

DOI: 10.5846/stxb202106161595

熊鹰,艾赣雄,周晨,姚颖,谢庆.基于改进三维生态足迹模型的洞庭湖区生态可持续时空演化研究.生态学报,2022,42(3):1165-1179.

Xiong Y, Ai G X, Zhou C, Yao Y, Xie Q. Temporal and spatial evolution of ecological sustainability in Dongting Lake area based on the improved three-dimensional ecological footprint model. Acta Ecologica Sinica, 2022, 42(3): 1165-1179.

基于改进三维生态足迹模型的洞庭湖区生态可持续时空演化研究

熊 鹰^{1,2,3,*}, 艾赣雄¹, 周 晨³, 姚 颖¹, 谢 庆¹

1 长沙理工大学水利与环境工程学院, 长沙 410114

2 洞庭湖水环境治理与生态修复湖南省重点实验室, 长沙 410114

3 长沙理工大学风景园林系, 长沙 410076

摘要:洞庭湖是长江流域重要的调蓄湖泊,也是中国重要的农产品主产区。科学评估洞庭湖区生态可持续状态,揭示其时空演化特征,对探究其生态可持续影响因素与作用机理,降低生态赤字具有重要意义。基于碳足迹与生态足迹理论构建了改进的三维生态足迹模型,填补了化石能源无法核算生态承载力的问题,同时调整了不同土地利用类型的参数因子。在对洞庭湖区 25 个区县进行可持续发展的动态评价分析中,计算了 2000—2019 年生态赤字、足迹广度与深度的时空分布特征。研究结果表明:(1)近 20 年来洞庭湖区的人均生态足迹增长速度远高于人均生态承载力,致使人均生态赤字在时间维度上不断增大,空间维度上呈湖滨向周边地区扩散的趋势;(2)洞庭湖区除林地之外的土地利用类型均存在自然资本存量的消耗,且表现为高生态赤字;(3)三次产业结构的分配、土地利用的变化、居民对生活质量的提高以及生态保护政策的有效实施等均会对洞庭湖区的可持续发展产生较大影响;(4)改进后的化石能源账户相较于传统账户的计算方法更能反映真实的碳排量与碳吸收量。研究以期对洞庭湖区土地利用、生态保护以及促进社会经济可持续发展提供科学参考。

关键词:洞庭湖区;三维生态足迹模型;碳足迹;时空分布;自然资本存量

Temporal and spatial evolution of ecological sustainability in Dongting Lake area based on the improved three-dimensional ecological footprint model

XIONG Ying^{1,2,3,*}, AI Ganxiong¹, ZHOU Chen³, YAO Ying¹, XIE Qing¹

1 School of Hydraulic and Environmental Engineering, Changsha University of Science & Technology, Changsha 410114, China

2 Key Laboratory of Dongting Lake Aquatic Eco-Environmental Control and Restoration of Hunan Province, Changsha 410114, China

3 Department of Landscape Architecture, Changsha University of Science & Technology, Changsha 410076, China

Abstract: Dongting Lake is not only an important regulation and storage lake in the Yangtze River Basin, but also a major agricultural product producing area in China. We evaluated the ecological sustainable development status of Dongting Lake area scientifically and revealed the characteristics of temporal and spatial evolution of the region, which could be used to explore the influencing factors and mechanism of the ecological sustainability of the Dongting Lake area. At the same time, this study reduced the ecological deficit of Dongting Lake area. The improvement of three-dimensional ecological footprint was mainly based on carbon footprint calculation method and ecological footprint theory, which solved the question that ecological carrying capacity cannot be calculated in the fossil energy account. In addition, the equilibrium factor and yield factor of Dongting Lake area were adjusted according to the concept of “provincial hectare”. Finally, the dynamic evaluation

基金项目:国家社会科学基金项目(15BJY051);湖南省水利科技项目(2015-254-19);长沙理工大学水利工程学院研究生科研创新项目(2020-05)

收稿日期:2021-06-16; 采用日期:2021-11-01

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: csustxy@126.com

and the analysis of sustainable development of 25 counties in Dongting Lake Ecological Economic Zone, the per capita ecological deficit, the breadth and depth of per capita ecological footprint from 2000 to 2019 were calculated. The main results could be concluded as follows: (1) During the 20-year study period, the per capita ecological footprint in Dongting Lake area increased faster than the per capita ecological carrying capacity, which caused the per capita ecological deficit increased in the temporal dimension. Meanwhile, the spatial dimension showed the trend of diffusion from the center to the periphery of Dongting Lake. (2) Among all land use types in Dongting Lake area, the forest land was the only account of ecological surplus. All accounts of the cultivated land, grassland, water area, construction land and energy displayed high ecological deficit. (3) The distribution of three industrial structures, the change of land use, the improvement of residents' quality of life and ecological environment policies were important influencing factors in the study area. (4) Compared with the traditionally ecological footprint calculation method, the carbon emission and carbon absorption calculated by the improved three-dimensional ecological footprint model are closer to the real value. The research was expected to provide scientific reference for land use, ecological protection, promoting social and economic sustainable development in Dongting Lake area.

Key Words: Dongting Lake area; three-dimensional ecological footprint model; carbon footprint; spatial and temporal distribution; natural capital stock

生态可持续发展是指在保护人类赖以生存和发展的自然条件下,将人类活动限制在自然界所能承受的范围内,其本质是寻求自然资源的有效利用、生态环境与社会经济的协调发展^[1]。改革开放以来,我国在推动经济快速发展的同时,也出现了诸多生态问题,对区域可持续发展造成了直接影响^[2]。生态足迹是根据人类活动实际占用的生物生产性土地来衡量地区可持续发展程度的方法^[3]。1992年加拿大 Rees^[4]首次阐述了模型概念,随后 Wackemagel 等^[5]将其概念发展为生态足迹模型,为了能够直观表达人类对自然资本的实际占用,模型巧妙地将人类活动比喻为人类在地球上留下的一个巨大脚印。然而,传统生态足迹无法展现出资本存量对维持生态系统平衡的作用,只对资本流量进行了测算^[6]。因此,为了区分资本流量与存量的实际占用, Niccolucci 等引入了足迹广度与足迹深度构建了三维生态足迹模型^[7],该模型不仅可以判断人类消费在横向上是否超载,而且在纵向上可以计算超载程度,能直接反映自然资源消费的代内和代际分配状况^[8]。

迄今为止,国内外学者对生态足迹的发展与延伸开展了丰富的研究,在应用领域方面涉及旅游、城市交通、国际贸易、城市规划等行业,在研究尺度方面大至全球小至个体层面^[9-10],在理论延伸方面相继出现了水足迹、碳足迹与及能源足迹^[11-13],三者与生态足迹共称为“足迹家族”。但生态足迹模型理论因其理论假设、参数因子、计算方法、能源账户、未考虑人类活动影响等缺陷导致其自提出以来争议不断^[14]。为此,学者们对其进行了大量改进。张恒义等^[15]、刘某承等^[16]基于省公顷的概念对参数因子进行了本土化修正,在目前生态足迹模型应用中,得到了广泛的使用。苏子龙等^[17]对模型账户进行了调整,将能源账户修改为污染物账户,进而考虑了废气与固体废弃物的影响。曹威威等^[18]基于能值法对生态足迹模型的计算进行了改进,将太阳能、风能、潮汐能、雨水化学能与势能、地球旋转势能等作为能源输入端,人类生产生活实际消费占用的能源作为输出端,通过两者对比来判断地区的生态盈亏。靳亚亚等^[19]认为除在全球尺度下,将区域认为是“封闭式”的假说极为不合理,为此以江苏省耕地为例,考虑了进出口贸易影响,并区分了本地居民与外地居民的实际占用情况。王瑞杰等^[20]从经济增长和科技进步方面对区域生态承载力进行了改进,引入了社会经济发展指数。针对能源账户承载力的核算一直以来都是模型饱受争议的主要问题之一,虽然有部分学者通过调整账户来重新定义能源足迹取得了不错的效果,但是基于碳足迹的视角下来重新计算化石能源承载力的研究还比较缺乏。同时,洞庭湖区作为中国重要的粮食主产区,素有“鱼米之乡”与“洞庭粮仓”之赞誉^[21]。但近年来由于城镇化的快速推动,致使洞庭湖区的生态环境受到破坏。为此国内学者分别从生态补偿、生态承载力、生态安全与生态风险等不同方向开展了大量的研究^[22-25],其研究成果丰富,涉及多方面的学科体系,但是基于

