

DOI: 10.20103/j.stxb.202501170152

孔凡振, 陈会广. 城乡居民食物消费生态足迹的时空演变及多情景模拟——以长江经济带为例. 生态学报, 2025, 45(16): - .

Kong F Z, Chen H G. Spatial-temporal evolution and multi-scenario simulation of food consumption ecological footprint for urban and rural residents: a case study of the Yangtze River Economic Belt. Acta Ecologica Sinica, 2025, 45(16): - .

城乡居民食物消费生态足迹的时空演变及多情景模拟 ——以长江经济带为例

孔凡振¹, 陈会广^{1,2,*}

¹ 南京农业大学公共管理学院, 南京 210095

² 南京农业大学中国资源环境与发展研究院, 南京 210095

摘要: 城乡居民消费是食物消费体系的终端环节。本研究以长江经济带作为典型研究区, 运用改进的基于组分法的生态足迹模型定量分析了城乡居民食物消费生态足迹的时空演变特征, 并借助基于共享社会经济路径 (SSPs) 的系统动力学 (SD) 模型对未来的发展趋势进行预测。研究结果表明: (1) 2005—2022 年, 长江经济带城乡居民的食物消费生态足迹总体呈增长趋势, 城镇居民的生态足迹高于农村居民, 且食物消费总生态足迹的增幅也更大。同时, 城乡居民膳食结构渐趋一致, 食物消费人均生态足迹的结构变化呈现出显著的区域特征。(2) 长江经济带 11 个省市城乡居民食物消费总生态足迹在空间分布上呈现“东高西低”的格局。其标准差椭圆呈“西南—东北”方向分布且面积略有缩小, 这意味着城乡居民食物消费总生态足迹的空间异质性有所减弱。此外, 城镇与农村居民食物总生态足迹的重心轨迹呈现出相向移动趋势, 表明区域内食物消费领域的城乡融合发展进一步加强。(3) 在多情景模拟中, 2023—2035 年长江经济带城乡居民食物消费总生态足迹的预测曲线存在明显差异。其中, 温饱型发展路径下的食物消费总生态足迹最低, 富裕型发展路径下的食物消费总生态足迹最高, 可持续发展路径是实现居民营养均衡与环境友好的最佳解决方案。本研究可从优化居民膳食结构、缩小城乡膳食不平等以及实施分区分级管控等方面为实现可持续食物消费、促进城乡膳食公平以及保障食品安全提供科学参考。

关键词: 食物消费生态足迹; 城乡居民; 系统动力学; 多情景模拟; 可持续饮食; 长江经济带

Spatial-temporal evolution and multi-scenario simulation of food consumption ecological footprint for urban and rural residents: a case study of the Yangtze River Economic Belt

KONG Fanzhen¹, CHEN Huiguang^{1,2,*}

¹ College of Public Administration, Nanjing Agricultural University, Nanjing 210095, China

² China Resources, Environment and Development Academy, Nanjing Agricultural University, Nanjing 210095, China

Abstract: Consumption by rural and urban residents constitutes the terminal link in the food consumption system. Taking the Yangtze River Economic Belt as a typical study area, this study employed a modified ecological footprint model based on the component approach to quantitatively analyze the spatial-temporal evolution characteristics of the food consumption ecological footprint of rural and urban residents. Additionally, a system dynamics (SD) model grounded in the shared socioeconomic pathways (SSPs) was used to predict the future development trend. The results of this study showed that: (1) From 2005 to 2022, the food consumption ecological footprint of rural and urban residents in the Yangtze River Economic Belt generally showed an increasing trend. The ecological footprint of urban residents was higher than that of rural residents, and the increase in the total ecological footprint of food consumption was also greater. Meanwhile, the dietary

基金项目: 江苏省社会科学基金一般项目 (23ZXZB022); 江苏省研究生科研与实践创新计划项目 (KYCX24_1009)

收稿日期: 2025-01-17; **网络出版日期:** 2025-00-00

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: chenhuiguang@njau.edu.cn

structure between urban and rural residents tended to be consistent, and the structural changes in the per capita ecological footprint of food consumption exhibited significant regional characteristics. (2) In terms of spatial distribution, the total ecological footprint of food consumption by urban and rural residents in 11 provinces and municipalities within the Yangtze River Economic Belt showed a pattern of “high in the east and low in the west”. The standard deviation ellipses were distributed in the direction of “southwest-northeast” and their areas were slightly decreased, which implied that the spatial heterogeneity of the total ecological footprint of food consumption by urban and rural residents was weakened. In addition, the center of gravity trajectories of the total ecological footprint of food consumption by urban and rural residents showed a tendency to move in the opposite direction. This indicated that the integrated urban-rural development in the field of food consumption within the region was further strengthened. (3) In the multi-scenario simulation analysis, there were significant differences in the predicted curves of the total ecological footprint of food consumption by urban and rural residents in the Yangtze River Economic Belt from 2023 to 2035. Among them, the total ecological footprint of food consumption by urban and rural residents was the lowest under the subsistence-oriented development pathway, and that under the affluent-oriented development pathway was the highest. Notably, the sustainable development pathway was the optimal solution to realize the nutritional balance of the residents and environmental friendliness. This study could provide scientific references for achieving sustainable food consumption, promoting urban-rural dietary equity, and ensuring food security in terms of optimizing residents’ dietary structures, reducing urban-rural dietary inequality, and implementing zoning management.

Key Words: food consumption ecological footprint; urban and rural residents; system dynamics model; multi-scenario simulation; sustainable diets; Yangtze River Economic Belt

食物是人类生存的基本必需品和首要消费品^[1-2],食物消费作为生态系统中食物链的重要环节,不仅影响人类的营养与健康,也关系到资源与环境的可持续性^[3]。随着经济快速发展、人均收入提高以及人口持续增长,人类对食物基本消费的“刚需”逐年增加,也刺激了对高品质食物消费的“柔需”升级,进而带来食物消费数量和结构的变化,导致食物消费引致的资源环境压力加剧^[4]。研究指出,食物消费是引起气候变化、生物多样性减少、耕地退化等资源环境问题的主要驱动力^[5]。面对资源供给有限性与人类需求无限性的矛盾,2015 年联合国提出了包括消除饥饿、实现粮食安全、改善营养状况的可持续发展目标(SDGs),使其成为全世界发展的行动指南。中国作为一个人口大国,用世界 7%的耕地资源养活着世界上 21%的人口,但人均耕地面积仅为世界人均耕地面积的一半,长期面临着较大的食物供给压力^[6-7]。为此,中国政府在 2015 年提出大农业观、大食物观概念,2022 年强调树立大食物观、构建多元化食物供给体系,2024 年进一步明确到 2035 年要全面建成多元化食物供给体系、有效满足人民群众多元化食物消费和营养健康需求。然而,近年来极端天气频发、地缘冲突加剧以及新冠疫情影响等多重因素,对全球粮食安全造成了巨大威胁,并可能经由农产品供应链对中国食物安全产生不利影响^[8]。加之中国现阶段面临着城乡居民膳食结构不合理、营养不均衡,农食系统食物有效供给不足、自给率下降等严峻挑战^[9]。因此,面对当前复杂的发展形势,科学评估居民食物消费状况及其对土地资源的环境压力影响,对于深化理解与加快实现可持续食物消费和城乡融合发展显得尤为关键和重要。

生态足迹方法被认为是评估资源利用及可持续发展的重要工具之一^[10-11]。该方法最初是在 1992 年由 William Rees 与其学生 Wackernagel 提出,用以衡量特定人口在一定消费模式下对自然资源的消耗及其对生态环境的影响^[12-13]。之后经过不断发展,现如今已经形成了较为成熟和完整的生态足迹核算体系。生态足迹侧重于消费需求侧,常见的核算思路包括综合法与组分法。综合法是一种自上而下的基于宏观统计数据的核算方法,适用于国家、省、市等较大的研究尺度。该法通常采用统一的单位当量值进行换算,容易导致很多区域的具体细节被忽略^[14];组分法是一种自下而上的通过逐项加合的核算方法,凭借准确性和实用性的优势对于家庭尺度的分析更为有效^[15]。作为生态足迹方法的一个应用领域,食物消费生态足迹源于生态足迹的概念内涵,是指在一定生活条件下,某一区域特定人口因食物消费所占用的以及吸收其二氧化碳排放所需的生态生产性土地面积^[2,14],旨在直观反映居民食物消费对土地资源与环境的影响效应以及可持续发展水平。

