

DOI: 10.5846/stxb201912282818

杨一畅, 卢宏伟, 梁东哲, 陈义忠, 田沛佩, 夏军. 基于三维生态足迹模型的长江中游城市群平衡性分析与生态补偿研究. 生态学报, 2020, 40(24): 9011-9022.

Yang Y Y, Lu H W, Liang D Z, Chen Y Z, Tian P P, Xia J. Balance Analysis and ecological compensation of urban agglomeration in the middle reaches of the Yangtze River based on the three-dimensional ecological footprint model. Acta Ecologica Sinica, 2020, 40(24): 9011-9022.

基于三维生态足迹模型的长江中游城市群平衡性分析与生态补偿研究

杨一畅^{1,2}, 卢宏伟^{2,*}, 梁东哲¹, 陈义忠³, 田沛佩^{1,2}, 夏 军^{2,4}

1 华北电力大学水利与水电工程学院, 北京 102200

2 中国科学院地理科学与资源研究所陆地水循环及地表过程重点实验室, 北京 100101

3 河北工业大学经济管理学院, 天津 300401

4 武汉大学水资源与水电工程科学国家重点实验室, 武汉 430072

摘要: 长江中游城市群是长江经济带的重要组成部分, 明晰生态足迹平衡性对城市群区域间生态补偿以及长江中游城市群生态可持续发展具有重要意义。研究采用三维生态足迹模型和基尼系数, 核算长江中游城市群各市生态足迹及生态承载力, 并对其生态足迹空间平衡性进行分析; 同时依据三维生态足迹相关理论, 计算各市生态补偿金额。结果表明: ①2000—2015 年长江中游城市群整体生态足迹持续上升, 由 65.52 hm²/人增加至 139.38 hm²/人, 年增长率为 7.52%, 武汉城市圈和襄荆宜城市群对生态足迹增长的贡献最大; ②生态承载力呈下降趋势, 由 11.25 hm²/人减小至 10.73 hm²/人, 从土地利用类型来看, 耕地和林地是提供生态承载能力的最主要因素; ③生态足迹的综合基尼系数处于 0.425-0.488 之间, 整体上处于“集聚程度较大”的区间范围, 空间分布显示出不平衡性; ④2000—2015 年长江中游城市群生态补偿支付区和补偿金额持续增加, 各子城市群生态补偿差异大小关系为: 环鄱阳湖城市群>环长株潭城市群>武汉城市圈和襄荆宜城市群。通过分析区域生态足迹、生态承载力的时空变化特征并提出对应补偿方案, 以为长江中游城市群生态建设和管理提供决策依据。

关键词: 三维生态足迹; 生态承载力; 基尼系数; 生态补偿; 长江中游城市群

Balance analysis and ecological compensation of urban agglomeration in the middle reaches of the Yangtze River based on the three-dimensional ecological footprint model

YANG Yiyang^{1,2}, LU Hongwei^{2,*}, LIANG Dongzhe¹, CHEN Yizhong³, TIAN Peipei^{1,2}, XIA Jun^{2,4}

1 School of Water Conservancy and Hydropower Engineering, North China Electric Power University, Beijing 102200, China

2 Key Laboratory of Water Cycle and Related Land Surface Processes, Institute of Geographic Sciences and Natural Resources Research, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China

3 School of Economics and Management, Hebei University of Technology, Tianjin 300401, China

4 State Key Laboratory of Water Resources and Hydropower Engineering Science, Wuhan University, Wuhan 430072, China

Abstract: Ecological compensation is an applicable solution to support sustainable development of mega-regions, such as the Yangtze River Economic Belt (YREB), where conflicts often occur between environmental protection and economic growth. This study investigates the ecological footprints and carrying capacities of main cities in the Triangle of Central China based on a three-dimensional ecological model and the Gini coefficient. They are then used to generate ecological

基金项目: 国家自然科学基金重大项目(41890824); 河北省自然科学基金青年项目(E2020202117)

收稿日期: 2019-12-28; 网络出版日期: 2020-11-05

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: luhw@igsnr.ac.cn

compensation schemes among sub-cities. The results have shown that ① the ecological footprints continued to increase from 2000 to 2015, with an annual growth rate of 7.52% (from 65.52 hm^2/cap to 139.38 hm^2/cap). The Wuhan Metropolitan Area and Xiang-Jing-Yi City Group occupied the most of regional ecological footprints growth. ② The ecological carrying capacity was decreased from 11.25 hm^2/cap to 10.73 hm^2/cap , and cultivated and forested lands were the major contributors from the perspective of land-use types. ③ The Gini coefficients of ecological footprints ranged from 0.425 to 0.488, and such a spatial distribution indicated an imbalanced and agglomerated tendency associated with city development. ④ Both of the payment area and the compensation amounts have increased during the past fifteen years, with the priority being Poyang Lake City Group > Great Chang-Zhu-Tang City Group > Wuhan Metropolitan Area and Xiang-Jing-Yi City Group. The outputs of this study are expected to provide decision-making suggestions for sustainable development of YREB, and offer valuable implications to other mega-regions as well.

Key Words: three-dimensional ecological footprint; ecological carrying capacity; Gini coefficient; ecological compensation; middle reaches of the Yangtze River