自然资源的角度来核算可持续发展状态的研究还存在一些不足,特别是针对自然资源资产研究的时空变化特征也较为缺乏。因此,本文将从碳循环与自然资源的角度来分析洞庭湖区生态可持续发展状态的演变。

自然资本存量是影响地区可持续发展的重要因素,为了界定洞庭湖区自然资本流量与存量的消耗关系,本文采用改进的三维生态足迹模型对洞庭湖区 25 区县进行可持续发展的动态研究,解析了 2000—2019 年人均生态足迹赤字、足迹广度与足迹深度的时空演变特征。与以往研究不同的是针对无法计算化石能源生态承载力的问题,结合碳足迹的相关研究^[26—27],认为林地与草地的固碳总量通过折算能够作为化石能源的生态承载力,可以为解决化石能源账户生态承载力无法计算的问题提供参考方法。研究成果可以为当地制定可持续发展政策、提高土地资源利用率、促进经济社会与生态保护协同发展提供科学依据。

1 研究区域及数据来源

1.1 研究区域概况

洞庭湖区位于湖南省北部由 25 个市县构成,国土面积为 4.6 万平方公里,占全省的 21.6%(图 1)。2019 年底,洞庭湖区生产总值为 9197.06 亿元,约占全省 22.7%,三次产业占比为 11.5:40.8:47.7。洞庭湖区常住居民 1596.35 万人,占全省 23.1%,其中城镇居民比重为 22.3%。洞庭湖区作为全国重要的粮食基地,农作物耕种面积为 228 万公顷,约占全省 28.1%的耕种面积。稻谷、玉米、薯类等为主要粮食作物。柑橘作为当地特色水果,总产量达 560 万吨,约研究区水果总产量的 52.8%。作为湖南省重要的渔业基地,2019 年渔业生产总值为 258.99 亿元,占全省总量的 58.62%。

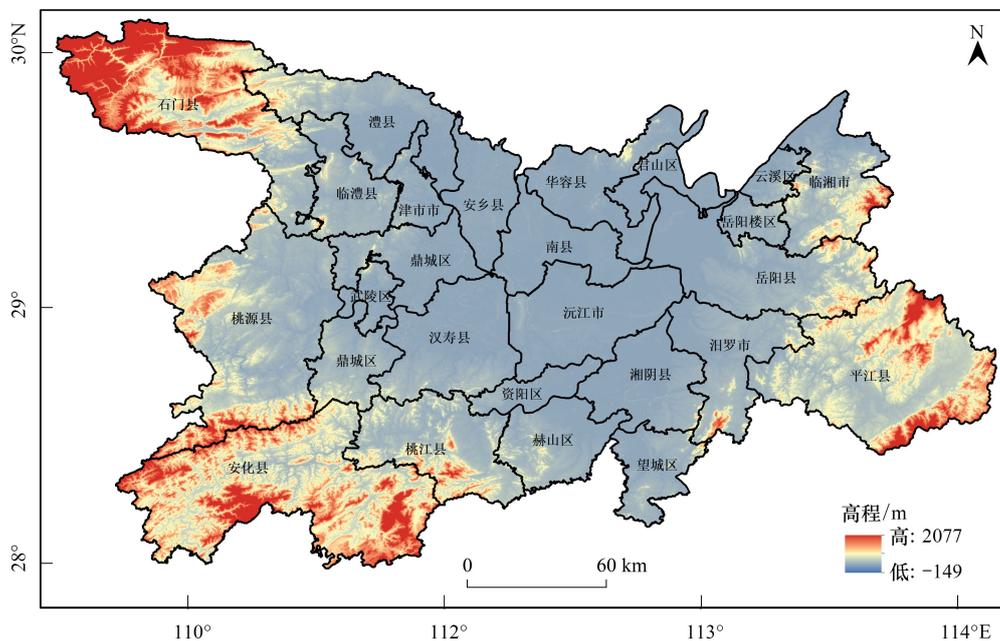


图 1 洞庭湖区数字高程模型示意图

Fig.1 Digital elevation model (DEM) map of Dongting Lake area

1.2 数据来源

本研究以分辨率为 30m×30m 的 landsat TM 多光谱遥感影像图作为基础数据。考虑到感影像在时间上的差异性,主要选取时间为每年的 5—8 月,同时运用 ENVI 5.1 对影像进行预处理,并通过遥感解译获得洞庭湖区 25 区县土地覆盖变化数据。

(1)生物账户主要消费项目数据均来自《湖南省统计年鉴(2000—2019 年)》。生态账户、消费项目及对应土地类型如表 1 所示。全球平均产量采用联合国粮农组织(FAO)1993 年发布的数据。在基于“省公顷”概

念核算洞庭湖区参数因子所用到的单位热值来自《农林技术经济手册》。

(2) 能源账户主要选取了原煤与焦炭等 7 种化石能源的碳排放量折算土地面积作为能源账户的生态足迹。由于区县级别的能源消费数据很难获取,参照周翠烟^[28]对洞庭湖生态经济区能源数据的处理方法,采用各区县规模以上的工业产值与总产值的比率进行折算。其各区县工业规模以上生产总值与各市能源消费账单来自《湖南省统计年鉴》和《湖南省能源统计年鉴》。

表 1 生态足迹模型选用的生态账户数据

Table 1 Ecological account data selected by the ecological footprint model

账户 Account	消费项目 Consumer items	土地类型 Land type
生物资源账户 Biological resources account	稻谷、小麦、玉米、大豆、薯类、棉花、油料、苧麻、烤烟、茶叶、柑橘、猪肉	耕地
	油茶籽、油桐子、松脂、棕片、木材、竹材	林地
	牛肉、羊肉	草地
	水产品	水域
能源消费账户 Energy consumption account	原煤、焦炭、原油、汽油、煤油、柴油、燃料油	化石能源用地
	建设面积、道路	建设用地

2 研究方法

2.1 三维生态足迹模型

生态足迹模型经历了两次演变过程,一维生态足迹主要在于核算人类对资源的利用程度,并将生物资源转化为可用于统一比较的土地面积^[29]。即生态足迹的计算,公式如下:

$$ef = \sum r_j \times (C_i \div Y_i) \quad (1)$$

$$EF = ef \times N \quad (2)$$

式中, ef 为洞庭湖区人均生态足迹 ($\text{hm}^2/\text{人}$); EF 为洞庭湖区生态足迹; r_j 为湖南省均衡因子; i 为不同的消费项目类型; j 为不同土地类型; C_i 为洞庭湖区 i 类项目的人均消耗量; Y_i 为洞庭湖区 i 类项目的全球平均产量; N 为洞庭湖区总人口。

二维在一维的基础上增加了承载力的计算,具体见公式(3)、公式(4)。为了判断区域生态承载力是否能够满足人类的生产活动,引入生态盈亏的概念,计算式见公式(5)。

$$ec = \sum a_j \times r_j \times y_j \times 0.88 \quad (3)$$

$$EC = ec \times N \quad (4)$$

$$ED = EF - EC \quad (5)$$

式中, ec 为洞庭湖区人均生态承载力 ($\text{hm}^2/\text{人}$); EC 为洞庭湖区生态承载力; ED 为洞庭湖区生态盈亏; a_j 为不同覆被的土地面积; y_j 为产量因子。

