

DOI: 10.20103/j.stxb.202401250231

袁亮, 柴林, 何伟军, 孔阳, 吴霞. 长江经济带农田生态系统碳水足迹耦合协调与时空演化. 生态学报, 2025, 45(4): 1613-1628.

Yuan L, Chai L, He W J, Kong Y, Wu X. Study on the coupled coordination and spatial-temporal evolution of the carbon and water footprints of farmland ecosystems in the Yangtze River Economic Belt. Acta Ecologica Sinica, 2025, 45(4): 1613-1628.

长江经济带农田生态系统碳水足迹耦合协调与时空演化

袁 亮^{1,2}, 柴 林^{1,2,*}, 何伟军^{1,2}, 孔 阳^{1,2}, 吴 霞^{1,2}

1 三峡大学经济与管理学院, 宜昌 443002

2 湖北省人文社科重点研究基地流域综合治理与水经济发展研究中心, 宜昌 443002

摘要: 节水、降碳是长江经济带农业可持续发展面临的主要挑战, 对农田生态系统的碳水关系进行耦合研究, 有助于明确农业水资源的可持续性和厘清农业碳排放的规律, 为农业生产水资源管理和低碳可持续发展提供决策支持。从碳水关联视角出发, 基于碳水足迹理论, 引入足迹广度与足迹深度对 2011—2020 年长江经济带农田生态系统碳水足迹进行评价, 并利用耦合协调度模型对农田生态系统的碳水足迹耦合关系进行探究。结果显示: (1) 长江经济带农田生态系统处于碳赤字、水盈余阶段, 四川省碳赤字水平最高, 湖南省水盈余指数最高。(2) 长江经济带农田生态系统碳足迹广度整体呈现“先增长后下降”的趋势, 四川省最高, 上海市最低, 且高值区主要集中在长江经济带上游; 除贵州省外, 其余省份碳足迹深度均等于 1, 无需动用存量资本。水足迹广度整体呈波动下降趋势, 江苏省最高, 上海市最低; 除江苏省外, 其余 10 省份水足迹深度均等于 1, 无需动用水资源存量资本。(3) 长江经济带农田生态系统碳足迹与水足迹的耦合协调度逐年上升; 从时间维度来看, 整体耦合协调度还不够高; 从空间维度来看, 碳水足迹耦合协调度均值呈“上游>中游>下游”的分布特征。(4) 长江经济带碳水足迹耦合协调发展水平存在空间依赖, 空间关联性存在不稳定性, 波动较大, 主要表现为高-高集聚区数量增多, 高-低集聚区减少, 低-低、低-高集聚区较为稳定。

关键词: 农田生态系统; 碳足迹; 水足迹; 耦合协调

Study on the coupled coordination and spatial-temporal evolution of the carbon and water footprints of farmland ecosystems in the Yangtze River Economic Belt

YUAN Liang^{1,2}, CHAI Lin^{1,2,*}, HE Weijun^{1,2}, KONG Yang^{1,2}, WU Xia^{1,2}

1 College of Economics & Management, China Three Gorges University, Yichang 443002, China

2 Key Research Institute of Humanities and Social Sciences of Hubei Province-Research Center for Integrated Watershed Management & Water Economy Development, China Three Gorges University, Yichang 443002, China

Abstract: Water conservation and carbon reduction are key challenges for the sustainable development of agriculture in the Yangtze River Economic Belt, and coupled with research on the water-carbon relationship of farmland ecosystems can help to clarify the sustainability of agricultural water resources and elucidate the pattern of agricultural carbon emissions, and provide decision-making support for the management of water resources for agricultural production and low-carbon sustainable development. This paper evaluates the carbon footprint of farmland ecosystems in the Yangtze River Economic Zone from 2011 to 2020 from the perspective of carbon and water correlation, based on the theory of carbon and water footprints, introduces the breadth and depth of footprints, and utilizes the coupling coordination degree model to explore the

基金项目: 国家自然科学基金项目(72104127, 72404169, 71874101); 国家社科基金重大项目(19ZDA08)

收稿日期: 2024-01-25; **网络出版日期:** 2024-11-06

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: 1119255730@qq.com

coupling relationship between carbon and water footprints of farmland ecosystems. The results show that: (1) the farmland ecosystems in the Yangtze River Economic Zone are in the stage of carbon deficit and water surplus, with the highest carbon deficit in Sichuan Province and the highest water surplus index in Hunan Province. (2) The carbon footprint of farmland ecosystems in the Yangtze River Economic Zone exhibits an overall trend of initial increase followed by a decline., with the highest level in Sichuan Province and the lowest in Shanghai, and the high value area is mainly concentrated in the upper reaches of the Yangtze River Economic Zone; except for Guizhou Province, the carbon footprint depth for all other provinces equals 1, and there is no need to utilize the stock of capital. The breadth of the water footprint shows a fluctuating downward trend, with the highest in Jiangsu and the lowest in Shanghai; except for Jiangsu, the depth of the water footprint of the remaining 10 provinces is equal to 1, without the need to utilize the capital stock of water resources. (3) From the value of the coupling degree of coordination, the coordination between the carbon and water footprints of farmland ecosystems in the Yangtze River Economic Zone has shown a trend of annual increase, but the overall coupling degree of coordination is not high enough in the time dimension; from the spatial dimension, the average value of the coupling degree of the carbon and water footprints is distributed in the form of "upstream>middle reaches>downstream". (4) There is a spatial dependence on the coupled and coordinated development level of the carbon and water footprint in the Yangtze River Economic Zone, and the spatial correlation is unstable and fluctuates greatly, which is mainly manifested in the increase in the number of high-high agglomerations, fewer high-low agglomerations, and more stable low-low and low-high agglomerations.

Key Words: agroecosystems; carbon footprint; water footprint; coupled coordination

气候变化与水资源短缺一直备受关注^[1],2022年联合国发布的《世界水发展报告》指出水安全和气候变化将对人类的生存发展造成持续而深刻的影响。一方面,气候变化正在对人类社会产生影响,农业已成为温室气体排放的主要来源之一,占全球温室气体排放的24%^[2]。另一方面,随着人口的增长和经济的发展,全球水资源需求不断增加,水资源短缺已经成为全球性的问题。我国作为农业生产大国,耕地总面积为18.51亿亩,农业活动不仅会释放大量温室气体,同时会消耗大量水资源^[3]。因此,有效评估农田生态的碳排放和水资源消耗强度能够为生态环境保护和资源高效开发利用提供参考。

碳、水足迹的概念均由“生态足迹”概念衍生而来^[4]。近年来,足迹研究已成为量化碳排放强度和水资源消耗对环境压力的有效方法。目前,碳、水足迹分别在量化农业温室气体排放、农业生产过程中的水资源消耗等方面被广泛应用,学界对农业碳足迹和水足迹开展了大量研究,关于农业碳足迹的研究主要是基于生命周期法^[5]、IPCC法^[6]在不同维度上对不同农作物进行研究,如,付伟^[7]、李明琦^[8]、尚杰^[9]、崔文超^[10]等分别从全国、省级、市级、区县等4个层面对我国农业碳足迹进行了核算,强调农业温室气体排放对生态环境的影响。在农业水足迹领域,主要利用生命周期法^[11]和水足迹理论^[12]从不同尺度出发对不同区域的农作物水足迹进行核算。

现有研究多集中于基于单一足迹对农田生态系统面临的环境压力进行分析,但是面对日益突出的复杂环境问题,单一足迹已无法对农田生态系统面临的压力进行全面分析评价。而且,碳、水是农业生产密不可分的两种要素,一方面农业生产过程中需要消耗化肥、薄膜等农资,产生碳排放;另一方面农业生产过程中农作物的生长也需要消耗水资源,碳水足迹的关联分析能够为区域农业可持续发展提供更加科学的依据。近年来,有少数学者开始关注农业碳水足迹的关联关系研究,并采用生命周期法、投入产出分析等方法开展相应研究,Liberatore等通过生命周期法对意大利小麦生产过程的碳水足迹进行核算分析^[13];张惠云等基于生命周期法对吉林省水稻生产的碳水足迹进行核算,并分析其时空演化特征^[14];杨文娟等利用投入产出分析对河南省不同产业的碳水足迹效率进行了对比研究^[15]。这些研究关注区域内部农田生态系统的碳水足迹核算对比及时空格局演化分析,仍存在以下不足之处:(1)已有研究主要集中在碳水足迹核算对比及时空格局演化方面,而对碳水足迹协同发展水平的空间格局演化鲜有研究。(2)已有研究的动态量化预测水平不高,仅能反映研究