生态系统为人类活动提供了必要的空间载体和基本保障,充沛的自然资源和良好的生态环境是维持经济社会发展的根本。随着工业化和城镇化的急剧发展,人们的生产生活和消费水平极大提高,生态资源超负荷问题也逐渐显露出来。生态足迹法是评价资源消耗强度与生态承载能力协调与否的有效手段,最初由加拿大生态经济学家 Rees^[1]于 1992 年提出,Wackernagel 和 Rees^[2]进一步完善,并在国内外广泛应用^[3-4]。近几年来,生态足迹模型在研究中得到了不断地改进和发展,国外学者 Niccolucci 等^[5-6]在已有研究基础上,引入足迹深度和足迹广度两项指标,提出三维生态足迹的概念;方恺等^[7-8]首次将该模型引入国内并加以优化,以中国为例进行了实证分析;靳相木和柳乾坤^[9]运用扩展后的三维生态足迹模型计算了 2000—2012 年间温州市的生态足迹和生态赤字(盈余)情况。然而,自然资源在时空分布上具有不平衡性,不同的经济发展水平、技术水平也影响着自然资源消耗与生态环境的变化,因此急需提出一种判断区域生态足迹与经济增长是否协调的方法^[10]。基尼系数能够较好的评价区域资源配置及平衡性问题^[11-12]。曾永明和张利国^[13]应用基尼系数对中国县域尺度人口分布格局进行非均衡性测度研究;程超等^[14]以滇中城市群为例,应用基尼系数对水资源生态承载力的供需平衡、时空平衡以及平衡性的偏离程度进行分析。由于经济发展与生态资源利用在不同区域存在差异,导致区域发展的不平衡,众多学者开始从生态补偿主体与补偿机制^[15]、生态价值当量^[16]以及生态补偿额度^[17]等方面展开了大量研究,对生态环境质量的不断改善与区域之间的协同发展具有重要意义。

我国十九大明确提出要加快生态文明体制改革,要以“共抓大保护、不搞大开发”为导向推动长江经济带发展。由此可见,着力解决资源环境问题,推动长江经济带绿色可持续发展刻不容缓。长江中游城市群是长江经济带的重要组成部分,随着国家深入实施区域发展总体战略和新型城镇化战略,全面深化改革开放,大力推进生态文明建设,长江中游城市群开发开放水平、整体实力和竞争力得以显著提升,但中心城市辐射带动能力不强,产业结构和空间布局不尽合理,环境污染问题较多,城乡区域发展不够平衡,总体上生态承载压力较大,生态安全问题较为突出,一体化发展机制还有待完善。城市群已成为推进国家新型城镇化的空间主体,是中国城镇化发展的战略依托,理清长江中游城市群之间的生态状况和发展程度的差异,制定合理的生态发展策略,对区域一体化发展具有重要意义。

因此,采用三维生态足迹模型,定量分析长江中游城市群 2000—2015 年各区域生态足迹、生态承载力时空变化特征,同时引入基尼系数对生态足迹的空间平衡性进行分析,探究其生态可持续发展趋势,并基于此对长江中游城市群各市生态补偿进行测算,以期城市群生态建设和管理提供决策依据。

1 研究方法数据来源

1.1 研究区域概况

长江中游城市群(108°21'—118°28'E, 20°09'—33°20'N)是以武汉城市圈、环长株潭城市群、环鄱阳湖城

城市群为主体形成的特大型国家级城市群(图 1),地处我国长江流域中段,承东启西、连南接北,范围包括湖北、湖南和江西省共 31 个地级市和部分县(区),总面积约 $32.61 \times 10^4 \text{ km}^2$,是长江经济带的重要组成部分。区域地形地貌繁杂,平原、山地、丘陵交错分布,河流水系纵横,耕地、林地、水体一直处于土地利用的主体地位,同时拥有 4 个生物多样性保护生态功能区,承担着重要的生态服务功能^[18-19]。受经济发展的影响,近些年来长江中游城市群耕地、林地面积呈现波动下降趋势,建筑用地面积显著上升^[20],城市化发展持续加快。

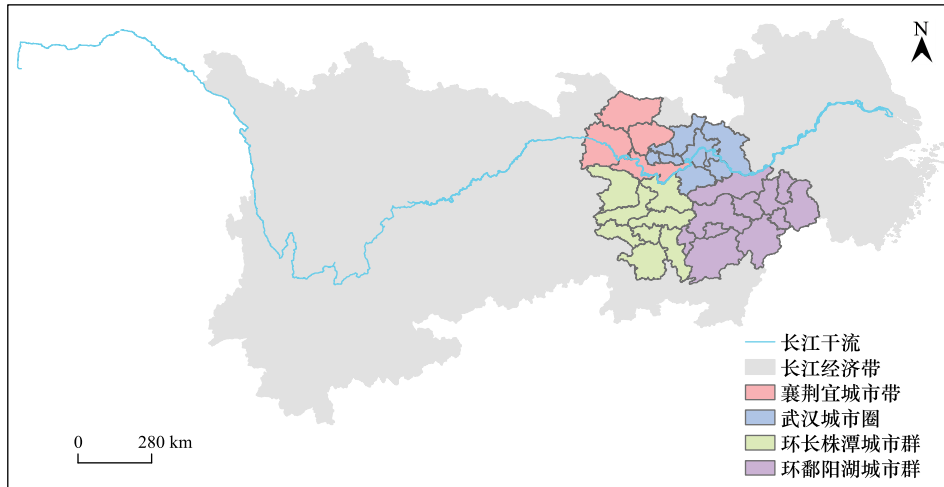


图 1 长江中游城市群位置示意图

Fig.1 The location of the middle reaches of the Yangtze River

1.2 研究方法

1.2.1 三维生态足迹模型

传统生态足迹模型重点在于对流量资本的测度,忽略了存量资本对地区生态系统平衡所起的关键作用。三维生态足迹模型在此基础上,引入足迹深度和足迹广度两个指标,以分别表征人类消耗自然资本存量和占用自然资本流量的程度。其计算公式如下:

$$EF_{3D} = EF_{\text{depth}} \times EF_{\text{size}} \quad (1)$$

式中: EF_{3D} 表示三维生态足迹; EF_{depth} 表示生态足迹深度; EF_{size} 表示生态足迹广度。足迹深度指维持区域现有资源消费水平理论上所需土地面积倍数,反映了超出生态承载力部分的自然资本存量消耗;足迹广度指在区域承载能力范围内,实际占用生物生产性土地的面积,反映了人类占用自然资本流量的水平。其计算公式如下:

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

$$EF_{\text{size}} = \sum_{i=1}^n \min\{EF_i, BC_i\} \quad (3)$$

式中: ED 为生态赤字; BC 表示生态承载力。当 $EF_{\text{depth}} = 1$ 时,表示流量资本刚好能够满足资源消费需求;当 $EF_{\text{depth}} > 1$ 时,表示此时流量资本已经无法满足消费需求,必须消耗存量资本。

