

DOI: 10.5846/stxb201711202066

鹿瑶, 李效顺, 蒋冬梅, 郎文婧, 沈春竹, 魏旭晨. 区域生态足迹盈亏测算及其空间特征——以江苏省为例. 生态学报, 2018, 38(23): - .
Lu Y, Li X S, Jiang D M, Lang W J, Shen C Z, Wei X C. Study on the calculation and spatial characteristics of regional ecological footprint profit and loss: Jiangsu Province as a case study. Acta Ecologica Sinica, 2018, 38(23): - .

区域生态足迹盈亏测算及其空间特征 ——以江苏省为例

鹿瑶¹, 李效顺^{1,2,*}, 蒋冬梅¹, 郎文婧¹, 沈春竹³, 魏旭晨¹

1 中国矿业大学 江苏省资源环境信息工程重点实验室, 徐州 221116

2 南京农业大学 中国土地问题研究中心, 南京 210095

3 江苏省土地勘测规划院 国土资源部海岸带开发与保护重点实验室, 南京 210024

摘要:生态足迹分析法能够通过计算生物生产性土地和水域的产量,估算人类对自然资本的消耗和自然资本的供给情况,进而对区域发展的可持续发展状态进行定量评估。论文在改进国家公顷生态足迹模型的基础上,对江苏省及其 13 个地级市生态足迹盈亏进行测算,进而揭示其空间演化特征。研究结果表明:(1)2015 年江苏省的人均生态足迹为 1.7890 hm²/人,人均生态承载力为 0.2991 hm²/人,生态赤字为-1.4899 hm²/人,万元 GDP 生态足迹为 0.2033 hm²/万元;(2)地级市中,人均生态足迹上,常州市最高为 2.9317 hm²/人,宿迁市最低为 1.7348 hm²/人;人均生态承载力上,盐城市最高为 0.6111 hm²/人,苏州市最低为 0.0812 hm²/人;人均生态赤字上,常州市最高为-2.8115 hm²/人,盐城市最低为-1.1503 hm²/人;万元 GDP 生态足迹上,宿迁市最高为 0.3956 hm²/万元,无锡市最低为 0.1651 hm²/万元;(3)江苏省及其苏南、苏中地区的人均建筑用地生态足迹和化石能源用地生态足迹所占比例较大,苏北地区人均耕地生态足迹和草地生态足迹所占比例较大;(4)人均生态足迹和生态赤字在空间分布上较为一致,呈现出南高北低的特征,而人均生态承载力呈现北高南低的分布特征;万元 GDP 生态足迹空间分布北高南低,整体上与人均地区生产总值成反比。研究结果能够为江苏省区域协调发展、生态文明建设提供理论指导和定量参考。

关键词:生态足迹;生态承载力;国家公顷;空间特征;江苏省

Study on the calculation and spatial characteristics of regional ecological footprint profit and loss: Jiangsu Province as a case study

LU Yao¹, LI Xiaoshun^{1,2,*}, JIANG Dongmei¹, LANG Wenjing¹, SHEN Chunzhu³, WEI Xuchen¹

1 Jiangsu Key Laboratory of Resources and Environmental Information Engineering, China University of Mining and Technology, Xuzhou 221116, China

2 China Land Problem Research Center, Nanjing Agricultural University, Nanjing 210095, China

3 Key Laboratory of Coastal Zone Exploitation and Protection, Ministry of Land and Resource, Nanjing 210024, China

Abstract: By calculating the bioproductive land and water output, ecological footprint analysis estimates the supply and demand of natural capital; thus, quantitatively evaluating the state of regional sustainable development. The national hectare ecological footprint model was improved in this paper to calculate the ecological footprint of Jiangsu Province and 13 prefecture-level cities and determine its spatial characteristics. The results showed that: (1) in 2015, the per capita ecological footprint of Jiangsu Province was 1.7890 hm²/cap, per capita ecological carrying capacity was 0.2991 hm²/cap, and per capita ecological deficit was -1.4899 hm²/cap, ten thousand yuan GDP ecological footprint was 0.2033 hm²/ten thousand yuan; (2) among the prefecture-level cities, the per capita ecological footprint of Changzhou City was the highest

基金项目:国家自然科学基金项目(71473249,71704177);中央高校基本科研专项资金(2017WB05);江苏省社科基金重点项目(15EYA002);国土资源部海岸带开发与保护重点实验室开放基金(2017CZEPK10)

收稿日期:2017-11-20; 网络出版日期:2018-00-00

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: lxsh@cumt.edu.cn

at 2.9317 hm^2/cap , and that of Suqian City was the lowest at 1.7348 hm^2/cap ; per capita ecological carrying capacity of Yancheng City was the highest at 0.6111 hm^2/cap , and Suzhou City was the lowest at 0.0812 hm^2/cap ; per capita ecological deficit of Changzhou City was the highest at $-2.8115 \text{ hm}^2/\text{cap}$, and Yancheng City was the lowest at $-1.1503 \text{ hm}^2/\text{cap}$; ten thousand yuan GDP ecological footprint of Suqian City was the highest at 0.3956 $\text{hm}^2/\text{ten thousand yuan}$, and that of Wuxi City was the lowest at 0.1651 $\text{hm}^2/\text{ten thousand yuan}$; (3) in Jiangsu Province, in the southern and middle Jiangsu areas, the building land and fossil energy land ecological footprint accounted for a considerable proportion. Whereas, in the northern Jiangsu area, the cultivated land and grassland ecological footprint contributed more to the whole ecological footprint; (4) the spatial distribution of per capita ecological footprint was in accordance with the ecological deficit, characteristically higher in the south and lower in the north, which was opposite to the ecological carrying capacity distribution. The spatial character of the ten thousand yuan GDP ecological footprint was higher in southern Jiangsu and lower in northern Jiangsu, which was inversely proportional to the per capita GDP. The results of this study provide theoretical direction and quantitative reference to coordinate the regional development and build ecological civilization in Jiangsu Province.