区域的碳排放、水消耗现状,无法预测未来发展态势。

因此,本文以长江经济带农田生态系统为研究对象,对其碳水足迹进行核算,并与生态承载力结合对农田生态系统碳水足迹现状进行判定和评估;引入足迹深度和广度来表征农业生产活动对碳水资源流量和存量资本的消耗程度和占用水平;通过分析时空差异特征揭示农田生态系统碳水足迹的时空演变规律,构建耦合协调度模型识别碳水足迹耦合发展类型,探索长江经济带农田生态系统碳水足迹耦合协调发展的空间关联特征。本文的主要创新点是:(1)从碳水关联视角出发,构建耦合协调度模型分析其协同发展关系,运用 GeoDa 空间自相关数据分析方法和 ArcGIS 可视化对农田生态系统碳水足迹耦合协调发展水平的空间特征进行探究,分析其空间分布形态及空间关联性。(2)在动态量化碳水足迹的基础上,将生态承载力与碳水足迹相结合,能够评估区域农业未来可持续发展能力。

1 研究区域与数据来源

1.1 研究区域

长江经济带横跨我国东部、中部、西部三大区域,涵盖云南、四川、贵州、重庆、湖南、湖北、江西、安徽、浙江、江苏和上海 9 省 2 市(图 1),区域面积约为 205.23 万 km^2 ,占全国的 21.4%,拥有全国 81%的水资源和 33.34%的耕地,2022 年农业总产值约为 33979 亿,约占全国 40.26%。

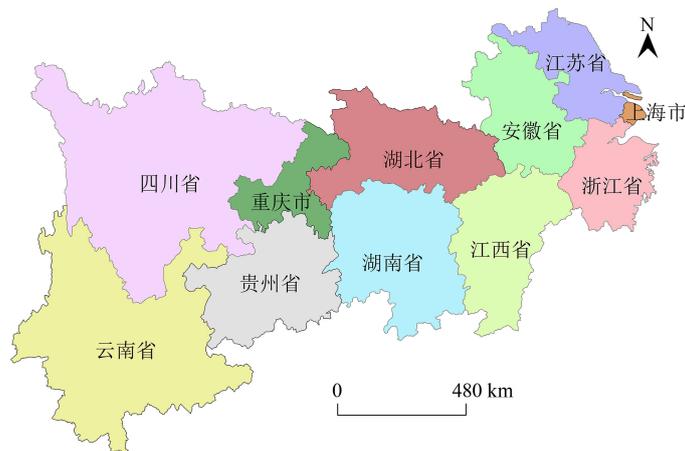


图 1 长江经济带区位图

Fig.1 Location map of the Yangtze River Economic Belt

1.2 数据来源

2011—2020 年长江经济带各省市的主要农作物产量、农作物播种面积及氮肥、磷肥、钾肥、农药、农膜、农业灌溉、农用柴油等生产资料使用量主要来自于各省市《统计年鉴》《统计公报》及《农村统计年鉴》;有效降水量、单位农田灌溉用水量等数据主要来自于各省市《水资源公报》;部分省市的耕地面积来自于各省市《国民经济和社会发展统计公报》;其中部分缺失数据通过插值法补齐。

2 研究方法

2.1 农田生态系统碳排放测算

根据 IPCC 温室气体清单指南,农田生态系统中的碳排放主要来自农业生产资料的投入引起的 CO_2 排放、稻田种植引起的 CH_4 排放、化肥使用引起的 N_2O 排放。

2.1.1 农田 CO_2 排放核算

农田 CO_2 主要由氮肥、磷肥、钾肥、农药、农膜、农用柴油、农业灌溉等农业生产资料的投入引起。根据

IPCC 系数法^[16], 农田 CO₂ 排放计算如下:

$$EF_{CO_2} = \sum G_w \times \alpha_w \times 44/12 \quad (1)$$

式中, EF_{CO_2} 表示排放的 CO₂ 当量, 单位为万 t; G_w 为第 w 种农业生产资料的使用量, 单位为万 t; α_w 为第 w 种农业生产资料的碳排放系数(表 1); 44/12 为 C 当量转换为 CO₂ 的系数。

表 1 碳排放系数及来源

Table 1 Carbon emission factors and sources

农业生产资料 Agricultural means of production	排放系数 Coefficient	单位 Unit	农业生产资料 Agricultural means of production	排放系数 Coefficient	单位 Unit
氮肥 Nitrogenous fertilizer	2.12	kg/kg	农膜 Mulching film	5.18	kg/kg
磷肥 Phosphatic fertilizer	0.64	kg/kg	农用柴油 Agricultural diesel	0.59	kg/kg
钾肥 Potash fertilizer	0.18	kg/kg	农业灌溉 Agricultural irrigation	266.48	kg/hm ²
农药 Pesticides	4.93	kg/kg			

2.1.2 农田 CH₄ 排放核算

稻田作为农田生态系统中最主要的 CH₄ 排放源, 占全球 CH₄ 排放的 10%—13%^[17]。根据已有研究, 稻田 CH₄ 排放量置换成 CO₂ 当量的计算如下:

$$EF_{CH_4} = \sum F_q \times \beta_q \times 25 \quad (2)$$

式中, EF_{CH_4} 表示根据 CH₄ 排放量置换成的 CO₂ 当量, 单位为万 t; F_q 为第 q 种稻田类型种植面积, 单位为万 hm²; β_q 为长江经济带不同省市第 q 种稻田类型的 CH₄ 排放因子(表 2), 单位为 t/hm²; 25 为根据 CH₄ 的增温潜势换算成 CO₂ 当量的转换系数^[18]。

表 2 长江经济带稻田 CH₄ 排放因子

Table 2 Emission factors of CH₄ from rice fields in the Yangtze River Economic Zone

种类 Type	上海	江苏	浙江	贵州	安徽	江西	湖南	湖北	重庆	四川	云南
单季稻 Sing-crop rice	215.5	215.5	215.5	156.2	215.5	215.5	236.7	236.7	156.2	156.2	156.2
双季稻 Double-crop rice	224.0	224.0	224.0	171.7	224.0	224.0	237.2	237.2	171.7	171.7	177.7

2.1.3 农田 N₂O 排放核算

农田生态系统作为 N₂O 的主要来源, 排放量约占人类活动 N₂O 排放量的 84%^[19]。根据《省级温室气体清单编制指南》, 农田 N₂O 排放量换算 CO₂ 当量计算如下:

$$EF_{N_2O} = (N_a + N_b) \times (44/28) \times 298 \quad (3)$$

式中, EF_{N_2O} 表示农田 N₂O 排放量换算成 CO₂ 的当量, 单位为万 t; N_a 、 N_b 分为 N₂O 直接排放量(包括化肥投入和秸秆还田直接产生的 N₂O 排放量)和间接排放量(挥发沉降间接产生的 N₂O 和淋溶或径流间接产生的 N₂O), 单位为万 t; 44/28 为 N₂O 与 N 分子量之比; 298 为 N₂O 换算成 CO₂ 当量的转换系数^[20]。

$$N_a = (N_{\text{化肥}} + N_{\text{秸秆}}) \times \chi \quad (4)$$

式中, $N_{\text{化肥}}$ 为使用化肥的含氮量; 其中复合肥的含氮量按照总量的 1/3 计算; χ 为 N₂O 的直接排放系数, 取 $\chi = 0.109$ ^[21]; $N_{\text{秸秆}}$ 为秸秆还田过程中的含氮量。

$$N_{\text{秸秆}} = \sum_{g=1}^n (B_g/L_g - B_g) \times m_g \times k_g + B_g/L_g \times \varepsilon_g \times k_g \quad (5)$$

式中, B_g 为农作物 g 的产量, 单位为 t; L_g 为农种作物 g 的经济系数; m_g 为农作物 g 的秸秆还田率(%), 因为秸秆还田比例尚未有官方统计数据, 所以将秸秆还田比率统一设置为 0.2^[22]; k_g 为农作物 g 秸秆含氮率(%); ε_g 为农种作物 g 的根冠比, 如表 3 所示。

表 3 农作物碳排放及碳吸收相关系数

Table 3 Correlation coefficients of crop carbon emission and carbon sequestration