国内外学者围绕食物消费生态足迹进行了广泛研究,亦取得了丰硕成果。早期的研究通过大规模调查与参数转换量化了主要食品与土地需求的数量关系^[16],引入了等效农作物概念并简化生态足迹的核算步骤^[17],结合投入产出分析扩展了生态足迹的核算思路^[18],使其得到更加广泛的应用。一方面,区域食物消费生态足迹核算及其异质性得到了较多关注,主要集中在国家、省、市等研究尺度。国外学者利用生态足迹法对加拿大^[19]、英国^[20]、意大利^[21]等食物消费生态足迹进行了分析,国内学者对北京市^[22-23]、福建省^[24]、西藏农区^[2]等居民食物消费生态足迹进行了核算,这些表明不同地区的食物消费对土地资源与环境的影响具有显著差异。不少学者对中国居民食物消费生态足迹的城乡差异进行了对比分析^[25-27],发现居民食物消费不平等会加剧其生态足迹的城乡差距。另一方面,食物消费结构变化会对土地资源需求产生较大影响。已有研究表明,居民膳食结构由植物型向以肉类为特征的富裕型转变会显著驱动食物消费足迹,并且增加土地需求量^[28-29]。此外,模拟预测也是食物消费生态足迹分析的重要内容。学者们利用需求函数、系统动力学模型等进行分析。不同模拟情景表明,倡导健康平衡膳食模式、促进可持续饮食能够减少与饮食有关的环境足迹并降低土地资源需求^[30-31]。除了上述研究外,一些学者从食物浪费^[32]、老龄化^[33]、城镇化^[34]等方面分析了居民食物消费生态足迹。

综上所述,生态足迹分析是国内外可持续食物消费研究的重点和热点^[35-36],已有成果为本研究提供了扎实的理论基础和科学的方法指导,但仍存在进一步的探索空间。其一,尽管现有的生态足迹核算框架相对成熟,但在近年来中国居民外出就餐比例明显增多的背景下,并不能完全衡量食物消费量,特别是在人口集聚区和经济活跃区;其二,现有的食物消费生态足迹多基于全球尺度参数展开,很少有研究进行参数本地化,往往不能准确地评估资源利用的区域差异;其三,鲜有研究将经济、人口、收入等影响因素与食物消费生态足迹的未来预测相结合,尤其是缺乏共享社会经济路径与系统动力学模型的融合分析。基于此,本研究以长江经济带作为典型研究区,采用改进的基于组分法的生态足迹模型分析了 2005—2022 年城乡居民食物消费生态足迹的时空演变,并结合 SSPs 的系统动力学模型预测了 2023—2035 年的发展趋势,有望为实现可持续食物消费、城乡融合发展以及食物安全保障提供科学参考。

1 研究方法与数据来源

1.1 研究区概况

长江经济带作为典型的人口集聚区、经济活跃区和生态敏感区^[37],是中国经济社会发展的重要支撑带^[38],也是生态文明建设的先行示范带^[39]。该区域横跨东中西三大地区,涵盖上海、江苏、浙江、安徽、江西、湖北、湖南、重庆、四川、云南、贵州 11 个省和直辖市(图 1),区域面积约为 205.23 万 km²,占全国的 21.38%。根据国家统计局数据,2022 年长江经济带国内生产总值(GDP)约为 55.98 万亿,占全国的 46.47%,人口和消费品零售额分别占全国的 43.07%和 50.63%,粮食产量占全国的 35.18%。长江经济带是中国经济最具活力和消费最具潜力的地区之一,然而,快速的工业化、城镇化和人口集聚导致该区域资源消耗和环境压力陡然上升,造成耕地面积缩减、土壤生态退化以及水资源污染等问题。因此,本文选取长江经济带 11 个省市作为研究区域具有重要的战略意义和现实紧迫性。

1.2 系统边界与数据来源

1.2.1 系统边界

本研究以城乡居民的终端食物消费为系统边界,包括初级食品及其制成品的直接食物消耗和基本损耗,以及这些食品在最终消费环节所包含的间接能源足迹,但不涉及食物消费过程中的其他隐含足迹或能量,如辅助机械、仪器等能耗^[40]。参照联合国统计委员会《按目的划分的个人消费支出分类标准》并根据《中国居民消费支出分类》的具体要求,以居民家庭年人均食物消费量为切入点,选取原粮、食用油、蔬菜类、肉禽及制品、水产品、蛋类、奶及制品、干鲜瓜果、食糖等 9 种主要食物类别加以核算。这些食物类别按照不同来源被划分为植物性食物和动物性食物两大类,所有食品根据生态足迹构成均可被转换为相应的耕地、林地、草地、水

域、建设用地、能源用地六种土地利用类型,见表 1。

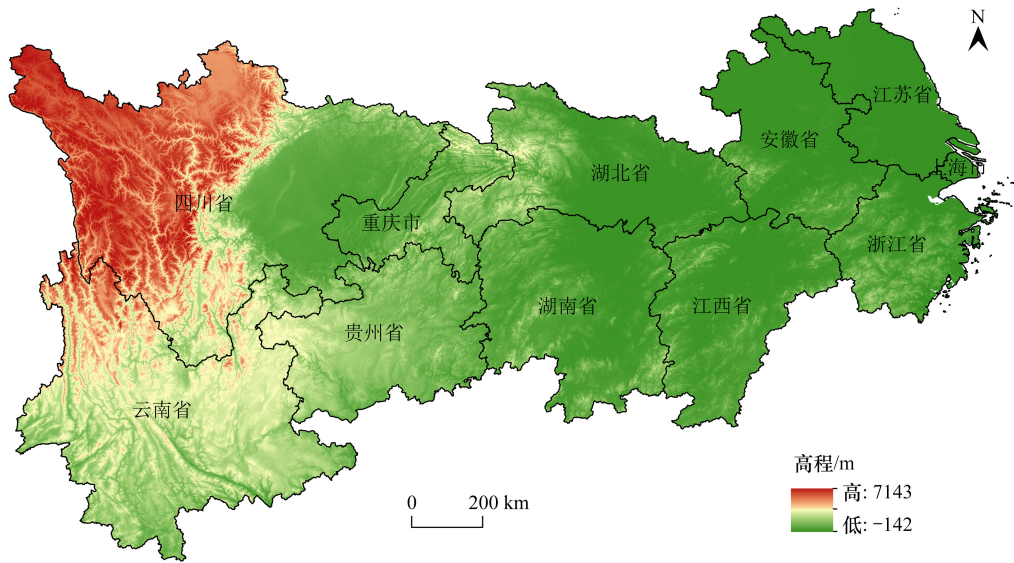


图 1 长江经济带地理位置
Fig.1 The location of the Yangtze River Economic Belt

表 1 食物消费类别及核算指标

Table 1 Main categories and accounting indicators of food consumption		
食物类别 Food categories	指标描述 Indicator description	土地利用类型 Type of land use
原粮 Cereals	谷物、薯类、豆类	耕地、能源用地
食用油 ^a Edible oils	植物油	耕地、能源用地
蔬菜类 Vegetables	蔬菜及食用菌	耕地、能源用地
肉禽及制品 ^b Meat and poultry products	猪肉、牛肉、羊肉、家禽	耕地、草地、能源用地
水产品 Aquatic products	鱼、虾、蟹等	水域、能源用地
蛋类 Eggs	鸡蛋、鸭蛋等	耕地、能源用地
奶及制品 Dairy products	生牛奶及乳制品	耕地、草地、能源用地
干鲜瓜果 ^c Fruits	香蕉、苹果、柑橘、西瓜等	耕地、林地、能源用地
食糖 Sugar	甘蔗、甜菜等成分	耕地、能源用地

^a动物油和脂肪被认为包含在肉禽及制品中,此处不再核算;^b不同省份选择将肉类与家禽合并或单独统计,为了方便比较本文采取合并的处理方式;^c干鲜瓜果参照前人研究和《国家足迹和生物承载力核算工作指南(2019)》^[41]的操作示例进行核算

1.2.2 数据来源与处理

本研究的数据包括两部分:一是 2005—2022 年长江经济带 11 个省市的经济、人口和食物消费数据,均来自国家和各省统计年鉴、统计公报以及年度报告等权威途径。其中,居民人均食物消费量来自全国住户收支与生活状况调查数据。二是生态足迹核算有关的模型参数,来源如下:食物足迹转换系数参考已有研究成果并结合《中国食物成分表(2023 版)》有改进^[2,14,42],综合碳折算系数根据前人研究计算而来^[43],食物基本损耗率取自已有研究成果^[23,34],见表 2;居民在外就餐消费比例来自《2021 中国与全球食物政策报告》^[44],利用中国健康与营养调查数据并根据各类食物在外消费收入弹性计算而来^[45—46],见表 3;相对平均生产力取自全国平均值,均衡因子采用以公顷为单位的全国尺度参数^[47]。此外,利用消费者价格指数对部分省份个别年份的数据缺失值进行填补,并采用三年周期的简单移动平均法对初始数据进行平滑处理,尽可能降低统计口径调整带来的变化影响。

表 2 主要食物的生态足迹转换系数、综合碳折算系数及基本损耗率说明
Table 2 Description of ecological footprint conversion coefficients and combined carbon conversion coefficients, and basic loss rates of main food categories