Nicolucci 等构建的三维生态足迹模型首次界定资本存量与流量的关系^[30],在此基础上我国学者方恺为克服模型地类间赤字的转移问题对三维模型进行了改进^[31],计算公式如下:

$$EF_{\text{size}} = \sum \text{Min}\{EF, EC\} \quad (6)$$

$$EF_{\text{depth}} = 1 + \frac{ED}{EC} = 1 + \frac{\sum \text{Max}\{EF - EC, 0\}}{\sum EC} \quad (7)$$

$$EF_{3D} = EF_{\text{depth}} \times EF_{\text{size}} \quad (8)$$

式中, EF_{size} 为洞庭湖区生态足迹广度; EF_{depth} 为洞庭湖区生态足迹深度; EF_{3D} 为洞庭湖区三维生态足迹。

2.2 模型改进

2.2.1 账户调整

由于现实生活中并没有预留化石能源用地,因此在计算能源账户承载力的时候通常默认为零,这一点与实际情况并不符合。事实上,能源消费账户主要以碳排放为主,根据 IPCC 的报告结果认为草地与森林能够吸收 93% 的碳排量,两者吸收比例为 17.28:82.72^[32]。在此基础上谢鸿宇等核算了森林与草地的固碳能力分别为 3.8096、0.9482t/hm²^[33]。为了能够核算化石能源的承载力,本文参考郑德凤等人对碳足迹的定义为吸纳碳排放量所需要的生态生产性土地面积^[34],同时参照中国科学院土地利用分类体系和最新版《土地利用现状分析》(GB/T 21010—2017)文件与康韵婕等^[26]的做法将林地代替森林面积。由此可以通过碳足迹核算方法得到林地与草地的生态生产性土地面积。为了方便比较,将由碳足迹核算的林地与草地定义为同时具备生物生产与生态生产功能的虚拟土地面积。再参考顾晓薇等^[35]对防护林的做法在此基础上乘于草地与林地的参数因子。其计算公式如下:

$$CE = \sum Qe_i \times Se_i \times De_i \quad (9)$$

$$CS = A_f \times NEP_f + A_g \times NEP_g \quad (10)$$

$$CEF = CE \times \left(\frac{P_f}{NEP_f} \times r_f \times y_f + \frac{P_g}{NEP_g} \times r_g \times y_g \right) \quad (11)$$

$$CEC = CS \times \left(\frac{P_f}{NEP_f} \times r_f \times y_f + \frac{P_g}{NEP_g} \times r_g \times y_g \right) \times 0.88 \quad (12)$$

式中, CE 与 CS 分别为碳排放总量与碳吸收总量; Qe_i 为洞庭湖区第 i 种能源的终端消费量; Se_i 为 i 类能源的标准折算系数; De_i 为 i 类能源碳排放系数; A_f 为洞庭湖区林地面积; A_g 为洞庭湖区草地面积; CEF 与 CEC 分别为碳足迹与碳承载力; P_f 与 NEP_f 分别为全球森林的碳吸收比例与固碳能力; P_g 与 NEP_g 分别为全球草地的碳吸收比例与固碳能力; r_f 与 y_f 分别为林地的均衡因子与产量因子; r_g 与 y_g 分别为草地的均衡因子与产量因子。

由于研究区化石能源消费账户当中有一部分的化石能源用于发电,为了避免使能源生态足迹重复计算,本文参考周涛等^[36]对建筑用地的核算方法,认为建设用地的足迹与承载力相等,计算采用承载力的核算方法。

2.2.2 参数修正

为了将不同土地利用类型的计算结果能够直接比较,需要将不同地类转化到同一生产力之下,其中的转化因子称为均衡因子;由于不同区域的自然条件存在差异,致使土地生产力不一致,为了将不同产品类型的生物产品相加,需要利用产量因子进行转化^[37]。研究表明^[38-39]采用大尺度下的模型参数,不能真实反映小区域的实际情况,对区域可持续发展决策的作用不大。为此,国内学者基于热值的概念先后提出了“国家公顷”与“省公顷”的小尺度模型,具体如下公式(13)、公式(14),计算结果如表 2 所示。

$$r_j = \frac{P_j}{P} = \frac{Q_j \div S_j}{\sum Q_j \div \sum S_j} = \frac{(\sum P_j^i \times g_j^i) \div S_j}{(\sum \sum P_j^i \times g_j^i) \div \sum S_j} \quad (13)$$

$$y_j = \frac{p_j}{P_j} = \frac{q_j \div s_j}{P_j} = \frac{(\sum p_j^i \times g_j^i) \div s_j}{P_j} \quad (14)$$

式中, P_j 为湖南省 j 类土地的平均生产力; P 为湖南省所有土地的平均生产力; Q_j 为 j 类土地生产的总热量; S_j 为 j 类土地总面积; P_j^i 表示湖南省 j 类土地上 i 类生物的消耗量; g_j^i 表示 j 类土地上 i 类生物的单位热量; p_j 表示洞庭湖区 j 类土地的平均生产力; q_j 表示洞庭湖区 j 类土地的总热量; s_j 表示洞庭湖区 j 类土地的总面积; p_j^i 表示洞庭湖区 j 类土地上 i 类生物的消耗量。

表 2 基于省公顷模型的参数因子

Table 2 Parameter factors based on the provincial hectare model

土地利用类型 Land use type	均衡因子 Balance factor					产量因子 Yield factor				
	2000 年	2005 年	2010 年	2015 年	2019 年	2000 年	2005 年	2010 年	2015 年	2019 年
耕地 Cultivated land	2.98	2.93	2.99	3.04	2.90	1.01	1.10	1.22	1.21	1.07
林地 Woodland	0.15	0.17	0.17	0.14	0.22	1.32	1.68	1.23	1.49	2.21
草地 Grassland	0.12	0.18	0.15	0.17	0.20	2.63	3.37	3.83	3.66	3.02
水域 Water area	0.36	0.45	0.51	0.62	0.64	0.76	0.79	0.76	0.86	0.83
建设用地 Construction land	2.98	2.93	2.99	3.04	2.90	1.01	1.10	1.22	1.21	1.07

3 结果分析

3.1 土地覆被变化

2000—2019 年洞庭湖区耕地转出面积最大,表现为面积减少的状态,主要转入到林地、水域与建设用地,其中水域与建设用地转入面积分别占 2019 年总面积的 31.12%和 53.04%(表 3)。但是由于水域面积的转出大于转入,致使洞庭湖区水域面积呈现出细微减少的状态。林地的覆被变化也相对较低,研究时段内转出 5060.88km²,转入 5223.53km²,总体表现为面积盈利状态。草地在过去的 20 年当中与林地的交换程度较大,总体表现为面积亏损的状态。未利用土地的增长主要来自于水域的转入。总体来说,随着近年来洞庭湖区城镇化进程的加快,除建设用地面积增长迅速以外,其他土地利用面积的变化幅度不大。

表 3 2000—2019 年洞庭湖区土地覆被变化矩阵/km²

Table 3 Transfer matrix of land use types in Dongting Lake area from 2000 to 2019

土地利用类型 Land use type	耕地 Cultivated land	林地 Woodland	草地 Grassland	水域 Water area	建筑用地 Construction land	未利用土地 Unused land
耕地 Cultivated land	11071.20	3934.94	97.70	1326.74	386.15	81.57
林地 Woodland	4304.35	15862.30	427.48	391.08	99.82	0.80
草地 Grassland	114.86	379.58	191.75	6.24	1.96	0
水域 Water area	1496.26	390.04	36.12	2503.54	87.57	295.21
建筑用地 Construction land	815.51	354.52	11.28	146.59	200.22	9.28
未利用地 Unused land	127.35	1.80	1.80	448.37	13.95	343.28

3.2 人均生态足迹

选取的五个节点时间生态足迹分别为 1.6003、2.2039、2.6144、3.5488、3.3027hm²/人,总体呈先增长后降低的态势(表 4、图 2)。值得注意的是,水域与能源账户的生态足迹 20 年来一直呈现增长的趋势,2019 年水域与能源账户分别是 2000 年生态足迹的 3.8 倍与 4 倍,这与 20 年来洞庭湖区的渔业产量与能源消耗量不断增长的实际情况一致。依据上文土地覆被变化分析可知 20 年内耕地地面表现为减少,但耕地人均生态足迹却表现为增长的态势,查阅《湖南统计年鉴》得到 2000 年岳阳、常德、益阳三市共使用化肥量 24.2 万吨,2019 年三市使用化肥量 75.66 万吨,20 年内增长了 3.13 倍,表明化肥的使用促进了土地生产力的提升,但长期使用化肥容易给土壤结构及理化性质造成极大危害,如土壤重金属含量增加、土壤酸化、土壤板结与及土壤养分失调等等,这些不仅会破坏了土壤的生态功能,也增加了土壤退化的风险;此外,过量施用化肥还易造成水体富营养化,破坏水生生态系统。2015—2019 年洞庭湖区耕地生态足迹降低明显,分析原因认为是受 2018 年发生的非洲猪瘟影响,致使猪肉产量下降 40%导致的。林地生态足迹在 2015 年之前表现平稳,但 2015—2019 年林地足迹突增,这是因为 2019 年的竹材砍伐量是 2015 年的 5 倍,致使林地足迹突增。草地与建设用地足迹增长较为平稳,总体表现为增长的态势。

