

DOI: 10.5846/stxb202010282764

官冬杰,姜亚楠,严聆云,周健,和秀娟,殷博灵,周李磊.基于生态足迹视角的长江流域生态补偿额度测算.生态学报,2022,42(20):8169-8183.

Guan D J, Jiang Y N, Yan L Y, Zhou J, He X J, Yin B L, Zhou L L. Calculation of ecological compensation amount in Yangtze River Basin based on ecological footprint. Acta Ecologica Sinica, 2022, 42(20): 8169-8183.

基于生态足迹视角的长江流域生态补偿额度测算

官冬杰^{1,2,*}, 姜亚楠^{1,3}, 严聆云⁴, 周 健¹, 和秀娟¹, 殷博灵¹, 周李磊⁵

1 重庆交通大学建筑与城市规划学院, 重庆 400074

2 省部共建山区桥梁及隧道工程国家重点实验室, 重庆 400074

3 重庆市地质矿产勘查开发局 208 水文地质工程地质队(重庆市地质灾害防治工程勘查设计院), 重庆 400700

4 中国科学院重庆绿色智能技术研究院, 重庆 400714

5 重庆交通大学土木工程学院, 重庆 400074

摘要:随着我国城市化进程的加快,导致的生态问题日益严重,发展与保护的矛盾日渐突出,如何客观定量地对生态环境受到破坏的区域进行补偿,发展与环境健康并行是生态建设中面临的重要任务之一。以长江流域的十九个省级行政区作为研究对象,基于“省公顷”模型,对均衡因子及产量因子进行修正,计算生态足迹及生态承载力,利用 GIS 平台进行并对其进行空间分析;结合生态系统服务价值,建立了动态化长江流域的生态补偿标准模型;对长江流域各行政区生态补偿额度进行测算,并基于流域尺度、城市群尺度、省级尺度进行差异化分析。研究表明:(1)在 2015—2017 年,长江流域的生态足迹与生态承载力无明显变化,三年内基本持平。长江流域省级行政区的生态安全指数均大于 1,表明整个流域处于不安全状态,需要对其进行补偿。(2)对于长江流域整体而言,生态补偿额度三年平均为 1169.11 亿元。(3)流域尺度上,上游、中游、下游的生态补偿额度呈现逐渐升高的趋势;城市群尺度上,成渝城市群最低,长江三角洲城市群最高;省级尺度上,上海最高,西藏最低。本文通过生态足迹及生态承载力计算得到的生态安全指数,可对生态环境所处的状态进行定量补偿及分析,并对生态补偿区域的确定提供指导性建议。

关键词:长江流域;生态补偿;生态足迹;生态承载力

Calculation of ecological compensation amount in Yangtze River Basin based on ecological footprint

GUAN Dongjie^{1,2,*}, JIANG Yanan^{1,3}, YAN Lingyun⁴, ZHOU Jian¹, HE Xiujuan¹, YIN Boling¹, ZHOU Lilei⁵

1 College of Architecture and Urban Planning, Chongqing Jiaotong University, Chongqing 400074, China

2 State Key Laboratory of Coal Mine Disaster Dynamics and Control, Chongqing Jiaotong University, Chongqing 400074, China

3 No.208 Hydrogeology and Engineering Geology Team of Chongqing Bureau of Geology and Minerals Exploration (Chongqing Institute of Geological Hazard Prevention Engineering Exploration and Design), Chongqing 400700, China

4 Chongqing Institute of Green and Intelligent Technology, Chinese Academy of Sciences, Chongqing 400714, China

5 School of Civil Engineering, Chongqing Jiaotong University, Chongqing 400074, China

Abstract: With the acceleration of China's urbanization process, the ecological problems are becoming more and more serious, and the contradiction between development and protection is becoming more and more prominent. How to objectively and quantitatively compensate the damaged areas, and balance development and environmental health is one of the important tasks in the ecological construction. This paper took 19 provincially administrative regions in the Yangtze River

基金项目:国家自然科学基金面上项目(42171298);教育部人文社科一般项目(20YJA790016);国家社科基金后期资助项目(20FJYB035)

收稿日期:2020-10-28; **网络出版日期:**2022-06-15

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: guandongjie_2000@163.com

Basin as the research object, based on the “provincial hectare” model, modified the equilibrium factor and yield factor, calculated the ecological footprint and ecological carrying capacity, and made spatial analysis by GIS. At the same time, combined with ecosystem service value, a dynamic ecological compensation standard model of the Yangtze River Basin was established. The amount of ecological compensation in each administrative region was calculated, and the differentiation analysis was carried out at the watershed scale, urban agglomeration scale and provincial scale. The results show that: (1) there was no significant change in the ecological footprint and ecological carrying capacity of the Yangtze River Basin from 2015 to 2017. The ecological security indexes of provincial administrative regions are greater than 1, indicating that the whole basin is in an unsafe state and needs to be compensated. (2) For the whole Yangtze River Basin, the ecological compensation amount averaged 116.91 billion CNY in three years. (3) On the watershed scale, the ecological compensation amount in the upper, middle and lower reaches shows a gradually increasing trend. On the scale of urban agglomeration, the ecological compensation amount of Chengdu-Chongqing urban agglomeration is the lowest and the Yangtze River Delta urban agglomeration is the highest. On the provincial scale, the ecological compensation amount of Shanghai is the highest and Tibet is the lowest. The ecological security index calculated by ecological footprint and ecological carrying capacity can quantitatively compensate and analyze the state of ecological environment, and provide guiding suggestions for the determination of ecological compensation area.

Key Words: Yangtze River Basin; ecological compensation; ecological footprint; ecological carrying capacity

随着我国工业化与城镇化的不断推进,伴随而来的生态问题日益严重,影响着社会经济的可持续性发展^[1]。我国以水资源为媒介的流域作为重要的生态系统服务和优势发展战略区域,近年来不断凸显以水资源价值为核心的生态产值和生态系统服务价值时空不平衡问题^[2]。在流域生态补偿机制的研究中,由于不同城市的地理区位、自然资源禀赋和社会经济结构等要素不同,单元区域的研究具有显著的差异^[3-4],长江流域作为中国典型的流域地区,一方面面临的生态问题不容小觑,另一方面由于地跨中国东部、中部和西部三大经济区,流经地域多且各地生态系统服务功能、经济发展水平差异较大,致使对生态环境的治理能力存在明显差距^[5-6]。

补偿标准核算是量化生态补偿的核心^[7-8],其中生态足迹方法是在特定区域范围内,从需求层面确定人类经济活动对自然资源的消耗强度(生态足迹),从供给层面求取生态环境能够提供的资源支持量(生态承载力)^[9-11]。生态足迹是一个研究可持续消费的指标^[12-15]。基于生态足迹的生态补偿研究,能够结合区域生态环境实际状况和经济发展的实际需要,衡量自然供给和生态服务需求的地域性差异,为多尺度、多跨度的生态区域可持续性发展提供补偿依据^[16-18]。1992年 Rees^[19]正式提出了生态足迹的概念,首次将生态足迹法用于评估旅游生态环境的可持续性,并在全球和国家尺度上进行了生态足迹的核算;Jennie Moor^[20]利用生态足迹模型以温哥华都市区为例,搭建了城市代谢综合框架,演示了自下而上的生态足迹分析应用,衡量了当地生产材料和能量的消耗,并与全球人均承载力结合,促进城市资源管理和可持续发展。Meidid Kissinger^[21]为深化农业、环境与经济之间的关系研究,建立了农户生态平衡账户,该账户用改进量化后的生态足迹与生物承载力相较,从而权衡作物的正负利润效应。生态足迹作为一种资源消耗测算指标,在生态补偿的研究中运用较少,需要进一步科学利用生态足迹、生态承载力表征的相关生态环境指标反应环境基质的盈亏程度,完善生态补偿机制,达到合理规划生态资源基础的目的^[22-25]。长江流域作为典型的消耗型内陆环境,如何可持续平衡资源消耗与生态供给成为研究热点。卢海新等^[26]从长江流域表征考虑经济补偿能力的修正系数,建立区域水资源的生态足迹,结合省域间生态系统服务的差异,构建水资源生态补偿模型,测算结果对区域间明确补偿关系,联动经济发展起到了协调作用;肖建红等^[27]依据修建大型水电工程对河流生态系统服务的影响,构建了大型水电工程的生态供需足迹模型,并依据正负向影响制定生态补偿标准,明确补偿主体和补偿额度;熊兴等^[28]通过生态足迹和生态承载力方法理论,构建生态压力、生态赤字与生态投入的概念,确立补偿标准与

总补偿额度,探讨补偿机制与生态安全的协同关系。围绕人类福祉与生态建设大背景,以自然资源消耗程度与环境承载能力的共生关系为研究基础的探讨,未来将成为研究热点,能够更好地为地区科学规划、可持续生态投入产出做出指导建议。