作物种类 Crop type	经济系数 Economic coefficient	秸秆含氮率/% Nitrogen content of straw	根冠比/% Root/shoot ratio	碳吸收率/% Carbon uptake rate	水分系数/% Water coefficient
水稻 Rice	0.489	0.00753	0.125	0.4100	0.12
小麦 Wheat	0.434	0.00516	0.166	0.4900	0.12
玉米 Corn	0.438	0.00580	0.17	0.4700	0.13
大豆 Soybeans	0.425	0.01810	0.13	0.4500	0.13
烟叶 Tobacco	0.830	0.01440	0.2	0.4500	0.85
花生 Peanuts	0.556	0.01820	0.2	0.4500	0.10
芝麻 Sesame	0.417	0.01310	0.2	0.4500	0.15
甘蔗 Sugarcane	0.750	0.83000	0.26	0.4500	0.50
麻类 Hemp	0.830	0.01310	0.2	0.4500	0.12
薯类 Potatoes	0.667	0.01100	0.05	0.4226	0.70
蔬菜类 Vegetables	0.830	0.00800	0.25	0.4500	0.90
油菜籽 Rapeseed	0.271	0.00548	0.15	0.4500	0.10

$$N_b = N \times \omega_p \times \varphi + N \times \gamma_p \times \eta \quad (6)$$

式中, N 为投入的氮肥、复合肥的总氮量; ω_p 、 γ_p 分别为氮肥和复合肥的排放系数 0.01、0.0075^[23], φ 、 η 分别为农田生态系统化肥的沉降率与淋溶率, 依据 IPCC 研究成果分别取 10% 和 20%。

2.2 农田生态系统碳足迹、碳承载力及盈亏指数

2.2.1 农田生态系统碳吸收计算模型

农田生态系统碳吸收是指农作物在生长过程中的碳吸收, 即农作物通过光合作用吸收大气中的 CO_2 将有机物质固定在植物体内的过程^[24], 农田生态系统碳吸收量为各类农作物在生长期内的碳吸收量之和, 结合农作物产量、农作物经济系数、农作物根冠比、农作物含碳量^[8] (表 3), 农田生态系统碳吸收量 C_d 计算如下:

$$C_d = \sum_{g=1}^V C_g = \sum_{g=1}^V P_g \times B_g \times (1 - Y_g) \times (1 + \varepsilon_g) / L_g \quad (7)$$

式中, g 为农作物类型; C_g 为农作物 g 的碳吸收量, 单位为 t; P_g 为农作物 g 的碳吸收率 (%); B_g 为农作物 g 的产量, 单位为 t; Y_g 为农作物 g 的水分系数 (%); ε_g 为农作物 g 的根冠比; L_g 为农作物 g 的经济系数; V 为农作物种类数。

2.2.2 农田生态系统碳足迹估算

农田生态系统碳足迹是指人类在农业生产活动时形成的碳流, 即直接或间接造成 CO_2 排放所需要占用的土地面积, 属于生态足迹的组成部分^[25]。

$$CD = (EF_{\text{CO}_2} + EF_{\text{CH}_4} + EF_{\text{N}_2\text{O}}) / NP \quad (8)$$

$$NP = Cd / G_s \quad (9)$$

式中, CD 为农田生态系统碳足迹, 即为农田生态系统吸收其农田生态系统碳排放所需要的耕地面积, 单位为 hm^2 ; NP 表示农田生态系统的固碳能力, 单位为 t/hm^2 ; G_s 为耕地面积, 单位为 hm^2 。

2.2.3 碳生态承载力及生态盈亏指数

碳生态承载力是指区域每年的固碳量^[26], 在农田生态系统中, 耕地的数量是发挥固碳作用的根本保证。因此, 将耕地面积作为区域碳生态承载力^[27]。当农田生态系统碳足迹大于耕地面积, 说明存在碳生态赤字; 反之, 则为碳生态盈余, 碳盈余量是指耕地面积与农田生态系统碳足迹的差值。

$$CG = CO - CD \quad (10)$$

式中, CG 为碳生态盈亏指数, 单位为万 hm^2 ; CO 为耕地面积即区域碳生态承载力, 单位为 hm^2 ; $CG > 0$, 表明区域处于生态盈余, 碳生态承载力较强, 有进一步开发利用空间; $CG = 0$, 表明区域处于生态平衡; $CG < 0$, 表明区

域处于生态赤字,碳排放量已超过农田生态系统可吸收上限,碳生态承载力较弱。

2.3 农田生态系统水足迹、水资源承载力及盈亏指数

2.3.1 农田生态系统水足迹

农田生态系统水足迹表示一定时期内生产单位农作物所消耗的水资源量,包括绿水足迹、蓝水足迹和灰水足迹^[12],水足迹 WF 的计算方法如下所示:

$$WF = WF_{\text{green}} + WF_{\text{blue}} + WF_{\text{grey}} \quad (11)$$

(1) 农田生态系统绿水足迹。农田生态系统绿水足迹表示农作物在生长过程中所消耗储存在土壤中的水量,通常与有效降水量有关^[28],农田生态系统绿水足迹 WF_{green} 计算为^[29]:

$$WF_{\text{green}} = \frac{Q_{rg}^t \times V_r^t}{\pi_{re}^t} \quad (12)$$

式中, Q_{rg}^t 为 t 时期 r 区域农作物 g 的播种面积,单位为万 hm^2 ; V_r^t 为 t 时期 r 区域的有效降水量,单位为 mm ; π_{re}^t 为复种指数。

(2) 农田生态系统蓝水足迹。农田生态系统蓝水足迹表示农作物生长过程中消耗的地下水和地表水,通常与灌溉用水量相关^[3],蓝水足迹 WF_{blue} 计算模型为^[30]:

$$WF_{\text{blue}} = AR_r^t \times H_v^t = AR_r^t \times \frac{E_g^t O_g^t}{S_g^t} \quad (13)$$

式中, AR_r^t 为 t 时期 r 区域的单位农田灌溉用水量,单位为 m^3/hm^2 ; H_v^t 为农作物灌溉面积,单位为万 hm^2 ; E_g^t 为农作物有效灌溉面积,单位为万 hm^2 ; O_g^t 为农作物 g 的播种面积,单位为万 hm^2 ; S_g^t 为农作物的总播种面积,单位为万 hm^2 。

(3) 农田生态系统灰水足迹。农田生态系统灰水足迹指在化肥施用后,为稀释污染物使其达到标准的水资源消耗量^[31],灰水足迹 WF_{grey} 计算模型为^[32]:

$$WF_{\text{grey}} = \frac{NE \times PO}{C_{\text{max}}^n - C_{\text{net}}^n} \quad (14)$$

式中, NE 为氮肥的淋失率,依据《第一次全国污染源普查-农业污染源肥料流失系数手册》取值为 10%; PO 为农业生产过程中氮肥的折纯用量,单位为 kg ; C_{max}^n 取值为 $0.01\text{kg}/\text{m}^3$ ^[33]; C_{net}^n 为污染物在水体中的初始浓度,取值为 0^[34]。

2.3.2 农田生态系统水生态承载力

农田生态系统水生态承载能力是指在地区现有水权分配模式下,以维护生态良性循环发展为条件,水资源所能支撑的农田生态系统发展的最大规模^[35],水资源承载力 EC 计算为^[36]:

$$EC = 0.4 \times Q_w \times L_{rw} \times \left(\frac{Q_{cw}}{P_{ew}} \right) \quad (15)$$

式中, Q_w 表示水资源均衡因子,根据国家足迹核算方法取值为 5.19^[37]; L_{rw} 为各省份平均水资源产量因子,取值如表 4 所示; Q_{cw} 表示区域水资源总量,单位为亿 m^3 ; P_{ew} 为水资源平均生产能力,取 $3140\text{m}^3/\text{hm}^2$ ^[38]。

表 4 长江经济带各省份平均水资源产量因子

Table 4 Average water resource yield factor of provinces in the Yangtze River Economic Zone region

区域 Region	上海	江苏	浙江	贵州	安徽	江西	湖南	湖北	四川	重庆	云南
产量因子 Yield factor	215.5	215.5	215.5	156.2	215.5	215.5	236.7	236.7	156.2	156.2	156.2

2.3.3 水生态盈亏指数

水生态盈亏指数为水生态承载力与水生态足迹之间的差值,反应水资源供需平衡情况^[39],计算方法如下:

$$ED = EC - WF \quad (16)$$

ED 为水生态盈亏指数,单位为万 hm^2 ; $ED > 0$, 表明处于生态盈余,水生态承载力较强,有进一步开发利用空间; $ED = 0$, 表明处于生态平衡; $ED < 0$, 表明处于生态赤字,水资源使用量已超过农田生态系统可使用上限,生态承载力较弱。