表 4 洞庭湖区 2000—2019 年人均生态足迹/(hm²/人)

Table 4 Per capita ecological footprint of Dongting Lake area from 2000 to 2019

年份 Years	耕地 Cultivated land	林地 Woodland	草地 Grassland	水域 Water area	建设用地 Construction land	能源 Energy	汇总 Total
2000	1.0134	0.0026	0.0118	0.4976	0.0144	0.0606	1.6003
2005	1.1666	0.0055	0.0337	0.8434	0.0168	0.1378	2.2039
2010	1.3433	0.0053	0.0246	1.0676	0.0216	0.1519	2.6144
2015	1.4611	0.0046	0.0335	1.8477	0.0277	0.1742	3.5488
2019	1.1062	0.0099	0.0337	1.8851	0.0248	0.2430	3.3027

3.3 人均生态承载力

根据公式 3—4 可知在参数因子变化不大的情况下,生态承载力的大小主要取决于各类土地面积(表 5, 图 3)。由图 3 可知洞庭湖区的生态承载力总体呈增长趋势,但其增长幅度较低,这与土地转移矩阵的分析结果一致。值得注意的是 2019 年耕地占总生产面积的 36.7%,但其生态承载力占总量的 59.8%,这与耕地高效的土地生产力是分不开的。草地生态承载力相较于其他土地而言较低,主要是因为草地在洞庭湖区面积占比比较少,2019 年草地仅占总生产面积的 1.5%。就 2000 年与 2019 年对比,发现林地、水域、建设用地、能源等生态承载力均提升了 2 倍左右,其中林地与水域均是随着生物产品产量的提升而发生增长,而建设用地是由于土地面积的不断扩大而促使其增长的。能源生态承载力是由两方面共同作用的,一方面是由林地面积增长导致,另一方面也是其参数因子提高所导致。由于洞庭湖区的草地面积较少,因此在时间点上,林地与能源的生态承载力具有一定的协同性。

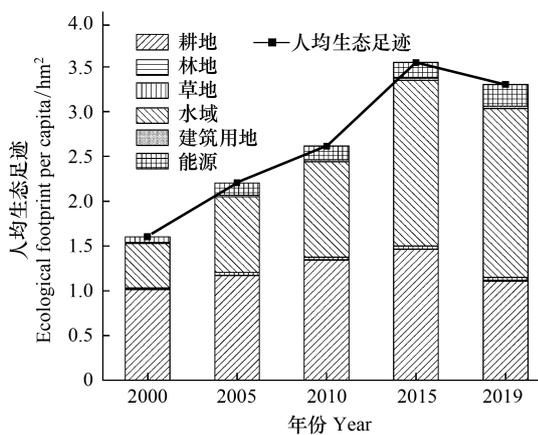


图 2 洞庭湖区人均生态足迹

Fig.2 Ecological footprint per capita in Dongting Lake area

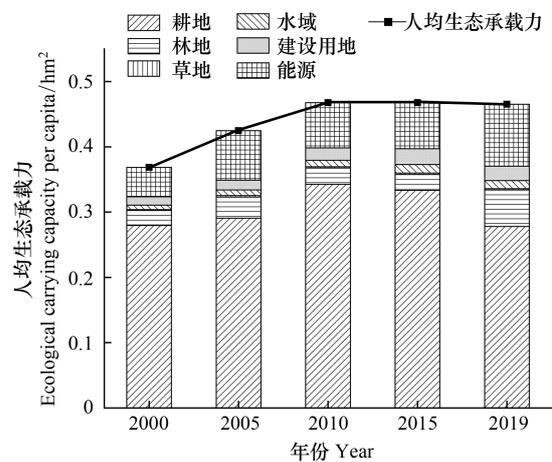


图 3 洞庭湖区人均生态承载力

Fig.3 Ecological carrying capacity per capita in Dongting Lake area

表 5 洞庭湖区 2000—2019 年人均生态承载力/(hm²/人)

Table 5 Per capita ecological carrying capacity of Dongting Lake area from 2000 to 2015

年份 Years	耕地 Cultivated land	林地 Woodland	草地 Grassland	水域 Water area	建设用地 Construction land	能源 Energy	汇总 Total
2000	0.2794	0.0232	0.0012	0.0068	0.0127	0.0451	0.3685
2005	0.2909	0.0323	0.0022	0.0088	0.0148	0.0760	0.4250
2010	0.3428	0.0248	0.0020	0.0100	0.0190	0.0691	0.4677
2015	0.3334	0.0242	0.0022	0.0130	0.0243	0.0706	0.4677
2019	0.2781	0.0561	0.0018	0.0125	0.0218	0.0950	0.4653

3.4 洞庭湖区生态盈亏的空间分布特征

近 20 年洞庭湖区人均生态赤字在时空上均表现为增长的趋势,说明一直以来洞庭湖区都是依靠自然资本存量的消耗来维持人类生产活动(图 4)。本文为了直观展现洞庭湖区的可持续发展水平,基于生态赤字的计算结果并结合相关研究^[40],将其划分为 5 个等级(可持续($ED \leq 1\text{hm}^2/\text{人}$)、弱可持续($1\text{hm}^2/\text{人} < ED \leq 2\text{hm}^2/\text{人}$)、不可持续($2\text{hm}^2/\text{人} < ED \leq 3\text{hm}^2/\text{人}$)、中等不可持续($3\text{hm}^2/\text{人} < ED \leq 4\text{hm}^2/\text{人}$)、强不可持续($ED > 4\text{hm}^2/\text{人}$))。2000 年洞庭湖区总体呈现出可持续与弱可持续发展水平,君山区与华容县呈中等不可持续发展水平。2005 年洞庭湖区大部分地区的人均生态赤字呈现增长趋势,鼎城区、安乡县与云溪区等 7 个市县由弱可持续发展水平转为不可持续,其中值得注意的是云溪区由弱可持续发展水平转为强不可持续发展水平,分析其原因认为与能源消耗迅速增长有着密切联系。2010 年以后,洞庭湖区总体开始呈现出不可持续状态,沅江市表现为强不可持续发展水平,究其原因,认为沅江市地处南洞庭,渔业资源丰富,自 2010 年之后渔业的产量常年位居洞庭湖区前三。2015 年洞庭湖区处于强不可持续发展水平的地区从 2000 年的 0 增加到 7 个,约占洞庭湖区总面积的 20%。2019 年之后生态赤字并没有呈现进一步的扩大,但除君山区以外强不可持续的地区并没有减少,且主要分布在洞庭湖周边,这表明 2019 年以渔业发展的地区生态赤字并没有下降,下降的主要是以农业与其他产业为主的地区。总体来看,洞庭湖区人均生态赤字在空间上呈现出由水域地区向周边扩散的趋势,并且正由可持续发展水平向强不可可持续发展的状态演变。