本文将生态足迹的思想引入到长江流域生态补偿的研究中,构建生态补偿标准量化模型,对长江流域生态补偿额度进行测算,并进行等级划分,从流域尺度、城市群尺度和城市规模尺度对生态补偿额度进行差异化分析,期望可实现生态补偿标准更加精确的量化与评估,对长江流域的生态补偿及其相关研究具有重要意义。

1 研究区域

长江流域地理位置介于 $90^{\circ}33'E-122^{\circ}25'E$, $24^{\circ}30'N-35^{\circ}45'N$ 之间,东西横跨 3000km 以上,南北跨度除江源及长江三角洲地区以外,均达到 1000km 左右。长江流域是世界第三大流域,流域总面积达 180 万 km^2 ,占据中国国土面积的 18.8%。包括上海、江苏、浙江、安徽、福建、江西、河南、湖北、湖南、广东、广西、重庆、四川、贵州、云南、西藏、陕西、甘肃、青海共 19 个行政区,据《2020 年中国统计年鉴》统计,长江流域 2019 年年末人口总数约 9.78 亿。属亚热带季风气候,地貌呈现出多级阶梯性,在我国的经济发展中发挥着至关重要的作用。近 50 年来,长江流域中尤其是中下游地区及四川盆地,经济发展迅速,逐渐形成了以上海、武汉、成都—重庆为中心的长江三角洲城市群、长江中游城市群、成渝城市群,构成了我国经济发展的重要经济区域。

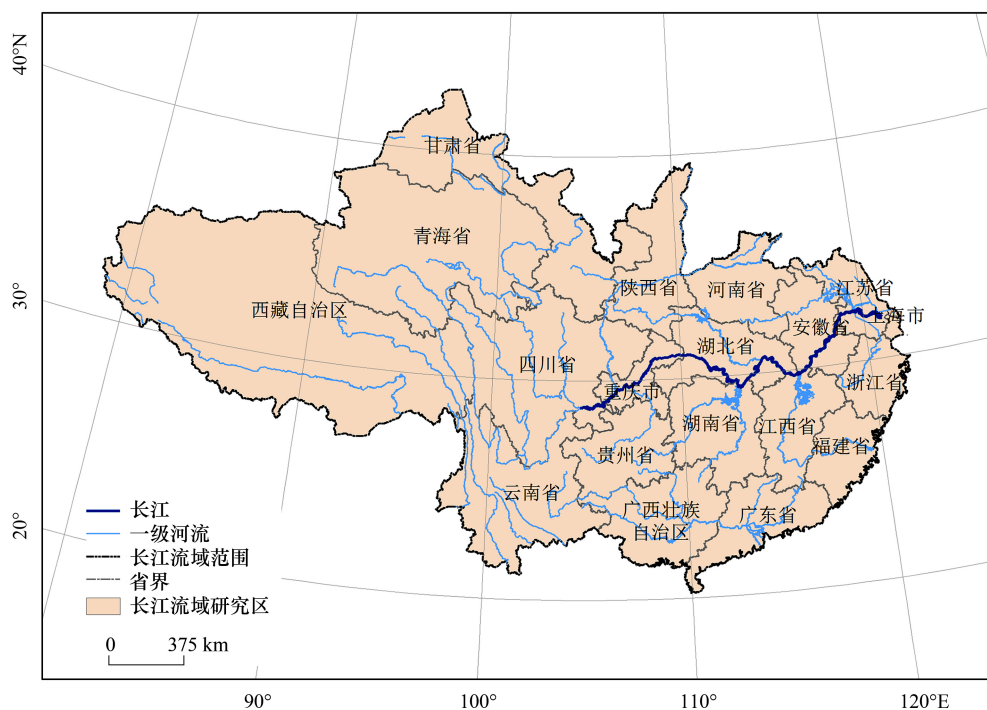


图 1 长江流域

Fig.1 The Yangtze River Basin

2 研究方法

2.1 生态足迹模型构建

生态足迹是指能够提供或消纳废物的具有一定生产能力的生物生产性土地面积^[29]。将不同的商品及能源按照一定的比例折算成相应的生物生产性土地面积,即建立了生态足迹账户^[17]。如公式(1)所示。

$$EF = N \times ef = N \times r_j \times \sum_{i=1}^n (aa_i) = N \times r_j \times \sum_{i=1}^n \frac{C_i}{EP_i} \quad (1)$$

式中, EF 为生态足迹(hm^2); N 为人口数量; ef 为人均生态足迹; aa_i 表示第 i 类商品人均生物生产土地面积(hm^2); C_i 第 i 类商品的人均消费量(kg); EP_i 表示第 i 类商品的全球平均生产量(kg/hm^2); r_j 为第 j 种生物生产性土地的均衡因子。

生物生产性土地包括以下 6 类:耕地、林地、草地、水域、建筑用地和化石能源用地,即生态足迹账户包含了生物产品消费账户和能源消耗账户。为使生态足迹的计算结果更加符合实际,需要对生态足迹模型进行修正。本文基于“省公顷”模型^[30]对长江流域生态足迹模型中的均衡因子和产量因子进行修正。均衡因子的计算公式如(2)所示。

$$q_i = \frac{\bar{P}_i}{\bar{P}} = \frac{Q_i}{S_i} / \frac{\sum Q_i}{\sum S_i} = \frac{\sum_k r_k^i \times p_k^i}{S_i} / \frac{\sum_i \sum_k r_k^i \times p_k^i}{\sum_i S_i} \quad (2)$$

式中, q_i 表示省域内第 i 类生物生产性土地的均衡因子; $\bar{P}_i$ 为第 i 种生物生产性土地的平均生产力(J/hm^2); $\bar{P}$ 为全部生物生产性土地的平均生产力(J/hm^2); Q_i 表示第 i 类生物生产性土地的总产出(J); p_k^i 表示第 i 类生物生产性土地的第 k 种产品产量(kg); r_k^i 表示第 i 类生物生产性土地的第 k 种产品的单位热值(J/kg)。

耕地、林地、草地、水域的均衡因子按照(表 1)进行计算,其中生物产品的热值数据来源于《农业技术经济手册(修订本)》;由于建筑用地基本占用耕地,因此建筑用地的均衡因子等于耕地的均衡因子;化石能源用地的均衡因子计算,按一定的比例将其折算成林地与草地^[31]。

表 1 长江流域各生物生产性土地均衡因子

Table 1 Balance factors of productive land in Yangtze River Basin

年份 Year	耕地 Cultivated land	林地 Woodland	草地 Grassland	水域 Waters	建筑用地 Construction land	化石能源用地 Fossil energy land
2015	3.5860	0.1788	0.3220	0.6987	3.5860	0.2035
2016	3.5552	0.2066	0.3127	0.7263	3.5552	0.2249
2017	3.5408	0.2194	0.3086	0.7381	3.5408	0.2348

2.2 生态承载力模型构建

生态承载力是指某区域能够提供的生物生产性用地总面积^[32]。计算公式如(3)所示。

$$EC = N \times ec = N \times \sum_{i=1}^n S_i \times r_i \times y_i \quad (3)$$

式中, EC 为生态承载力(hm^2); ec 为人均生态承载力; S_i 为第 i 类生物生产性土地面积(hm^2); r_i 为第 i 种生物生产性土地的均衡因子; y_i 为第 i 种生物生产性土地的产量因子。

省公顷模型中,产量因子=各区域某种生物生产性土地的平均生产力/全研究区所有某种生物生产性土地的平均生物生产力。同样,通过热值来对其进行表示所得到的计算公式如(4)所示。

$$y_i = \frac{\bar{P}_i^j}{\bar{P}_i} = \frac{Q_i^j}{S_i^j} / \frac{Q_i}{S_i} = \frac{\sum_k r_k^i \times (p_k^i)^j}{S_i^j} / \frac{\sum_k r_k^i \times p_k^i}{S_i} \quad (4)$$

式中, y_i 表示 j 区域第 i 类生物生产性土地的产量因子; $\bar{P}_i^j$ 表示 j 区域第 i 类生物生产性土地的平均生产力(J/hm^2); Q_i^j 表示 j 区域第 i 类生物生产性土地的总产出(J); S_i^j 表示 j 区域第 i 类生物生产性土地面积; $(p_k^i)^j$ 表示 j 区域第 i 类生物生产性土地第 k 种生物产品的产量。相同参数的含义如上。

耕地、林地、草地、水域的产量因子按照(表 2)进行计算;建筑用地的产量因子等同于耕地的产量因子;化石能源用地的产量因子为 0^[33]。2015—2017 年的产量因子平均值如表 2 所示。