核算参数 Accounting parameters	原粮 Cereals	食用油 Edible oils	蔬菜类 Vegetables	肉禽及制品 Meat and poultry products				水产品 ^a Aquatic products	蛋类 Eggs	奶及制品 Dairy products	干鲜瓜果 ^b Fruits	食糖 Sugar
				猪 Pork	牛 Beef	羊 Lamb	家禽 Poultry					
农产品折算系数/(kg/kg)												
Conversion coefficients of cropland	1	4	0.3	3.3	2.6	2.3	2.1	2	2	0.4	0.5	2
草地折算系数/(kg/hm ²)					18	24.3				216		
Conversion coefficients of grassland												
来自放牧草比例/%					14	35				26		
Proportion from grazing												
来自饲料粮比例/%				100	86	65	100	80	100	74		
Proportion from feeding												
全国平均生产力 ^c /(kg/hm ²)	5230							40				
National average productivity	4709											
综合碳折算系数/(kgc/kg)	1.2	4.25	0.1	4.36	5.01	5.01	3.69	2.68	3.31	1.56	0.18	1.45
Conversion coefficients of carbon												
基本损耗率 ^d	0.1	0.35	0.3	—	—	—	—	—	—	—	0.3	—

^a水产品来自养殖与捕捞生产,根据中国渔业统计年鉴的数据,养殖与捕捞产量比约为 4:1;b水果分为园林水果和瓜果类水果,根据中国统计年鉴的数据,园林水果与瓜果类水果的产量比约为 7:3;c 原粮全国平均生产力取自 2005—2022 年的平均值,其中饲料粮对应部分取自 2005—2022 年豆类与玉米产量的平均值,水产品全国平均生产力来自捕捞渔业的统计数据;d与植物性食物相比,动物性食物的利用率较高,基本损耗可忽略不计

表 3 2005—2022 年中国城乡居民主要食物在外消费比例
Table 3 Proportions of main foods consumed outside the home by urban and rural residents in China, 2005—2022

食物类别 Food categories	2005—2008			2009—2011			2012—2015			2016—2018			2019—2022		
	城镇 Urban	农村 Rural	—	城镇 Urban	农村 Rural	—	城镇 Urban	农村 Rural	—	城镇 Urban	农村 Rural	—	城镇 Urban	农村 Rural	—
原粮 Cereals/%	16.40	—	—	18.43	11.53	—	19.97	12.57	—	25.13	17.50	—	30.07	21.53	—
食用油 Edible oils	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
蔬菜类 Vegetables/%	8.90	3.60	—	12.70	7.20	—	13.80	7.90	—	17.50	11.10	—	21.00	13.70	—
肉禽及制品 Meat and poultry products:															
猪 Pork/%	14.20	8.30	—	17.10	13.00	—	18.80	14.30	—	24.20	20.70	—	29.40	25.90	—
牛 Beef/%	25.40	13.50	—	25.30	22.90	—	27.70	25.30	—	35.80	36.40	—	43.50	45.60	—
羊 Lamb/%	48.10	31.60	—	25.80	26.60	—	28.30	29.30	—	36.50	42.30	—	44.40	53.00	—
家禽 Poultry/%	12.40	13.00	—	20.60	16.60	—	22.60	18.30	—	29.10	26.40	—	35.40	33.10	—
水产品 Aquatic products/%	12.60	9.40	—	17.80	15.40	—	19.70	17.20	—	26.10	25.70	—	32.30	32.70	—
蛋类 Eggs/%	12.90	5.80	—	13.20	8.50	—	14.20	9.10	—	17.10	12.00	—	20.00	14.40	—
奶及制品 Dairy products/%	14.60	14.00	—	12.70	18.00	—	13.50	19.30	—	16.40	25.40	—	19.10	30.50	—
干鲜瓜果 Fruits/%	4.80	4.50	—	7.40	4.30	—	8.40	4.80	—	11.60	7.70	—	14.70	10.00	—
食糖 Sugar	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—

参考数据中并未给出食用油、干鲜瓜果的居民在外就餐消费的比例

1.3 研究方法

1.3.1 食物消费生态足迹模型

参照生态足迹的基本公式,食物消费生态足迹包括直接食物消费生态足迹和食物最终消费所含的能源生态足迹两部分。前者将包含在外就餐消费和基本损耗的各类食物消费量转换为统一的生态生产性土地面积,后者利用综合碳折算系数法计算吸收食物消费中二氧化碳排放所需的生态生产性土地面积。计算公式如下:

$$EF_{tc} = EF_{fc} + EF_{nc} \quad (1)$$

$$EF_{fc} = N \cdot ef_{fc} = N \cdot \sum \{Q_i / [(1 - k)(1 - \lambda)] \cdot TF_i / \bar{P}_{ij} \cdot r_j\} \quad (2)$$

$$EF_{nc} = N \cdot \sum (Q_{ii} \cdot TC_i / \bar{C}_s \cdot r_a) \quad (3)$$

$$r_j = p_j / p \quad (4)$$

式中, EF_{tc} 为食物消费总生态足迹 (hm^2), EF_{fc} 为直接食物消费生态足迹 (hm^2), EF_{nc} 为食物消费所含的间接能源足迹 (hm^2), ef_{fc} 为直接的食物消费人均生态足迹, N 为地区人口数; TF_i 为第 i 类食物足迹转换系数, λ 为食物损耗率, 见表 2; k 为居民在外就餐消费比例, 见表 3; Q_i 为第 i 类食物的家庭年人均消费量 (kg), Q_{ii} 为含在外就餐和基本损耗的扩展的家庭年人均食物消费量, $i=1, 2, \dots, 9$ 对应着原粮、食用油、……食糖等主要食物; $\bar{P}_{ij}$ 为初级食物每公顷的平均生产力 (kg/hm^2), r_j 为第 j 类土地利用类型的均衡因子, p_j 为全国第 j 类土地利用类型的平均生产力, p 为全国全部土地利用类型的平均生产力, r_a 为能源用地的均衡因子; TC_i 为第 i 类食物的综合碳折算系数, $\bar{C}_s$ 为每公顷生态生产性土地的平均碳吸收率, 本文是指林地、草地和水域的综合碳吸收能力。此外, 核算步骤包括测算含在外就餐消费和食物损耗的扩展的食物消费量, 利用转换系数折算为相应的土地需求量, 进一步转换为统一的生态生产性土地面积, 详细核算流程见图 2。

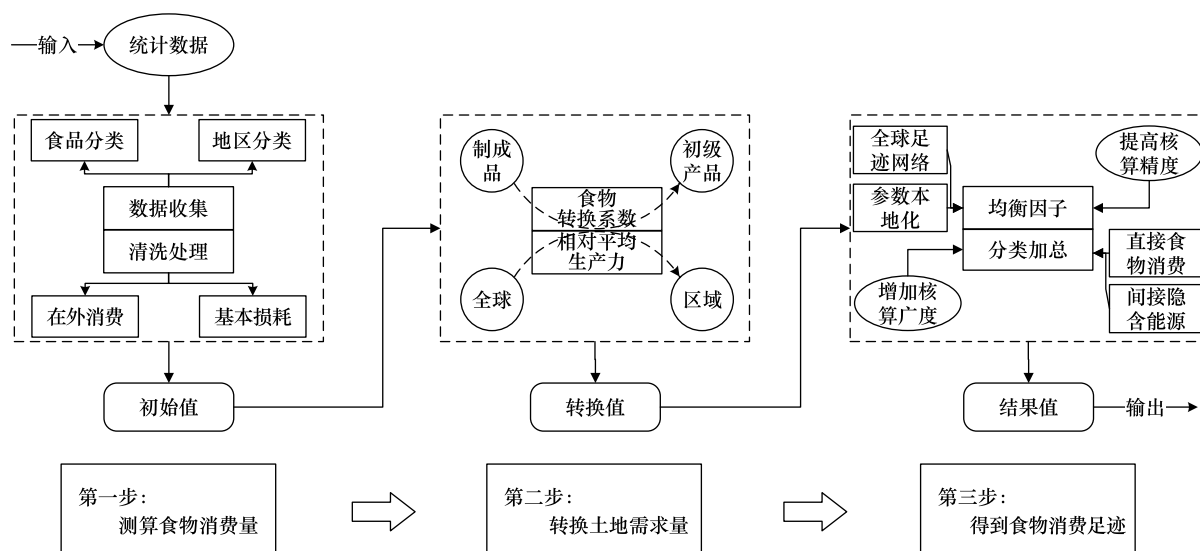


图 2 城乡居民食物消费生态足迹的核算步骤

Fig.2 Accounting steps to the ecological footprint of food consumption by urban and rural residents

1.3.2 重心-标准差椭圆模型

重心-标准差椭圆模型借助重心、长轴、短轴等基本参数多用于描述研究对象的空间分布特征^[48], 揭示长江经济带城乡居民食物消费生态足迹的空间格局和动态变化。重心坐标的计算公式:

$$X = \frac{\sum_{i=1}^n w_i x_i}{\sum_{i=1}^n w_i}; Y = \frac{\sum_{i=1}^n w_i y_i}{\sum_{i=1}^n w_i} \quad (5)$$