Key Words: ecological footprint; ecological carrying capacity; national hectare; spatial characteristics; Jiangsu Province

工业革命以来,发达国家在创造极大物质财富的同时,也引发了沉重的生态环境灾难,直接威胁着人类生存和社会持续发展。与国外类似,改革开放以后,我国城镇化水平从 1978 年的 17.9% 提高到 2016 年的 57.4%、年均增长超过 1 个百分点,GDP 保持年均增长约 10 个百分点,发展成就举世瞩目。然而,发达国家 300 年中产生的环境问题却在我国 30 年间集中式爆发,加速损耗我国经济社会赖以发展的资源环境家底,并严重损毁普通民众追求美好宜居生活的梦想。尤其伴随城镇化进程快速推进和年均超过 1000 万城镇人口加速增长,人们生产生活对土地和自然资源的刚性需求迅速增加,占用了大量的农地、林地及其他类型的生态用地来进行房地产、商业区、工业区的开发建设,土地利用的变化尤其是城市过度蔓延对生态系统服务功能产生了消极影响^[1],从而造成了越发严重的人地矛盾和区域土地生态承载力严重超载。

严峻的生态环境形势给我们敲响了警钟:模仿西方国家发展模式,靠拼资源、牺牲环境发展经济的道路难以走通。政府高层也意识到生态环境恶化的严重性:党的十九大报告明确提出要尊重自然、顺应自然、保护自然,建设人与自然和谐共生的现代化。因此,如何测算土地资源承载能力,合理利用土地、缓解人地矛盾,从而实现可持续发展,是公众关注焦点、学者研究重点和政策创新难点。生态足迹可以表现人类对自然资本的利用情况,判断人类活动是否在生态系统的承载范围之内,从而评估发展可持续性。生态足迹分析法的提出和发展,为定量测度可持续发展提供了评价方法^[2]。

江苏省作为改革开放的前沿阵地、经济水平最为发达、区域差异最为显著和人地矛盾最为尖锐的省份之一,区域土地承载力迅速超载。鉴于此,本文在改进传统生态足迹模型基础上,以“国家公顷(nhm^2)”为计量单位,对江苏省及其 13 个地级市 2015 年生态足迹、生态承载力和生态盈亏进行测算,并在此基础上计算研究区万元 GDP 生态足迹。与已有研究不同的是,本文利用国家公顷生态足迹模型计算了江苏省及 13 个地级市的产量因子,立足于区域生态足迹的空间特征分析,进而把握影响区域生态足迹分布差异的因素,从而在理论上补充、完善生态足迹模型在空间分析方面的不足,研究结果在为江苏省生态文明建设和土地可持续利用提供定量参考的同时,对统筹江苏省各市协调、可持续发展具有指导意义。

1 研究区概况

江苏省位于中国大陆东部沿海中心,地理位置介于 $116^{\circ}18'—121^{\circ}57'E$, $30^{\circ}45'—35^{\circ}20'N$ 之间,属东亚季风气候区,平均气温介于 $13—16^{\circ}\text{C}$ 间,年均降水量为 1000 mm。江苏省地势低平,地形以平原为主,平原面积达 700 多万 hm^2 ,占江苏面积的 70% 以上。江苏省际陆地边界线 3383 km,面积 1072 万 hm^2 ,占中国国土面积

的 1.12%, 人均国土面积在中国各省区中最少。其中耕地面积为 458 万 hm^2 , 占全省土地总面积的 42.72%, 林地面积为 179 万 hm^2 。江苏省下辖 13 个地级市。根据地理位置和经济发展, 一般将江苏省分为苏北(徐州、连云港、淮安、盐城、宿迁)、苏中(南通、扬州、泰州)和苏南(南京、无锡、常州、苏州、镇江)。

江苏与上海、浙江共同构成的长江三角洲城市群已成为 6 大世界级城市群之一。《2016 年江苏省国民经济和社会发展统计公报》显示, 截至 2016 年末, 江苏省的城镇化率已达到 67.7%, 高于全国超过 10%, 2016 年江苏省地区生产总值达 76086.2 亿元, 全省人均生产总值达 95259 元。全国省域中, 江苏省人均生产总值、地区发展与民生指数均居首位, 达到“中上等”发达国家水平。但是江苏省迅速的城市化进程也导致了一些问题, 例如城市建设用地占用生态用地、建设用地供需矛盾突出、土地生态服务功能的减弱, 这也是当前亟需解决的问题。

2 数据来源与研究方法

2.1 数据来源

本研究数据主要采用全国生物生产性土地面积和产量, 研究区人口、GDP 总值、生物生产性土地面积和产量。根据数据的可获取性, 本研究数据主要来源于 2015 年《中国新型城镇化的生态足迹影响分析》, 2016 年《中国统计年鉴》、《中国城市统计年鉴》、《江苏统计年鉴》以及江苏省各地级市的统计年鉴。

