动物、脊椎动物、森林植物等)造成的压力,以此寻找生物多样性保护路径^[67]。第三类是环境安全,聚类关键词为“CO₂ emission, greenhouse gases, emission, climate change, energy, coal consumption, carbon dioxide”。研究基于不同层次、不同行业、不同尺度、不同对象的生态足迹、碳足迹、能源足迹等,评估碳排放与能源消耗的可持续性^[68];进一步通过实证分析

包括畜牧养殖、城市化、废物管理、能源消耗、旅游等在内的人类活动与足迹、二氧化碳排放或温室气体排放导致的气候变化之间的关系^[69],为促进低碳、减排提供决策依据。

(2) 国内研究

国内对于生态安全的研究主要分为两类,其一是生态足迹应用下的可持续发展评估,聚类关键词为“可持续发展、动态预测、生态承载力、城市可持续发展、人均生态赤字、耕地、粮食安全、生态安全、区域可持续发展、生态整体性、环境可持续性指数、生态赤字、生态容量、生态盈余和生态系统”。在可持续发展指标体系框架下,通过计算生态足迹与生态承载力,分析特定区域(包括国家、省市、城市群、以旅游地为代表的特殊区域、以农业和旅游业为代表的特定产业以及以耕地为代表的自然资源等)的生态赤字或生态盈余情况^[70],以此作为评估可持续发展和生态安全状况的依据,或进一步对其未来状况进行动态预测^[71]。其二是有关生态文明建设的内容,聚类关键词为“生态补偿、生态价值、生态服务系统价值、环境保护、世界自然基金会”。生态补偿研究近年来较为热门(包括不同省市的生态补偿、农田耕地或自然保护区等特定区域的生态补偿、旅游等产业生态补偿以及能源资产流转生态补偿等方面)。相关研究利用生态足迹量化自然生态空间的占用情况,并以生态系统服务功能经济价值核算方法等为基础计算生态赤字的价值,以此为基础构建补偿框架,并进一步探究补偿区域、补偿标准、补偿方式、保障机制等,通过人为干预缓解生态与资源压力^[72];与此同时,世界自然基金会也通过发布《中国生态足迹与可持续消费研究报告》和《地球生命力报告》等积极引导全球加强环境保护、加强生态文明建设^[73]。

3.4 生态协调

根据生态足迹中外文献关键词聚类分析结果,聚类 4 为生态协调,即利用生态足迹分析生态与经济、社会、人文之间的关系。国内有关生态协调的研究多集中于经济发展,而国外研究除经济发展之外更加注重人类福祉等情况。

(1) 国外研究

国外有关人类与生态协调发展的研究大致分为两个方面:经济发展与收入分配。经济与生态足迹协调发展关系研究的聚类关键词为“appropriation, international trade, urbanization, economic growth, cross-national, economics, trade, agricultural intensification”。相关研究将生态足迹作为环境退化的指标,验证不同国家和地区环境库兹涅茨曲线假设的成立情况^[46],或者检验生态足迹与经济增长、能源消耗、城市化、贸易、技术进步、全球化等相关指标之间的协整性与因果关系^[74]。人类收入分配与生态足迹协调发展的聚类关键词为“benefit, equity, income inequality, allocation”,借助生态足迹分析生态环境与收入和人口不平等、粮食匮乏、人类健康之间的关系以及全球范围内存在的环境不平等问题^[75]。

(2) 国内研究

国内有关生态协调的研究核心在于经济可持续发展。一方面利用生态足迹模型评估生态经济可持续发展状态,聚类关键词为“生态经济、人类发展指数、生态地租”,以生态足迹理念为基础,研究资源消耗与地球承载关系下我国人类社会经济发展中存在的生态问题、通过生态地租衡量生态资源利用带来的社会经济效果、综合人类发展指数与生态足迹指数基于生态绩效视角进行生态经济可持续发展评价与预测、对生态与经济系统耦合状态进行评估等^[76],以此作为建立循环经济、发展生态经济、促进人与自然和谐发展的理论依据。另一方面,通过实证分析探究影响生态足迹的经济因素,聚类关键词为“经济增长、产业结构、生态福利绩效”,从产业结构、收入或消费、技术进步、城市化或国际贸易等角度剖析经济发展与生态足迹之间的关联^[77],深层次挖掘生态足迹社会经济驱动因素,多方位探寻提升区域自然生态与社会经济的可持续性路径,促进生态与经济系统协调发展。