表 2 2015—2017 年长江流域年平均产量因子

Table 2 Land balance factors in the Yangtze River Basin, 2015—2017

用地类型 Land types	上海	江苏	浙江	安徽	福建	江西	河南	湖北	湖南	广东
耕地 Cultivated land	0.7774	1.3489	0.7245	1.2276	0.7412	1.2379	1.6414	1.1909	1.3446	1.0140
林地 Woodland	37.1188	8.7882	0.6114	2.7788	1.5796	0.8885	2.0852	0.8397	1.0459	1.4212
草地 Grassland	255.5450	95.2454	19.5413	14.2991	3.0760	14.2359	27.6954	21.6134	25.2723	14.2182
水域 Waters	0.7585	1.4069	6.8607	1.1870	15.0586	1.4251	1.0553	1.4678	1.3894	4.1803
建筑用地 Construction land	0.7774	1.3489	0.7245	1.2276	0.7412	1.2379	1.6414	1.1909	1.3446	1.0140
用地类型 Land types	广西	重庆	四川	贵州	云南	西藏	陕西	甘肃	青海	
耕地 Cultivated land	1.3488	0.6723	0.7397	0.6355	0.7529	0.1986	0.4881	0.4028	0.3398	
林地 Woodland	3.2406	0.8084	0.3859	0.4544	0.3643	0.0076	0.2583	0.16000	0.0087	
草地 Grassland	4.8614	5.4690	1.2539	2.1589	1.4478	0.0088	0.6379	0.2166	0.0284	
水域 Waters	3.3029	1.7983	1.3283	2.0474	0.7901	0	0.3801	0.018	0.0015	
建筑用地 Construction land	1.3488	0.6723	0.7397	0.6355	0.7529	0.1986	0.4881	0.4028	0.3398	

2.3 生态安全指数构建

生态安全指数是生态足迹与生态承载力的比值,用来量化评估生态安全的指标^[34]。它明确了生态补偿的方向,即当生态环境处于不安全状态时,需要对其区域进行补偿。具体公式如(5)所示。

$$ES = \frac{EF}{EC} \quad (5)$$

式中, ES 表示生态安全指数。当 $ES > 1$ 时,表明生态足迹大于生态承载力,生态环境处于赤字即不安全状态;当 $ES < 1$ 时,表明生态足迹小于生态承载力,生态环境处于盈余即安全状态。

2.4 生态补偿额度测算模型构建

在生态足迹的基础上结合生态系统服务价值,可构建生态补偿模型^[33]。

$$EV = \sum ev_i = E_i \times R_i \times K_i \quad (6)$$

式中, EV 为生态补偿额度; ev_i 是第 i 种生物生产性土地的生态补偿额度; E_i 为第 i 种生物生产性土地的生态足迹系数; R_i 为第 i 种生物生产性土地的生态系统服务价值系数; K_i 为第 i 种生物生产性土地的生态补偿系数。

生态系统服务价值可将生态环境的安全性量化成补偿的具体金额, ESV_i 为第 i 种生物生产性土地的生态系统服务价值。

$$ev_i = |EC_i - EF_i| \times \frac{ESV_i}{S_i} \times K_i \quad (7)$$

由于生态系统服务价值与实际经济发展水平存在较大的差异,需对 K_i 进行调整^[34]。利用各地区的生产总值 GDP 进行量化,如公式(8), ε 为恩格尔系数。结果如表 3。

$$K_i = \frac{e^\varepsilon \times GDP_i}{[(e^\varepsilon + 1) \times GDP]} \quad (8)$$

生态补偿的实质为对生态赤字区的面积进行补偿,生态系统服务价值作为联系生态足迹与生态补偿之间的桥梁,将生态赤字区面积量化为补偿的具体金额。本文采用谢高地^[35]估算的生态系统服务价值作为生物生产性土地的生态系统服务价值系数 R_i 的值(如表 4)。

3 结果分析

3.1 长江流域生态足迹分析

本文将所有能源指标均转换成标准煤,求取化石能源的生态足迹。将生产品的生态足迹与化石能源的生

态足迹进行汇总,得到长江流域各行政区人均生态足迹(图2)。

表3 2015—2017年长江流域各行政区生态补偿系数

Table 3 Ecological compensation coefficient of each administrative region in the Yangtze River Basin, 2015—2017

年份 Year	上海	江苏	浙江	安徽	福建	江西	河南	湖北	湖南	广东
2015	0.0517	0.1443	0.0882	0.0453	0.0535	0.0344	0.0761	0.0608	0.0595	0.1498
2016	0.0526	0.1444	0.0882	0.0455	0.0538	0.0345	0.0755	0.0609	0.0589	0.1509
2017	0.0520	0.1457	0.0879	0.0459	0.0546	0.0340	0.0756	0.0602	0.0575	0.1522
年份 Year	广西	重庆	四川	贵州	云南	西藏	陕西	甘肃	青海	
2015	0.0346	0.0323	0.0618	0.0216	0.0280	0.0021	0.0371	0.0140	0.0050	
2016	0.0342	0.0331	0.0614	0.0220	0.0276	0.0021	0.0362	0.0134	0.0048	
2017	0.0314	0.0330	0.0628	0.0230	0.0278	0.0022	0.0372	0.0127	0.0045	

表4 生态系统服务价值/(元/hm²)

Table 4 Ecosystem service value

	耕地 Cultivated land	林地 Woodland	草地 Grassland	水域 Waters	建筑用地 Construction land	化石能源用地 Fossil energy land
生态系统服务价值 Ecosystem service value	6114.3	19334	6406.5	40676.4	6114.3	19334

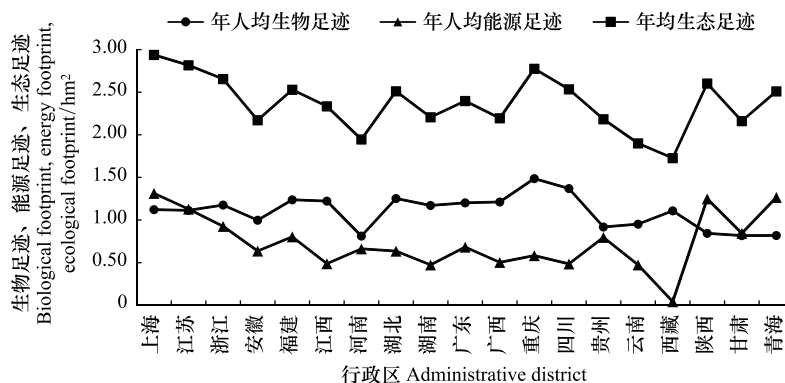


图2 长江流域人均生物足迹、人均能源足迹和人均生态足迹对比

Fig.2 Comparison of per capita biological footprint, per capita energy footprint and per capita ecological footprint in the Yangtze River Basin

2015—2017年间,长江流域各行政区的生态足迹变化微小,其中西藏最小,上海最大。3年内,长江流域的平均生态足迹分别为 2.39hm^2 、 2.36hm^2 、 2.37hm^2 ,呈现出先下降又小幅上升的趋势,生态足迹均大于年平均值的行政区均处于沿海地区。陕西与青海人均能源足迹消耗较大,分别达 1.25hm^2 和 1.27hm^2 ,仅次于沿海地区最高的上海(图2)。生物足迹、能源足迹与生态足迹的变化趋势基本一致,除上海、陕西和青海以外,其余各行政区的人均生物足迹均高于人均能源足迹。对于生物足迹,重庆与四川的生物足迹是整个长江流域里最高的,河南的人均生物足迹最小,为 0.81hm^2 。

利用 ArcGIS 空间分析技术,采用自然断点法的方式,将长江流域的人均生态足迹划分为5个等级(图3),可知由于经济资源的不均衡性,长江流域的生态足迹整体上呈现出东大西小的空间格局。2015—2017年间,长江流域的人均生态足迹总体变化不大,说明长江流域在3年时间里的发展基本稳定。