2.2 研究方法

2.2.1 生态足迹分析法

生态足迹分析法由加拿大生态经济学家 William Rees 于 20 世纪 90 年代初首次提出, 随后其学生 Mathis Wackernagel 对生态足迹进行了完善^[3-4]。生态足迹分析法在 20 世纪 90 年代末引入中国, 被国内学者较多用于土地生态系统的研究^[5-6]。生态足迹分析法以其容易理解、计算简便的特点, 被国内外众多学者应用于生态承载力和可持续发展程度的计量中^[7-8]。随着研究广度和深度的增加, 学者们对传统生态足迹模型进行了各方面的改进^[9-10]。近年来学者们对生态足迹的研究进展主要集中在尺度选择和方法改进 2 个方面: (1) 时空尺度上, 学者们对生态足迹的时间序列变化及未来预测进行了研究, 弥补了传统生态足迹模型瞬时性的不足^[11-14], 有学者提出了基于“国家公顷”、“省公顷”和“本地公顷”的改进模型^[15-18], 使得生态足迹模型能够更为准确地表达中小尺度上的生态足迹盈亏情况。(2) 计算方法上, 学者提出基于能值和净初级生产力(NPP)的生态足迹模型^[19-20], 以得到能真实反映研究区消费情况的均衡因子, 还有学者引入“足迹广度”和“足迹深度”两个指标构建了三维生态足迹模型^[21-23]。近年来, 学者们也从空间维度对生态足迹展开了深入探索, 武翠芳等利用 Gini 系数和 Theil 指数对黑河流域生态足迹的空间差异进行研究^[24], 李一琼等采用空间自相关方法, 对广西县域生态足迹及其影响因子的空间差异进行了定量计算^[25], 潘洪义等通过计算成都市 6 年生态足迹和生态承载力, 对成都市生态足迹的时间、空间动态演变及其差异性进行分析^[26]。总体而言, 国内外学者对生态足迹分析法的研究已经相对成熟, 但是目前利用国家公顷生态足迹模型, 计算研究区均衡因子和产量因子, 并在此基础上对生态足迹空间分布特征及其差异原因进行分析的研究相对较少, 且对生态足迹进行分析时较少关注人口、经济等社会因素的定量影响, 导致计算结果无法全面、准确地反映生态环境与经济发展之间的关系。

2.2.2 国家公顷生态足迹模型

生态足迹模型能够对区域的生态足迹和生态承载力进行测算, 从而评估人类活动对生态系统和环境的影响情况, 对合理使用自然资源有一定指导作用。生态足迹通过计算生产性土地和水域面积及其各类产品的产量, 估算某一区域人类为了维持自身生产生活而利用自然资源的量, 即一定人口(人均、城市、国家等)需要多少生产性土地来生产需要的资源和吸纳产生的废物, 进而评估人类的生产生活对地球生态系统和环境的影响^[2,5]。生态足迹的值越高, 代表人类所需的资源越多, 对生态和环境的影响就越严重。

生态足迹模型分为生态足迹和生态承载力两部分。为了在国家范围内对省、市的生态足迹进行更精确的

比较和计算,减少计算结果的偏差,本研究以国家公顷为计量单位,构建了以下国家公顷生态足迹和生态承载力模型^[27]:

$$EF = N \times ef = N \times \sum_{i=1}^6 (\lambda_i \times A_i) = N \times \sum_{i=1}^6 (\lambda_i \times \sum_{j=1}^n aa_j) = N \times \sum_{i=1}^6 \left[\lambda_i \times \sum_{j=1}^n \left(\frac{c_j}{p_j} \right) \right] \quad (1)$$

式中, EF 为总生态足迹(hm^2); N 为总人口数; ef 为人均生态足迹($\text{hm}^2/\text{人}$); $i=1,2,\dots,6$,代表6类生物生产性土地; λ_i 为第*i*类生物生产性土地的均衡因子; A_i 为人均第*i*类生物生产性土地面积($\text{hm}^2/\text{人}$); j 为消费项目类型; aa_j 为人均第*j*种消费项目折算的生物生产性土地($\text{hm}^2/\text{人}$); c_j 为第*j*种消费品的人均年消费量($\text{kg}/\text{人}$); p_j 为*j*种消费品的平均生产能力(kg/hm^2)。

生态承载力计算公式为:

$$EC = (1 - 0.12) \times N \times ec = (1 - 0.12) \times N \times \sum_{i=1}^6 (a_i \times \lambda_i \times y_i) \quad (2)$$

式中, EC 为总生态承载力, N 为总人口数, ec 为人均生态承载力($\text{hm}^2/\text{人}$), a_i 为人均第*i*类生物生产性土地面积($\text{hm}^2/\text{人}$), λ_i 为第*i*类生物生产性土地的均衡因子; y_i 为产量因子。根据联合国世界环境与发展委员会在《我们共同的未来》一书中提出的,为保护生物多样性,最终生态承载力应该在均衡生态承载力的基础上扣除12%用以保护生物多样性。

生物生产性土地是生态足迹分析法为各类自然资本提供统一度量的基础^[28]。生物生产性土地是指具有生物生产能力的土地或水体,在生态足迹模型中,根据生产力的大小,各种资源和能源消费项目被折算为耕地、草场、林地、水域、建筑用地和化石能源用地6种类型的生物生产性土地面积。用生物生产性土地表示自然资本的物质量,有利于计算各类土地的产量和生态足迹的总量。在生态足迹模型中,将生物生产性土地类型划分为耕地、草地、林地、水域、化石燃料用地和建筑用地6种类型。根据研究区的生产情况和数据的可获取性,对生物生产性土地的消费项目进行了划分,结果如表1。

表1 国家公顷生态足迹模型消费项目分类

Table 1 Consumption items of national hectare ecological footprint model

生物生产性土地 Biological productive land	消费项目类型 Consumption item type
耕地 Cultivated land	小麦、稻谷、玉米、棉花、油料作物、麻类、糖类、蔬菜瓜类、烤烟、豆类、薯类
林地 Forestland	茶叶、蚕茧、水果
草地 Grassland	猪肉、牛肉、羊肉、禽肉、兔肉、奶类、绵羊毛、禽蛋、蜂蜜
水域 Water area	水产品
化石能源用地 Fossil energy land	煤炭、焦炭、原油、汽油、煤油、柴油、燃料油、液化石油气
建筑用地 Building land	电力

将生态足迹与生态承载力进行比较,如果生态足迹大于生态承载力,则为生态赤字,即在当前技术和生产力状况下,生物生产性土地面积不足以支撑人类生产生活;若生态足迹小于生态承载力,则为生态盈余,即当前生物生产性土地面积能够支持人类生产生活。