综上所述,中外生态足迹研究均已经形成了以生态足迹模型方法为工具、以足迹测算为基础、以生态安全为落脚点、以促进人与生态协调发展为目标的基础框架体系。在模型方法方面,国外生态足迹研究比较注重生态、环境等相关指标的选取与测算框架的跨学科构建;国内更加注重生态足迹模型中产量因子、均衡因子等

重要参数的适应性调整、测算方法的修正演变以及 STIRPAT 模型的应用与修正等。在足迹测算方面,国外生态足迹研究以荒野和水资源保护为代表,强调多元测算框架的具体应用与分析;国内则注重既定框架内不同尺度的足迹量化,以及生态压力指数和生态效率等相关指数分析。在生态安全方面,国外强调生态足迹研究中的整体生态安全、物种安全和环境安全问题;国内则更关注可持续发展指标体系框架下特定区域的生态盈余或赤字情况,以及生态补偿等生态文明建设内容。在生态协调方面,国外研究重在分析经济发展与生态环境的内部作用机制与协调机理,以及生态足迹所呈现的人类福祉问题;国内则集中于经济发展的可持续性评估与外部影响因素分析。

通过以上分析发现,国外生态足迹研究在理论框架搭建中基础性贡献较多,相比国内,其研究更注重跨区域、全球化等宏观范畴,以及具体要素的作用机制与协调机理等微观分析视角,研究内容也更加多元化;国内则以多领域应用为发展背景,以模型方法改进为突破、影响因素与生态补偿等外部环境规律为研究重点,强调生态足迹的“工具”性。

4 中外生态足迹研究的前沿方向

本文通过突变检测(Burst detection)功能分析生态足迹关键词词频变化情况,并绘制相应的突现词时间分布图谱,探究中外生态足迹研究的前沿方向。本文提取词频变化率较高的十个关键词进行整理(表4),以此表示生态足迹研究前沿相关术语及其研究起止时间。

表 4 中外“生态足迹”研究突现关键词
Table 4 Keywords with the strongest citation bursts in Chinese and foreign “Ecological Footprint” research

突现关键词 Keywords	突现值 Strength	频次 Count	起始年份 Begin	终止年份 End	突现关键词 Keywords	突现值 Strength	频次 Count	起始年份 Begin	终止年份 End
Appropriation 拨款	6.6071	19	1997	2009	能值分析 Emergy analysis	6.5303	29	2008	2011
Economics 经济学	7.5434	35	1999	2015	碳足迹 Carbon footprint	12.1273	53	2012	2020
Ecological footprint 生态足迹	21.0904	1003	2000	2012	农田生态系统 Cropland ecosystem	4.84	12	2013	2018
Embodied energy 内含能	5.296	21	2002	2009	水资源生态足迹 Ecological footprint of water resources	8.6131	32	2013	2020
Sustainability 可持续性	7.1274	444	2006	2012	自然资本 Natural capital	7.1897	34	2013	2020
International trade 国际贸易	11.097	86	2009	2016	生态文明 Ecological civilization	7.9914	25	2014	2016
Nation 国家	11.3637	56	2010	2016	水资源 Water resources	7.2996	36	2014	2020
Ecological network analysis 生态网络分析	4.9818	25	2016	2020	三维生态足迹 Three- dimensional ecological footprint	8.9572	23	2015	2020
Urban 城市	4.2623	18	2017	2020	足迹家族 Footprint family	7.1427	12	2015	2016
Kuznets curve 库兹涅茨曲线	4.773	22	2018	2020	生态补偿 Ecological compensation	6.013	44	2016	2020

(1) 国外前沿

由表 4 可知,近年来国外生态足迹研究热点围绕国家生态经济协调发展问题,尤其以库兹涅茨曲线研究为代表,即验证生态足迹与经济发展之间的库兹涅茨曲线假设是否成立。

在环境库兹涅茨曲线理论研究中,环境压力指标通常由单一环境污染物排放量、环境退化指数等综合指标或生态足迹表示。其中,生态足迹作为能够同时反映多维环境与资源压力的综合指标^[78],已被应用于不同国家与地区。相关研究结合能源消耗、技术创新等指标,探究生态足迹与经济增长之间的库兹涅茨假设成立关系^[46],将两者因果关系结果作为促进经济与生态协调发展的理论依据。此外,以生态足迹为重要衡量指标的生态网络分析渐热,研究通过探究不同区域或系统间的空间连通性,为区域可持续发展规划提供依据^[47]。