2.4 碳足迹深度、广度模型

耕地作为提供自然资源和生态服务的自然资本,按照属性划分为存量资本和流量资本两部分,分别用足迹深度、广度来反映自然资本的存量和流量,足迹深度表示人类对自然资源存量的消耗程度,足迹广度表示人类对自然资源流量的占用水平^[40]。

碳足迹广度 EF_{size} 为:

$$EF_{\text{size}} = \min[EF, EC], 0 < EF \leq EC \quad (17)$$

碳足迹深度 EF_{depth} 为:

$$EF_{\text{depth}} = 1 + \frac{\max[EF - EC, 0]}{EC} \quad (18)$$

$EF_{\text{depth}} \geq 1$, 1 为足迹深度的自然原长。当 $EF \leq EC$ 时, $EF_{\text{depth}} = 1$, 表示流量资本能够满足自身消耗,无需借助存量资本; $EF > EC$ 时, $EF_{\text{depth}} > 1$, 表示流量资本无法满足自身消耗,需将存量资本作为补充被消耗。

2.5 耦合协调度模型

为探究农田生态系统碳足迹与水足迹在发展过程中的协调程度,利用耦合协调度衡量系统之间的协同效应与协同程度^[41]。耦合协调度值越大,则表明两系统之间的耦合情况越好,且整个系统结构越趋于稳定,反之则表明两系统之间的耦合情况越差且整个系统趋于无序。具体步骤如下:

(1) 由于碳足迹与水足迹的量纲不同,不利于数据的对比与分析,在确定权重前需要对碳、水足迹原始数据进行标准化处理,消除量纲的影响^[42]。碳足迹、水足迹作为负向指标,标准化处理公式如下:

$$x'_{ij} = \frac{\max(x_j) - x_{ij}}{\max(x_j) - \min(x_j)} \times 0.99 + 0.01 \quad (19)$$

式中, x_{ij} 与 x'_{ij} 分别为碳足迹或水足迹的原始数据值和标准化值; $\max(x_j)$ 与 $\min(x_j)$ 分别碳足迹或水足迹为最大值与最小值。

(2) 采用熵权法对碳足迹、水足迹的权重进行计算,如式(20)~(23)所示。

$$P_{ij} = \frac{x'_{ij}}{\sum_{i=1}^m x'_{ij}} \quad (20)$$

$$e_{ij} = -\frac{1}{\ln(n)} \sum_{i=1}^m (P_{ij} \times \ln P_{ij}) \quad (21)$$

$$d_{ij} = 1 - e_{ij} \quad (22)$$

$$C_{ij} = \frac{d_{ij}}{\sum_{j=1}^m d_{ij}} \quad (23)$$

式中, m 为评价时间长度, j 为评价指标的数量, n 为研究区域数量, P_{ij} 为第 i 年碳足迹或水足迹的比重值, e_{ij} 为计算的碳足迹或水足迹的信息熵, d_{ij} 为碳足迹或水足迹的信息熵冗余度, C_{ij} 为碳足迹或水足迹的权重。

(3) 计算碳足迹、水足迹的综合发展指数 U_1 、 U_2 :

$$U_1 = \sum_{j=1}^m C_{ij} x'_{ij} \quad (24)$$

$$U_2 = \sum_{j=1}^m C_{ij} x'_{ij} \quad (25)$$

(4) 碳足迹与水足迹的耦合协调度:

$$A = \frac{2 \sqrt{U_1 \times U_2}}{\sqrt{(U_1 + U_2)}} \quad (26)$$

$$T = h_1 U_1 + h_2 U_2 \quad (27)$$

$$D = \sqrt{A \times T} \quad (28)$$

式中, A 表示耦合度; D 表示耦合协调度; T 表示协调度值, 反映碳足迹、水足迹的整体发展水平; h_1 、 h_2 为待定系数, 假设碳水足迹在协调发展过程同等重要, $h_1 = h_2 = 0.5$ 。为了更加直观和清晰的对碳水足迹协同发展进行评价分析, 根据耦合协调度值对子系统的耦合协调度进行等级划分^[43], 如表 5 所示:

表 5 耦合协调度等级划分标准

Table 5 Criteria for classifying the degree of coupling coordination

耦合协调度 Coupling coordination	[0,0.2)	[0.2,0.4)	[0.4,0.5)	[0.5,0.6)	[0.6,0.8)	[0.8,1.0]
耦合协调类型 Type of coupling coordination	重度失调	轻度失调	濒临失调	初级协调	中度协调	高度协调

2.6 空间相关性分析

为了进一步探究长江经济带农田生态系统碳水足迹耦合协调发展能力的空间分布规律^[44], 采用局部莫兰指数 (Local Moran's I) I_a 进行分析:

$$I_a = \frac{D_e - \bar{D}}{S^2} \sum_f F_{ef} (D_f - \bar{D}) \quad (29)$$

式中, D_e 、 D_f 为区域 e 和 f 的耦合协调度值; \bar{D} 为 D 的平均值; S^2 表示方差; F 为空间权重矩阵; F_{ef} 表示长江经济带沿线区域 e 和 f 的空间距离权重。

I_a 的取值范围为 $[-1, 1]$, 当 $I_a > 0$ 时, 表示该区域与相邻区域有类似的高值或低值, 空间集群为 HH 集群 (高-高集聚) 和 LL 集群 (低-低集聚); 当 $I_a < 0$ 时, 表示该区域与相邻区域的取值有显著差异, 表现为空间离群, 空间集聚群为 HL 集群 (高-低集聚) 和 LH 集群 (低-高集聚)。

3 结果分析

3.1 农田生态系统碳水足迹及碳水生态承载力时间差异

长江经济带碳水足迹及碳水生态承载力时间变化趋势如图 2 所示, 2011—2020 年长江经济带农田生态系统碳生态承载力总体呈波动上升趋势, 主要是由耕地面积变化所导致, 耕地面积由 2011 年的 3544 万 hm^2 增长至 2020 年的 4236 万 hm^2 。长江经济带农田生态系统碳足迹呈现“先增长后下降”趋势: ①2011—2013 年处于增长期, 碳足迹由 201474 万 hm^2 增长到 274465 万 hm^2 , 平均增长率为 10.8%, 碳足迹增加的原因主要是稻田 CH_4 排放量的增加以及秸秆还田中的氮元素输入增加, 导致农田 N_2O 排放量增加, 最终导致碳足迹增加。②2013—2020 年为下降期, 碳足迹由 274465 万 hm^2 减少到 175756 万 hm^2 , 平均降幅 6.2%, 碳足迹减少的原因主要在于化肥、农药、地膜等农业生产资料的投入减少, 导致农业生产活动投入产生的碳排放量减少, 以及农作物产量的降低, 导致碳吸收能力的减弱, 双重因素的叠加导致碳足迹减少。

长江经济带农田生态系统的水生态承载力因受年际水资源量丰枯影响, 总体呈波动状态; 农田生态系统水足迹总体呈波动下降的趋势, 2015 年达到峰值, 随后逐年下降, 主要原因由以下两方面原因造成: 一方面是单位农田灌溉用水量逐年下降, 单位农田灌溉用水量由 2011 年的 $3821\text{m}^3/\text{hm}^2$ 降至 2020 年的 $3167\text{m}^3/\text{hm}^2$, 导致农田灌溉用水需求逐渐降低; 另一方面是农业生产资料使用量的降低, 由于农村农业部提出了控制化肥使用的方案, 导致氮肥施用量由 2011 年的 994 万 t 逐渐减少至 2020 年的 824 万 t, 从而促使灰水足迹持续下降。



图2 长江经济带碳水足迹及碳水生态承载力时间变化趋势

Fig.2 Temporal trends of carbon and water footprints and carbon and water ecological carrying capacity of the Yangtze River Economic Zone

长江经济带农田生态系统碳水盈亏指数如图3所示,2011—2020年长江经济带农田生态系统整体呈现碳赤字,说明生产性土地无法完全吸收由农业生产活动产生的碳足迹,但碳赤字程度逐渐降低。水盈余状态不断提高,表明长江经济带农田生态系统的水环境不断改善。长江经济带农田生态系统碳水生态环境呈现时间分布差异,具体表现为:碳足迹逐渐下降,碳生态承载力逐渐上升,碳生态赤字逐渐减小;水足迹波动下降,水生态承载力波动上升,水生态盈余值逐渐提升。并且,长江经济带农田生态系统碳水环境呈现较为明显的时间差异,2011—2020年长江经济带农田生态系统整体呈现水生态盈余状态,能够实现内部自我循环,其中2020年水生态盈余指数最高。