2.2.3 均衡因子

均衡因子是全国某一类生物生产性土地与全国所有生物生产性土地生产能力的比值,表示不同土地类型之间生物生产能力的差异。均衡因子计算公式^[29-30]为:

$$\lambda_i = \frac{p_i}{p} \quad (3)$$

式中, λ_i 为第*i*类生物生产性土地的均衡因子, p_i 为全国第*i*类生物生产性土地的平均生产力, p 为全国全部生物生产性土地的平均生产力。

2.2.4 产量因子

产量因子是研究区某一类土地的生物生产能力与这类土地全国平均生产能力的比值,表示当地和全国平均实际生产能力的差异,计算公式^[29-30]为:

$$y_i = \frac{p'_i}{p_i} \quad (4)$$

式中, y_i 为第*i*类生物生产性土地的产量因子, p'_i 为研究区第*i*类生物生产性土地的平均生产能力, p_i 为全国第*i*类生物生产性土地的平均生产能力。

为使计算结果更准确,在计算均衡因子和产量因子时,本研究利用能值转换率系数表^[31],将生物资源和能源资源的产量均转换为能值,进而计算出均衡因子和产量因子。

2.2.5 万元 GDP 生态足迹

由于生态足迹模型主要对生物产量和生产性土地面积进行测算,计算过程中忽略了经济等社会因素的影响,得到的结果不能全面、准确地反映生态与环境之间的关系。万元 GDP 生态足迹是区域总生态足迹与万元 GDP 的比值,指产生每万元 GDP 需要的资源所占用的生物生产性土地面积,可以用来衡量资源的利用效益^[32],计算公式^[33]为:

$$EF_c = EF/GDP \quad (5)$$

式中, EF_c 为万元 GDP 生态足迹, EF 为区域总生态足迹,GDP 为区域 GDP 总值,单位万元。 EF_c 值越大,表明资源的利用效益越低,反之则表明资源利用效益高。

3 结果与分析

3.1 江苏省生态足迹测算结果

根据式 3、式 4,计算得到国家公顷生态足迹模型均衡因子和产量因子,计算结果如表 2、表 3。

表 2 国家公顷生态足迹模型均衡因子

Table 2 Equivalence factors of national hectare ecological footprint model

生物生产性土地 Biological productive land	均衡因子 Equivalence factor	生物生产性土地 Biological productive land	均衡因子 Equivalence factor
耕地 Cultivated land	2.9363	水域 Water area	1.9421
林地 Forestland	0.8872	化石能源用地 Fossil energy land	0.8872
草地 Grassland	1.0872	建筑用地 Building land	2.9363

表 3 国家公顷生态足迹模型产量因子

Table 3 Yield factors of national hectare ecological footprint model

研究区 Study area	耕地 Cultivated land	林地 Forestland	草地 Grassland	水域 Water area	化石能源用地 Fossil energy land	建筑用地 Building land
江苏省	1.1276	0.7578	3.4819	0.7277	0.0000	0.5327
南京市	1.5240	0.7083	0.7944	0.5282	0.0000	0.4516
苏州市	1.0778	1.4215	7.6428	0.3929	0.0000	0.7950
无锡市	1.0361	0.6911	1.7284	0.6893	0.0000	0.3502
常州市	0.9139	0.5691	4.0037	0.9770	0.0000	0.7848
镇江市	0.9948	0.8294	3.2060	0.5253	0.0000	0.5005
扬州市	1.0213	0.1984	8.9451	0.4916	0.0000	0.0692
泰州市	1.1817	1.6265	7.3441	0.5636	0.0000	0.1187
南通市	1.2593	1.3437	5.7756	0.7195	0.0000	0.1439
徐州市	1.0641	0.8048	10.8704	0.0968	0.0000	0.2318
连云港市	0.8639	0.5796	3.6972	2.9164	0.0000	0.3337
盐城市	1.1570	0.9625	6.1879	0.9444	0.0000	0.3391
宿迁市	0.9479	0.1121	0.9992	0.6796	0.0000	0.2257
淮安市	0.9440	0.9904	1.2337	0.5527	0.0000	0.3686

本文以江苏省为例,计算了2015年江苏省以及13个地级市的人均生态足迹和人均生态承载力,结果显示研究区的生态盈亏均呈现为生态赤字。在此基础上,对江苏省人均生态足迹、生态承载力和生态赤字的空间特征进行了研究。人均生态足迹、生态承载力和生态赤字计算结果如表4—表6。

表4 研究区2015年人均生态足迹/($\text{hm}^2/\text{人}$)

Table 4 Per capita ecological footprint of Jiangsu Province in 2015

研究区 Study area	耕地 Cultivated land	草地 Grassland	林地 Forestland	水域 Water area	化石能源用地 Fossil energy land	建筑用地 Building land	总计 Total	均衡面积 Balanced area
江苏省	0.1314	0.0028	0.1584	0.0069	0.5686	0.2420	1.1101	1.7890
南京市	0.0472	0.0011	0.0627	0.0029	0.0962	0.8200	1.0301	2.7065
苏州市	0.0319	0.0005	0.0504	0.0026	0.1471	0.6793	0.9118	2.2791
无锡市	0.0486	0.0071	0.0554	0.0027	0.3593	0.5547	1.0278	2.1619
常州市	0.0654	0.0060	0.1315	0.0050	1.6668	0.3756	2.2503	2.9317
镇江市	0.1122	0.0027	0.0801	0.0032	0.1577	0.4306	0.7865	1.8294
扬州市	0.1975	0.0009	0.1482	0.0086	0.2679	0.2624	0.8855	1.7667
泰州市	0.2095	0.0018	0.1865	0.0089	0.0732	0.2933	0.7732	1.7630
南通市	0.1810	0.0040	0.2608	0.0129	0.0600	0.3172	0.8359	1.8282
徐州市	0.1783	0.0068	0.3581	0.0023	0.0470	0.2724	0.8649	1.7649
连云港市	0.2361	0.0085	0.1345	0.0177	0.4194	0.1744	0.9906	1.7656
盐城市	0.2806	0.0073	0.1527	0.0170	0.3147	0.1542	0.9265	1.7614
宿迁市	0.2174	0.0181	0.2251	0.0059	0.6262	0.0915	1.1842	1.7348
淮安市	0.2746	0.0013	0.1962	0.0057	0.0405	0.2323	0.7506	1.7498