1.2.2 生态承载力

生态承载力是指一个区域能够提供给人类生存和发展所需自然资源的生物生产性土地面积的总和。在计算生态承载力时,应扣除 12% 的生物多样性保护面积。其计算公式如下:

$$BC = N \times bc = N \times \sum_{k=1}^6 (r_k \times e_k \times y_k) \times (1 - 12\%) \quad (4)$$

式中: BC 表示该地区总的生态承载力; N 表示区域人口总数; bc 表示该地区人均生态承载力; r_k 表示人均实际占有第 k 类生物生产性土地面积; e_k 表示均衡因子; y_k 表示产量因子。

1.2.3 生态足迹空间平衡性评价指标

基尼系数是指国际上通用的、用以衡量一个国家或地区居民收入差距的常用指标。系数介于 $[0, 1]$ 之间, 越接近 0 表明分配越趋近公平。按照国际惯例, 通常取 0.4 作为基尼系数的“警戒线”^[21]。基尼系数的变化反映了人口分布、经济发展以及水资源量等要素区域集聚程度的变化, 由于人口、GDP、水资源量对用生态资源的分配影响可视为同等重要, 3 个影响因子可作为生态足迹的评价指标, 赋予权重, 计算出综合基尼系数, 来综合分析长江中游城市群生态足迹的空间平衡性。计算公式为:

$$G_i = 1 - \sum_{i=1}^n (X_i - X_{i-1})(Y_i + Y_{i-1}) \quad (5)$$

$$G_i = (G_1 + G_2 + G_3) / 3 \quad (6)$$

式中: G_i 为基尼系数; X_i 为人口、GDP、水资源量等影响因素指标的累计百分比; Y_i 为人均生态足迹的累计百分比, 其值根据三维生态足迹模型得到; i 为区域位置序号, 且当 $i=1$ 时, (X_{i-1}, Y_{i-1}) 视为 $(0, 0)$; G_i 为综合基尼系数。一般地, 基尼系数在 0.2 以下表示“绝对平均”; $[0.2, 0.3)$ 表示“相对平均”; $[0.3, 0.4)$ 表示“相对合理”; $[0.4, 0.5)$ 表示“集聚程度较大”; 在 0.5 及以上表明所考察的要素在区域内高度偏集^[22]。

1.2.4 基于生态足迹的生态补偿模型

在环境系统整体性和环境利益公平分配原则的指导下, 依据三维生态足迹模型与研究区域实际情况, 通过生态资源转化效率和支付意愿指标, 确定各区域实际应得的生态补偿金额。

(1) 生态资源转化效率

$$U_R = \frac{ef_R}{p_R} \quad (7)$$

式中: U_R 为 R 市万元 GDP 生态足迹; ef_R 为 R 市人均生态足迹, 其值根据三维生态足迹模型得到; p_R 为 R 市人均 GDP。

(2) 支付意愿指标

$$W_R = \frac{p_R \times l_R}{\bar{p}} \quad (8)$$

$$l_R = \frac{1}{1 + e^{-t}}, t = \frac{In_R}{In} \quad (9)$$

$$In_R = \frac{A \times m + B \times n}{m + n} \quad (10)$$

式中: W_R 为 R 市的支付意愿; l_R 为 R 市发展阶段系数; In_R 为 R 市人均收入; In 为某省人均收入; A 为某市城镇人均可支配收入; m 为某市城镇人口; B 为某市农村人均纯收入; n 为某市农村人口。

(3) 生态服务供给系数

$$\beta_R = \frac{BC_R}{\sum EC} \quad (11)$$

$$V_R = M \times \beta_R \quad (12)$$

式中: β_R 为 R 市生态服务供给系数; BC_R 为 R 市生态承载力总量; V_R 为 R 市因供给生态服务而应获得的金额; M 为各省生态服务总金额(以污染治理投资代表)。

(4) 生态服务消费系数

$$Rec_R = \frac{U_R \times W_R}{\bar{U} \times \bar{W}} \quad (13)$$

$$\alpha_R = \frac{EF_R \times Rec_R}{\sum_{R=1}^n (EF_R \times Rec_R)} \quad (14)$$

$$F_R = M \times \alpha_R \quad (15)$$

式中: Rec_R 为R市综合修正系数; \bar{U} 为某省万元GDP生态足迹平均水平; \bar{W} 为某省支付意愿平均水平; α_R 为R市生态服务消费系数; F_R 为R市因消费生态服务而应给与的金额。

(5) 生态补偿金额

$$X_R = V_R - F_R \quad (16)$$

式中: X_R 为R市应获得的生态补偿金额。若 X_R 为正值,说明该市生态补偿金额为净流入;若为负值,则为净流出。

1.3 数据来源

本文数据来源于2000—2015年《湖北统计年鉴》、《湖南统计年鉴》、《江西统计年鉴》以及研究区域内各市统计年鉴;土地分类数据通过ArcGIS提取所得(空间分辨率为1 km × 1 km),土地利用类型分为耕地、草地、林地、水域、建设用地、化石燃料用地六类;均衡因子和产量因子采用刘某承和李文华^[23-24]对中国及各省市的测算结果。根据三维生态足迹计算方法和长江中游城市群的实际情况,收集了生物资源消费和能源消费两大类数据。其中,生物资源分为农产品、动物产品、林产品和水产品,能源分为工业消费能源及电力,共计30项统计条目(表1)。

表1 三维生态足迹指标评价体系

Table 1 Three-dimensional ecological footprint index evaluation system

产品消费类型 Product consumption type	土地利用类型 Land use type	指标细则 Indicator details
生物资源消费 Consumption of biological resources	耕地	小麦、水稻、棉花、蔬菜、猪肉、禽蛋
	草地	牛肉、羊肉、其他肉类(家禽)、牛奶
	林地	柑橘、其他水果(园林水果)、油桐籽、板栗、茶叶、木材、竹材
能源消费 Energy consumption	水域	鱼类、虾蟹类、贝类、其他水产品(养殖)
	化石燃料用地	原油、原煤、汽油、焦炭、柴油、燃料油、液化石油气、煤炭
	建设用地	电力