长轴和短轴标准差的计算公式:

$$\sigma_x = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (w_i \bar{x}_i \cos \theta - w_i \bar{y}_i \sin \theta)^2}{\sum_{i=1}^n w_i^2}}; \sigma_y = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (w_i \bar{x}_i \sin \theta - w_i \bar{y}_i \cos \theta)^2}{\sum_{i=1}^n w_i^2}} \quad (6)$$

式中, (X, Y) 为食物消费生态足迹的重心坐标, x_i 和 y_i 为研究区的空间坐标, $\bar{x}_i$ 和 $\bar{y}_i$ 为各点距离区域重心的相对坐标, w_i 表示权重, 旋转角 θ 通过计算其正弦值得到; σ_x 和 σ_y 分别为沿长轴和短轴的标准差。上述计算均可借助 ArcGIS 10.8 实现。

1.3.3 基于 SSPs 的系统动力学模型

本研究基于共享社会经济路径的假定情景, 根据已有研究的经济、人口、收入等参数设定^[49-50], 利用系统动力学模型对长江经济带城乡居民的食物消费生态足迹进行模拟预测。其基本假设如下: 第一, 模型运行时间为 2005—2035 年, 其中模拟时间为 2023—2035 年, 时间步长为 1 年。第二, 食物消费生态足迹受到社会、经济、人口、环境等多因素影响, 本文构建了食物消费生态足迹的系统动力学模型, 通过逻辑判断和数学模型确定变量之间的反馈关系, 见图 3。在此基础上, 设定 SSP1(可持续路径)、SSP2(基准情景 Business-as-usual, BAU)、SSP3(温饱型路径)和 SSP5(富裕型路径)四种模拟情景, 选取 GDP、人口、收入、膳食结构、在外就餐等指标作为调控变量。其中, SSP4(非均衡发展路径)严重偏离研究区的实际和可预见的未来发展趋势, 因此本文不作探讨。根据世界银行、国际货币基金组织以及中国国家统计局发布的数据, 每条路径下设定高中低三个等级的调控区间, 见表 4。第三, 考虑到长江经济带发展的区域非均衡性, 本文将 11 个省市划分为三类区域, 分别匹配三个等级调控区间的上限、均值和下限。其中, I 类区域包括上海、江苏和浙江, 具有经济发达、高收入、高消费等特征; II 类区域包括湖北、湖南、重庆、四川和安徽, 具有经济中等、收入中等、消费逐步提升等特征; III 类区域包括江西、云南和贵州, 具有经济欠发达、收入偏低、传统型消费等特征。

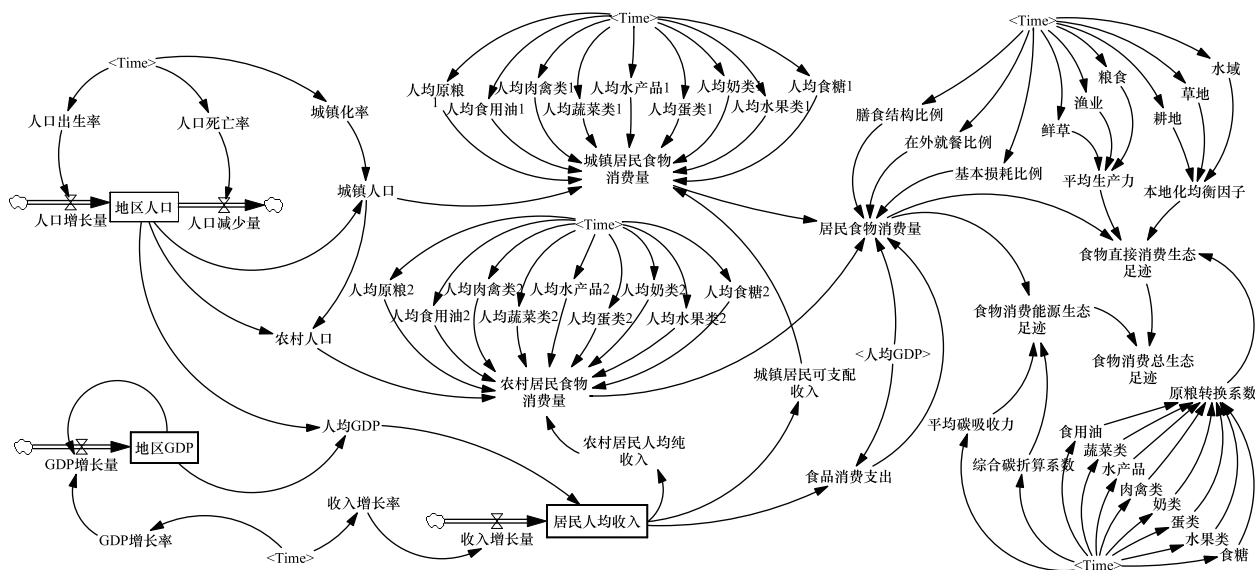


图3 城乡居民食物消费生态足迹的系统存量流量图

Fig.3 System stock and flow diagram of ecological footprint of food consumption by urban and rural residents

2 结果与分析

2.1 食物消费生态足迹时空演变分析

2.1.1 足迹数量时序变化

2005—2022 年, 长江经济带城乡居民的食物消费生态足迹整体呈现增长趋势, 城镇居民的食物消费生态

足迹普遍高于农村居民,如图 4 所示。总体而言,城乡居民食物消费总生态足迹从 2005 年的 1.56 亿 hm^2 增加到 2022 年的 2.60 亿 hm^2 ,增幅达 66.87%;人均生态足迹从 2005 年的 0.58 hm^2 增加到 2022 年的 0.83 hm^2 ,增幅为 43.84%。这表明长江经济带城乡居民的食物消费对资源环境的压力逐年增加。在研究期内,城镇居民食物消费总生态足迹的增幅比农村居民更为显著,而农村居民食物消费人均生态足迹的增幅则相对更大。同时,不同地区城乡居民食物消费人均生态足迹的变化具有区域差异。在研究期内,上海、重庆、江苏城镇居民和农村居民的食物消费人均生态足迹普遍高于其他地区,而云南和贵州则处于较低水平。

表 4 不同 SSPs 下的情景说明与调控变量

Table 4 Scenario description and regulatory variables under different SSPs

路径 Pathways	情景说明 Scenario description	调控变量 Regulatory variables				
		经济发展 Economic	人口增长 Population	收入水平 Income	膳食结构 Dietary	在外就餐 Eating out
SSP 1	可持续发展路径,满足健康平衡的膳食模式	高 (7%—10%)	低 (0.1%—0.3%)	高 (7%—9%)	中 (31%—40%)	低 (5%—15%)
SSP 2 (BAU)	惯性式发展路径,延续历史惯性的发展趋势	中 (4%—6%)	中 (0.4%—0.7%)	中 (4%—6%)	较低 (21%—30%)	中 (20%—35%)
SSP 3	温饱型发展路径,以谷物等植物性食物为主	低 (1%—3%)	高 (0.8%—1.2%)	低 (1%—3%)	低 (10%—20%)	低 (5%—15%)
SSP 5	富裕型发展路径,以肉类等动物性食物为主	高 (7%—10%)	低 (0.1%—0.3%)	高 (7%—9%)	高 (50%—75%)	高 (40%—65%)

SSP: 社会经济共享路径 Shared socioeconomic pathway; BAU: 基准情景 Business-as-usual; 膳食结构是指动物性食物消费与植物性食物消费的实物量之比