3.2 长江流域生态承载力分析

通过对均衡因子及产量因子的修正,得到2015—2017年长江流域的人均生态承载力(表5)。河南的年

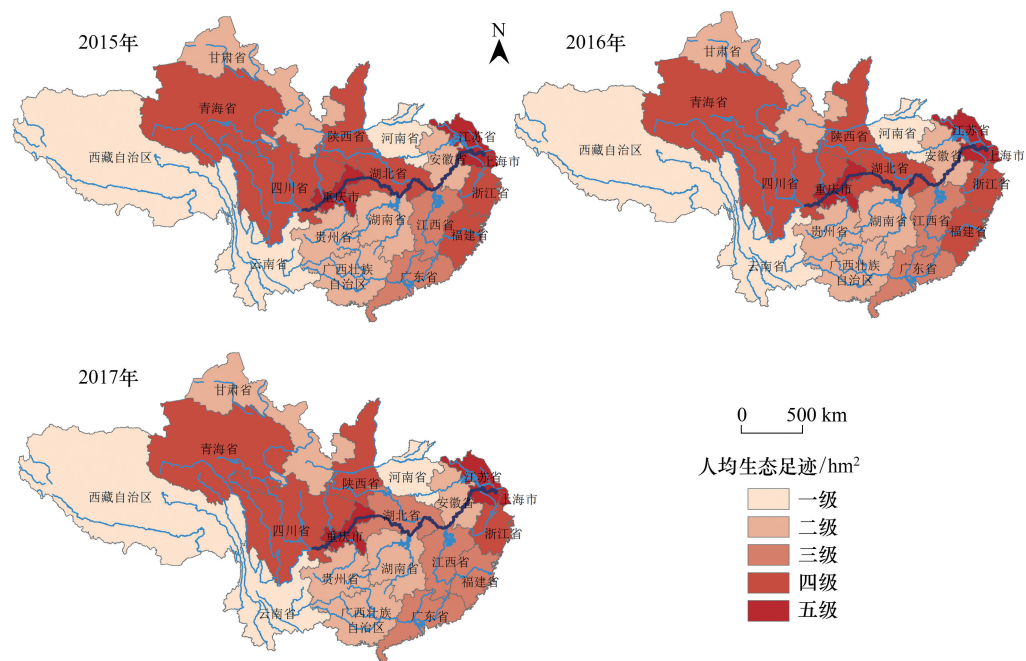


图 3 2015—2017 年长江流域人均生态足迹空间分布

Fig.3 Spatial distribution of per capita ecological footprint in the Yangtze River Basin, 2015—2017

均生态承载力最大为 0.87hm²,上海的年平均生态承载力最小为 0.09hm²。整个长江流域的年平均生态足迹为 0.47hm²。总体来看,长江流域不同生物生产性土地的生态承载力大小排序均为:耕地>林地>建筑用地>水域>草地,且耕地的生态承载力远大于其他类型的生物生产性土地(图 4)。

表 5 2015—2017 年长江流域各行政区人均生态承载力/hm²

Table 5 Per capita ecological carrying capacity of each administrative region in the Yangtze River Basin, 2015—2017										
年份 Year	上海	江苏	浙江	安徽	福建	江西	河南	湖北	湖南	广东
2015	0.0959	0.584	0.2251	0.7828	0.3193	0.6087	0.8749	0.6845	0.5967	0.2563
2016	0.0867	0.5742	0.2073	0.7348	0.3200	0.5951	0.8744	0.6588	0.5894	0.2549
2017	0.0802	0.5701	0.2058	0.7256	0.3141	0.5889	0.8655	0.6573	0.5914	0.2582
年份 Year	广西	重庆	四川	贵州	云南	西藏	陕西	甘肃	青海	
2015	0.7718	0.3977	0.4992	0.3925	0.5183	0.1624	0.3848	0.4379	0.2684	
2016	0.8106	0.3999	0.5019	0.4124	0.5162	0.1881	0.3973	0.4237	0.2653	
2017	0.8246	0.3856	0.4957	0.4128	0.5266	0.1823	0.3765	0.4145	0.2494	

为了明确长江流域生态承载力的地域间差异,利用 ArcGIS 空间分析技术,采用自然断点法的方式,将长江流域的人均生态承载力划分为 5 个等级(图 5),可知空间分布呈现出中部高,东、西部低的格局。东部地区经济发达,空间上占用了大量的生物生产性土地,建筑用地扩张其他生物生产性土地面积减少,造成生态承载力较低。西部地区受气候和地理因素影响,人均生态承载力低主要体现在西藏和青海,该区域的未利用土地广阔,生态脆弱,导致其生态承载力仅处于一级状态。2015—2017 年间,长江流域的人均生态承载力分别为 0.47hm²、0.46hm²、0.46hm²,呈现出逐渐下降的趋势。

3.3 长江流域生态安全分析

对长江流域各行政区的生态环境安全性进行评估可知(表 6),长江流域全部行政区生态安全指数均大

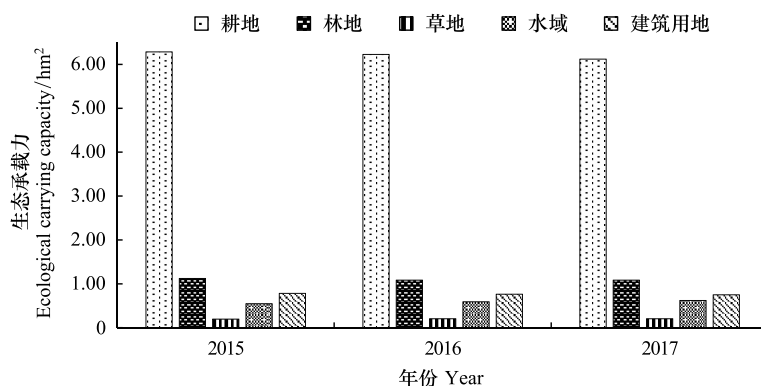


图 4 2015—2017 年长江流域不同土地人均生态承载力对比

Fig.4 Comparison of per capita ecological carrying capacity of different land types in the Yangtze River Basin, 2015—2017

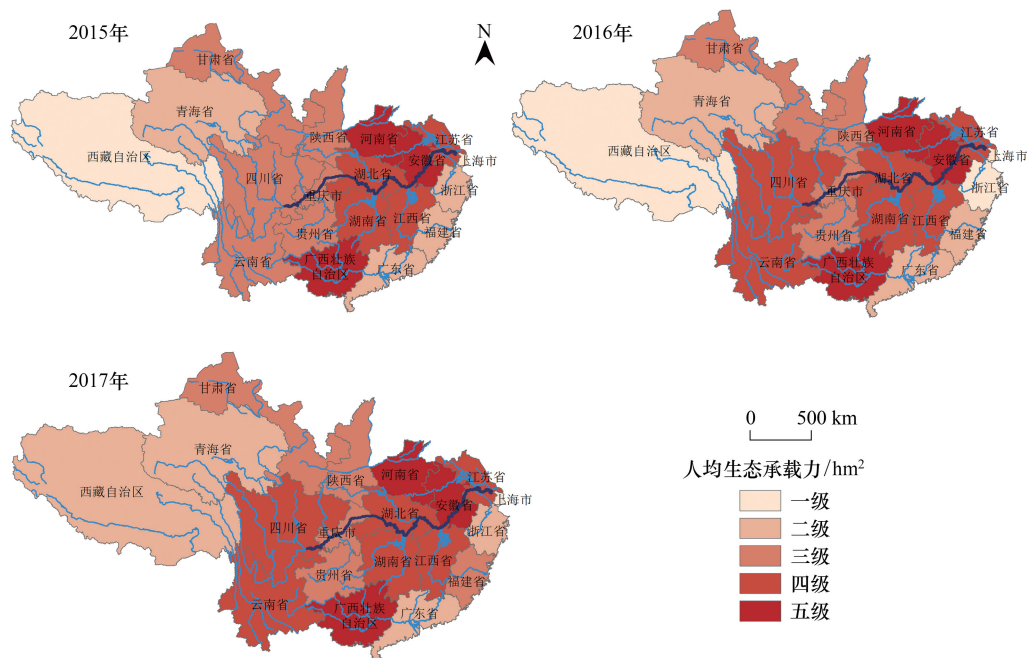


图 5 2015—2017 年长江流域人均生态承载力空间分布

Fig.5 Spatial distribution of per capita ecological carrying capacity in the Yangtze River Basin, 2015—2017

于 1, 表明整个流域都处于生态赤字即生态不安全的状态, 需要对其进行生态补偿。在 2015—2017 年内, 生态安全指数最大的为上海, 最小的为河南。

利用 ArcGIS 平台对长江流域行政区生态安全指数进行划分 (图 6), 空间上呈现出东、西较高, 交错分布的格局。由于自然因素和经济因素, 西藏和青海生态承载力较低, 生态安全指数则较高。东部沿海的上海、浙江、广东等省市, 较频繁的经济活动导致生态足迹偏高, 使得这些地区的生态安全指数也较高。3 年内, 长江流域的平均生态安全指数分别为 7.29、7.30、7.52, 呈现逐年缓慢增加的趋势, 表明长江流域的生态环境不安全状态也在轻微升高。

3.4 长江流域生态补偿额度测算结果分析

对长江流域各行政区进行人均生态补偿额度测算 (表 7)。2015—2017 年间, 年人均生态补偿额度最高的为上海达到 396.80 元, 最低的为西藏为 33.72 元。分析其原因, 主要是经济发展所致。上海市的综合经济实力一直处于我国前列, 屡次位居全国第一。随着国家产业结构调整迅速, 促进了上海市的经济进一步发展。