2 结果分析

2.1 人均生态足迹

根据公式(2—3)分别计算长江中游城市群及子城市圈足迹深度和足迹广度(表2、表3),进而得到三维人均生态足迹。结果表明,长江中游城市群及子城市圈2000—2015年人均生态足迹呈上升趋势(图2)。其中,襄荆宜城市群与武汉城市圈趋势相似,人均生态足迹增长速率较快且持续上升,与2000年相比,2015年分别增长了146.22%和119.00%,这是由于湖北省重视并大力发展工业,生态环境恢复滞后,同时积极进行城镇化扩张,导致人均生态足迹大幅度增加。环长株潭城市群与环鄱阳湖城市群人均生态足迹增长速率较慢且逐渐趋缓,其变化趋势均可分为两个阶段:环长株潭城市群2000—2007年人均生态足迹年增长率为21.78%,2007—2015年人均生态足迹年增长率为4.80%,说明湖南省早期大力发展经济,随着人口的显著增多,对生态资源的掠夺式开发和过度依赖导致该地区人均生态足迹增长迅速,2007年长株潭城市群获批“两型”社会综合改革试验区,湖南省由此拉开了绿色发展大幕,人均生态足迹增长速率随之放缓;环鄱阳湖城市群2000—2008年人均生态足迹年增长率为19.98%,2008—2015年人均生态足迹年增长速率为2.12%,究其原因,与人们对自然资源的依赖与需求程度不断提高有关,但该城市群人口增长优势不明显,且在2009年国务院审批通过“建设鄱阳湖生态经济区”的重大战略决策,近年来环鄱阳湖城市群人均生态足迹增长趋于平缓。

长江中游城市群整体人均生态足迹处于线性增长状态,年增长率为 7.52%。

表 2 长江中游城市群 2000—2015 年人均生态足迹深度

Table 2 Depth of per capita ecological footprint of urban agglomerations in the middle reaches of the Yangtze River from 2000 to 2015

年份 Year	襄荆宜城市群 Xiang-Jing-Yi City Group	武汉城市圈 Wuhan Metropolitan Area	环长株潭城市群 Great Chang-Zhu- Tang City Group	环鄱阳湖城市群 Poyang Lake City Group	长江中游城市群 Urban agglomeration in the middle reaches of the Yangtze River
2000	7.98	11.61	12.39	6.97	9.74
2001	7.74	11.74	13.24	7.08	9.95
2002	8.58	12.30	14.10	7.33	10.58
2003	9.19	13.22	15.22	7.42	11.26
2004	9.78	14.03	16.41	8.64	12.22
2005	10.30	15.36	17.58	9.08	13.08
2006	10.96	15.65	18.58	9.78	13.74
2007	11.80	15.81	19.75	10.35	14.43
2008	12.34	17.53	18.88	11.09	14.96
2009	13.73	18.99	19.14	12.12	16.00
2010	15.03	21.03	20.70	12.61	17.34
2011	17.26	22.11	21.37	13.06	18.45
2012	16.53	23.36	21.43	13.40	18.68
2013	15.39	24.66	21.48	13.83	18.84
2014	17.43	24.03	21.92	14.11	19.37
2015	18.10	24.64	21.87	14.13	19.69

表 3 长江中游城市群 2000—2015 年人均生态足迹广度/($\text{hm}^2/\text{人}$)

Table 3 Breadth of per capita ecological footprint of urban agglomerations in the middle reaches of the Yangtze River from 2000 to 2015

年份 Year	襄荆宜城市群 Xiang-Jing-Yi City Group	武汉城市圈 Wuhan Metropolitan Area	环长株潭城市群 Great Chang-Zhu- Tang City Group	环鄱阳湖城市群 Poyang Lake City Group	长江中游城市群 Urban agglomeration in the middle reaches of the Yangtze River
2000	0.33	0.22	0.19	0.24	0.25
2001	0.33	0.22	0.19	0.23	0.24
2002	0.33	0.22	0.19	0.25	0.25
2003	0.33	0.23	0.19	0.24	0.25
2004	0.33	0.23	0.21	0.28	0.26
2005	0.33	0.23	0.21	0.28	0.26
2006	0.33	0.23	0.20	0.29	0.26
2007	0.33	0.22	0.20	0.29	0.26
2008	0.33	0.23	0.22	0.30	0.27
2009	0.34	0.23	0.20	0.25	0.26
2010	0.34	0.23	0.21	0.25	0.26
2011	0.34	0.22	0.22	0.24	0.26
2012	0.35	0.22	0.21	0.25	0.26
2013	0.35	0.23	0.22	0.25	0.26
2014	0.35	0.23	0.22	0.25	0.26
2015	0.35	0.23	0.21	0.25	0.26

图 3 可见,2000—2015 年间对长江中游城市群人均生态足迹贡献最多的是襄荆宜城市群(29.91%)和武汉城市圈(26.91%),其次是环长株潭城市群(25.12%),贡献最少的是环鄱阳湖城市群(18.06%)。从土地利

用类型来看,2000—2015 年长江中游城市群人均生态足迹从大到小排序为:耕地>草地>化石燃料用地>林地>水域>建筑用地。耕地的人均生态足迹最大,占整体的 43.02%,草地和化石燃料用地次之,二者的生态足迹总量超过整体的 1/2,说明农业、养殖业和工业在长江中游城市群经济社会发展中占有举足轻重的地位,这一结论与张星星和曾辉^[25]、董建红等^[26]研究结果基本一致。长江中游地区自古就是中国的粮仓,具有坚实的农业生产基础,是全国农产品资源最丰富、农产品贸易最活跃的地区之一。同时,长江中游地区积极发挥生猪养殖的优势,大力推进建设生猪养殖基地。除此之外,长江中游地区工业化水平也有显著提升,三大核心城市群及整体均处于以加工危重心的工业化发展中期阶段。