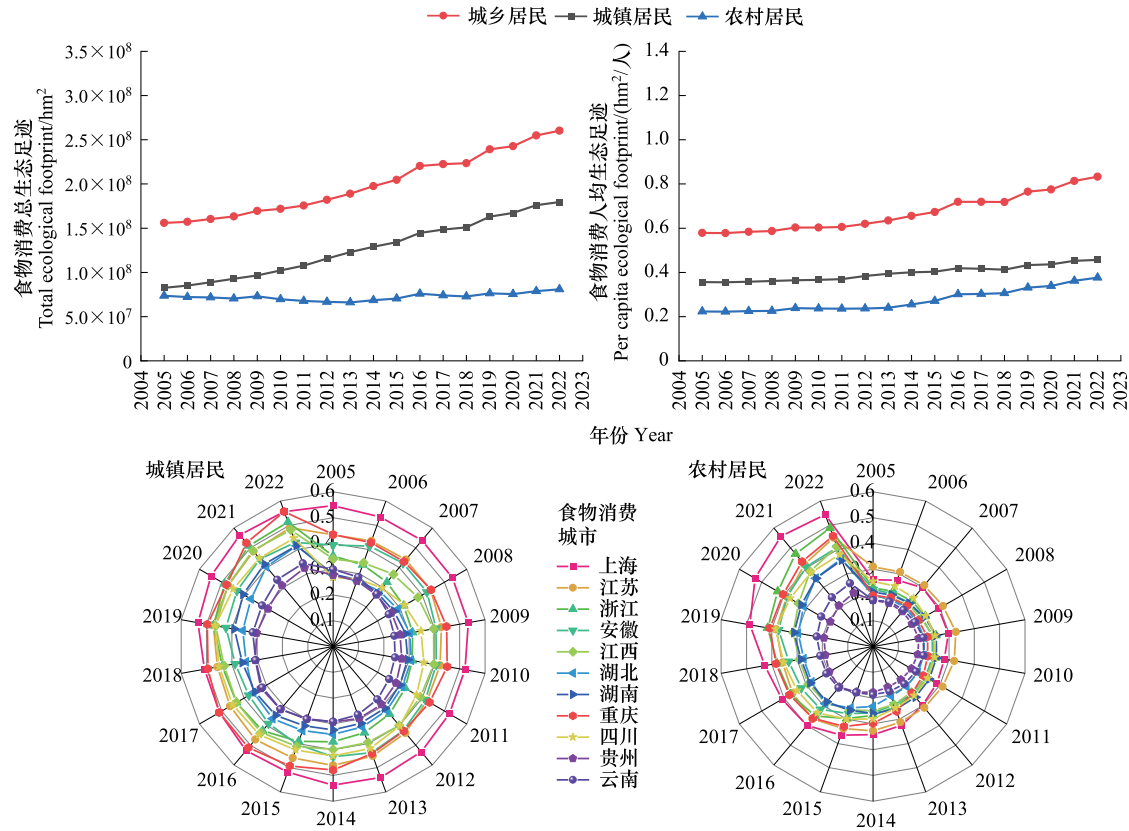


图 4 2005—2022 年城乡居民食物消费生态足迹的数量变化

Fig.4 Quantitative changes of ecological footprint of food consumption by urban and rural residents, 2005—2022

2.1.2 膳食结构时序变化

图5显示了长江经济带11个省市城镇和农村居民食物消费人均生态足迹的结构变化。总体而言,城镇

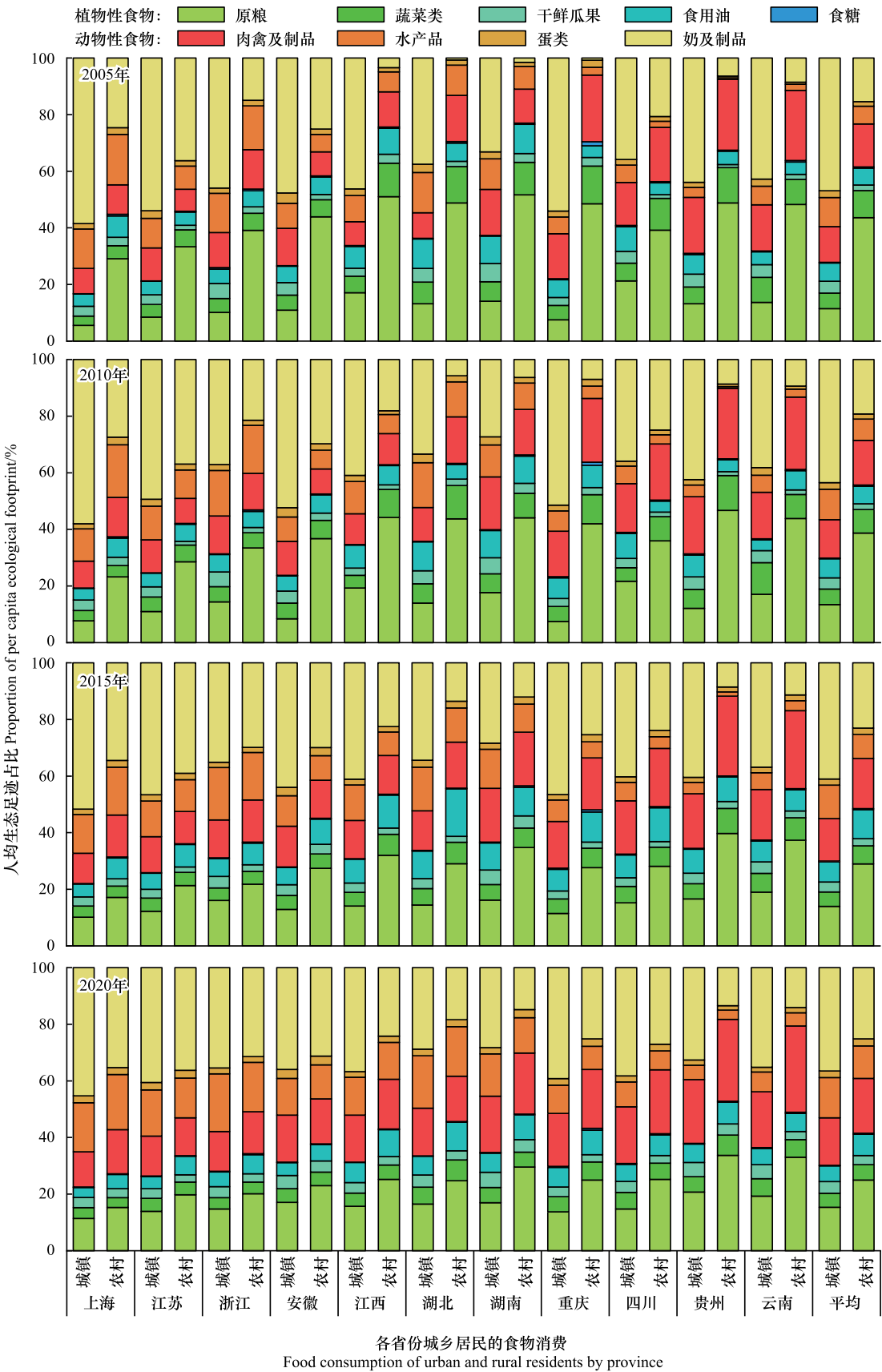


图5 城乡居民食物消费人均生态足迹的结构变化

Fig.5 Structural changes of per capita ecological footprint of food consumption by urban and rural residents

居民食物消费人均生态足迹多以动物性食物为主,但植物性食物比例缓慢上升;农村居民则多以植物性食物为主,但动物性食物比例增加显著。这表明,随着经济社会发展和居民生活水平的提升,城乡居民的膳食结构已经发生改变、愈发趋于一致,膳食理念也正在由“吃得饱”向“吃得好”“吃得营养健康”转变。分地区来看,在云贵川渝地区,由肉禽及制品所驱动的生态足迹比例较高;在江浙沪地区,由奶及制品所驱动的生态足迹比例较高。这也反映了不同地域文化、资源禀赋和饮食习惯的差异化影响。

2.1.3 空间分布格局变化

长江经济带 11 个省市城乡居民食物消费总生态足迹在空间分布上整体呈现出“东高西低”的格局(图 6)。本研究选取 2005、2010、2015 和 2020 年运用自然断点法(Jenks)以及断点前后的均值标准差进行分析,发现江苏的城乡居民食物消费总生态足迹处于较高水平,浙江、四川的城乡居民食物消费总生态足迹增加显著。这主要是受到地区人口规模效应和人均生态足迹增长效应的影响。具体来看,在农村地区,居民食物消费总生态足迹的空间分布格局相对稳定、变化不大。其中,四川、湖南、江苏和安徽的居民食物消费总生态足迹维持在较高水平。在城镇地区,四川、浙江、重庆和江西的居民食物消费总生态足迹增加显著。这表明,研究区内城乡居民食物消费总生态足迹的空间格局受到城镇居民的空间分布特征的关键影响。