加之生态补偿模型中的补偿系数是由 GDP 进行修正的,因此上海市的人均生态补偿额度达最高。西藏自治区受地理因素的影响,产业发展较单一,经济发展较长江流域其他地区缓慢,生态补偿额度远低于其他地区。

表 6 2015—2017 年长江流域各行政区生态安全指数

Table 6 Ecological security index of each administrative region in the Yangtze River Basin, 2015—2017										
年份 Year	上海	江苏	浙江	安徽	福建	江西	河南	湖北	湖南	广东
2015	32.5281	4.7809	11.8145	2.7596	7.9934	3.8333	2.2234	3.7644	3.6672	9.3443
2016	33.0230	4.8667	12.7501	2.9524	7.9821	3.8973	2.2308	3.8384	3.7017	9.3583
2017	35.3242	5.0194	12.9463	3.0117	7.9007	3.9919	2.2460	3.6942	3.8044	9.3364
年份 Year	广西	重庆	四川	贵州	云南	西藏	陕西	甘肃	青海	
2015	2.8703	6.9312	5.1414	5.6795	3.7703	10.1784	6.7469	5.0690	9.3852	
2016	2.6552	6.9229	4.9561	5.2458	3.6799	9.6080	6.4576	5.1408	9.3091	
2017	2.6883	7.2689	5.1420	5.2292	3.5094	9.4514	7.0314	5.0318	10.1853	

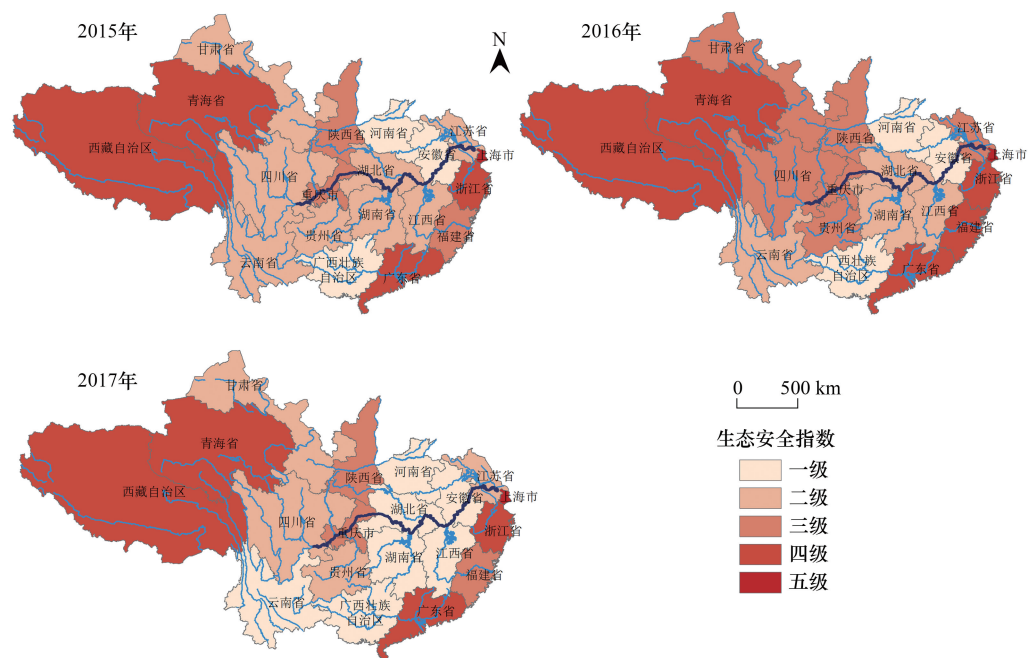


图 6 2015—2017 年长江流域生态安全指数空间分布

Fig.6 Spatial distribution of ecological security index in the Yangtze River Basin, 2015—2017

表 7 2015—2017 年长江流域各行政区人均生态补偿额度/元

Table 7 Per capita ecological compensation of each administrative region in the Yangtze River Basin, 2015—2017										
年份 Year	上海	江苏	浙江	安徽	福建	江西	河南	湖北	湖南	广东
2015	421.8879	253.7020	213.8100	79.6479	174.4682	63.5474	99.1667	111.5545	73.9591	132.7189
2016	385.5115	261.7536	209.2620	77.9889	172.0654	63.8385	98.9155	111.5602	75.1137	133.0596
2017	382.9957	272.0955	208.1362	77.5889	168.0571	64.5236	96.7747	107.6306	72.8413	136.7248
年份 Year	广西	重庆	四川	贵州	云南	西藏	陕西	甘肃	青海	
2015	68.5920	123.4004	71.8951	59.7242	44.7152	31.9891	134.6078	56.1167	126.5920	
2016	70.4367	125.7230	69.8353	58.4511	41.5564	34.8879	128.8677	53.0390	115.4532	
2017	65.9099	126.6404	71.9069	63.1817	41.2434	34.2764	136.4737	47.6037	112.9290	

为明晰长江流域人均生态补偿的空间分布差异,本文利用自然断点法和 GIS 平台,将长江流域的人均生态补偿额度划分为 5 个等级(图 7)。从整个流域上来看,人均生态补偿额度仍然有东高西低、交替分布的空间格局。2015—2017 年间,人均生态补偿额度小于 70 元的有江西、广西、贵州、云南、西藏和甘肃;大于 130 元的有上海、江苏、浙江、福建、广东、陕西。各行政区的人均生态补偿额度有部分地区发生了一个级别的变化,如四川、湖北和广西。东部沿海各省市一直处于补偿额度最高的状态,而西部地区除个别省以外,均处于级别最低的状态。

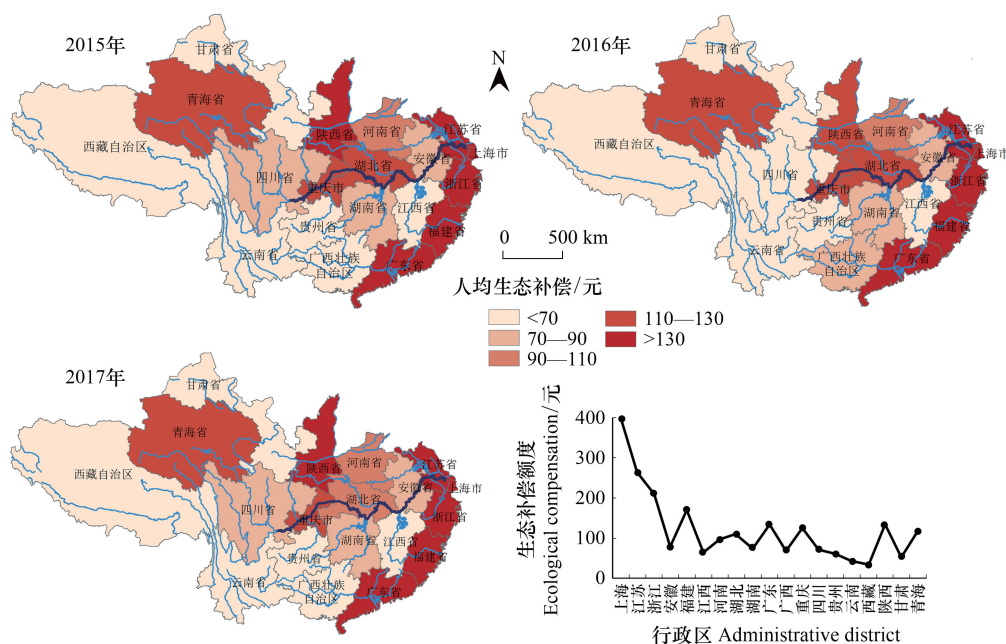


图 7 2015—2017 年长江流域人均生态补偿空间分布

Fig.7 Spatial distribution of per capita ecological compensation in the Yangtze River Basin, 2015—2017

4 讨论

4.1 长江流域生态足迹、生态承载力和生态补偿额度比较分析

2015—2017 年长江流域的人均生态补偿随着生态足迹和生态承载力变化而变化,生态承载力一直处于小幅上升的状态。2015 年的人均生态补偿为 123.27 元,2016 年为 120.39 元,2017 年为 120.40 元,3 年内基本持平。生态足迹与生态补偿的变化保持一致,呈现先有所下降再小幅上升的趋势,而生态承载力则逐年降低(图 8),由此可见长江流域的经济发展正不断推进,由经济活动所造成的生物生产性土地被占用将是一个长期的趋势。