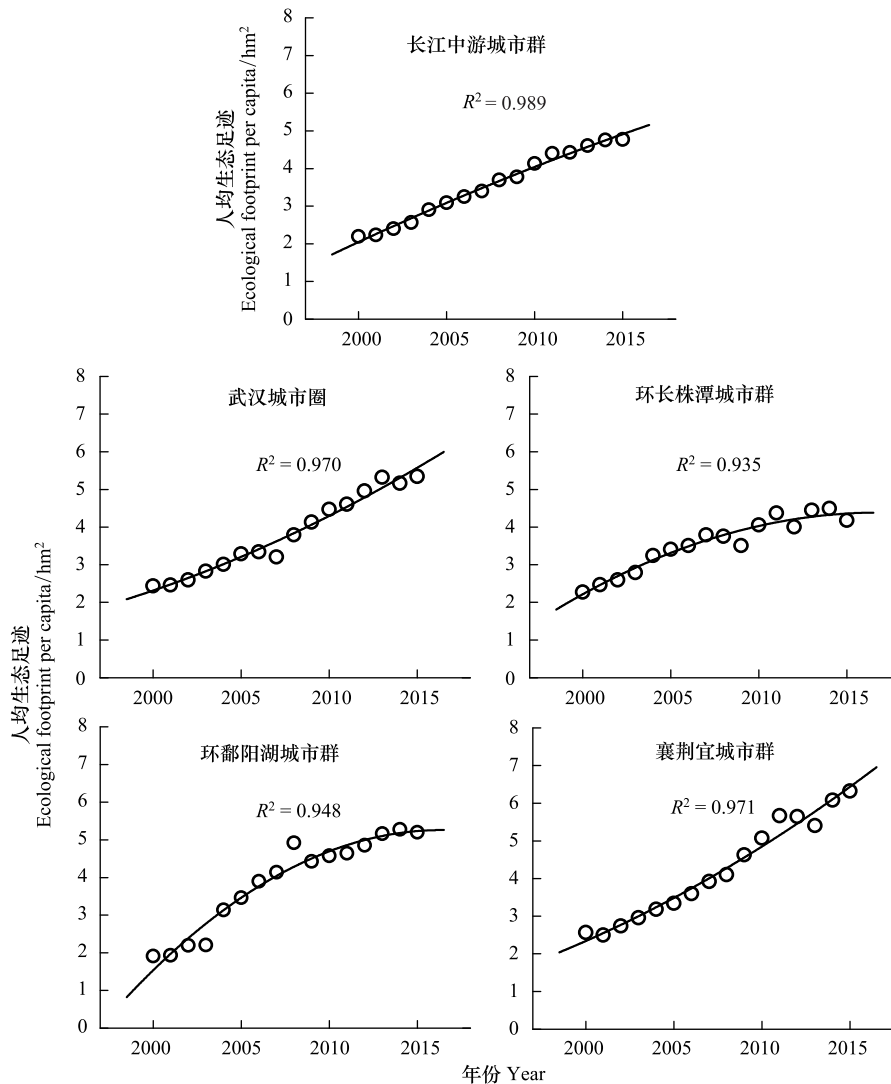


图 2 2000—2015 年长江中游各城市圈与城市群人均生态足迹时空变化

Fig.2 The per capita ecological footprint of each urban circle and urban agglomeration in the middle reaches of the Yangtze River changed in time and space from 2000 to 2015

2.2 人均生态承载力时空演变特征

生态承载力是生物生产性土地面积的总和,故与各土地利用类型密切相关。长江中游各城市群生态承载力差异明显(表 4),2015 年人均生态承载力最大的是环鄱阳湖城市群(37.86%),其次是武汉城市圈(22.69%)和环长株潭城市群(22.05%),襄荆宜城市群(17.40%)最小。各种土地利用类型对其生态承载能力的贡献也有所不同;武汉城市圈耕地人均生态承载力贡献率达到 64.34%,为整体最高值;环鄱阳湖城市群的

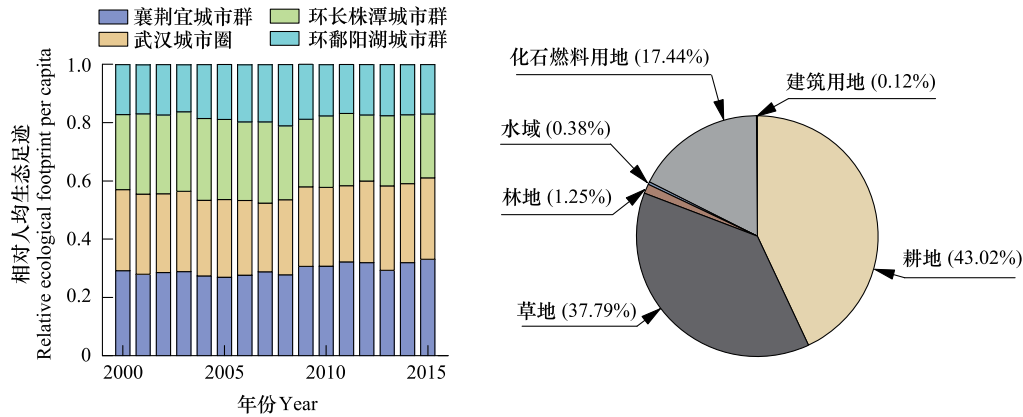


图3 长江中游城市群 2000—2015 年平均生态足迹构成

Fig.3 Composition of the average ecological footprint of the urban agglomeration in the middle reaches of the Yangtze River from 2000 to 2015

林地次之,为 54.56%;环长株潭城市群的林地和襄荆宜城市群的耕地人均生态承载力贡献率也分别达到了 49.49%、49.41%。

表 4 长江中游各城市群 2015 年人均生态承载力空间格局/(hm²/人)

Table 4 Spatial pattern of per capita ecological carrying capacity of each urban agglomeration in the middle reaches of the Yangtze River in 2015

城市群 City group	耕地 Cropland	草地 Grassland	林地 Forest	水域 Water	化石燃料用地 Fossil fuel land	建筑用地 Building land	合计 Total
襄荆宜城市群	0.922	0.025	0.783	0.064	0.006	0.066	1.866
武汉城市圈	1.566	0.033	0.498	0.146	0.021	0.170	2.434
环长株潭城市群	0.999	0.022	1.171	0.074	0.028	0.073	2.366
环鄱阳湖城市群	1.495	0.098	2.212	0.091	0.030	0.135	4.062
合计 Total	4.982	0.178	4.664	0.376	0.085	0.444	10.728