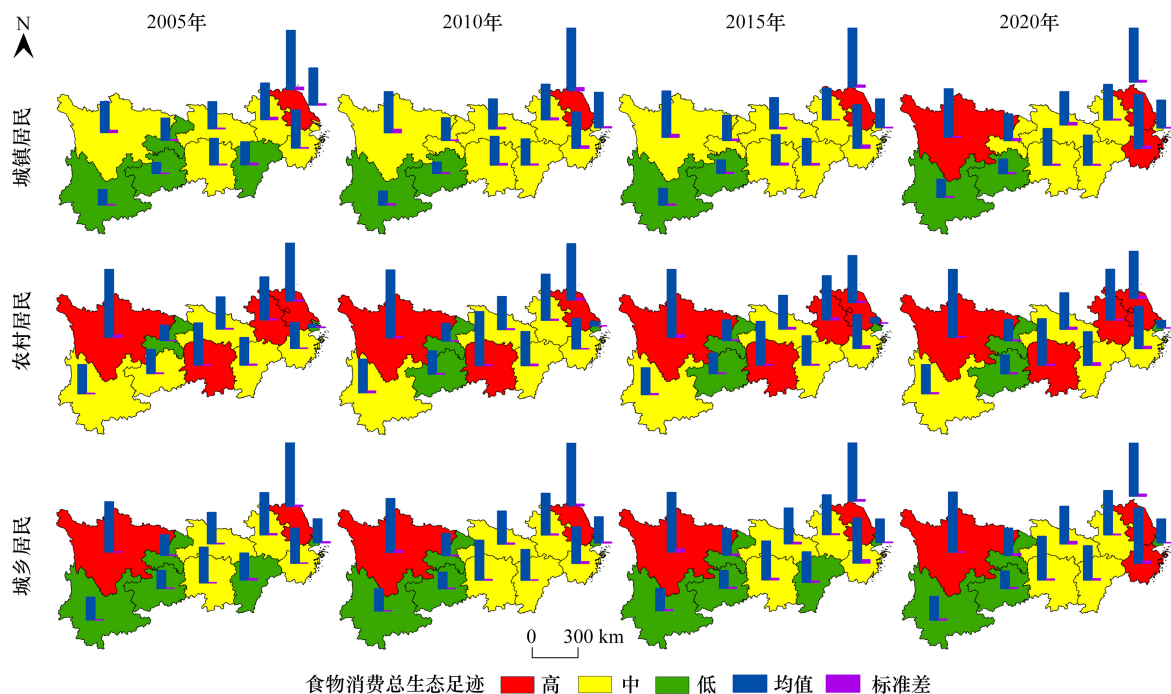


图 6 城乡居民食物消费总生态足迹的空间分布格局

Fig.6 Spatial distribution pattern of total ecological footprint of food consumption by urban and rural residents

2.1.4 重心-标准差椭圆变化

2005—2022 年,长江经济带 11 个省市城乡居民食物消费总生态足迹的标准差椭圆呈现明显的“西南—东北”方向分布,且方向角的北偏东角度逐渐扩大,见图 7。同时,其标准差椭圆的面积略有缩小,这表明城乡居民食物消费总生态足迹的空间异质性有所减弱。结合重心迁移轨迹分析,城镇居民与农村居民的食物消费总生态足迹重心轨迹表现出相向移动的特征。在研究期内,城乡居民食物消费总生态足迹的重心相对稳定,并未发生明显迁移。具体来看,城镇居民的重心整体上呈现由东向西的迁移趋势,农村居民的重心则呈现由西向东的迁移趋势,但二者在南北方位的移动距离均不显著。这一现象表明长江经济带在食物消费领域的城乡融合发展进一步加强。

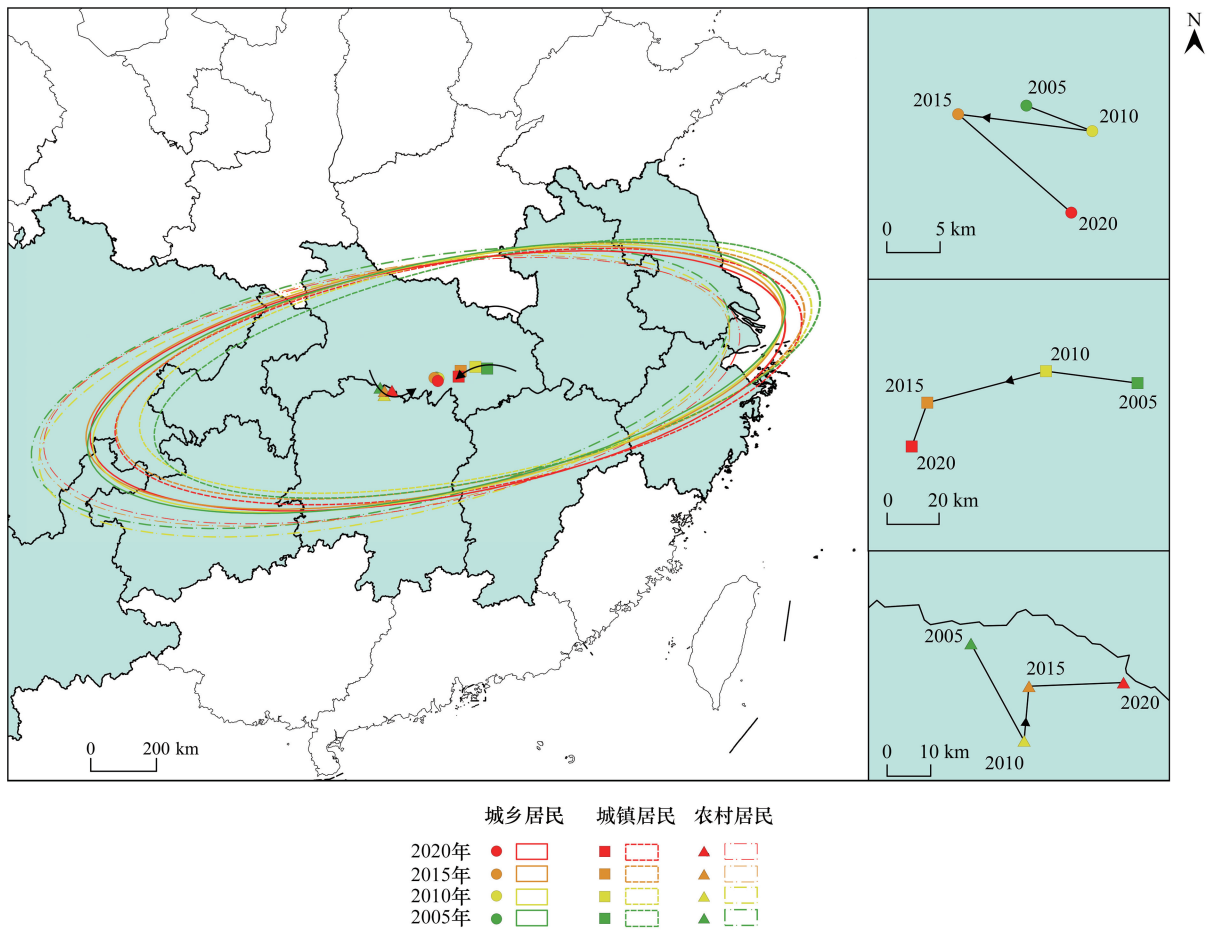


图 7 城乡居民食物消费总生态足迹的迁移轨迹变化

Fig.7 Changes in migration trajectory of total ecological footprint of food consumption by urban and rural residents

2.2 基于 SSPs 的系统动力学情景模拟

不同假定情景下,2023—2035 年长江经济带城乡居民食物消费总生态足迹的预测曲线呈现显著差异。其中,SSP3 路径下的居民食物消费总生态足迹最低,SSP5 路径下的居民食物消费总生态足迹最高。分区域来看,Ⅰ类区域城乡居民食物消费总生态足迹的增长幅度较高,Ⅱ类区域次之,Ⅲ类区域的增长幅度较低且规模相对较小。例如,在 2035 年 SSP5 路径下的城乡居民食物消费总生态足迹的预测值是 SSP1 路径下的 1.74 倍,是 SSP2 路径下的 1.45 倍,是 SSP3 路径下的 2.55 倍。与此同时,表 5 列出了关键年份的长江经济带城乡居民食物消费总生态足迹的预测值以及相对增长率。其中,SSP1 路径是一种最为理想的发展情景,居民食物消费总生态足迹呈现稳定增长。尽管 SSP3 路径下的居民食物消费总生态足迹呈现负增长且总量下降,但是以牺牲膳食结构平衡为代价。SSP5 路径下的居民食物消费总生态足迹呈现高速增长,食物消费城乡不平等进一步加剧。具体来说,在 SSP1 路径下,城乡居民食物消费总生态足迹的相对增长率平均值为 22.99%,相较于 SSP2 和 SSP5 路径分别低二十四个百分点和八十八个百分点,高于 SSP3 路径四十个百分点。

3 讨论与结论

3.1 讨论

促进可持续饮食和城乡融合发展是实现联合国 SDGs 的基本要求,也是推动中国区域高质量发展的重要着力点。首先,长江经济带城乡居民食物消费的人均生态足迹差距逐步缩小,但总生态足迹差距却不断拉大。