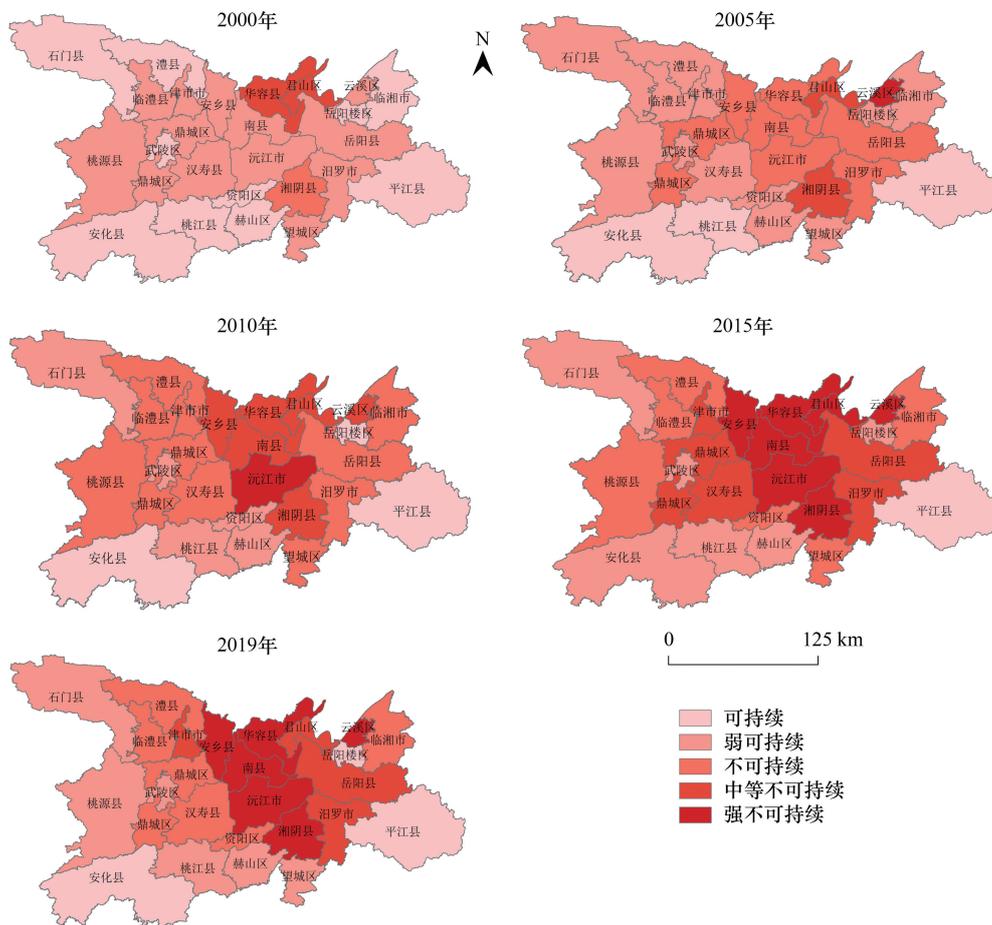


图 4 洞庭湖区空间可持续发展状况分布

Fig.4 Distribution of spatial sustainable development in Dongting Lake area

3.5 洞庭湖区生态足迹的广度与深度时空演变

3.5.1 时间维度

根据公式 6—7 计算得到洞庭湖区各类土地利用的生态足迹广度与深度(表 6、表 7)。2000—2019 年洞庭湖区的人均生态足迹深度与广度均呈增长趋势,但足迹广度的变动较低,这表明人类对资本流量的消耗是一个相对稳定状态;而足迹深度增长幅度近 1 倍,说明洞庭湖区在 20 年内自然资源存量的损耗一直在增加,自然资本流量占比在不断减少。就 2000 年与 2019 年相比,洞庭湖区人均生态足迹深度除林地与建设用地之外均为增长态势,其中草地、水域与能源足迹的增长约 1 倍左右。林地的人均生态足迹深度保持为 1,说明林地的自然资本流量能够提供人类生产所需,属于可持续发展的状况。值得注意的是水域人均生态足迹深度最低为 72.9975,经分析发现采用 1993 年的全球水产品产量 $29\text{kg}/\text{hm}^2$ 并没有考虑到人工养殖的产量,这一点与当前洞庭湖区的渔业生态系统并不符合^[41]。

3.5.2 空间维度

在空间上(图 5、图 6),人均生态足迹广度较高地区分别为石门县、桃源县与临澧县等 8 个市县,集中于研究区的西部与北部地区。人均生态足迹深度正好与之相反,其较高地区主要集中在中部与南部地区,北部君山区、岳阳楼区与云溪区的足迹深度较大,主要是由于这几个地区人均生态足迹很高。总体来看足迹广度在不同地区上变化不大,但人均生态足迹深度一直呈现出不断扩张的趋势,空间地理位置上总体表现为由东部向西部扩散的趋势。广度可以表示对流量的损耗,深度可表示对存量的损耗,当流量损耗占比高时,对存量的消耗就低,属于可持续发展的状态^[42]。研究发现,2019 年洞庭湖区有 19 个区县的人均生态足迹深度大于 6,表明这些地区的资本存量消耗占比高于 80%,区域生态可持续性存在一定的风险;同时从研究时段上看,2000—2019 年区域人均生态足迹深度呈现上升的趋势。

表 6 洞庭湖区人均生态足迹广度/($\text{hm}^2/\text{人}$)

Table 6 Per capita ecological footprint breadth of Dongting Lake area

年份 Years	耕地 Cultivated land	林地 Woodland	草地 Grassland	水域 Water area	建设用地 Construction land	能源 Energy	汇总 Total
2000	0.2794	0.0026	0.0012	0.0068	0.0127	0.0451	0.3685
2005	0.2909	0.0055	0.0022	0.0088	0.0148	0.0760	0.4250
2010	0.3428	0.0053	0.0020	0.0100	0.0190	0.0691	0.4677
2015	0.3334	0.0046	0.0022	0.0130	0.0243	0.0706	0.4677
2019	0.2781	0.0099	0.0018	0.0125	0.0218	0.0950	0.4653

表 7 洞庭湖区人均生态足迹深度

Table 7 Per capita ecological footprint depth of Dongting Lake area

年份 Years	耕地 Cultivated land	林地 Woodland	草地 Grassland	水域 Water area	建设用地 Construction land	能源 Energy	汇总 Total
2000	3.6264	1.0000	9.9274	72.9975	1.1364	1.3432	4.3433
2005	4.0104	1.0000	15.5928	95.9346	1.1364	1.8138	5.1857
2010	3.9188	1.0000	12.3351	106.4188	1.1364	2.1991	5.5904
2015	4.3822	1.0000	15.5986	142.1003	1.1364	2.4662	7.5878
2019	3.9784	1.0000	18.3951	150.8261	1.1364	2.5568	7.0978

4 讨论

4.1 模型对比分析

将 2000—2019 年的能源生态足迹与赤字和传统算法进行比较,结果如表 8。据表可以看到基于碳足迹算法下的能源生态足迹均大于传统算法,这是因为在碳足迹的视角下核算了化石能源的全部碳排放量,而传统算法

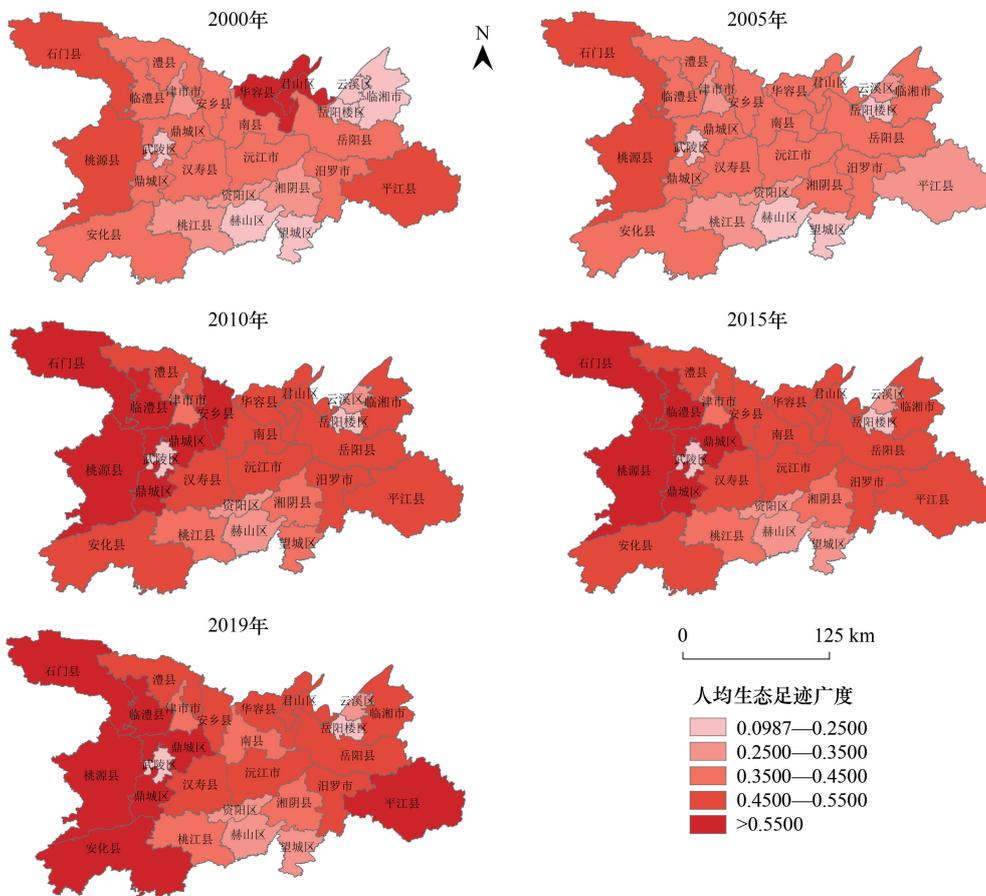


图5 洞庭湖区人均生态足迹广度空间分布

Fig.5 Spatial distribution of per capita ecological footprint breadth in Dongting Lake area