研究期间,长江中游城市群人均生态承载力详见表 5,除水域和建筑用地外,其他土地类型生态承载能力在 2000—2015 年间均有所下降,尤以耕地、林地最为严重。与 2000 年相比,2015 年耕地和林地人均生态承载力均下降了 0.31 hm²/人,这是因为在推进城市化进程中,受冲击最大的是农田和林地,土地面积分别减少了 49.81%和 49.98%,尽管如此,耕地和林地仍占长江中游城市群生态承载能力的主导地位,二者生态承载能力之和约为整体的 90%,因此在发展中应加大对耕地、林地的保护力度,以提高长江中游城市群整体生态承载能力。

2.3 生态足迹公平性分析

基尼系数可反映生态足迹在空间分布上的平衡状态。以 2000—2015 年的三维生态足迹、人口、GDP 以及水资源量的数据为基础,按照式(5—6)计算出长江中游城市群不同影响因子之间的基尼系数以及综合基尼系数(图 4):

(1)从人口基尼系数变化看,整体呈“W”型变化,2000、2008 年以及 2011—2015 年的基尼系数均超过“0.4的警戒线”,处于“集聚程度较大”的区间范围,其他年份则处于“相对合理”的区间范围内。

(2)对于 GDP 基尼系数,2000—2015 年年均基尼系数为 0.457,除 2013 年处于“高度偏集”状态外,其他年份均处于“集聚程度较大”的区间范围。这是由于经济发达地区 GDP 增加相对较多,而人均生态足迹增加相对较少;相反,经济欠发达地区的 GDP 增加相对较少,生态足迹相对增加较多,这也表明长江中游城市群的经济发展与自然资本占用之间的不平衡性。

表 5 长江中游城市群 2000—2015 年人均生态承载力动态变化/($\text{hm}^2/\text{人}$)

Table 5 Dynamic changes in per capita ecological carrying capacity of urban agglomerations in the middle reaches of the Yangtze River from 2000 to 2015

年份 Year	耕地 Cropland	草地 Grassland	林地 Forest	水域 Water	化石燃料用地 Fossil fuel land	建筑用地 Building land	合计 Total
2000	5.292	0.194	4.975	0.350	0.092	0.343	11.247
2001	5.273	0.193	4.951	0.349	0.092	0.342	11.200
2002	5.250	0.192	4.923	0.347	0.092	0.341	11.144
2003	5.220	0.191	4.884	0.346	0.091	0.339	11.070
2004	5.223	0.190	4.878	0.345	0.091	0.339	11.067
2005	5.134	0.187	4.846	0.378	0.084	0.368	10.996
2006	5.117	0.185	4.822	0.377	0.083	0.366	10.951
2007	5.092	0.184	4.791	0.375	0.083	0.365	10.890
2008	5.071	0.183	4.763	0.373	0.082	0.364	10.836
2009	5.091	0.183	4.763	0.376	0.083	0.366	10.862
2010	5.082	0.178	4.801	0.378	0.088	0.388	10.915
2011	5.038	0.176	4.755	0.375	0.088	0.385	10.816
2012	5.024	0.175	4.734	0.373	0.087	0.384	10.777
2013	5.009	0.174	4.707	0.372	0.087	0.384	10.733
2014	4.999	0.174	4.693	0.371	0.086	0.383	10.707
2015	4.982	0.178	4.664	0.376	0.085	0.444	10.728

(3)各年均水资源量基尼系数超过“警戒线”0.4,基尼系数在 2001 年达到峰值,并在 2001—2012 年期间先下降后上升,在 2012 年后呈下降趋势,呈现“M”型变化动态,整体上处于“高度偏集”的区间范围。表明研究期间水资源量和生态足迹处在一种高度不平衡的发展状态,同时说明水资源的空间分布不是影响生态资源消费的最主要因素。

(4)2000—2015 年,长江中游城市群生态足迹综合基尼系数变化范围处在 0.425—0.488 之间,16 年年均综合基尼系数为 0.456,总体上处于“集聚程度较大”的区间范围。人口分布、经济发展以及资源环境与生态足迹空间分布不协调,发展关系未对应,三维生态足迹在空间分布上呈现出不平衡性,这种变化趋势应引起重视。

2.4 长江中游城市群区域生态补偿

通过三维生态足迹模型对长江中游各城市群 2000—2015 年生态补偿金额进行测算,结果如图 5 所示。环鄱阳湖城市群中,南昌市平均支付生态补偿金额最高(14.28 亿元),上饶市平均获得生态补偿金额最高(17.11 亿元);环长株潭城市群中,岳阳市平均支付的生态补偿金额最高(6.89 亿元),长沙市平均获得补偿金额最高(7.15 亿元);襄荆宜城市群和武汉城市圈中,武汉市平均支付的生态补偿金额最高(1.40 亿元),宜昌市平均获得生态补偿金额最高(1.65 亿元)。从人均水平来看,环鄱阳湖城市群中,人均需支付生态补偿和获得生态补偿最高的城市分别是新余市(476.71 元/人)和上饶市(258.63 元/人),新余市人均水平高于南昌市的原因可能是,尽管南昌整体支付生态补偿金额高,但新余人口基数远小于南昌;环长株潭城市群中,人均需支付生态补偿和获得生态补偿最高的城市分别是岳阳(125.18 元/人)和株洲(160.44 元/人);荆宜城市群和武汉城市圈中,人均需支付生态补偿和获得生态补偿最高的城市分别是鄂州(84.35 元/人)和宜昌