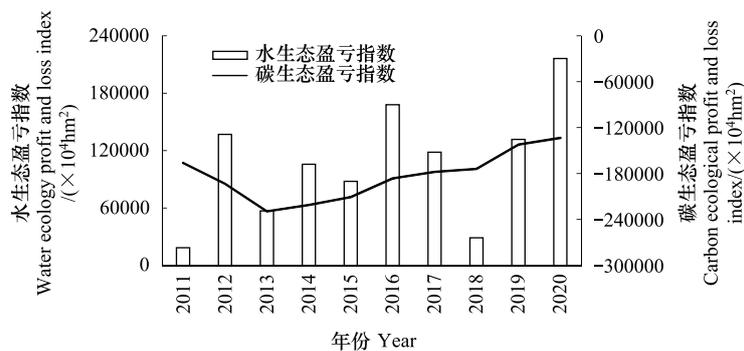


图3 长江经济带农田生态系统碳水盈亏指数变化趋势

Fig.3 Trend of carbon and water surplus/deficit indices of farmland ecosystems in the Yangtze River Economic Zone

3.2 农田生态系统碳水足迹及碳水生态承载力空间差异

长江经济带11省市平均碳水足迹及碳水生态承载力空间分布特征如图4所示,2011—2020年平均碳足迹最大的省份为四川,总量占到长江经济带碳足迹总量的22.16%,其他省份由高到低依次为贵州、云南、江苏、安徽、湖南、湖北、重庆、浙江、江西、上海。由此可知碳足迹较高的区域主要集中在上游地区,较低的区域主要集中在下游地区。平均碳生态承载力也存在空间差异,云南省的碳生态承载力最高,主要原因是云南作为农业大省,耕地面积高于其他省份,随着农业技术水平的提升,农作物单位面积产量及固碳能力不断增强。上海市的碳生态承载力最低,虽然上海市农业生产技术水平较高,农作物单位面积产量和固碳能力也在不断提升,但是由于上海市自身面积较小,导致耕地面积也较少,因此碳生态承载力最低。长江经济带农田生态系统平均水足迹整体上呈现“上游>中游>下游”的空间格局,省际间的水生态承载力差异较为明显,四川、贵州水生态承载力最大,云南、湖南、江西次之,产生差异的原因主要是降雨量及水资源总量的影响。

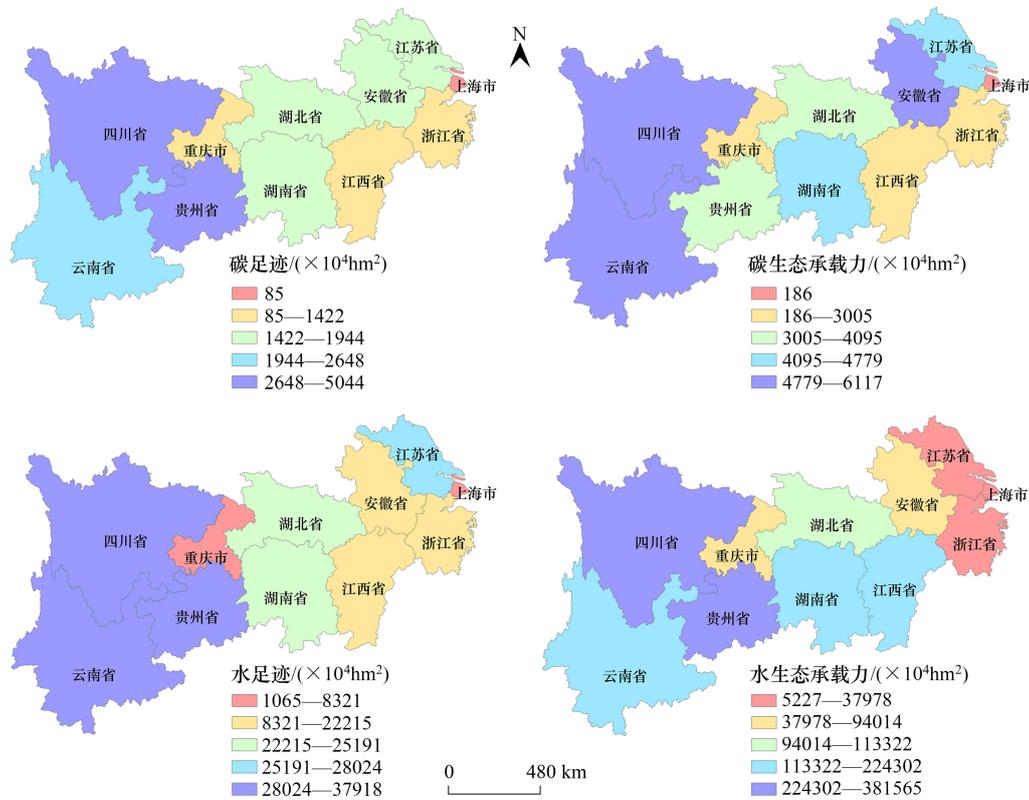


图 4 长江经济带农田生态系统平均碳水足迹及碳水生态承载力空间分布

Fig.4 Spatial distribution of average values of indicators of farmland ecosystems in the Yangtze River Economic Zone, 2011—2020

3.3 农田生态系统碳足迹深度与广度

长江经济带农田生态系统碳足迹深度如表 6 所示,2011—2015 年贵州省碳足迹深度大于 1,但碳足迹深度值在不断减小,直到等于 1;2016—2020 年碳足迹深度等于 1,表明碳生态环境虽然形势严峻,但是在逐渐好转。

表 6 长江经济带 11 省市农田生态系统碳足迹深度/10⁴ hm²

Table 6 Carbon footprint depth of farmland ecosystems in 11 provinces and cities in the Yangtze River Economic Zone

区域 Region	年份 Year									
	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020
上海	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
江苏	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
浙江	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
安徽	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
江西	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
湖南	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
湖北	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
重庆	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
四川	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
云南	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
贵州	1.51	1.16	1.18	1.08	1.04	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00

长江经济带农田生态系统碳足迹广度如表 7 所示,2011—2020 年各省碳足迹广度整体呈现“先增长后下

降”的趋势,平均碳足迹广度由高到低依次为四川、贵州、云南、江苏、安徽、湖南、湖北、重庆、浙江、江西、上海,高值区主要集中在长江经济带上游。

表 7 长江经济带 11 省市农田生态系统碳足迹广度/ 10^4 hm^2

Table 7 Carbon footprint breadth of farmland ecosystems in 11 provinces and cities in the Yangtze River Economic Zone

区域 Region	年份 Year									
	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020
上海	9.95	9.11	8.95	8.71	8.72	8.38	9.03	8.23	6.83	6.78
江苏	222.50	205.62	198.29	193.71	189.73	188.07	161.93	274.78	153.21	155.69
浙江	142.94	148.15	154.48	149.99	150.05	171.98	160.52	89.07	92.17	85.50
安徽	154.59	147.73	209.40	199.94	191.62	171.43	171.58	168.36	148.79	154.36
江西	121.48	131.10	129.44	125.89	125.91	110.27	109.19	105.78	90.78	95.37
湖南	135.08	133.27	198.40	191.24	181.85	177.84	175.38	171.76	151.92	147.13
湖北	190.05	187.84	187.11	177.31	168.88	161.21	160.38	150.27	123.26	134.40
重庆	153.62	156.19	154.01	143.79	150.36	143.68	142.06	111.04	109.46	147.51
四川	376.04	394.89	675.75	671.21	614.13	492.42	479.40	500.51	371.35	468.53
云南	242.92	280.62	290.24	298.48	303.86	285.31	266.13	246.77	206.53	227.35
贵州	175.49	455.22	454.81	454.01	453.74	401.40	390.81	344.03	347.98	334.94

3.4 农田生态系统水足迹广度与深度

长江经济带农田生态系统水足迹深度如表 8 所示,除江苏外,其余 10 省份农田生态系统水足迹深度均等于 1,说明水资源流量资本能够满足农业生产活动的需要,无需动用水资源存量资本;江苏省受播种面积及单位农田灌溉用水量的影响,除 2015 年、2016 年以及 2020 年外均需要动用水资源存量资本。

表 8 长江经济带 11 省市农田生态系统水足迹深度/ 10^4 hm^2

Table 8 Depth of water footprint of farmland ecosystems in 11 provinces and cities in the Yangtze River Economic Zone

区域 Region	年份 Year									
	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020
上海	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
江苏	1.08	1.48	1.95	1.31	1.00	1.00	1.30	1.32	2.16	1.00
浙江	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
安徽	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
江西	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
湖南	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
湖北	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
重庆	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
四川	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
云南	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
贵州	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00