4.2 长江流域生态补偿差异化分析

4.2.1 基于流域尺度生态补偿额度差异化分析

基于长江流域各行政区生态补偿额度以及等级划分,对上、中、下游人均生态补偿额度进行差异化分析(图 9)。研究表明长江流域上游的人均生态补偿呈现出高低交叉分布的空间格局,3 年期间,整体上未发生较大的变化。上游地区人均生态补偿大都集中在小于 70 元的低范围内。陕西、重庆和青海的人均生态补偿额度是最高的,3 年平均值分别为 133.32 元、125.25 元、118.32 元。长江流域中游地区的人均生态补偿呈现出南北两头高,中间低的空间格局,未发生明显变化,只有湖北省发生了一个级别的变化。整体来看中游地区的人均生态补偿额度跨越了 5 个等级,比上游地区幅度大。长江流域下游人均生态补偿呈现出东多西少且差异较大的空间格局(图 9),且 3 年内未发生明显变化。沿海的上海、江苏、浙江和福建的人均生态补偿额度均处

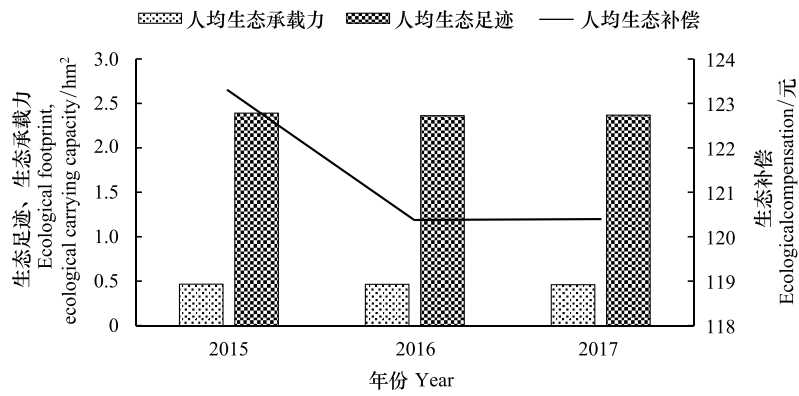


图 8 2015—2017 年长江流域人均生态足迹、人均生态承载力、人均生态补偿额度

Fig.8 Per capita ecological footprint, per ecological carrying capacity and per ecological compensation in the Yangtze River Basin, 2015—2017

于最高等级大于 130 元。将上、中、下游的生态补偿额度进行数量上的对比分析(图 10),长江流域人均生态补偿数量变化幅度以上游最为大,中游次之,下游最小。

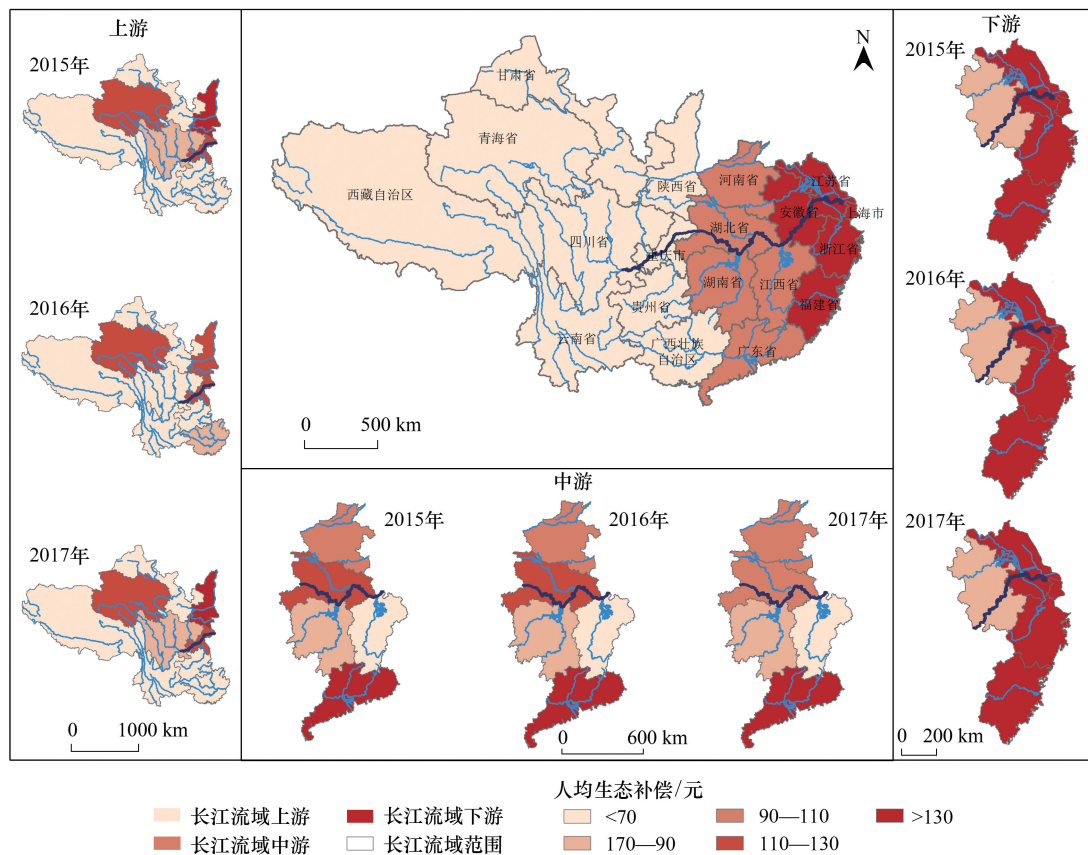


图 9 长江流域上、中、下游划分与不同省份生态补偿额度

Fig.9 Division of the upper, middle and lower reaches of the Yangtze River Basin and the ecological compensation in different provinces

4.2.2 基于城市群尺度生态补偿额度差异化分析

长江流域包括长江三角洲城市群,成渝城市群和长江中游城市群,不同城市群人均生态补偿额度差异显

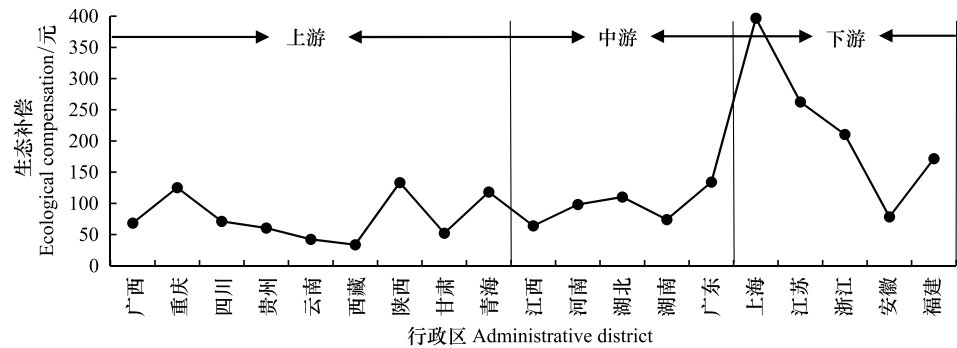


图 10 长江流域上、中、下游生态补偿额度对比

Fig.10 Comparison of ecological compensation in upper, middle and lower reaches of Yangtze River Basin

著(图 11)。对 2015—2017 年间成渝城市群和中游城市群人均生态补偿额度进行空间分析,人均生态补偿额度呈现出东多西少,整体较均匀的空间格局,期间主要是四川的城市出现了一个级别的改变。重庆作为成渝城市群的中心,3 年间年人均生态补偿达 125.25 元。长江中游城市群人均生态补偿额度呈现出西多东少的空间格局,湖北的城市最高为 110.25 元,江西的城市最低为 63.97 元。长江三角洲城市群人均生态补偿额度呈现出均匀分布的空间格局,且在 3 年间未发生明显变化。由于地处沿海区域,地理位置优越,由经济活动所造成的生物生产性土地被占用则会导致生态赤字增高,生态补偿额度随之增大。