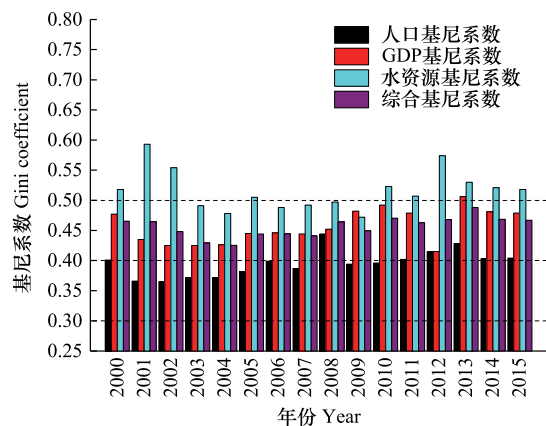


图 4 长江中游城市群 2000—2015 年基尼系数动态变化

Fig.4 Changes of the Gini coefficient in the urban agglomeration of the middle reaches of the Yangtze River from 2000 to 2015

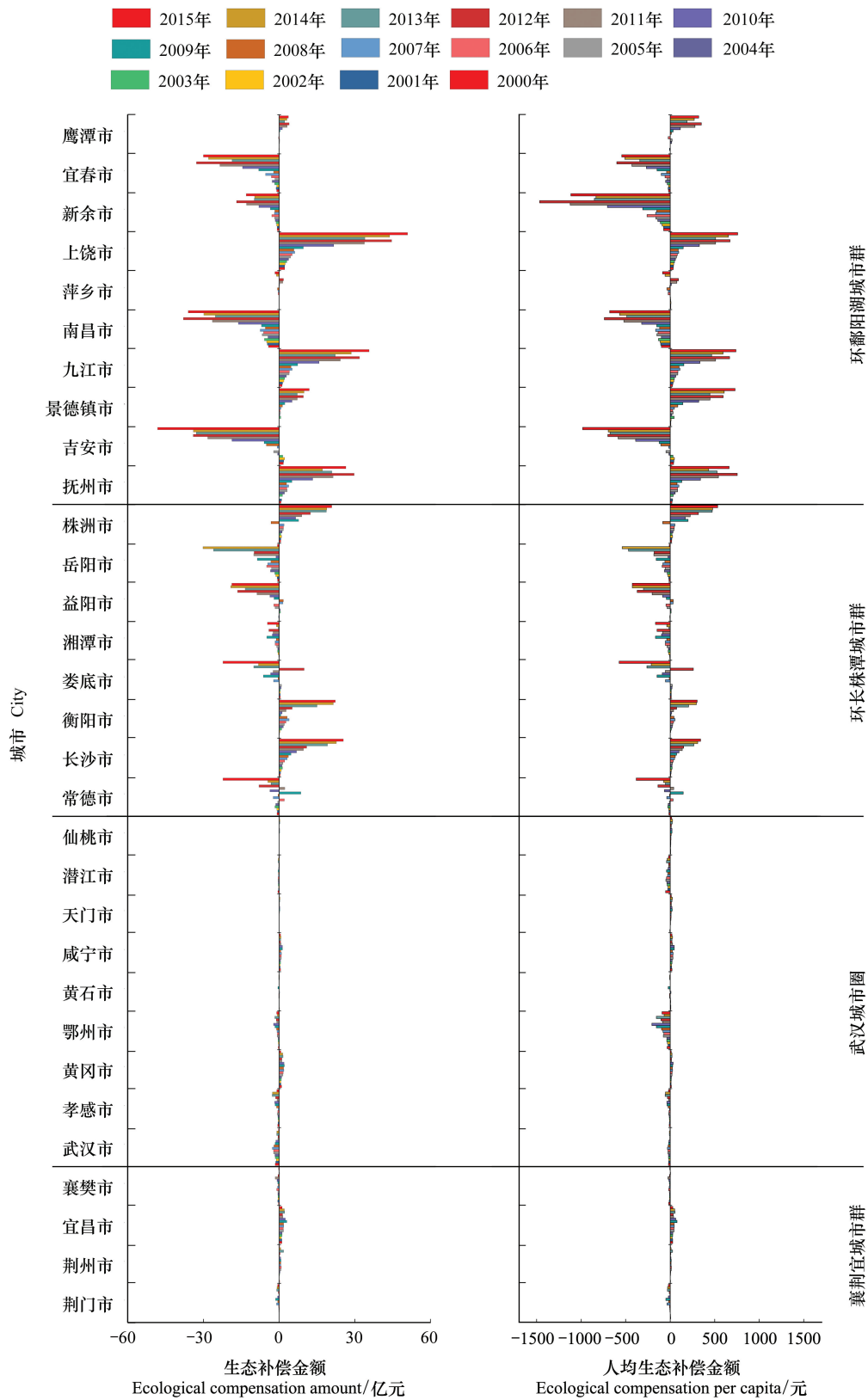


图5 长江中游各城市群2000—2015年生态补偿

Fig.5 Ecological compensation in urban agglomerations of the middle reaches Yangtze River from 2000 to 2015

(41.24 元/人)。导致这两个城市群人均生态补偿水平与整体水平不同的原因同样可能是各市人口基数差异。支付生态补偿的城市多集中在各省中心位置或为地市级中心城市,经济发展较快、GDP 总量较高,为经济发展而消耗的生态资源量超出本地区生态承载力,需通过占用其他地区生态资源进行弥补;受偿区因受地理位置和地形的限制,经济发展较为缓慢,生态承载能力较强,可为其他城市供给生态服务,同时获得相应的生态补偿。

从时间尺度上来看,长江中游城市群生态补偿支付区与补偿金额持续增加,生态补偿差异呈扩大趋势。其中,环鄱阳湖城市群整体生态补偿差异最大且增长速度最快,在 2015 年支付区与受偿区补偿金额差异达到峰值(99.05 亿元);环长株潭城市群生态补偿差异于 2014 年达到最大值(52.86 亿元),2015 年缩小至 47.70 亿元;武汉城市圈和襄荆宜城市群整体生态补偿差异最小,且呈现波动缓慢增长趋势,在 2013 年达到最大值(4.92 亿元)后随即下降,2015 年生态补偿差异缩小至 2.18 亿元。研究时段内,武汉城市圈和襄荆宜城市群各地市经济发展处于相对平衡状态,但是由于湖北省在发展进程中,对环境污染治理投资较少,导致其生态补偿标准较低,因此在未来发展中应加强对环境保护的重视与投资力度。