表5 研究区2015年人均生态承载力/($\text{hm}^2/\text{人}$)

Table 5 Per capita ecological carrying capacity of Jiangsu Province in 2015

研究区 Study area	耕地 Cultivated land	草地 Grassland	林地 Forestland	水域 Water area	化石能源用地 Fossil energy land	建筑用地 Building land	总计 Total	均衡面积 Balanced area	可利用承载力 Available capacity
江苏省	0.0932	0.0035	0.0025	0.0094	0.0121	0.0040	0.1247	0.3399	0.2991
南京市	0.0339	0.0026	0.0037	0.0055	0.0275	0.0092	0.0824	0.1744	0.1534
苏州市	0.0225	0.0015	0.0005	0.0066	0.0129	0.0043	0.0483	0.0923	0.0812
无锡市	0.0331	0.0045	0.0014	0.0040	0.0205	0.0068	0.0703	0.1184	0.1042
常州市	0.0403	0.0023	0.0012	0.0052	0.0160	0.0053	0.0703	0.1366	0.1202
镇江市	0.0718	0.0047	0.0028	0.0062	0.0130	0.0043	0.1028	0.2356	0.2073
扬州市	0.1099	0.0016	0.0001	0.0175	0.0094	0.0031	0.1416	0.3482	0.3064
泰州市	0.1187	0.0015	0.0006	0.0158	0.0068	0.0023	0.1457	0.4369	0.3845
南通市	0.1100	0.0028	0.0010	0.0180	0.0084	0.0028	0.1430	0.4427	0.3896
徐州市	0.1290	0.0095	0.0037	0.0235	0.0088	0.0051	0.1796	0.4615	0.4061
连云港市	0.1365	0.0006	0.0017	0.0061	0.0138	0.0046	0.1633	0.3925	0.3454
盐城市	0.1780	0.0042	0.0076	0.0180	0.0059	0.0020	0.2157	0.6944	0.6111
宿迁市	0.1386	0.0002	0.0002	0.0086	0.0053	0.0018	0.1547	0.3985	0.3507
淮安市	0.1568	0.0020	0.0070	0.0103	0.0095	0.0032	0.1888	0.4603	0.4051

3.2 江苏省生态足迹空间特征

根据生态足迹和生态承载力模型的计算,2015年江苏省的人均生态足迹为 $1.7890 \text{ hm}^2/\text{人}$,人均可利用生态承载力为 $0.2991 \text{ hm}^2/\text{人}$,生态赤字为 $-1.4899 \text{ hm}^2/\text{人}$ 。地级市中,常州市人均生态足迹最高为 $2.9317 \text{ hm}^2/\text{人}$,宿迁市人均生态足迹最低为 $1.7348 \text{ hm}^2/\text{人}$;盐城市人均可利用生态承载力最高为 $0.6111 \text{ hm}^2/\text{人}$,苏

州市人均可利用生态承载力最低 $0.0812 \text{ hm}^2/\text{人}$;生态盈亏均表现为生态赤字,常州市人均生态赤字最高为 $-2.8115 \text{ hm}^2/\text{人}$,盐城市人均生态赤字最低为 $-1.1503 \text{ hm}^2/\text{人}$ 。

表 6 研究区 2015 年人均生态赤字/($\text{hm}^2/\text{人}$)

Table 6 Per capita ecological deficit of Jiangsu Province in 2015

研究区 Study area	生态赤字 Ecological deficit	研究区 Study area	生态赤字 Ecological deficit
江苏省	-1.4899	泰州市	-1.3785
南京市	-2.5531	南通市	-1.4386
苏州市	-2.1979	徐州市	-1.3588
无锡市	-2.0577	连云港市	-1.4202
常州市	-2.8115	盐城市	-1.1503
镇江市	-1.6221	宿迁市	-1.3841
扬州市	-1.4603	淮安市	-1.3447

人均生态足迹构成方面(图 1),江苏省以及南京市、苏州市、无锡市、镇江市、扬州市、泰州市、南通市、徐州市的人均生态足迹中所占比例最大的均为建筑用地,建筑用地的主要消费项目为电力,可见江苏省大部分地区对电力的消耗较大;其中,南京市的人均建筑用地生态足迹占到了人均生态足迹总值的 88.96%,为研究区中最高。江苏省人均化石能源用地生态足迹占比在建筑用地之后,达到 28.20%;地级市中,常州市的人均化石能源用地生态足迹占比最高,为 50.44%。连云港市、盐城市、宿迁市和淮安市的人均耕地生态足迹在人均生态足迹中占比最高,其中盐城市最高,为 46.78%。徐州市的人均草地生态足迹比例最高,为 22.06%。研究区中,水域和林地的生态足迹占比都较小。