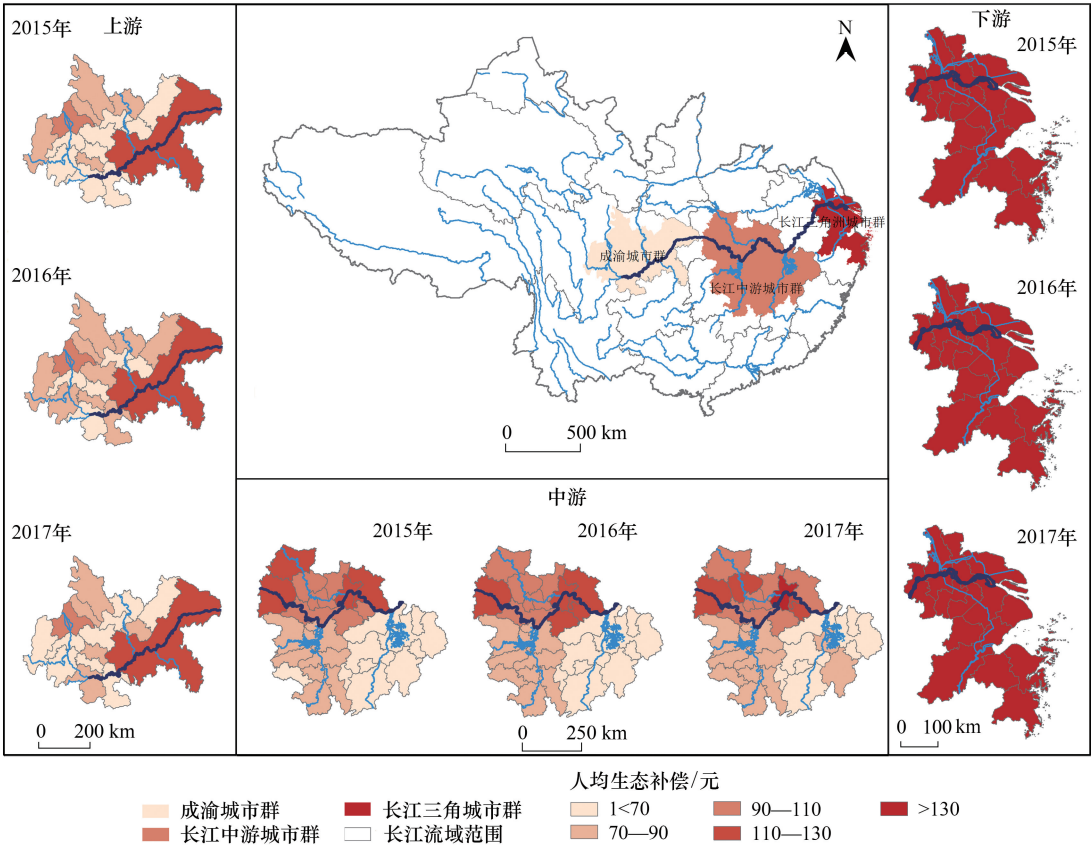


图 11 长江流域城市群划分及生态补偿额度差异

Fig.11 Division of urban agglomerations in the Yangtze River Basin and ecological compensation for different cities

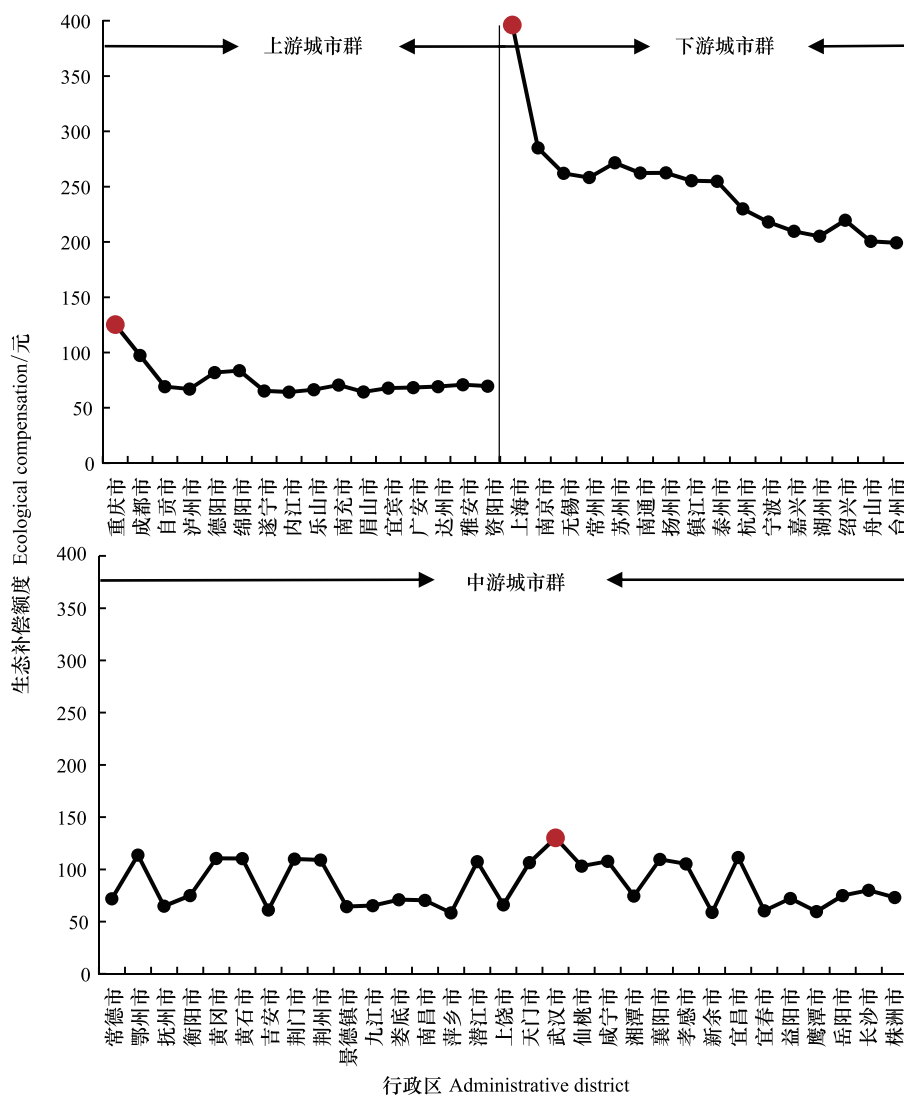


图 12 长江流域三大城市群生态补偿额度对比

Fig.12 Comparison of ecological compensation of three urban agglomerations in Yangtze River Basin

按各行政区 GDP 进行一定比例的计算。2015—2017 年间,三大城市群年人均生态补偿额度(图 12),变化最为明显的是长江三角洲城市群,而变化幅度最小的为成渝城市群,每个城市群内部变化曲线的最高点均发生在城市群中心城市。成渝城市群和中游城市群中,最高的分别是重庆市和武汉市,达到 125.26 元和 130.14 元,最低的分别是四川省内江市和江西省萍乡市,补偿额度分别达到 64.22 元和 58.40 元,成渝城市群的其他城市均分布在 50 元—100 元间;对于长江三角洲城市群而言,上海市的补偿额度明显高于其他城市为 396.80 元,其余城市都低于 300 元。

4.2.3 基于省级尺度生态补偿额度差异化分析

2015—2017 年间,长江流域总体生态补偿额度年平均为 1169.11 亿元。其中江苏和广东所需生态补偿额度最高,年均生态补偿总额度超过 140 亿元,总额度最少的为西藏和青海,皆少于 10 亿元(图 13)。各行政区间补偿额度相比较,差距较大,整体来说,东部沿海地区补偿额度远大于西部内陆地区,与经济发展及区域资源配置呈大致正相关性。3 年间变化最大的省份是广东和上海。3 年间,长江流域总补偿额度变化较小,分别为 1177.61 亿元、1163.16 亿元和 1166.57 亿元,呈先减少再增加态势。

基于以上不同省份生态补偿额度差异化分析,发现长江流域内地域由西向东所需的生态补偿额度升高,

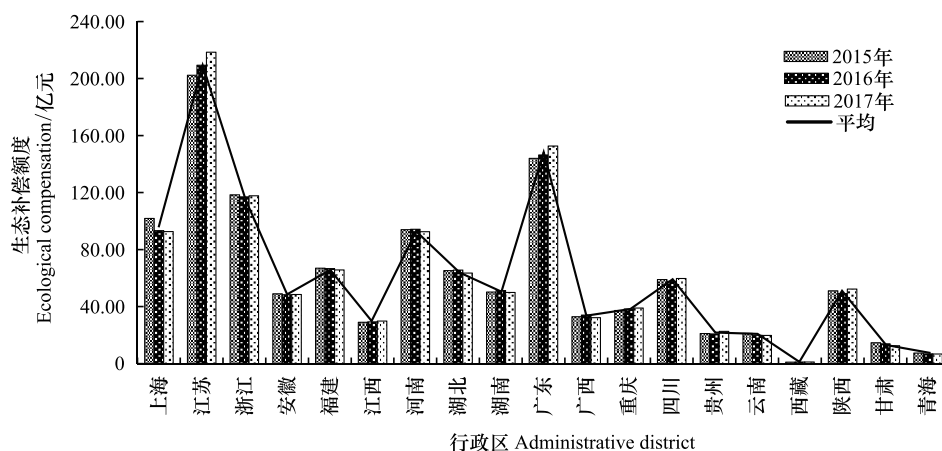


图 13 2015—2017 年长江流域各行政区生态补偿额度对比

Fig.13 Comparison of ecological compensation in different administrative regions of the Yangtze River Basin, 2015—2017