3 结论

基于 2000—2015 年面板数据,采用三维生态足迹模型和基尼系数对长江中游城市群生态足迹、生态承载力进行测算,分析了其时空动态变化特征与空间平衡性,并依据研究区域生态服务供给和消费比重,确定各市生态补偿金额。主要结论为:

(1)2000—2015 年长江中游城市群整体处于生态不可持续发展状态。生态足迹呈现快速增长的趋势,农牧业发展与化石能源消耗是生态足迹增长的主要原因;生态承载力波动下降,主要是由于耕地和林地面积受城市化影响而大幅度减少。因此,在推动长江中游城市群发展的同时,应加大对耕地、林地和草地等自然资源的保护力度,同时控制能源消费。

(2)从生态足迹的空间平衡差异看,2000—2015 年长江中游城市群三维生态足迹综合基尼系数呈现波动变化,总体上处于“集聚程度较大”的区间范围,即研究区生态足迹在空间分布上不平衡。这反映出长江中游城市群人口分布、经济发展以及资源环境与三维生态足迹之间的发展关系不协调和空间分布不合理。

(3)2000—2015 年长江中游城市群生态补偿支付区和补偿金额呈上升趋势,支付区与受偿区的生态补偿差异逐渐扩大。在城市群未来发展进程中,应加强中心城市辐射带动能力,经济发展较慢的地区,可适度加大发展力度,提高自身经济水平。

参考文献(References):

- [1] Rees W E. Ecological footprints and appropriated carrying capacity: what urban economics leaves out. *Environment and Urbanization*, 1992, 4(2): 121-130.
- [2] Wackernagel M, Rees W. *Our Ecological Footprint: Reducing Human Impact on the Earth*. Philadelphia: New Society Publishers, 1996.
- [3] 杨军昌, 吴青芬, 李绍练. 基于生态足迹的滇桂黔石漠化片区人口与环境——以黔西南州为分析对象. *生态经济*, 2019, 35(10): 136-142, 190-190.
- [4] Wu M Y, Wei Y G, Lam P T I, Liu F Z, Li Y. Is urban development ecologically sustainable? Ecological footprint analysis and prediction based on a modified artificial neural network model: a case study of Tianjin in China. *Journal of Cleaner Production*, 2019, 237: 117795.
- [5] 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.
- [6] 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.
- [7] 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.
- [8] 方恺, 高凯, 李焕承. 基于三维生态足迹模型优化的自然资本利用国际比较. *地理研究*, 2013, 32(9): 1657-1667.
- [9] 靳相木, 柳乾坤. 基于三维生态足迹模型扩展的土地承载力指数研究——以温州市为例. *生态学报*, 2017, 37(9): 2982-2993.

- [10] White T J. Sharing resources: the global distribution of the Ecological Footprint. *Ecological Economics*, 2007, 64(2): 402-410.
- [11] Hu Z N, Chen Y Z, Yao L M, Wei C T, Li C Z. Optimal allocation of regional water resources: from a perspective of equity-efficiency tradeoff. *Resources, Conservation and Recycling*, 2016, 109: 102-113.
- [12] 杨屹, 樊明东. 中国丝绸之路经济带沿线省份生态足迹时空差异及公平性分析. *生态学报*, 2019, 39(14): 5040-5050.
- [13] 曾永明, 张利国. 中国人口空间分布格局演变与非均衡性测度——基于分县尺度人口普查数据: 1990-2010. *南方人口*, 2017, 32(5): 68-80.
- [14] 程超, 童绍玉, 彭海英, 闫少凯. 滇中城市群水资源生态承载力的平衡性研究. *资源科学*, 2016, 38(8): 1561-1571.
- [15] 刘某承, 王佳然, 刘伟玮, 杨伦, 桑卫国. 国家公园生态保护补偿的政策框架及其关键技术. *生态学报*, 2019, 39(4): 1330-1337.
- [16] 刘春腊, 刘卫东, 徐美. 基于生态价值当量的中国省域生态补偿额度研究. *资源科学*, 2014, 36(1): 148-155.
- [17] Song B, Zhang X X, Xin Y L, Xue L L. Notice of retraction: ecological compensation accounting for provinces in china based on modification from ecological resources conversion efficiency and payment willingness//Proceedings of 2010 International Conference on E-Business and E-Government. Guangzhou: IEEE, 2010.
- [18] 刘园, 周勇, 杜越天. 基于 InVEST 模型的长江中游经济带生境质量的时空分异特征及其地形梯度效应. *长江流域资源与环境*, 2019, 28(10): 2429-2440.
- [19] 胡昕利, 易扬, 康宏樟, 王彬, 史明昌, 刘春江. 近 25 年长江中游地区土地利用时空变化格局与驱动因素. *生态学报*, 2019, 39(6): 1877-1886.
- [20] 刘凤, 曾永年, 赵丹阳, 张猛. 长江中游城市群土地利用生态风险分析——以长株潭城市群为例. *国土与自然资源研究*, 2016, (5): 16-22.
- [21] 王金南, 逮元堂, 周劲松, 李勇, 曹东. 基于 GDP 的中国资源环境基尼系数分析. *中国环境科学*, 2006, 26(1): 111-115.
- [22] 曾明星, 张善余. 中国人口再分布的社会经济合理性及其“多中心集聚”分析. *南方人口*, 2013, 28(05): 71-80.
- [23] 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. *生态学杂志*, 2010, 29(3): 592-597.
- [24] 刘某承, 李文华. 基于净初级生产力的中国生态足迹均衡因子测算. *自然资源学报*, 2009, 24(9): 1550-1559.
- [25] 张星星, 曾辉. 珠江三角洲城市群三维生态足迹动态变化及驱动力分析. *环境科学学报*, 2017, 37(2): 771-778.
- [26] 董建红, 张志斌, 张文斌. 基于三维生态足迹的甘肃省自然资本利用动态变化及驱动力. *生态学杂志*, 2019, 38(10): 3075-3085.