(2) 国内前沿

近年来国内生态足迹研究集中于足迹测算框架的应用以及生态文明建设方面。碳足迹、水资源生态足迹、自然资本、水资源、三维生态足迹和生态补偿为最新的高突现值突现词,代表国内生态足迹研究前沿。

在足迹测算框架应用中,碳足迹研究已经进入相对稳定的时期,研究内容从最初碳足迹测算步骤与方法解释发展为不同尺度中的可持续发展评估应用及影响因素分析,主要围绕低碳经济、碳标签、农田生态系统、产品碳足迹等展开^[79]。水资源生态足迹主要用于评估不同区域、省市、产业的水资源可持续利用情况,近年来不断有学者将改进的生态足迹模型应用于此,并对水资源生态足迹进行时空演化分析^[80]。三维生态足迹模型是传统生态足迹模型的深化,旨在以足迹深度和足迹广度两个指标分别刻画人类对自然资本存量与自然资本流量的占用水平^[28],其相关发文量较少,研究尚处于发展期,目前用于全国、省市或部分流域的自然资本评估^[81]、海岸带以及土地承载力评估以及相关时空演变分析等^[56]。在生态文明的制度建设方面主要为生态补偿研究,也尚处于发展阶段,研究对象包括地区、农田、旅游地、水资源、能源以及草原、湖泊等自然区域,研究基于生态足迹方法量化生态补偿标准^[72]。

由此,国外生态足迹动态前沿仍以经济活动与生态环境的关系为主线,以能源、科技为重要方向,以生态网络分析为重要方法。一方面,生态足迹概念最初就与经济学相结合,讨论边际价格、贸易条件和效率策略等与生态之间的关系^[7],并在经济活动与生态环境的关系研究及多学科融合中发展,因而前沿研究仍围绕以库兹涅茨假设为代表的经济与生态问题,而能源是库兹涅茨假设验证中的关键要素之一^[82];另一方面,当前全球处于能源发展大变革时期,新技术又在新能源革命中扮演重要的角色^[83],其动态前沿与减缓全球环境压力的国际形势相适应。而国内生态足迹动态前沿为碳足迹和水资源足迹测算、三维生态足迹模型下的自然资本评估以及生态补偿。从呼吁发展低碳经济到确保实现碳达峰、碳中和目标,从首次以法律形式明确规定水环境生态保护补偿机制,到十九大报告强调建立市场化、多元化生态补偿机制,在国内战略背景下,生态足迹研究呈现明显的政策导向特征。

5 结论与讨论

本文运用科学知识图谱法,借助 CiteSpace 可视化软件,以关键词为核心对 1999—2020 年 CNKI 中文核心期刊与 1994—2020 年 Web of Science 核心合集有关生态足迹研究的数据进行分析,梳理中外生态足迹相关研究演进路径、基本理论框架与动态前沿,得出以下结论:

(1) 中外生态足迹研究热点演进均可以分为三个阶段,但演进方式有所差异,且国内研究较国外相对滞后。国外生态足迹研究开创于全球自然资本评估框架,在经济活动与生态环境的关系研究以及多学科融合中发展,聚焦能源社会的可持续发展与预测等领域;国内研究则在引入国外既有概念与模型基础上,立足中国国情,在研究视角、内容和方法上实现创新突破。

(2) 中外生态足迹理论在框架构成上具有相似性,均形成了以生态足迹模型方法为工具、以足迹测算为基础、以生态安全为落脚点、以促进人与生态协调发展为目标的基础框架体系。但是,国外研究在理论框架搭建中基础性贡献较多,更侧重生态足迹全球化、多区域等宏观范畴以及具体要素的作用机制与协调机理等微观分析视角,研究内容更加多元化;国内研究以模型方法改进为突破,以影响因素与生态补偿等外部环境规律为重点,强调生态足迹的“工具”性。

(3) 通过高频突现词挖掘中外生态足迹动态前沿,发现国外前沿方向为生态足迹与经济关系的库兹涅茨曲线假设验证研究与生态网络分析,国内则为碳足迹和水资源足迹测算、三维生态足迹模型下自然资本评估以及生态补偿问题。国外生态足迹动态前沿仍以经济活动与生态环境的关系为主线,与全球能源发展态势相适应;国内研究则在生态文明建设等国家战略背景下呈现政策导向特征。