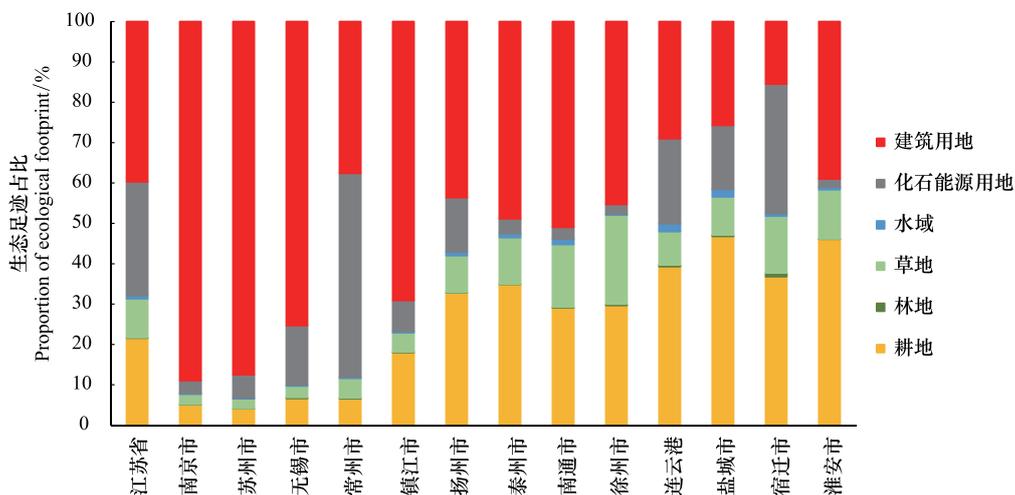


图 1 研究区 2015 年生态足迹构成

Fig.1 Composition of ecological footprint in Jiangsu Province in 2015

空间特征上(图 2),人均生态足迹和生态赤字自南向北降低,苏南地区最高,苏中地区次之,苏北地区最低;人均生态承载力自北向南降低,苏北地区最高,苏中地区次之,苏南地区最低。人均生态足迹和生态赤字的空间特征具有相对一致性,与人均生态承载力相反。与江苏省人均生态足迹相比,苏北地区 5 个市和泰州市、扬州市的人均生态足迹低于江苏省平均值,苏南地区 5 个市均高于江苏省平均值;与江苏省人均生态承载力相比,苏北和苏中地区 8 个市的人均生态承载力均高于江苏省平均值,苏南地区 5 个市均低于江苏省平均值;与江苏省人均生态赤字相比,苏北和苏中地区 8 个市的人均生态赤字均低于江苏省平均值,苏南地区 5 个市均高于江苏省平均值。

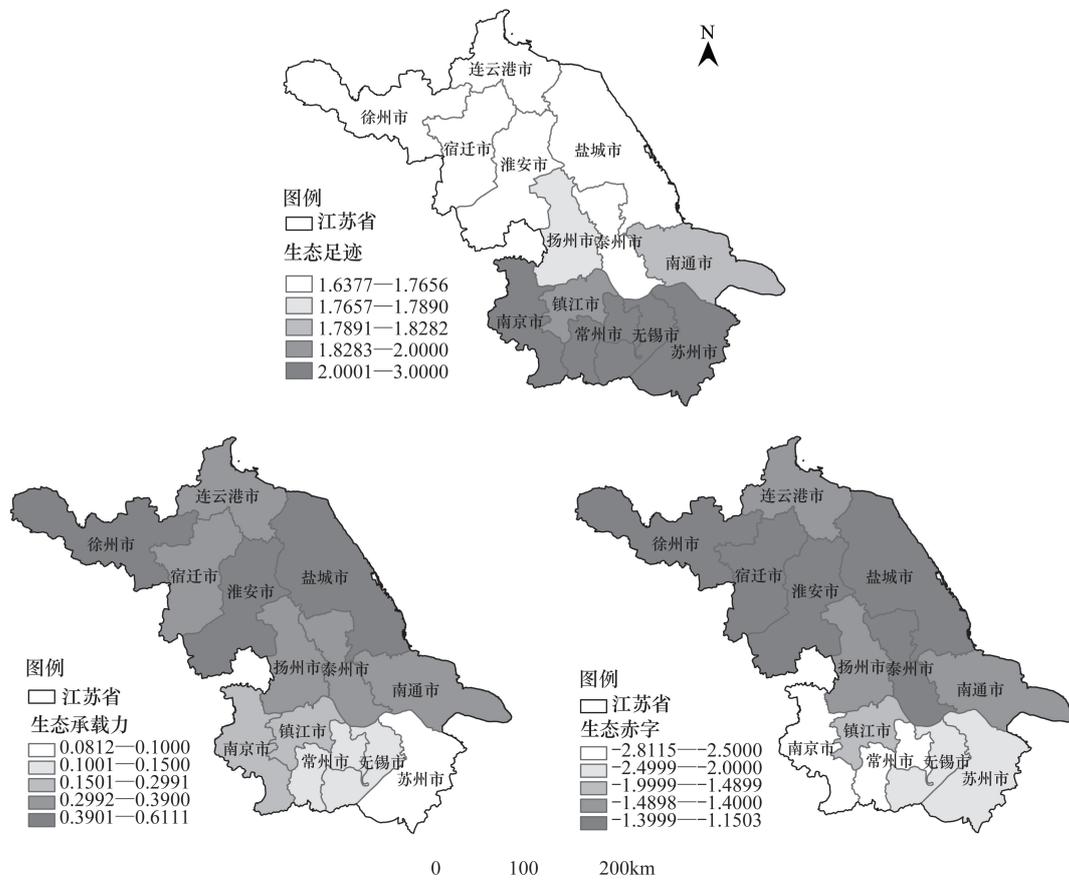


图2 研究区 2015 年人均生态足迹、生态承载力和生态赤字空间特征

Fig.2 Spatial characteristics of ecological footprint, ecological carrying capacity and ecological deficit of Jiangsu Province in 2015

3.3 江苏省万元 GDP 生态足迹测算结果

根据式 5, 计算出 2015 年江苏省及 13 个地级市的万元 GDP 生态足迹, 测算结果如表 7 所示。

表 7 研究区 2015 年万元 GDP 生态足迹/($\text{hm}^2/\text{万元}$)