只计算了生成二氧化碳的那一部分碳量^[43],改进后的模型使得能源账户的碳排量更加接近真实值。对比两种方法下的生态赤字,2000年与2015年核算的生态赤字比传统算法高,主要是因为这两年林地核算的参数因子较小,与林地账户的项目选取有较大的关系;而2005、2010与2019年的能源生态赤字均低于传统算法,其生态赤字差异均较小,这主要是因为洞庭湖区的草地面积较少,仅占研究区总面积的1.5%,致使草地吸收的碳排量较少,使得生态承载力较低。此外,若能考虑将人类社会活动等要素添加到模型当中,能够进一步提高其分析结果的可靠性;其次,若能够加入耕地与水域对碳的吸收,能够进一步提高能源账户的计算精度,上述问题也是今后有待强化研究的方向。

表8 两种计算方法的生态赤字对比/($\text{hm}^2/\text{人}$)

Table 8 Comparison of the ecological deficit of the two calculation methods

年份 Years	改进方法足迹 Improved method footprint	传统方法足迹 Traditional method footprint	改进生态赤字 Improve the ecological deficit
2000	0.0606	0.0019	0.0155
2005	0.1378	0.0865	0.0618
2010	0.1519	0.1123	0.0828
2015	0.1742	0.0975	0.1036
2019	0.2430	0.1572	0.1479

4.2 生态可持续性演变

本研究从土地利用动态变化、人均生态赤字、人均生态足迹广度与深度的层面上客观分析了洞庭湖区的

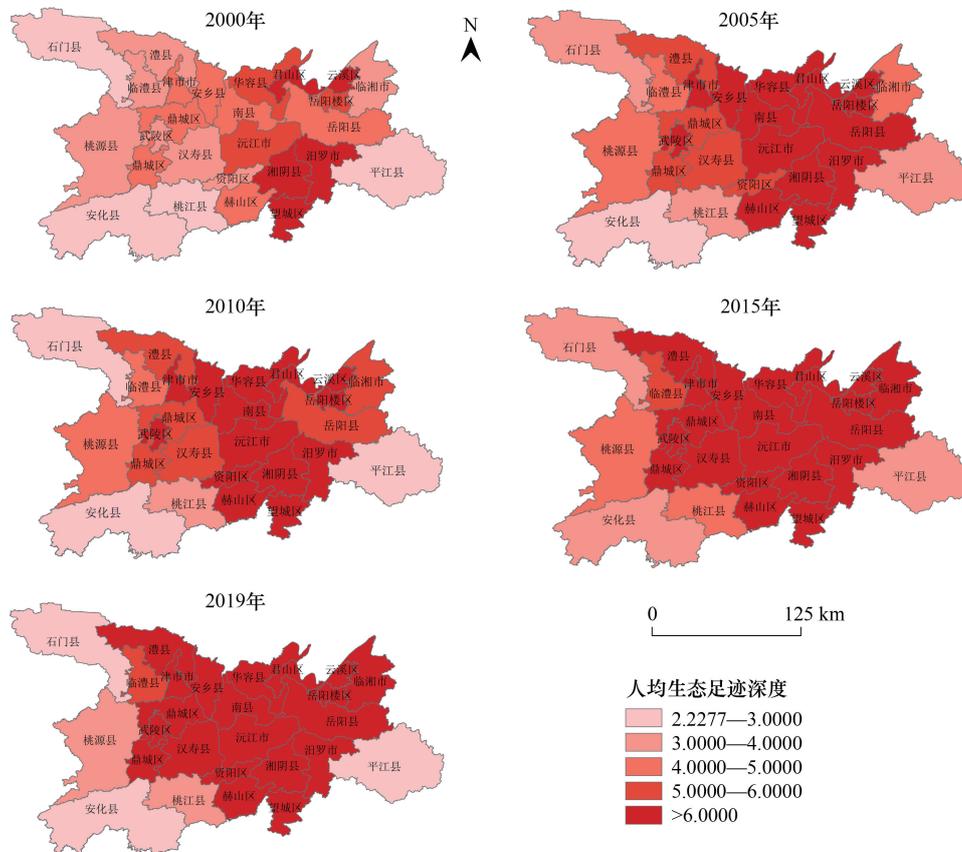


图 6 洞庭湖区人均生态足迹深度空间分布

Fig.6 Spatial distribution of per capita ecological footprint depth in Dongting Lake area

可持续性发展水平。在 2000—2019 年期间,洞庭湖区的可持续性发展水平有明显的演变过程,采用标准差椭圆的方法分析洞庭湖区人均生态赤字与足迹深度的时空转移特征。由图 7、图 8 可知,两者重心在空间上较为集中,且运动趋势基本一致,生态赤字的重心转移距离为 5.20km;足迹深度的重心转移距离为 7.23km。受到高污染工业发展的影响,前 5 年生态赤字重心向东北转移了 7.06km;足迹深度向东北方向转移了 9.67km,是选取的三个时间段偏移位置最大时段,说明生态赤字与足迹深度的前期变化程度比后期明显。由于 2005 年后云溪等地为了响应保护生态环境号召,开始逐年降低能源消耗量,东北部地区生态环境得到了一定程度的缓解。但与此同时,沅江市、湘阴县等地对渔业过度捕捞,导致洞庭湖水生态系统遭受严重破坏,加大了水域账户的生态赤字与足迹深度,进而导致了人均生态赤字与足迹深度向西南方向偏移。2010—2015 年重心转移距离与标准椭圆的长短轴均有所减小,这表明洞庭湖区的高生态赤字地区开始集中,2015—2019 年椭圆长短轴进一步缩小,且生态赤字与生态深度中心分别向东北方向偏移了 3.66km、2.78km,这主要是受猪肉大量减产的影响,致使西部地区石门县、桃源县等地的生态赤字降低,同时也使得以渔业为主的高生态赤字地区在空间上表现更加集中。

4.3 生态可持续性驱动因素

区域的生态可持续发展状况是由自然、社会、经济等众多因素共同作用的结果,如人口数量的增减、土地利用类型的变化、三次产业结构的调整与生态保护政策措施的实施等都会对区域可持续发展水平产生不同程度的影响^[44]。在研究时段内,洞庭湖区呈现出向强不可持续发展水平演变。研究区常住居民由 2000 年 1646.51 万降低至到 2015 年的 1645.95 万,但生物资源的消费总量却呈现快速增长的趋势,这表明人们生活质量的提高对可持续发展水平会产生一些消极影响。同时,由于近年来建设用地面积的快速增长,致使耕地

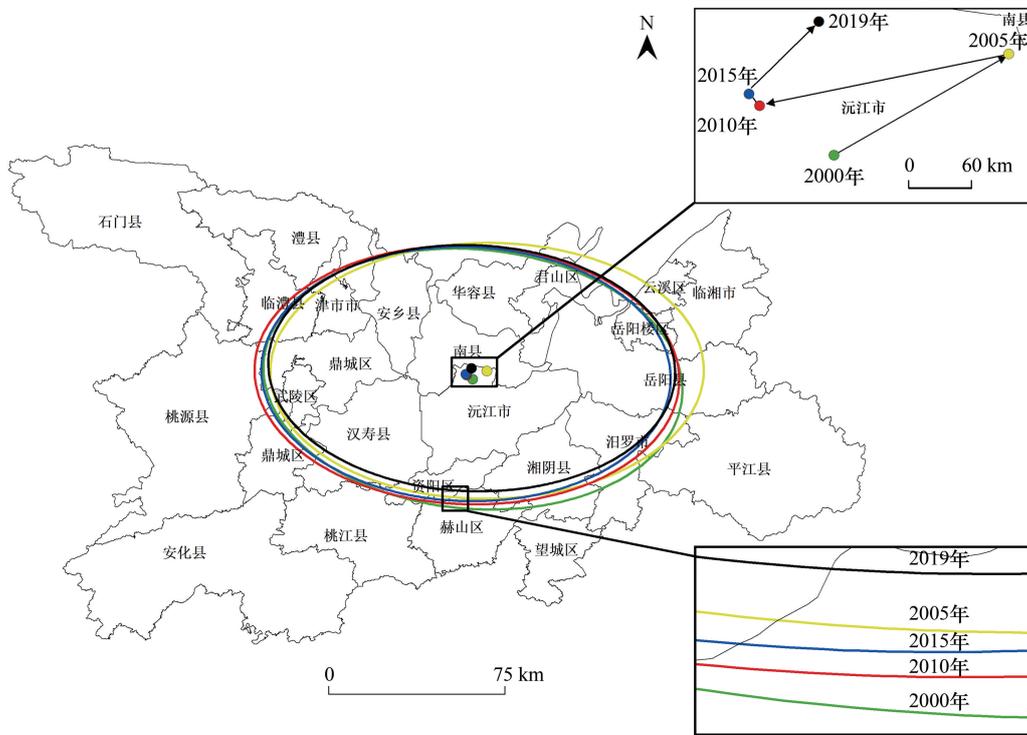


图 7 洞庭湖区人均生态赤字重心转移轨迹

Fig.7 The center of gravity shift of per capita ecological deficit in Dongting Lake area