综上所述,国内外生态足迹研究侧重点具有一定差异。为进一步完善我国生态足迹理论体系,针对目前研究中存在的学科融合发展不足、微观机制分析不深等问题,未来研究重点应包括以下几个方面:

(1) 生态足迹理论跨学科融合。生态足迹研究不只是生态议题,多学科融合发展有利于创新研究方法、

丰富基础理论。未来国内研究应进一步促进生态足迹理论与 GIS 信息、地理、环境科学、社会经济等多学科融合发展,提高多元指标体系构建与数据获取的科学性,形成更为完善且系统的生态足迹研究框架。

(2)生态足迹微观机制分析。突破生态足迹影响因素的外部评估模式,加强关键要素的微观作用机制与协调机理分析。深入分析生态足迹与生态系统服务、生物多样性、经济发展以及人类福祉等方面的反馈机制,探究技术、能源、人力资本、生物承载力等要素间协同作用机理,推动国内生态足迹理论创新。

(3)生态足迹研究尺度扩展。双循环新发展格局下,国内生态足迹研究应破除边界,与国际生态足迹动态前沿开放互联,与全球发展态势相适应。研究尺度以国内为中心向外辐射,纳入国际要素对国内生态足迹的影响,探究国内外生态足迹研究的共性与特性。

本文通过梳理中外生态足迹相关研究的演进路径、基本理论框架与动态前沿,能够为未来生态足迹研究方向提供一定的参考。考虑到本文在期刊文献选取范围以及将关键词作为分析依据方面均仍存在一定局限性,未来相关研究应对此进行优化提升,以期进一步提高利用科学知识图谱分析的精准度。

参考文献 (References):

- [1] 洪顺发,郭青海,李达维. 基于生态足迹理论的中国生态供需平衡时空动态. 资源科学, 2020, 42(5): 980-990.
- [2] Moore D, Cranston G, Reed A, Galli A. Projecting future human demand on the Earth's regenerative capacity. *Ecological Indicators*, 2012, 16: 3-10.
- [3] Wackernagel M, Onisto L, Bello P, Linares A C, Falfán I S L, García J M, Guerrero A I S, Guerrero M G S. National natural capital accounting with the ecological footprint concept. *Ecological Economics*, 1999, 29(3): 375-390.
- [4] Hoekstra A Y, Hung P Q. Virtual Water Trade: A Quantification of Virtual Water Flows Between Nations in Relation to International Crop Trade. *Water Science and Technology*, 2002, 49(11): 203-209.
- [5] Hammond G. Time to give due weight to the 'carbon footprint' issue. *Nature*, 2007, 445(7125): 256.
- [6] Ferng J J. Toward a scenario analysis framework for energy footprints. *Ecological Economics*, 2002, 40(1): 53-69.
- [7] Wackernagel M, Rees W E. Perceptual and structural barriers to investing in natural capital: economics from an ecological footprint perspective. *Ecological Economics*, 1997, 20(1): 3-24.
- [8] Wackernagel M, Yount J D. The ecological footprint: an indicator of progress toward regional sustainability. *Environmental Monitoring and Assessment*, 1998, 51(1/2): 511-529.
- [9] Ahmed Z, Zhang B, Cary M. Linking economic globalization, economic growth, financial development, and ecological footprint: evidence from symmetric and asymmetric ARDL. *Ecological Indicators*, 2021, 121: 107060.
- [10] 陆岷峰,葛和平. 中国互联网金融生态足迹、承载力及效率的测算与评价研究. 管理学报, 2018, 31(1): 22-32.
- [11] Khan I, Hou F J. The dynamic links among energy consumption, tourism growth, and the ecological footprint: the role of environmental quality in 38 IEA countries. *Environmental Science and Pollution Research*, 2021, 28(5): 5049-5062.
- [12] 甄翌,麻学锋,李志龙. 旅游城镇化不可转移生态足迹演变及驱动因素. 生态学报, 2020, 40(21): 7908-7920.
- [13] Udemba E N. Mediation of foreign direct investment and agriculture towards ecological footprint: a shift from single perspective to a more inclusive perspective for India. *Environmental Science and Pollution Research*, 2020, 27(21): 26817-26834.
- [14] 王圣云,林玉娟. 中国区域农业生态效率空间演化及其驱动因素——水足迹与灰水足迹视角. 地理科学, 2021, 41(2): 290-301.
- [15] Zhang X Q, Xu L, Chen Y, Liu T T. Emergy-based ecological footprint analysis of a wind farm in China. *Ecological Indicators*, 2020, 111: 106018.
- [16] 谭德明,何红渠. 基于能值生态足迹的中国能源消费可持续性评价. 经济地理, 2016, 36(8): 176-182.
- [17] Helmers E, Chang C C, Dauwels J. Carbon footprinting of universities worldwide: part I—objective comparison by standardized metrics. *Environmental Sciences Europe*, 2021, 33(1): 30.
- [18] 胡帅,袁素芬,刘俊江,刘世杰,黎劼. 基于生态足迹的低碳校园研究:以广东环境保护工程职业学院为例. 环境科学与技术, 2017, 40(S2): 306-310.
- [19] González-Vallejo P, Muntean R, Solís-Guzmán J, Marrero M. Carbon footprint of dwelling construction in Romania and Spain. a comparative analysis with the OERCO2 tool. *Sustainability*, 2020, 12(17): 6745.
- [20] 李俊杰,顾锦磊,张建坤,成虎. 基于能值生态足迹模型的住宅小区环境负荷分析. 城市问题, 2015, (1): 49-53.
- [21] Arshed N, Munir M, Iqbal M. Sustainability assessment using STIRPAT approach to environmental quality: an extended panel data analysis.