产生这一结果的原因,理论上,生态补偿研究实质上是环境成本的互置问题,关键在于解决生态产品节制和损害后的成本问题^[36]。本研究采用的生态补偿修正模型结合反映地域社会因素的 GDP 和恩格尔系数,兼顾了区域生态生产的外溢性价值,考虑到局域发展水平的差异及其相应的资源配置所带来的环境保护代价不同,综合补偿实施过程中为保护环境所牺牲的经济差距。综合以往研究,较发达的地区,在发展和实施环境保护的过程中,对生态环境的投入成本大,生态资本薄弱,建设治理过程中考虑到人口密度、工业占比、人均 GDP 等资源消耗问题,以及发展机会成本损失,生态构建所需的资本更高^[37]。按照国际研究标准,城市生态环保投入占政府财政收入 2%—3%之间时,城市的生态环境运转较健康,保护相对较好^[38],由此生态补偿制度构建过程中应涉及区域社会发展水平的差异。

5 结论

将生态足迹的思想引入到生态补偿的研究中,构建生态补偿额度测算模型,对长江流域生态补偿额度进行测算,并进行等级划分,从流域尺度、城市群尺度和城市规模尺度对生态补偿额度进行差异化分析。得到如下结论:(1)长江流域的生态足迹呈东大西小的分布,生态承载力则出现中部大,东西部小的空间格局;2015—2017 年的生态足迹呈现出略微波动的状态,生态承载力则表现出逐年下降的趋势。(2)从长江流域各行政区的生态安全指数来看,整个长江流域都处于赤字区,均需要补偿。在生态补偿额度测算中,江苏省的年均生态补偿额度最高,达到了 210.06 亿元,而西藏自治区的最少,为 1.12 亿元,说明在发达的东部沿海省份,实施环境保护过程中,对环境投入成本较大,生态资本薄弱,建设治理过程中同时考虑到社会经济因素影响,生态补偿的额度会更高。(3)生态足迹与生态补偿的变化保持一致,呈现先有所下降再小幅上升的趋势,而生态承载力则逐年降低,说明长江流域经济活动占用生物生产性土地的现象将成为长期趋势。(4)基于流域尺度分析生态补偿额度,上游表现为交叉分布,中游表现为南北高,中间低的格局,而下游则呈东多西少的分布;基于城市群尺度补偿额度由大到小依次为:长江三角洲城市群、成渝城市群、长江中游城市群,整体上仍表现为东多西少的空间格局;基于省级尺度,整体上依旧存在东多西少的空间格局现象,数量在宏观上呈现出与经济发展水平正相关的趋势。本研究为长江流域差异性生态补偿政策制定提供了建议和指导,为流域生态补偿的量化方法提供参考。

参考文献 (References):

- [1] 李爱梅, 康蓉, 杨海真. 快速城镇化地域生态承载力评价模型构建与分析. 环境科学与管理, 2013, 38(2): 139-143, 164-164.
- [2] 潘华, 周小凤. 长江流域横向生态补偿准市场化路径研究——基于国土治理与产权视角. 生态经济, 2018, 34(9): 179-184.

- [3] Wei X Y, Xia J X. Ecological compensation for large water projects based on ecological footprint theory: a case study in China. *Procedia Environmental Sciences*, 2012, 13(10):1338-1345.
- [4] 杨雪获, 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.
- [5] 徐智超, 刘华民, 韩鹏, 陆学岩, 王立新, 温璐. 内蒙古生态安全时空演变特征及驱动力. *生态学报*, 2021, 41(11): 4354-4366.
- [6] 曹莉萍, 周冯琦, 吴蒙. 基于城市群的流域生态补偿机制研究——以长江流域为例. *生态学报*, 2019, 39(1): 85-96.
- [7] 禹雪中, 冯时. 中国流域生态补偿标准核算方法分析. *中国人口·资源与环境*, 2011, 21(9): 14-19.
- [8] 杨桐鹤. 流域生态补偿标准计算方法研究[D]. 北京: 中央民族大学, 2011.
- [9] 李晓光, 苗鸿, 郑华, 欧阳志云. 生态补偿标准确定的主要方法及其应用. *生态学报*, 2009, 29(8): 4431-4440.
- [10] 庄添淇. 基于生态足迹和服务价值的生态补偿研究[D]. 哈尔滨: 东北农业大学, 2012.
- [11] 张皓玮, 方斌, 魏巧巧, 瞿颖, 王庆日. 区域耕地生态价值补偿量化模型构建——以江苏省为例. *中国土地科学*, 2015, 29(1): 63-70.
- [12] Rees W E. Ecological footprints and appropriated carrying capacity: what urban economics leaves out. *Environment and Urbanization*, 1992, 4(2): 121-130.
- [13] Rees W, Wackernagel M. Urban ecological footprints: why cities cannot be sustainable and why they are a key to sustainability. *Environmental Impact Assessment Review*, 1996, 16(4/6): 223-248.
- [14] 白钰, 曾辉, 梁尧钦, 刘语凡, 詹望. 城市生态足迹计算中温室气体环境责任的区域分配法. *中国环境科学*, 2009, 29(5): 555-560.
- [15] 刘宇辉, 彭希哲. 中国历年生态足迹计算与发展可持续性评估. *生态学报*, 2004, 24(10): 2257-2262.
- [16] 郭荣中, 申海建. 基于生态足迹的澧水流域生态补偿研究. *水土保持研究*, 2017, 24(2): 353-358.
- [17] 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.
- [18] 张志强, 徐中民, 程国栋, 陈东景. 中国西部 12 省(区市)的生态足迹. *地理学报*, 2001, 56(5): 599-610.
- [19] Wackernagel M, Rees W. *Our Ecological Footprint: Reducing Human Impact on the Earth*. Gabriola Island: New Society Publishers, 1996.
- [20] Moore J, Kissinger M, Rees W E. An urban metabolism and ecological footprint assessment of Metro Vancouver. *Journal of Environmental Management*, 2013, 124: 51-61.
- [21] Kissinger M, Haim A. Urban hinterlands the case of an Israeli town ecological footprint. *Environment, Development and Sustainability*, 2008, 10(4): 391-405.
- [22] 张雪琪, 满苏尔·沙比提, 马国飞. 基于生态足迹改进模型的叶尔羌河平原绿洲生态安全评价. *生态与农村环境学报*, 2018, 34(9): 840-849.
- [23] 魏黎灵, 李岚彬, 林月, 吴仪, 祁新华. 基于生态足迹法的闽三角城市群生态安全评价. *生态学报*, 2018, 38(12): 4317-4326.
- [24] 杨丹荔, 罗怀良, 蒋景龙. 基于生态足迹方法的西南地区典型资源型城市攀枝花市的可持续发展研究. *生态科学*, 2017, 36(6): 64-70.
- [25] 卢新海, 柯善淦. 基于生态足迹模型的区域水资源生态补偿量化模型构建——以长江流域为例. *长江流域资源与环境*, 2016, 25(2): 334-341.
- [26] 肖建红, 王敏, 于庆东, 刘娟. 基于生态足迹的大型水电工程建设生态补偿标准评价模型——以三峡工程为例. *生态学报*, 2015, 35(8): 2726-2740.
- [27] 熊兴, 储勇. 基于生态足迹的长江经济带生态补偿机制研究. *重庆工商大学学报: 自然科学版*, 2017, 34(6): 94-102.
- [28] 林卫. 基于生态足迹的流域生态系统可持续发展能力评价研究[D]. 长沙: 中南林业科技大学, 2014.
- [29] 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.
- [30] 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.
- [31] 袁平. 基于生态足迹模型的县级区域可持续发展评价——以内蒙古阿鲁科尔沁旗为例[D]. 北京: 中国农业科学院, 2005.
- [32] 郭跃, 程晓昀, 朱芳, 姜瑞华. 基于生态足迹的江苏省生态安全动态研究. *长江流域资源与环境*, 2010, 19(11): 1327-1332.
- [33] 陈源泉, 高旺盛. 农业生态补偿的原理与决策模型初探. *中国农学通报*, 2007, 23(10): 163-166.
- [34] 周健, 官冬杰, 周李磊. 基于生态足迹的三峡库区重庆段后续发展生态补偿标准量化研究. *环境科学学报*, 2018, 38(11): 4539-4553.
- [35] 谢高地, 张彩霞, 张昌顺, 肖玉, 鲁春霞. 中国生态系统服务的价值. *资源科学*, 2015, 37(9): 1740-1746.
- [36] 袁广达. 我国工业行业生态环境成本补偿标准设计——基于环境损害成本的计量方法与会计处理. *会计研究*, 2014, (8): 88-95.
- [37] 彭文英, 王瑞娟, 刘丹丹. 城市群区际生态贡献与生态补偿研究. *地理科学*, 2020, 40(6): 980-988.
- [38] 王瑞娟, 彭文英, 刘丹丹. 共建共治共享视角下京津冀城市生态补偿研究. *生态环境学报*, 2021, 30(5): 1103-1110.