长江经济带农田生态系统水足迹广度如表 9 所示,2011—2020 年长江经济带各省农田生态系统水足迹广度整体呈波动下降趋势,由高到低以此为江苏、湖北、四川、安徽、贵州、江西、湖南、云南、浙江、重庆、上海。

3.5 农田生态系统碳足迹耦合协调分析

为了进一步厘清长江经济带碳足迹耦合协调特征,从耦合协调类型及其动态演化视角对各省市耦合协调度展开分析。长江经济带农田生态系统碳足迹耦合协调度均值如图 5 所示,2011—2020 年,长江经济带中四川的耦合协调度均值最高,位于 0.8—1.0 之间,属于高度协调;贵州、江苏、云南、湖北、湖南、安徽 6 省的耦合协调度均值处于 0.6—0.8 之间,属于中度协调,且位于这一区间的省市最多,占比超过 50%;江西、浙江耦合协调度均值处于 0.5—0.6 之间,属于初级协调;上海、重庆耦合协调度均值处于 0.4—0.5 之间,属于濒临

失调。从整体来看,上游区域耦合协调度均值为 0.647,处于 0.6—0.8 之间,属于中度协调;中下游区域耦合协调度均值分别为 0.588、0.555,处于 0.5—0.6 之间,属于初级协调,形成了“上游>中游>下游”的空间格局。

表 9 长江经济带 11 省市农田生态系统水足迹广度/ 10^4 hm^2

Table 9 Breadth of water footprint of farmland ecosystems in 11 provinces and cities in the Yangtze River Economic Zone

区域 Region	年份 Year									
	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020
上海	115.56	109.86	97.24	91.80	97.23	109.05	121.69	115.36	107.54	99.99
江苏	4232.14	3208.48	2436.66	3431.95	4371.49	4370.91	3376.94	3252.31	1991.44	3714.70
浙江	1342.22	1512.50	1117.50	1410.67	1472.65	1290.75	1239.09	1187.21	1037.38	877.36
安徽	2830.40	2549.85	3085.43	2645.55	2906.21	3139.36	1813.75	2820.41	2521.60	2186.61
江西	1918.33	1944.62	2312.80	2140.38	2081.73	2108.29	2110.97	1960.61	1928.99	1657.97
湖南	2518.70	2559.60	2704.37	2715.92	2627.83	2571.53	2592.32	2569.19	2408.56	1922.62
湖北	3406.88	3433.32	3367.69	3560.79	3333.64	3462.39	3413.83	3216.19	3008.25	2782.96
重庆	826.59	687.25	886.49	908.60	883.77	898.33	863.34	889.56	787.50	689.24
四川	2686.04	2830.44	2705.07	2933.69	3025.10	2988.77	2966.47	2893.81	2682.86	2205.48
云南	1869.88	2203.92	2192.93	2267.02	2292.77	2275.54	2239.05	1801.96	2290.77	1807.70
贵州	1230.15	1432.72	1509.40	1472.16	1555.39	1581.55	1543.16	1582.40	1430.45	923.70

长江经济带农田生态系统碳水足迹耦合协调度位序演变情况如图 6 所示,近年来,长江经济带各省市农田生态系统碳水足迹的耦合协调度变化显著,发展水平不一,位次波动明显。四川、贵州、云南三省形成了碳水足迹耦合发展的高水平圈层,农业综合实力为碳水足迹的融合发展奠定了坚实的基础。上海、浙江、安徽形成了碳水足迹融合的高速发展区,碳水足迹融合水平有了较大的提升,其中上海从第 11 名上升到第 5 名,安徽从第 5 名上升到第 3 名,浙江从第 10 名上升到第 7 名。部分省份碳水足迹协调发展进程较慢,增长速度不及其他地区,江西从第 8 名下降到第 10 名,湖北从第 3 名下降到第 6 名,湖南从第 7 名下降到第 8 名。

3.6 农田生态系统碳水足迹耦合协调度的空间关联特征分析

通过 Geoda 软件和 ArcGIS 软件对长江经济带农田生态系统的碳水足迹耦合协调水平的局部空间关联特征进行分析,结果如图 7 所示。

从时间序列角度来看,高-高集聚区在 2011—2020 年间主要分布于四川、云南、贵州、江苏、浙江、上海、安徽等 7 省;低-低集聚区在 2011—2020 年间分布于重庆、上海、浙江。高-高集聚区和低-低集聚区的耦合协调水平空间集聚格局均表现出显著的正相关性;高-低集聚区在 2011—2014 年主要分布于浙江、江苏、安徽,在 2016 年仅分布在湖南。低-高集聚区在 2013 年、2014 年均分布于湖南、湖北、江西,2020 年仅分布在湖北、重庆。

从空间分布角度来看,高-高集聚区集中在长江经济带上游和下游区域,主要原因在于上游区域政策、资源、地理位置以及坚实的农业基础,提升了耦合协调水平;下游的农业技术水平、政策、经济基础等促进了耦合协调水平的提升。低-低集聚区集中在重庆、上海两市,主要是因为重庆地貌以山地、丘陵为主,土地细碎、作

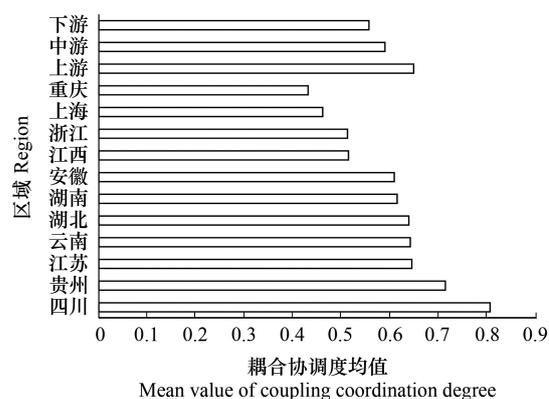


图 5 2011—2020 年长江经济带农田生态系统碳水足迹耦合协调度均值

Fig.5 Mean value of carbon water footprint coupling coordination degree of farmland ecosystem in the Yangtze River Economic Belt from 2011 to 2020

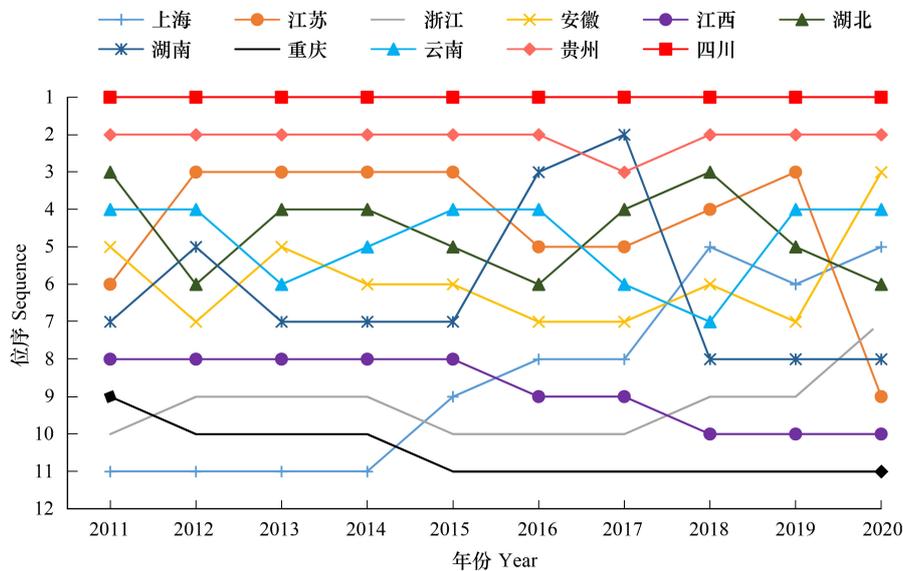


图6 2011—2020年长江经济带农田生态系统碳水足迹耦合协调度位序演变

Fig.6 Evolution of the coupled coordination degree rank order of the carbon and water footprint of farmland ecosystems in the Yangtze River Economic Zone from 2011 to 2020

业基础条件差;上海区域面积较小,耕地面积与其他区域相比较少,且生产成本较高,因此形成弱发展集聚。低-高集聚区主要集中在长江经济带中游地区,中游地区的农田生态系统碳水足迹耦合协调水平不会因为与高水平地区相邻而得到提升。