- Environmental Science and Pollution Research, 2021, 28(14): 18163-18175.
- [22] 朱文博, 李双成, 朱连奇. 中国省域生态系统服务足迹流动及其影响因素. 地理研究, 2019, 38(2): 337-347.
- [23] 贾秀红, 汪文涛, 胡云, 孙林山, 周欢, 乐祥明. 基于生态足迹成分法的太子山国家森林公园旅游承载力研究. 华中农业大学学报, 2020, 39(4): 57-62.
- [24] Usman M, Hammar N. Dynamic relationship between technological innovations, financial development, renewable energy, and ecological footprint: fresh insights based on the STIRPAT model for Asia pacific economic cooperation countries. Environmental Science and Pollution Research, 2021, 28(12): 15519-15536.
- [25] Zadgaonkar L A, Mandavgane S A. Framework for calculating ecological footprint of process industries in local hectares using emergy and LCA approach. Clean Technologies and Environmental Policy, 2020, 22(10): 2207-2221.
- [26] Lenzen M, Murray S A. A modified ecological footprint method and its application to Australia. Ecological Economics, 2001, 37(2): 229-255.
- [27] Zambrano-Monserrate M A, Ruano M A, Ormeño-Candelario V, Sanchez-Loor D. Global ecological footprint and spatial dependence between countries. Journal of Environmental Management, 2020, 272: 111069.
- [28] 董建红, 张志斌, 张怀林, 高发文, 张文斌, 公维民. 生态脆弱区自然资本可持续利用及驱动机制——以宁夏为例. 中国人口·资源与环境, 2021, 31(2): 162-173.
- [29] 李坦, 王静, 张庆国, 崔玉环, 姚佐文. 合肥市生态足迹时空特征与脱钩效应变化及灰色预测分析. 生态学报, 2019, 39(5): 1735-1747.
- [30] Baloch M A, Zhang J J, Iqbal K, Iqbal Z. The effect of financial development on ecological footprint in BRI countries: evidence from panel data estimation. Environmental Science and Pollution Research, 2019, 26(6): 6199-6208.
- [31] 周晓艳, 张文妍, 叶信岳, 甘甜, 韩项. 1992—2012 年国际生态足迹研究文献计量分析. 地理科学进展, 2014, 33(3): 336-346.
- [32] 孙艳芝, 沈镭. 关于我国四大足迹理论研究变化的文献计量分析. 自然资源学报, 2016, 31(9): 1463-1473.
- [33] 张新平, 张芳芳, 徐勇, 王得祥, 吴志红. 基于 CiteSpace 的国内外生态足迹研究知识图谱比较. 资源开发与市场, 2017, 33(11): 1347-1353, 1339-1339.
- [34] Yang Y, Meng G F. A bibliometric analysis of comparative research on the evolution of international and Chinese ecological footprint research hotspots and frontiers since 2000. Ecological Indicators, 2019, 102: 650-665.
- [35] 陈悦, 陈超美, 刘则渊, 胡志刚, 王贤文. CiteSpace 知识图谱的方法论功能. 科学学研究, 2015, 33(2): 242-253.
- [36] 陈悦, 刘则渊, 陈劲, 侯剑华. 科学知识图谱的发展历程. 科学学研究, 2008, 26(3): 449-460.