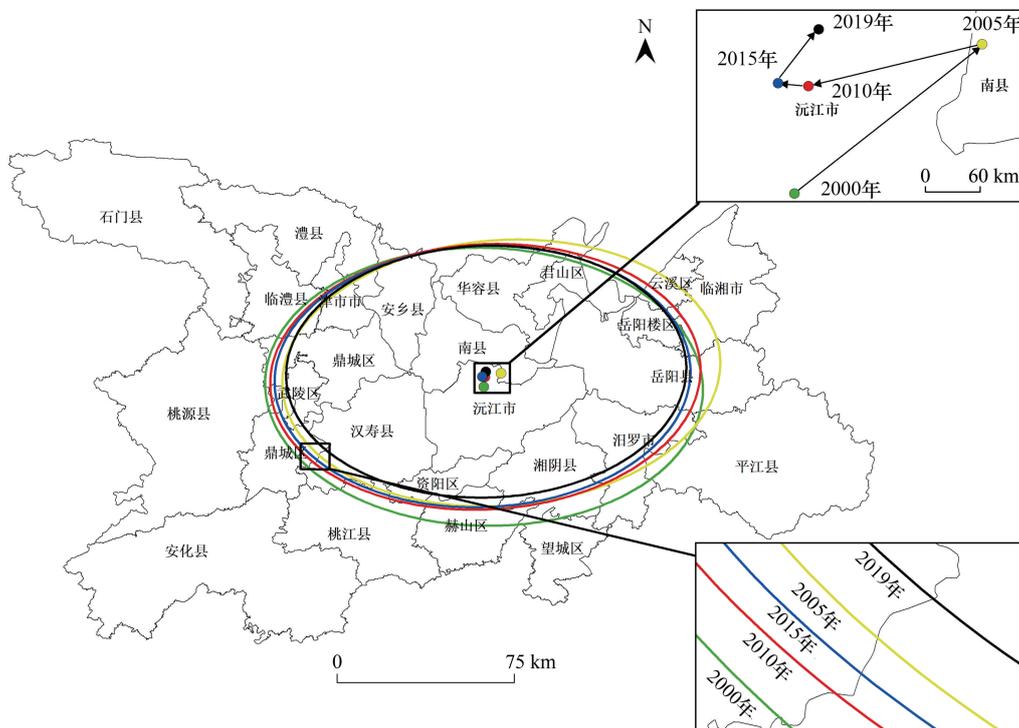


图 8 洞庭湖区生态足迹深度重心转移轨迹

Fig.8 The transfer track of ecological footprint depth gravity center in Dongting Lake area

资源被侵占,而在 2019 年的计算中发现 36.7%的耕地面积所产生的生态足迹与生态承载力分别占总量的 33.5%、59.8%,这表明耕地是维持地区生态平衡的重要支柱。其次是产业结构的分配(表 9),以 2019 年的三次产业占比为例,大力发展第三产业的岳阳楼区生态赤字仅为 0.7475hm²/人,远低于以工业发展为主的云溪区;安乡县的第三产业比重虽然也比较大,但其对水产品的捕捞量较高导致其水生态赤字较高。以上说明,三次产业结构的分配对研究区可持续发展水平具有一定的影响。最后,早期湖区大规模的污染排放和鱼类无序养殖活动,致使水域生态环境遭受到严重破坏,生态承载力下降。近年来,当地通过加大落实“一湖四水”的生态保护,湖区各区县加强湖区环境治理与生态保护力度,其成效明显,洞庭湖区的水生态承载力呈现逐年增长的趋势,这表明生态政策调控也是可持续发展水平的重要驱动因素之一。

表 9 2019 年洞庭湖区 25 区县三次产业比值

Table 9 Tertiary industry ratio of 25 districts and counties in Dongting Lake District in 2019

县区 Counties and districts	第一产业比值 Primary industry ratio/%	第二产业比值 Secondary industry ratio/%	第三产业比值 Tertiary industry ratio/%	人口 Population/ ×10 ⁴ 人	水产品产量 Aquatic product output/t	生态赤字 Ecological deficit/ (人/hm ²)
望城区	0.06	0.36	0.58	72.57	29074	1.4070
岳阳楼区	0.01	0.30	0.69	101.83	21353	0.7475
云溪区	0.03	0.66	0.31	17.84	19551	5.7359
君山区	0.19	0.34	0.47	25.99	36141	3.8951
岳阳县	0.16	0.45	0.39	71.05	53615	3.1025
华容县	0.21	0.35	0.44	72.17	149475	5.6944
湘阴县	0.18	0.40	0.42	71.08	161810	5.9309
平江县	0.15	0.39	0.45	95.42	9607	0.8448
汨罗市	0.11	0.46	0.43	70.14	47343	3.0862
临湘市	0.11	0.45	0.44	51.61	39274	2.8834
武陵区	0.01	0.54	0.46	73.30	21481	1.0984
鼎城区	0.17	0.32	0.51	82.09	75540	2.9748
安乡县	0.17	0.28	0.54	53.16	132000	6.2451
汉寿县	0.17	0.34	0.49	80.86	78627	2.9767
澧县	0.14	0.30	0.56	77.94	57265	2.6060
临澧县	0.16	0.35	0.49	41.68	22560	2.3921
桃源县	0.20	0.31	0.49	84.48	35268	1.9782
石门县	0.15	0.35	0.49	58.05	13256	1.6460
津市市	0.13	0.42	0.45	25.59	25677	3.5481
资阳区	0.13	0.50	0.37	42.23	31557	2.7412
赫山区	0.08	0.50	0.42	89.99	30532	1.6395
南县	0.25	0.28	0.48	74.32	122615	4.6079
桃江县	0.15	0.46	0.39	79.55	12435	1.0244
安化县	0.19	0.33	0.48	86.10	16176	0.9266
沅江市	0.23	0.39	0.37	69.88	173700	6.2473

5 结论

本文从碳循环的视角出发与生态足迹理论结合,构建了改进的三维生态足迹模型,重点分析了洞庭湖区 25 区县可持续发展状态的动态演变特征与驱动因子。研究结论如下:(1)20 年内洞庭湖区人均生态承载力与人均生态足迹在总体上均呈现增长的趋势,但人均生态足迹的增长速度远高于人均生态承载力,致使人均生态赤字在时间维度上不断增大,空间维度上呈湖滨向周边地区扩散的趋势。为减少洞庭湖区整体的生态赤字,可提高土地利用效率,推进节约集约用地,充分发挥市场机制作用,完善土地租赁、转让、抵押市场,让闲置

的土地能够得到充分利用,同时在能源结构上可增大清洁能源的占用比例,改善能源消费结构,减少碳排放量和降低碳排放强度。(2)洞庭湖区的土地资源划分不够合理,除林地账户之外的其他账户均存在自然资本存量的消耗,且表现为高生态赤字。特别是水域账户,过度的水生态资源开发致使洞庭湖的自然资本存量存在严重亏损。为加快水生态环境的保护与修复,既要充分修复湿地的生态功能,也要健全健全湿地生态补偿机制。(3)对比传统生态足迹模型,改进后的模型在能源账户的计算中更能反映出真实的碳排放量与碳吸收量。由于研究区草地面积占比较低,使得洞庭湖区的能源生态承载力与林地具有较高的协同性,同时,也使得研究区能源账户的生态承载力存在偏小的情况。(4)洞庭湖区的可持续发展程度与县区的产业结构具有较高的耦合性,表现为高生态赤字的地区主要以渔业和工业为主,而以服务业发展为主的岳阳楼区等地生态赤字较低,因此可以通过调整产业结构构建以绿色经济为主体的新型产业结构,依托绿色生态发展全域旅游,打造湿地公园、天然氧吧等生态休闲场所。同时,通过研究发现居民生活质量的提升、土地结构的变化与生态政策的有效落实均对地区的生态可持续发展具有重要的调节作用。