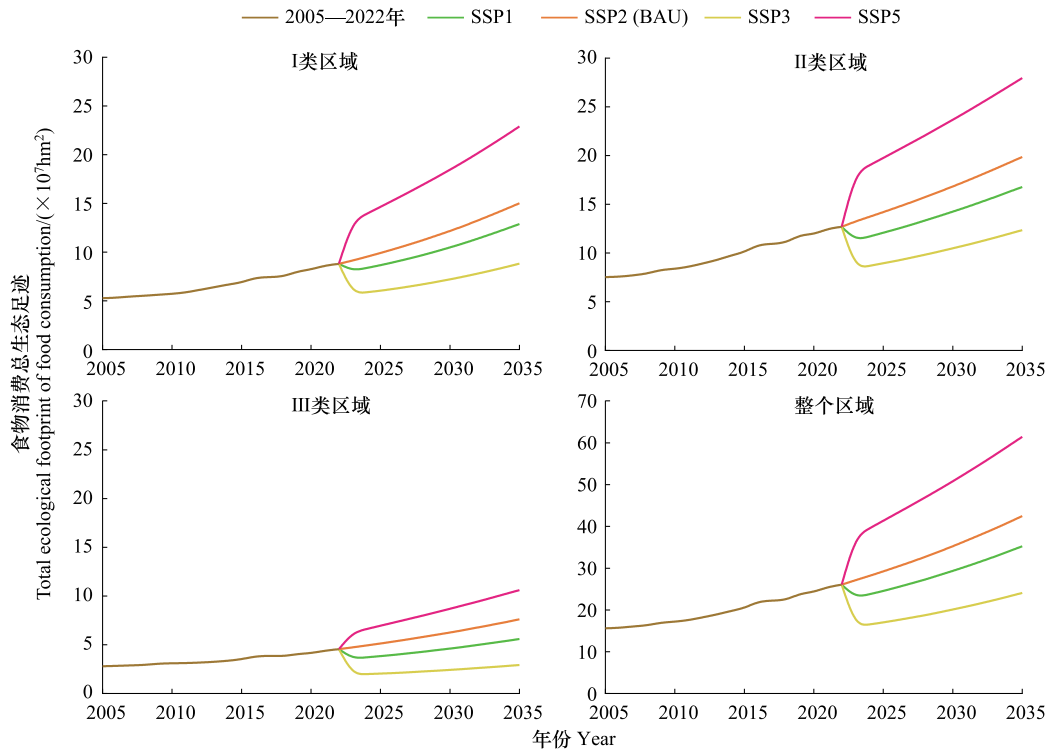


图8 不同 SSPs 下城乡居民食物消费总生态足迹的预测曲线

Fig.8 Prediction curves of total ecological footprint of food consumption by urban and rural residents under different SSPs

表5 不同 SSPs 下长江经济带城乡居民食物消费总生态足迹的模拟结果

Table 5 Simulation results of total ecological footprint of food consumption by urban and rural residents in Yangtze River Economic Belt under different SSPs

年份 Year	指标 Indicator	SSP 1	增长率/% Growth rate	SSP 2 (BAU)	增长率/% Growth rate	SSP 3	增长率/% Growth rate	SSP 5	增长率/% Growth rate
2025	城乡居民	249581514	2.82	292237695	20.39	170178718	-29.89	413464968	70.33
	城镇居民	173135173	3.54	203171018	21.50	121612364	-27.27	286868436	71.55
	农村居民	76446341	1.22	89066677	17.93	48566354	-35.70	126596532	67.62
2030	城乡居民	293391442	20.86	352668133	45.28	201044300	-17.18	508205659	109.36
	城镇居民	207205687	23.91	244465623	46.20	144730254	-13.45	348116999	108.18
	农村居民	86185755	14.11	108202510	43.27	56314046	-25.44	160088659	111.97
2035	城乡居民	352652898	45.28	424843974	75.02	232851407	-4.07	614833666	153.29
	城镇居民	245522577	46.83	290114385	73.50	163122899	-2.45	413720029	147.41
	农村居民	107130321	41.85	134729589	78.39	69728507	-7.68	201113637	166.29

SSP:社会经济共享路径 Shared socioeconomic pathway;BAU:基准情景 Business-as-usual;单位是 hm^2 ,以2020年的实际值作为基期数据进行五年周期的相对增长率计算

长江经济带在快速的工业化、城镇化和经济发展进程中,食物消费升级的结构效应、外来人口流入的规模效应以及人均收入增长效应是导致该区域居民食物消费呈现城乡差异的重要原因^[51]。这表明在推动可持续食物消费转型时,需综合考虑资源、人口、收入和生态等多方因素,基于多目标优化和效益最大化原则缩小城乡食物消费不平等。其次,长江经济带城乡居民膳食结构变化呈现阶段性特征^[52],城镇居民动物性食物消费占比高但增速趋缓,而农村居民动物性食物消费增长迅猛。这表明在保证营养摄入的前提下,需优化城乡居民膳食结构^[53]。对于城镇居民的食物消费,要加强植物基蛋白替代,减油增豆,合理控制动物性食物摄入量;对于

农村居民的营养升级,要规避高碳饮食陷阱,优先推广禽肉、水产品、豆类等低环境影响的蛋白来源。最后,多情景模拟结果显示,可持续发展路径不仅能保障居民食物与营养安全,还能将食物消费生态足迹控制在较低水平。考虑到区域资源禀赋差异和发展非均衡性,应构建“支持-优化-抑制”的梯级管控机制,对应本文划定的Ⅲ类、Ⅱ类和Ⅰ类区域的分区管理策略,从而促进膳食公平、降低整体环境足迹以及实现可持续饮食。

3.2 结论

当前,中国和全球都面临着粮食安全、资源约束与环境压力的多重挑战。本文以典型人口集聚区、经济活跃区和生态敏感区的长江经济带为例,采用改进的基于组分法的生态足迹模型深入分析了 2005—2022 年城乡居民食物消费生态足迹的时空演变特征,并基于 SSPs 的系统动力学模型对 2023—2035 年的发展趋势进行了多情景模拟。主要结论如下:

(1) 2005—2022 年,长江经济带城乡居民的食物消费生态足迹整体呈现增长趋势,城镇居民生态足迹普遍高于农村居民。同时,城镇居民食物消费人均生态足迹以动物性食物为主,但植物性食物比例有所上升;农村居民则以植物性食物为主,但动物性食物比例增加显著。这表明长江经济带城乡居民膳食结构趋于一致、食物消费不平等有所改善。此外,城乡居民食物消费生态足迹变化具有显著的区域特征。

(2) 长江经济带 11 个省市城乡居民食物消费总生态足迹在空间上整体呈现“东高西低”的分布格局,受到城镇居民的空间分布特征的关键影响。同时,其标准差椭圆呈明显的“西南-东北”方向分布,且标准差椭圆的面积略有缩小,这表明城乡居民食物消费总生态足迹的空间异质性有所减弱。此外,城镇居民与农村居民的食物消费总生态足迹重心轨迹呈现相向移动趋势,长江经济带在食物消费领域的城乡融合发展进一步加强。

(3) 在多情景模拟中,2023—2035 年长江经济带城乡居民食物消费总生态足迹的预测曲线呈现显著差异。其中,Ⅰ类区域城乡居民食物消费总生态足迹的增长幅度最高,Ⅱ类区域的增长幅度次之,Ⅲ类区域的增长幅度较低且规模相对较小。同时,在不同发展路径下,城镇居民与农村居民的食物消费总生态足迹的预测数据存在较大差距。其中,可持续发展路径是实现营养均衡与环境友好的最佳解决方案,有助于促进长江经济带在区域内、城乡间的全面协调发展。

参考文献 (References):

- [1] 朱晶. 树立大食物观,构建多元食物供给体系. 农业经济与管理, 2022, (6): 11-14.
- [2] 王灵恩, 李云云, 李佳洳, 郭嘉欣, 张宪洲, 范玉枝, 成升魁. 青藏高原“一江两河”农区居民家庭食物消费生态足迹核算. 生态学报, 2024, 44(17): 7476-7489.
- [3] Tilman D, Clark M. Global diets link environmental sustainability and human health. *Nature*, 2014, 515(7528): 518-522.
- [4] 窦羽星, 刘秀丽. 居民食物消费变化引致的环境足迹测算. 中国环境科学, 2023, 43(1): 446-455.
- [5] 林永钦, 齐维孩, 祝琴. 基于生态足迹的中国可持续食物消费模式. 自然资源学报, 2019, 34(2): 338-347.
- [6] 刘丹, 巩前文, 杨文杰. 改革开放 40 年来中国耕地保护政策演变及优化路径. 中国农村经济, 2018(12): 37-51.
- [7] 孔凡振, 陈会广. 农村劳动力转移与粮食安全研究进展及展望——基于 CiteSpace 和 NVivo 可视化分析. 中国农业资源与区划, 2025, 46(2): 14-29.
- [8] 严斌剑, 谢颖菲, 周应恒. 中国食物系统演化及其包容性: 基于食物货币的视角. 华中农业大学学报(社会科学版), 2024, (2): 10-22.
- [9] 中国农业大学全球食物经济与政策研究院, 浙江大学中国农村发展研究院, 南京农业大学国际食品与农业经济研究中心, 中国农业科学院农业经济与发展研究所, 国际食物政策研究所. 2022 中国与全球食物政策报告. (2022-5-24) [2025-1-9]. http://agfep.cau.edu.cn/art/2022/5/24/art_39031_861011.html.
- [10] Gerbens-Leenes P W, Nonhebel S. Consumption patterns and their effects on land required for food. *Ecological Economics*, 2002, 42(1/2): 185-199.
- [11] Syrovátka M. On sustainability interpretations of the ecological footprint. *Ecological Economics*, 2020, 169: 106543.
- [12] Rees W E. Ecological footprints and appropriated carrying capacity: what urban economics leaves out. *Environment and Urbanization*, 1992, 4(2): 121-130.
- [13] 曹淑艳, 谢高地. 表达生态承载力的生态足迹模型演变. 应用生态学报, 2007, (6): 1365-1372.
- [14] 陈冬冬, 高旺盛. 近 30 年来中国农村居民食物消费的生态足迹分析. 中国农业科学, 2010, 43(8): 1738-1747.
- [15] Simmons C, Lewis K, Barrett J. Two feet-two approaches: a component-based model of ecological footprinting. *Ecological Economics*, 2000, 32(3): 375-380.
- [16] Gerbens-Leenes P W, Nonhebel S, Ivens W P M F. A method to determine land requirements relating to food consumption patterns. *Agriculture*,