- [37] Van Den Bergh J C J M, Verbruggen H. Spatial sustainability, trade and indicators: an evaluation of the 'ecological footprint'. Ecological Economics, 1999, 29(1): 61-72.
- [38] Lenzen M, Murray J, Sack F, Wiedmann T. Shared producer and consumer responsibility — theory and practice. Ecological Economics, 2007, 61(1): 27-42.
- [39] Chapagain A K, Hoekstra A Y, Savenije H H G, Gautam R. The water footprint of cotton consumption: an assessment of the impact of worldwide consumption of cotton products on the water resources in the cotton producing countries. Ecological Economics, 2006, 60(1): 186-203.
- [40] Bagliani M, Bravo G, Dalmazzone S. A consumption-based approach to environmental Kuznets curves using the ecological footprint indicator. Ecological Economics, 2008, 65(3): 650-661.
- [41] Zhang X Y, Friedl M A, Schaaf C B, Strahler A H, Schneider A. The footprint of urban climates on vegetation phenology. Geophysical Research Letters, 2004, 31(12): L12209.
- [42] Haberl H, Erb K H, Krausmann F. How to calculate and interpret ecological footprints for long periods of time: the case of Austria 1926-1995. Ecological Economics, 2001, 38(1): 25-45.
- [43] York R, Rosa E A, Dietz T. STIRPAT, IPAT and ImpACT: analytic tools for unpacking the driving forces of environmental impacts. Ecological Economics, 2003, 46(3): 351-365.
- [44] Zhao S, Li Z Z, Li W L. A modified method of ecological footprint calculation and its application. Ecological Modelling, 2005, 185(1): 65-75.
- [45] Lu Y, Chen B. Urban ecological footprint prediction based on the Markov chain. Journal of Cleaner Production, 2017, 163: 146-153.
- [46] Gómez M, Rodríguez J C. The ecological footprint and Kuznets environmental curve in the USMCA countries: a method of moments quantile regression analysis. Energies, 2020, 13(24): 6650.
- [47] Guzmán-Colón D K, Pidgeon A M, Martinuzzi S, Radeloff V C. Conservation planning for island nations: using a network analysis model to find novel opportunities for landscape connectivity in Puerto Rico. Global Ecology and Conservation, 2020, 23: e01075.
- [48] 熊德国, 鲜学福, 姜永东. 生态足迹理论在区域可持续发展评价中的应用及改进. 地理科学进展, 2003, 22(6): 618-626.
- [49] 张志强, 徐中民, 程国栋. 生态足迹的概念及计算模型. 生态经济, 2000, (10): 8-10.
- [50] 徐中民, 张志强, 程国栋. 甘肃省 1998 年生态足迹计算与分析. 地理学报, 2000, 55(5): 607-616.
- [51] 王保利, 李永宏. 基于旅游生态足迹模型的西安市旅游可持续发展评估. 生态学报, 2007, 27(11): 4777-4784.