Table 7 Ten thousand yuan GDP ecological footprint of Jiangsu Province in 2015

研究区 Study area	万元 GDP 生态足迹 Ten thousand yuan GDP ecological footprint	研究区 Study area	万元 GDP 生态足迹 Ten thousand yuan GDP ecological footprint
江苏省	0.2033	泰州市	0.2218
南京市	0.2290	南通市	0.2170
苏州市	0.1667	徐州市	0.2869
无锡市	0.1651	连云港市	0.3647
常州市	0.2612	盐城市	0.3021
镇江市	0.1658	宿迁市	0.3956
扬州市	0.1971	淮安市	0.3099

由测算结果可知, 江苏省整体万元 GDP 生态足迹为 $0.2033 \text{ hm}^2/\text{万元}$, 无锡市、镇江市、苏州市和扬州市的万元 GDP 生态足迹低于江苏省值, 表明这 4 个城市的资源利用效益高于全省平均水平, 而其他城市资源利用效益相对较低。

图 3 为研究区人均 GDP 与万元 GDP 生态足迹趋势对比图。由图 3 可知, 万元 GDP 生态足迹整体上与人均 GDP 成反比。苏南地区人均 GDP 均高于江苏省平均值, 而其中人均 GDP 较高的无锡市、镇江市和苏州市, 万元 GDP 生态足迹低于江苏省平均值; 苏北地区 5 个地级市人均 GDP 较低, 但是万元 GDP 生态足迹均高

于苏中和苏南地区。

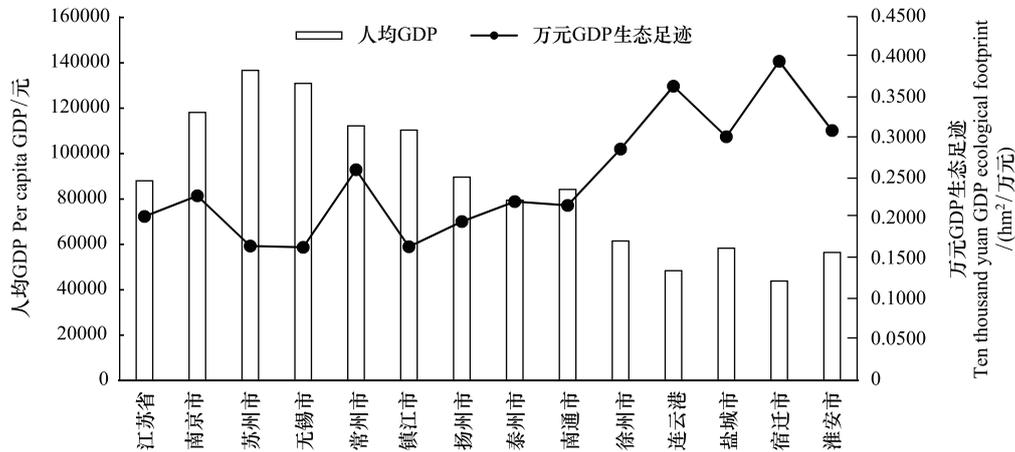


图3 研究区 2015 年人均 GDP、万元 GDP 生态足迹

Fig.3 Per capita GDP and ten thousand yuan GDP ecological footprint of Jiangsu Province in 2015

上述结果表明,江苏省城市化进程对自然资源的消耗量远大于自然资源的供给量,对生态环境造成较大的压力,影响生态经济的可持续发展能力。人均生态足迹构成上,江苏省和苏中、苏南地区人均生态足迹中,人均建筑用地生态足迹和化石能源用地生态足迹占较大比重,即电力和能源消耗较多;苏北地区人均生态足迹贡献大的是人均草地生态足迹和耕地生态足迹,即粮食和畜牧产品的消耗较大。人均生态足迹空间分布上,人均生态足迹和生态赤字在空间上的分布一致,呈现出南高北低的特征,而人均生态承载力则相反,呈现北高南低的分布特征。由此可见,人均生态足迹的空间分布与地区人均地区生产总值分布呈正相关;人均地区生产总值较高的苏南地区,人均生态足迹也相对较高,且均高于江苏省平均水平;人均地区生产总值低于江苏省平均水平的苏北地区,人均生态足迹也低于江苏省平均值。万元 GDP 生态足迹测算结果显示,苏南地区万元 GDP 生态足迹值低,表明苏南地区资源利用效益较高,资源利用方式较为集中;苏北地区万元 GDP 生态足迹较高,说明资源利用效益低。

4 结论与建议

基于以上分析判断,本研究主要结论和政策建议如下:

第一,实证结果显示,2015 年江苏省人均生态足迹为 $1.7890 \text{ hm}^2/\text{人}$,人均可利用生态承载力为 $0.2991 \text{ hm}^2/\text{人}$,生态赤字为 $-1.4899 \text{ hm}^2/\text{人}$,万元 GDP 生态足迹为 $0.2033 \text{ hm}^2/\text{万元}$ 。地级市中,常州市人均生态足迹最高为 $2.9317 \text{ hm}^2/\text{人}$,宿迁市人均生态足迹最低为 $1.7348 \text{ hm}^2/\text{人}$;盐城市人均可利用生态承载力最高为 $0.6111 \text{ hm}^2/\text{人}$,苏州市人均可利用生态承载力最低为 $0.0812 \text{ hm}^2/\text{人}$;常州市人均生态赤字最高为 $-2.8115 \text{ hm}^2/\text{人}$,盐城市人均生态赤字最低为 $-1.1503 \text{ hm}^2/\text{人}$;宿迁市万元 GDP 生态足迹最高为 $0.3956 \text{ hm}^2/\text{万元}$,无锡市万元 GDP 生态足迹最低为 $0.1651 \text{ hm}^2/\text{万元}$ 。苏南地区人类活动对自然资源的需求已经远超出生态环境的承载力,但是资源利用方式较为集中高效;苏北地区人类活动需求对生态承载力压力较小,但是资源利用效益低,也会对生态经济的可持续发展造成影响。