4 讨论

本文基于碳水足迹理论与耦合协调度模型对区域碳水足迹水平及内在关系进行探究,并以长江经济带11省市农田生态系统为例展开研究,所得到的碳水足迹评价结果与李志英^[45]、陈义忠等^[46]得到的研究结果基本一致,但是由于上述研究对研究边界、排放系数的考虑不同,导致评价结果与本文存在一定差异。此外,从时间趋势来看,碳水足迹水平在不断降低,这在李华^[47]、阳君等^[48]的研究中均有体现。但与本文不同的是,上述研究均是在省级层面进行研究,通过化肥等生产资料、作物生产耗水确定碳水足迹水平,而本文还关注了稻田 CH_4 的排放和施用化肥间接排放的 N_2O ,核算更加系统和全面。本文还进一步探讨了长江经济带农田生态系统碳水足迹的协同发展关系,发现碳水足迹耦合协调度均值呈“上游>中游>下游”的分布特征,不同区域应根据实际情况进行政策调整。研究表明,碳水足迹理论与耦合协调度模型相结合的农田生态系统碳水协同关系研究中效果较好,但仍有一些问题需要进一步探究:(1)在对农田生态系统碳水足迹评价及耦合协调规律进行研究时,需要结合研究对象的实际情况,合理选择碳源、耗水农作物等,进一步提升研究结论的准确性。(2)气候变化对农业生产条件产生了影响,改变了农业生产的基础条件,模拟不同气候变化条件下农田生态系统的碳水足迹对于推动农业绿色可持续发展具有重要意义。(3)土地流转作为优化土地资源配置的重要方式,不同土地种植规模下将改变化肥、机械、水资源等的投入与消耗,精细刻画不同土地利用模式下的农田生态系统碳水足迹将有助于提升资源利用效率和减少碳排放。

5 结论与建议

5.1 结论

(1)长江经济带农田生态系统碳水生态环境具有明显的时间差异和空间差异,农田生态系统处于碳赤字、水盈余阶段,其中四川省碳赤字水平最高,湖南省水盈余指数最高。

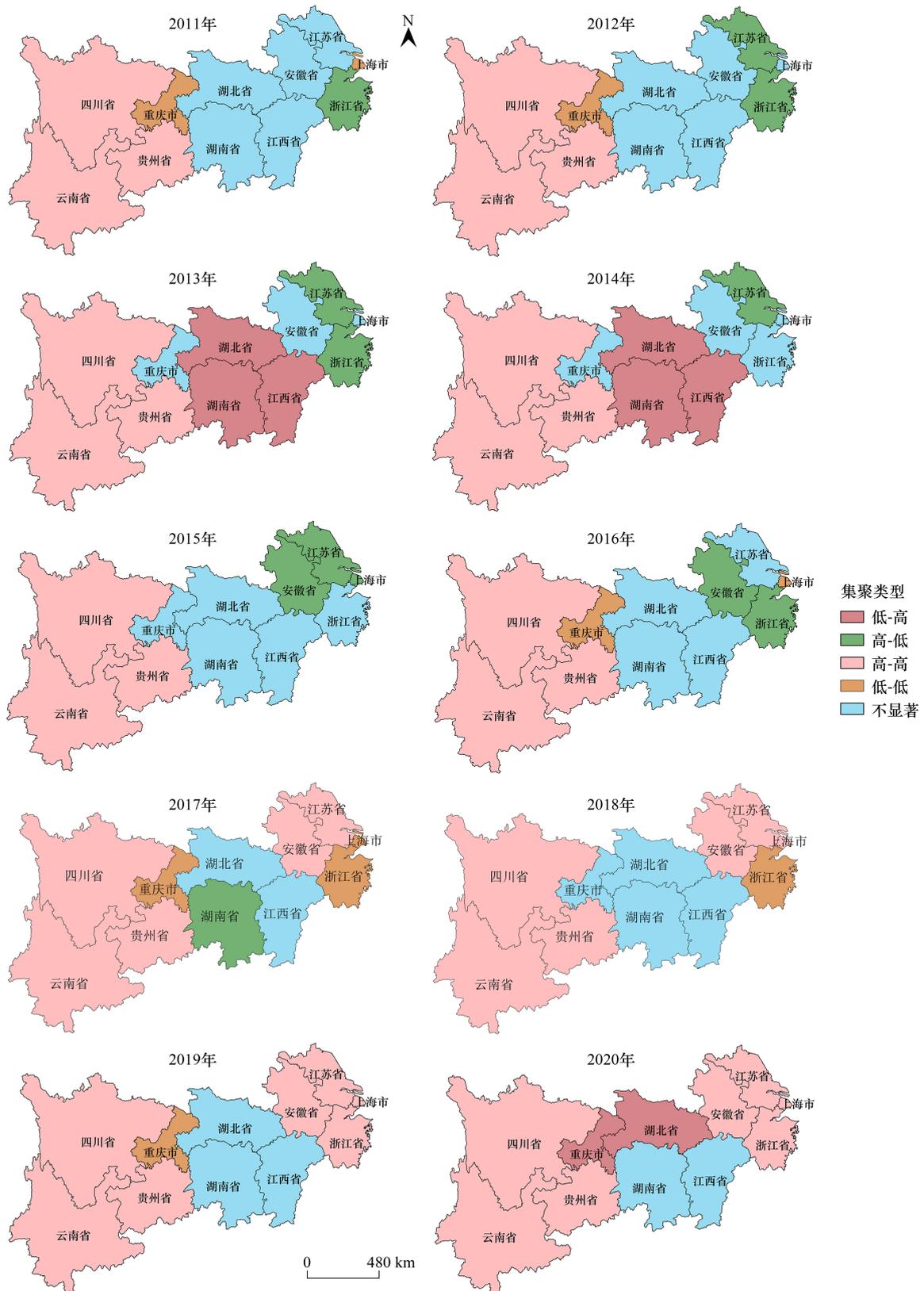


图 7 2011—2020 年长江经济带农田生态系统碳水足迹耦合协调发展能力空间关联特征

Fig.7 Characteristics of spatial correlation of coupled coordinated development capacity of farmland ecosystems with carbon and water footprints in the Yangtze River Economic Zone, 2011—2020

(2) 长江经济带农田生态系统碳足迹广度整体呈现“先增长后下降”的趋势,四川省最高,上海市最低,且高值区主要集中在长江经济带上游;除贵州省外,其余省份碳足迹深度均等于 1,无需动用存量资本。水足迹广度整体呈波动下降趋势,江苏省最高,上海市最低;除江苏省外,其余 10 省份水足迹深度均等于 1,无需动用水资源存量资本。

(3) 从耦合协调度值来看,长江经济带农田生态系统碳足迹与水足迹的耦合协调度逐年上升,不断向着优质协调发展,但从时间维度来看,农田生态系统碳足迹与水足迹整体耦合协调度还不够高;从空间维度来看,农田生态系统碳足迹与水足迹耦合协调度均值呈“上游>中游>下游”的分布特征。

(4) 从空间关联特征来看,长江经济带农田生态系统碳足迹与水足迹的耦合协调发展在空间分布上存在一定程度的空间依赖和联系,高-高集聚区集中在长江经济带上游和下游区域,低-高集聚区主要集中在长江经济带中游地区,但是空间关联性不稳定,具有波动性,主要表现为高-高集聚区数量增多,高-低集聚区减少。

5.2 建议

(1) 长江经济带农田生态系统目前处于水盈余、碳赤字阶段,但是盈余值在不断变化,且碳赤字程度逐年降低,发展生态农业仍是当前主要任务,农业劳动者在生产过程中要逐步减少化肥施用,不断加强田间管理,减少农药、薄膜等农资的投入,实现经济发展与生态保护的双赢。

(2) 长江经济带各省市农田生态系统的碳足迹与水足迹生态环境呈现出水盈余碳赤字的状态,生态环境形势较为严峻。一方面,各省市应有序增加耕地面积,提升耕地质量,从而提高耕地的固碳能力;另一方面,治理水资源过度开发,通过推广高效节水灌溉技术和建设高标准农田提升用水效率,大力推进农业节水。

(3) 长江经济带农田生态系统产生的碳排放占用的流量资源具有集聚性,可以考虑建立农田生态系统碳足迹账户并协调区域内的碳额分配,从流域整体对碳资源进行统筹。同时,对长江经济带生产、生活、生态用水需求进行优化配置,建立农业水权交易机制,促进不同省市的水权交易,提高农业用水效率。