- [52] 顾晓薇, 王青, 刘建兴, 李广军. 基于“国家公顷”计算城市生态足迹的新方法. 东北大学学报: 自然科学版, 2005, 26(4): 397-400.
- [53] 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. 生态学报, 2010, 29(3): 592-597.
- [54] 刘森, 胡远满, 常禹, 张文广, 张薇. 基于能值理论的生态足迹方法改进. 自然资源学报, 2008, 23(3): 447-457.
- [55] 李智, 鞠美庭, 刘伟, 邵超峰. 中国 1996 年—2005 年能源生态足迹与效率动态测度与分析. 资源科学, 2007, 29(6): 54-60.
- [56] 方恺. 生态足迹深度和广度: 构建三维模型的新指标. 生态学报, 2013, 33(1): 267-274.
- [57] 方恺. 足迹家族: 概念、类型、理论框架与整合模式. 生态学报, 2015, 35(6): 1647-1659.
- [58] 黄天宇, 王冠丽, 李东方, 段利民, 刘廷玺. 科尔沁沙地沙丘——草甸梯级生态系统不同气象条件下气候学足迹特征. 干旱区研究, 2019, 36(5): 1127-1135.
- [59] Lenzen M, Kanemoto K, Moran D, Geschke A. Mapping the structure of the world economy. *Environmental Science & Technology*, 2012, 46(15): 8374-8381.
- [60] Burkhard B, Kroll F, Nedkov S, Müller F. Mapping ecosystem service supply, demand and budgets. *Ecological Indicators*, 2012, 21: 17-29.
- [61] 赵志强, 李双成, 高阳. 基于能值改进的开放系统生态足迹模型及其应用——以深圳市为例. 生态学报, 2008, 28(5): 2220-2231.
- [62] 谭秀娟, 郑钦玉. 我国水资源生态足迹分析与预测. 生态学报, 2009, 29(7): 3559-3568.
- [63] 郭运功, 汪冬冬, 林逢春. 上海市能源利用碳排放足迹研究. 中国人口·资源与环境, 2010, 20(2): 103-108.
- [64] Brooks S T, Jabour J, Bergstrom D M. What is ‘footprint’ in Antarctica; proposing a set of definitions. *Antarctic Science*, 2018, 30(4): 227-235.
- [65] Wang S G, Chen B. Energy-water nexus of urban agglomeration based on multiregional input-output tables and ecological network analysis: a case study of the Beijing-Tianjin-Hebei region. *Applied Energy*, 2016, 178: 773-783.
- [66] 史丹, 王俊杰. 基于生态足迹的中国生态压力与生态效率测度与评价. 中国工业经济, 2016, (5): 5-21.
- [67] Galli A, Wackernagel M, Iha K, Lazarus E. Ecological footprint: implications for biodiversity. *Biological Conservation*, 2014, 173: 121-132.
- [68] Mi Z F, Zhang Y K, Guan D B, Shan Y L, Liu Z, Cong R G, Yuan X C, Wei Y M. Consumption-based emission accounting for Chinese cities. *Applied Energy*, 2016, 184: 1073-1081.
- [69] Charfeddine L. The impact of energy consumption and economic development on ecological footprint and CO₂ emissions: evidence from a Markov switching equilibrium correction model. *Energy Economics*, 2017, 65: 355-374.
- [70] 吴健生, 李锴杨, 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. 地理科学进展, 2020, 39(8): 1345-1355.
- [71] 朱莉莎, 赵先贵. 基于能值生态足迹模型的四川省生态安全评价与预测. 中国人口·资源与环境, 2012, 22(S1): 78-82.
- [72] 徐秀美, 郑言. 基于旅游生态足迹的拉萨乡村旅游地生态补偿标准——以次角林村为例. 经济地理, 2017, 37(4): 218-224.
- [73] 陈成忠, 葛绪广, 孙琳, 邵冬, 柯文莉. 物种急剧丧失·生态严重超载·跨越“地球边界”·区域公平失衡·“一个地球”生活——《地球生命力报告 2014》解读. 生态学报, 2016, 36(9): 2779-2785.
- [74] Lee J W, Brahmastreene T. Investigating the influence of tourism on economic growth and carbon emissions: evidence from panel analysis of the European Union. *Tourism Management*, 2013, 38: 69-76.
- [75] White T J. Sharing resources: the global distribution of the ecological footprint. *Ecological Economics*, 2007, 64(2): 402-410.
- [76] 毕明丽, 谢高地, 姚翠友. 人类可持续发展指数的改进及国际比较. 自然资源学报, 2020, 35(5): 1017-1029.
- [77] 肖思思, 黄贤金, 吴春笃. 江苏省生态足迹时间维度变化及其驱动因素分析——基于 PLS 方法对 STIRPAT 模型的修正. 地理与地理信息科学, 2012, 28(3): 76-82.
- [78] 钱文婧, 贺灿飞. 经济增长与环境关系: 生态足迹视角. 生态经济, 2010, (10): 24-29.
- [79] 李明琦, 刘世梁, 武雪, 孙永秀, 侯笑云, 赵爽. 云南省农田生态系统碳足迹时空变化及其影响因素. 生态学报, 2018, 38(24): 8822-8834.
- [80] 李雨欣, 薛东前, 宋永永. 中国水资源承载力时空变化与趋势预警. 长江流域资源与环境, 2021, 30(7): 1574-1584.
- [81] 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. 生态学报, 2020, 40(13): 4327-4339.
- [82] Shokoohi Z, Dehbid N K, Tarazkar M H. Energy intensity, economic growth and environmental quality in populous middle east countries. *Energy*, 2022, 239: 122164.
- [83] 许勤华. 新能源革命与全球能源治理变革. 人民论坛·学术前沿, 2021, (14): 80-87.