参考文献 (References):

- [1] 兰简琪, 谢世友. 基于生态足迹理论的青岛市水资源可持续分析. 西南师范大学学报: 自然科学版, 2020, 45(10): 55-62.
- [2] 鲁洋, 沈宜菁, 黄素珍, 杨晓英, 李小港. 基于生态足迹理论的休宁县可持续发展评价研究. 复旦学报: 自然科学版, 2019, 58(6): 756-764.
- [3] 王文国, 龚久平, 青鹏, 潘科, 胡启春. 重庆市水资源生态足迹与生态承载力分析. 生态经济, 2011, (7): 159-162.
- [4] Rees W E. Ecological footprints and appropriated carrying capacity: what urban economics leaves out. *Environment and Urbanization*, 1992, 4(2): 121-130.
- [5] Wackernagel M, Onisto L, Bello P, Linares A C, FalfáN I S L, GARCia 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.
- [6] 何逸帆, 杨庆媛, 张忠训. 基于三维生态足迹的重庆市自然资本利用动态分析. 亚热带资源与环境学报, 2019, 14(1): 79-86, 95-95.
- [7] Niccolucci V, Bastianoni S, Tiezzi E B P, Wackernagel M, Marchettini N. How deep is the footprint? A 3D representation. *Ecological Modelling*, 2009, 220(20): 2819-2823.
- [8] 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.
- [9] 王丽萍, 夏文静. 生态足迹的国内外研究进展. 经济研究参考, 2018, (1): 56-68.
- [10] 胡志毅, 管陈雷, 杨天昊, 秦普艳, 陈艳. 中国旅游生态足迹研究可视化分析. 生态学报, 2020, 40(2): 738-747.
- [11] Rosa L, Sanchez D L, Realmonde G, Baldocchi D, D'Odorico P. Corrigendum to "the water footprint of carbon capture and storage technologies" [Renew Sustain Energy Rev(2021)110511]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2021, 140: 110773.
- [12] Vita G, Rao N D, Usubiaga-Liaño A, Min J, Wood R. Durable goods drive two-thirds of global households' final energy footprints. *Environmental Science & Technology*, 2021, 55(5): 3175-3187.
- [13] Güney E, Demirel N. Water footprint assessment of carbon in pulp gold processing in turkey. *Sustainability*, 2021, 13(15): 8497
- [14] 陈成忠, 林振山. 生态足迹模型的争论与发展. 生态学报, 2008, 28(12): 6252-6263.
- [15] 张恒义, 刘卫东, 王世忠, 单娜娜, 梁红梅. "省公顷"生态足迹模型中均衡因子及产量因子的计算——以浙江省为例. 自然资源学报, 2009, 24(1): 82-92.
- [16] 刘某承, 李文华. 基于净初级生产力的中国各地生态足迹均衡因子测算. 生态与农村环境学报, 2010, 26(5): 401-406.
- [17] 苏子龙, 袁国华, 周伟. 基于改进三维生态足迹模型的安徽省土地生态承载力评价. 水土保持研究, 2020, 27(3): 256-262.
- [18] 曹威威, 孙才志. 能值生态足迹模型的改进——以海南为例. 生态学报, 2019, 39(1): 216-227.
- [19] 靳亚亚, 柳乾坤, 李陈. 基于改进三维生态足迹模型的耕地承载力评价——以江苏省为例. 中国土地科学, 2020, 34(9): 96-104.
- [20] 王瑞杰, 闫峰, 张学良. 2000-2015年鄂尔多斯高原生态承载力时空变化特征. 水土保持通报, 2020, 40(1): 91-98, 107-107.
- [21] 付永虎, 刘铁, 刘俊青, 胡晗, 魏范青. 基于灰水足迹的粮食主产区农业环境效率与水环境可持续性测度与评估. 中国农业资源与区划, 2021, 42(1): 77-87.
- [22] 熊建新, 张志业, 赵迪, 周扬, 许建伟. 城镇化过程中生态承载力耦合关系的时空演变——以洞庭湖区为例. 中南林业科技大学学报, 2021, 41(3): 111-119, 156-156.
- [23] 禹亚玲, 李巧云. 基于改进 PSR 模型的洞庭湖区生态安全评价及主要影响因素分析. 农业现代化研究, 2021, 42(1): 132-141.
- [24] 郭晶, 莲花, 李利强, 黄代中, 王丑明. 洞庭湖水水质污染状况及主要污染物来源分析. 水生态学杂志, 2019, 40(4): 1-7.

- [25] 邓楚雄, 钟小龙, 谢炳庚, 万义良, 宋雄伟. 洞庭湖区土地生态系统的服务价值时空变化. 地理研究, 2019, 38(4): 844-855.
- [26] 康韵婕, 郑国璋, 杨建平. 基于碳足迹方法的山西省土地可持续利用研究. 山西师范大学学报:自然科学版, 2021, 35(2): 23-28.
- [27] 卢俊宇, 黄贤金, 陈逸, 肖潇. 基于能源消费的中国省级区域碳足迹时空演变分析. 地理研究, 2013, 32(2): 326-336.
- [28] 周翠烟. 基于生态足迹的洞庭湖生态经济区全要素生态效率研究[D]. 长沙: 湖南师范大学, 2018.
- [29] 伍芮, 李成英. ArcGIS 下基于三维生态足迹模型的土地利用分析——以青海省东部城市为例. 国土与自然资源研究, 2020, (6): 20-27.
- [30] Niccolucci V, Galli A, Reed A, Neri E, Wackernagel M, Bastianoni S. Towards a 3D national ecological footprint geography. Ecological Modelling, 2011, 222(16): 2939-2944.
- [31] 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. 生态学报, 2015, 35(11): 3766-3777.
- [32] 梁中, 徐蓓. 中国省域碳压力空间分布及其重心迁移. 经济地理, 2017, 37(2): 179-186.
- [33] 谢鸿宇, 陈贤生, 林凯荣, 胡安焱. 基于碳循环的化石能源及电力生态足迹. 生态学报, 2008, 28(4): 1729-1735.
- [34] 郑德凤, 刘晓星, 王燕燕, 吕乐婷. 中国省际碳足迹广度、深度评价及时空格局. 生态学报, 2020, 40(2): 447-458.
- [35] 顾晓薇, 王青, 刘建兴, 李广军, 丁一, 刘敬智. 辽宁省自然资源可持续利用的生态足迹分析. 资源科学, 2005, 27(4): 118-124.
- [36] 周涛, 王云鹏, 龚健周, 王芳, 冯艳芬. 生态足迹的模型修正与方法改进. 生态学报, 2015, 35(14): 4592-4603.
- [37] 王涛. 中国省域生态安全评价及影响因素分析[D]. 开封: 河南大学, 2020.
- [38] 郭慧, 董士伟, 吴迪, 裴顺祥, 辛学兵. 基于生态系统服务价值的生态足迹模型均衡因子及产量因子测算. 生态学报, 2020, 40(4): 1405-1412.
- [39] 闻熠, 高峻, 徐迪, 林章林. 基于改进参数的长三角城市生态足迹分析及其可持续性评价. 水土保持研究, 2020, 27(1): 312-318, 327-327.
- [40] 杨雪荻, 白永平, 车磊, 乔富伟, 周亮. 甘肃省生态安全时空演变特征及影响因素解析. 生态学报, 2020, 40(14): 4785-4793.
- [41] 谢鸿宇, 叶慧珊. 中国主要农产品全球平均产量的更新计算. 广州大学学报:自然科学版, 2008, 7(1): 76-80.
- [42] 李鹏辉, 徐丽萍, 张军民, 金梦婷, 张茹倩. 干旱区内陆河流域三维生态足迹时空变化分析——以玛纳斯河流域为例. 生态学报, 2020, 40(19): 6776-6787.
- [43] 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.
- [44] 李玉丹. 洞庭湖生态经济区生态安全评估[D]. 长沙: 湖南师范大学, 2014.