第二,空间特征发现,江苏省和苏南、苏中地区人均建筑用地生态足迹和化石能源用地生态足迹所占比例较大,苏北地区人均耕地生态足迹和草地生态足迹所占比例较大;人均生态足迹和生态赤字在空间上的分布一致,呈现出南高北低的特征,而人均生态承载力则相反,呈现北高南低分布特征;万元 GDP 生态足迹在空间上分布呈北高南低的特征,总体上与人均地区生产总值成反比。

第三,政策调控建议,江苏省应当协调社会经济与生态环境共同发展,加大生态文明建设投入,建立合理的生态足迹调控机制,提高生态承载力,控制并降低生态赤字;统筹苏北、苏中、苏南地区的经济和生态均衡发展。

展,转变苏北地区资源利用方式,提高资源利用效益,促进生态经济可持续发展,控制、减少苏南地区城市建设造成的环境问题,从而扭转生态足迹和生态赤字过高的严峻态势。另外,要尽快落实以及完善生态环境保护制度体系,加快生态红线的划定和协调,坚持可持续发展之路,从而保障我国生态安全。

参考文献 (References):

- [1] Chuai X W, Huang X J, Wu C Y, Li J B, Lu Q L, Qi X X, Zhang M, Zuo T H, Lu J Y. Land use and ecosystems services value changes and ecological land management in coastal Jiangsu, China. *Habitat International*, 2016, 57: 164-174.
- [2] Rees W E. Ecological footprints and appropriated carrying capacity: what urban economics leaves out. *Environment and Urbanization*, 1992, 4(2): 121-130.
- [3] Wackernagel M. Ecological footprint and appropriated carrying capacity: a tool for planning toward sustainability[D]. Vancouver, Canada: The University of British Columbia, 1994.
- [4] 吕雅, 王让会, 朱旻. 基于多元数据的江苏省生态足迹特征分析. *江苏农业科学*, 2014, 42(7): 345-348.
- [5] 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.
- [6] 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.
- [7] 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.
- [8] Peng W J, Wang X M, Li X K, He C C. Sustainability evaluation based on the emergy ecological footprint method: A case study of Qingdao, China, from 2004 to 2014. *Ecological Indicators*, 2018, 85: 1249-1261.
- [9] 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.
- [10] 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.
- [11] 黄宝荣, 崔书红, 李颖明. 中国 2000—2010 年生态足迹变化特征及影响因素. *环境科学*, 2016, 37(2): 420-426.
- [12] 向秀容, 潘韬, 吴绍洪, 刘卫东, 马丽, 王晓峰, 尹云鹤, 李静. 基于生态足迹的天山北坡经济带生态承载力评价与预测. *地理研究*, 2016, 35(5): 875-884.
- [13] 梅艳, 何蓓蓓, 刘友兆, 徐梦洁. 江苏省动态生态足迹的测度和分析. *贵州农业科学*, 2008, 36(5): 47-50.
- [14] 陈成忠, 林振山. 中国人均生态足迹与生物承载力变化的 EMD 分析及情景预测. *生态学报*, 2007, 27(12): 5291-5299.
- [15] 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): 295-298.
- [16] 邱寿丰, 朱远. 基于国家生态足迹账户计算方法的福建省生态足迹研究. *生态学报*, 2012, 32(22): 7124-7134.
- [17] 鲁凤, 陶菲, 钞振华, 胡秀芳. 基于净初级生产力的省公顷生态足迹模型参数的计算——以江苏省为例. *地理与地理信息科学*, 2016, 32(2): 83-88.
- [18] Wiedmann T, Lenzen M. On the conversion between local and global hectares in ecological footprint analysis. *Ecological Economics*, 2007, 60(4): 673-677.
- [19] 陈春锋, 王宏燕, 肖笃宁, 王大庆. 基于传统生态足迹方法和能值生态足迹方法的黑龙江省可持续发展状态比较. *应用生态学报*, 2008, 19(11): 2544-2549.
- [20] 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.
- [21] 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.
- [22] 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.
- [23] 马维兢, 刘斌, 杨德伟, 郭青海. 基于三维生态足迹模型的流域自然资本动态评估——以福建省九龙江流域为例. *资源科学*, 2017, 39(5): 871-880.
- [24] 武翠芳, 徐中民. 黑河流域生态足迹空间差异分析. *干旱区地理*, 2008, 31(6): 799-806.
- [25] 李一琼, 刘艳芳, 唐旭. 广西生态足迹及影响因子的空间差异分析. *测绘科学*, 2016, 41(11): 72-78.
- [26] 潘洪义, 朱晚秋, 崔绿叶, 冯茂秋, 朱芳. 成都市人均生态足迹和人均生态承载力空间分布差异. *生态学报*, 2017, 37(19): 6335-6345.
- [27] 周朕, 蒙吉军. 基于改进生态足迹模型与生态重要性识别的最小生态用地优化——黑河中游案例研究. *干旱区地理*, 2016, 39(3): 513-520.
- [28] 杨开忠, 杨咏, 陈洁. 生态足迹分析理论与方法. *地球科学进展*, 2000, 15(6): 630-636.
- [29] 李利锋, 成升魁. 生态占用——衡量可持续发展的新指标. *自然资源学报*, 2000, 15(4): 375-382.
- [30] 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.
- [31] 金丹, 卞正富. 基于能值的生态足迹模型及其在资源型城市的应用. *生态学报*, 2010, 30(7): 1725-1733.
- [32] 徐中民, 张志强, 程国栋, 陈东景. 中国 1999 年生态足迹计算与发展能力分析. *应用生态学报*, 2003, 14(2): 280-285.
- [33] 杨屹, 梁砺波, 张景乾. 关中城市群生态足迹演变趋势及公平性评价. *自然资源学报*, 2017, 32(8): 1360-1373.