- Ecosystems & Environment, 2002, 90(1): 47-58.
- [17] Kastner T, Nonhebel S. Changes in land requirements for food in the Philippines: a historical analysis. *Land Use Policy*, 2010, 27(3): 853-863.
- [18] Bicknell K B, Ball R J, Cullen R, Bigsby H R. New methodology for the ecological footprint with an application to the New Zealand economy. *Ecological Economics*, 1998, 27(2): 149-160.
- [19] Kissinger M. Approaches for calculating a nation's food ecological footprint—The case of Canada. *Ecological Indicators*, 2013, 24: 366-374.
- [20] Scarborough P, Clark M, Cobiac L, Papier K, Knuppel A, Lynch J, Harrington R, Key T, Springmann M. Vegans, vegetarians, fish-eaters and meat-eaters in the UK show discrepant environmental impacts. *Nature Food*, 2023, 4(7): 565-574.
- [21] Genta C, Sanyé-Mengual E, Sala S, Lombardi P. The Consumption Footprint as possible indicator for environmental impact evaluation at city level. The case study of Turin (Italy). *Sustainable Cities and Society*, 2022, 79: 103679.
- [22] 吴燕, 王效科, 逯非. 北京市居民食物消耗生态足迹和水足迹. *资源科学*, 2011, 33(6): 1145-1152.
- [23] 郭华, 蔡建明, 杨振山. 城市食物生态足迹的测算模型及实证分析. *自然资源学报*, 2013, 28(3): 417-425.
- [24] 王海平, 陈志峰, 曹红亮. 城镇化背景下福建城乡居民食物消费转型及其生态足迹. *江苏农业科学*, 2019, 47(22): 315-321.
- [25] Shi C F, Wu C, Zhang J Y, Zhang C J, Xiao Q Q. Impact of urban and rural food consumption on water demand in China—From the perspective of water footprint. *Sustainable Production and Consumption*, 2022, 34: 148-162.
- [26] Dou Y X, Liu X L. Reducing environmental footprints and promoting health: Optimizing dietary structure in China. *Sustainable Production and Consumption*, 2024, 45: 126-138.
- [27] 陈萱, 李绍亭, 任彦军. 2000—2020 年中国城乡食物消费碳-水足迹及其驱动因素分析. *农业工程学报*, 2024, 40(5): 287-296.
- [28] 刘业轩, 甄霖, 胡云锋. 北方农牧交错带农村居民食物消费特征. *生态学报*, 2023, 43(15): 6117-6130.
- [29] Sun Z X, Zhan Y J, Liu L C, Ye Q L, Zhang Q. China's dietary transition and its impact on cropland demand for sustainable agriculture. *Sustainable Production and Consumption*, 2024, 49: 61-71.
- [30] Fu H Y, Li Y T, Jiang P H, Zhou S, Liao C. Transition towards sustainable diets: Multi-objective optimization of dietary pattern in China. *Sustainable Production and Consumption*, 2024, 48: 14-28.
- [31] Zhu X H, Zhang Y, Zhu Y Y, Li Y R, Cui J X, Yu B H. Multidimensional deconstruction and workable solutions for addressing China's food security issues: From the perspective of sustainable diets. *Land Use Policy*, 2025, 148: 107401.
- [32] 王灵恩, 倪笑雯, 李云云, 成升魁. 中国消费端食物浪费规模及其资源环境效应测算. *自然资源学报*, 2021, 36(6): 1455-1468.
- [33] 钱龙, 饶清玲, 余可. 人口老龄化对农村居民食物消费生态足迹的影响——基于省级面板数据的实证分析. *合肥工业大学学报(社会科学版)*, 2023, 37(4): 59-69.
- [34] 王玲玲, 戴淑芬, 王琛. 城镇化水平与我国居民食物消费生态足迹:变化与影响. *广东财经大学学报*, 2021, 36(3): 77-92.
- [35] 李云云, 王灵恩, 成升魁. 国际食物消费可持续性研究进展. *中国农业资源与区划*, 2023, 44(4): 73-88.
- [36] 付秀梅, 李晓楠, 林春宇, 薛诚, 陈睿姝, 鹿守本. 基于科学知识图谱的生态足迹研究演进、框架与前沿中外比较. *生态学报*, 2022, 42(13): 5543-5557.
- [37] 沈威, 鲁丰先, 秦耀辰, 谢志祥, 李阳. 长江中游城市群城市生态承载力时空格局及其影响因素. *生态学报*, 2019, 39(11): 3937-3951.
- [38] 于水, 区小兰. 长江经济带社会经济保障的测度、区域差异与障碍因子. *华东经济管理*, 2023, 37(11): 29-38.
- [39] 中国政府网. 国务院关于依托黄金水道推动长江经济带发展的指导意见. (2014-9-12) [2025-1-9]. https://www.gov.cn/gongbao/content/2014/content_2758494.htm
- [40] Erb K H. Actual land demand of Austria 1926—2000: a variation on ecological footprint assessments. *Land Use Policy*, 2004, 21(3): 247-259.
- [41] Lin D, Hanscom L, Martindill J, Borucke M, Cohen L, Galli A, Lazarus E, Zokai G, Iha K, Eaton D, Wackernagel M. Working Guidebook to the National Footprint and Biocapacity Accounts. Oakland: Global Footprint Network, 2019: 18-20.
- [42] 曹淑艳, 谢高地, 陈文辉, 郭红. 中国主要农产品生产的生态足迹研究. *自然资源学报*, 2014, 29(8): 1336-1344.
- [43] Han J Y, Qu J S, Maraseni T N, Zeng J J, Wang D, Ge Y J, Wu D Y. Spatiotemporal analysis of the food-related carbon emissions of China: Regional heterogeneity and the urban-rural divide. *Journal of Environmental Management*, 2024, 370: 122441.
- [44] 中国农业大学全球食物经济与政策研究院, 浙江大学中国农村发展研究院, 南京农业大学国际食品与农业经济研究中心, 中国农业科学院农业经济与发展研究所, 国际食物政策研究所. 2021 中国与全球食物政策报告. (2021-4-30) [2025-1-9]. http://agfep.cau.edu.cn/art/2021/4/30/art_39031_744872.html.
- [45] 黄季焜, 解伟. 中国农产品供需与食物安全的政策研究. 北京: 科学出版社, 2019: 55-57.
- [46] 郑志浩, 赵殷钰. 收入分布变化对中国城镇居民家庭在外食物消费的影响. *中国农村经济*, 2012, (7): 40-50.
- [47] 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): 8574-8583.
- [48] 王耕, 李素娟, 马奇飞. 中国生态文明建设效率空间均衡性及格局演变特征. *地理学报*, 2018, 73(11): 2198-2209.
- [49] O'Neill B C, Kriegler E, Riahi K, Ebi K L, Hallegatte S, Carter T R, Mathur R, van Vuuren D P. A new scenario framework for climate change research: the concept of shared socioeconomic pathways. *Climatic Change*, 2014, 122(3): 387-400.
- [50] 景丞, 姜彤, 苏布达, 王艳君, 王国杰, 黄金龙, 高妙妮, 林齐根, 刘述慈, 翟建青. 共享社会经济路径在土地利用、能源与碳排放研究的应用. *大气科学学报*, 2022, 45(3): 397-413.
- [51] 祁闯, 孙璇, 黄雅丽, 潘志勇, 陆继来, 王国祥, 张利民. 中国城乡居民食品消费模式及其碳足迹演化特征. *环境科学*, 2025, 46(1): 66-75.
- [52] 朱文博, 全世文, 杨鑫. 中国城乡居民健康饮食评价研究. *世界农业*, 2024(3): 54-67.
- [53] 马维兢, 李小哲, 寇敬雯, 张楚悦, 杨海江, 薛冰. 黄河上游城乡居民食物代谢过程及资源环境效应研究——以兰州市为例. *生态经济*, 2024, 40(5): 171-180.