(4) 因地制宜提升长江经济带农田生态系统碳足迹与水足迹耦合协调度,处于濒临失调的区域,减少化肥和农药的使用、加强土壤保护和水资源管理、增加植被覆盖率来恢复生态平衡;处于初级协调的区域,推广生态农业、循环农业等可持续农业模式,并加强农民的培训和教育,进一步改善生态状况;处于中度协调的区域,进一步推广可持续农业技术和模式,促进农业的绿色发展,确保生态系统的稳定性和可持续性;处于高度协调的区域,坚持发挥生态优势和潜力,加强科学研究和技术创新,探索更加高效的生态农业模式和技术,促进农业的可持续发展。

参考文献 (References):

- [1] Davis K F, Rulli M C, Seveso A, D'Odorico P. Increased food production and reduced water use through optimized crop distribution. *Nature Geoscience*, 2017, 10: 919-924.
- [2] 周姝含, 曹永强, 么嘉棋, 王菲, 常志冬. 东北三省碳源/汇和碳盈亏时空分布与影响因素. *生态学报*, 2023, 43(22): 9266-9280.
- [3] 张雯, 刘倩倩, 王慧, 陈彬. 基于水足迹的山东省农业水土资源匹配特征及短缺压力分析. *生态学报*, 2023, 43(12): 4943-4953.
- [4] Rees W E. Ecological footprints and appropriated carrying capacity: what urban economics leaves out. *Environment and Urbanization*, 1992, 4(2): 121-130.
- [5] 马海波, 朱强. 基于生命周期评价的我国稻米碳足迹核算. *干旱区资源与环境*, 2023, 37(6): 11-19.
- [6] 李亚宁, 吴秀芹. 中国三大粮食作物耕地生态系统碳足迹分析. *北京大学学报(自然科学版)*, 2024, 60(3): 575-584.
- [7] 付伟, 徐媛媛, 王福利, 罗明灿, 陈建成. 中国省域农田生态系统碳足迹时空演变分析. *生态经济*, 2024, 40(1): 88-94.
- [8] 李明琦, 刘世梁, 武雪, 孙永秀, 侯笑云, 赵爽. 云南省农田生态系统碳足迹时空变化及其影响因素. *生态学报*, 2018, 38(24): 8822-8834.
- [9] 尚杰, 杨滨键. 区域农业碳足迹动态影响效应研究——以潍坊市种植业为例. *农村经济*, 2020(5): 75-82.
- [10] 崔文超, 焦雯璐, 闵庆文, 吴敏芳, 孙业红. 基于碳足迹的传统农业系统环境影响评价——以青田稻鱼共生系统为例. *生态学报*, 2020, 40(13): 4362-4370.
- [11] Cai J P, Xie R, Wang S J, Deng Y P, Sun D Q. Patterns and driving forces of the agricultural water footprint of Chinese cities. *Science of the Total Environment*, 2022, 843: 156725.

- [12] 范星, 陈彬. 三江平原粮食作物生产水足迹时空特征及影响因素. 生态学报, 2022, 42(15): 6368-6380.
- [13] Casolani N, Pattara C, Liberatore L. Water and Carbon footprint perspective in Italian durum wheat production. *Land Use Policy*, 2016, 58: 394-402.
- [14] 张惠云, 秦丽杰, 贾利. 吉林省水稻生产的碳足迹与水足迹时空变化特征. 浙江农业学报, 2021, 33(6): 974-983.
- [15] 杨文娟, 赵荣钦, 张战平, 肖连刚, 曹连海, 王帅, 杨青林. 河南省不同产业碳水足迹效率研究. 自然资源学报, 2019, 34(1): 92-103.
- [16] 范紫月, 齐晓波, 曾麟岚, 吴锋. 中国农业系统近 40 年温室气体排放核算. 生态学报, 2022, 42(23): 9470-9482.
- [17] Wang Z, Zhang X Y, Liu L, Wang S Q, Zhao L M, Wu X D, Zhang W T, Huang X J. Estimates of methane emissions from Chinese rice fields using the DNDC model. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2021, 303: 108368.
- [18] 国家发展改革委应对气候变化司. 省级温室气体清单编制指南(试行). 北京: 国家气候战略中心, 2011.
- [19] Wener R E. Climate change 2007: Mitigation of climate change. *Journal of Environmental Psychology*, 2009, 29(4): 533-535.
- [20] 王英, 杨娟, 王佳丽. 农田生态系统碳排放时空格局及趋势分析. 中国农业大学学报, 2023, 28(1): 89-101.
- [21] 张露, 何雨霏, 陈坦, 杨婷, 张冰, 金军. 2011—2020 年汾渭平原农田生态系统碳足迹的时空格局演变. 生态环境学报, 2023, 32(6): 1149-1162.
- [22] 孟军, 范婷婷. 黑龙江省农业碳排放动态变化影响因素分析. 生态经济, 2020, 36(12): 34-39.
- [23] 王莉, 刘莹莹, 张亚慧, 董素涵. 河南省农田生态系统碳源/汇时空分布及影响因素分解. 环境科学学报, 2022, 42(12): 410-422.
- [24] 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, (4): 1729-1735.
- [25] 丁也璐, 赵娜娜, 黎明, 梁梦茵, 高学睿, 王纪超, 赵西宁. 陕北农田作物生产碳源/汇及碳足迹空间特征. 生态学报, 2024, 44(11): 4574-4583.
- [26] 刘帅康. 贵阳市碳足迹与碳承载力分析研究. 市场研究, 2020(2): 20-21.
- [27] 宁静, 杨楠, 杜国明, 孙天成, 胡明均, 王蕾. 区域农田生态系统碳足迹时空演变研究——以黑龙江省为例. 中国农业大学学报, 2023, 28(6): 98-112.
- [28] Hoekstra A Y. Green-blue water accounting in a soil water balance. *Advances in Water Resources*, 2019, 129: 112-117.
- [29] 刘晓东, 彭晓彤, 白丽, 高春雨. 水足迹视阈下河北省农业用水驱动因素分析. 中国农业资源与区划, 2021, 42(11): 188-198.
- [30] 郝帅, 孙才志, 宋强敏. 中国能源-粮食生产对水资源竞争的关系——基于水足迹的视角. 地理研究, 2021, 40(6): 1565-1581.
- [31] 张丽丽, 邓晓雅, 龙爱华, 高海峰, 任才, 李志赞. 基于农业水足迹的水资源安全时空变化分析——以新疆和田地区为例. 干旱区研究, 2022, 39(2): 436-447.
- [32] 王月英, 刘科伟. 陕西省农业水足迹量化及对水资源的影响分析. 河北农业大学学报, 2019, 42(4): 109-116.
- [33] 樊慧丽, 付文阁. 水足迹视角下我国农业水土资源匹配及农业经济增长——以长江经济带为例. 中国农业资源与区划, 2020, 41(10): 193-203.
- [34] 王雅洁, 刘俊国, 赵丹丹. 基于水足迹理论的水资源评价——以河北省张家口市宣化区为例. 水土保持通报, 2018, 38(5): 213-219.
- [35] 康健, 王建华, 王素芬. 海河流域农业水资源承载力评价研究. 水利水电技术, 2020, 51(4): 47-56.
- [36] 刘杰, 郭东罡. 沁源县农业水生态足迹与水资源承载力动态特征分析. 山西农业科学, 2018, 46(6): 970-975, 1008.
- [37] 孙才志, 张智雄. 中国水生态足迹广度、深度评价及空间格局. 生态学报, 2017, 37(21): 7048-7060.
- [38] 王世豪, 黄麟, 徐新良, 李佳慧. 特大城市群生态空间及其生态承载状态的时空分异. 地理学报, 2022, 77(1): 164-181.
- [39] 马晓蕾, 乔雅琦, 王婕, 焦士兴, 张曼. 陕西省水生态足迹深度与广度时空格局及影响因素. 干旱区研究, 2023, 40(3): 469-480.
- [40] 肖黎明, 李秀清. 资源利用对长江经济带高质量发展的影响——基于生态足迹的检验. 地理与地理信息科学, 2022, 38(4): 104-112.
- [41] 张茹倩, 李鹏辉, 徐丽萍. 城镇化对新疆土地利用碳排放的影响及其耦合关系. 生态学报, 2022, 42(13): 5226-5242.
- [42] 冷仙, 曾源, 周键, 杨飞龄, 武瑞东. 基于熵权 TOPSIS 法的西南自然保护区景观保护成效评价. 生态学报, 2023, 43(3): 1040-1053.
- [43] 程飞飞, 李洪庆, 宋红艳, 陈明慧. 沿海城市陆海生态环境质量综合评价与耦合协调度. 生态学报, 2024, 44(9): 3855-3867.
- [44] 袁亮, 程娟, 何伟军, 徐沙沙. 长江经济带“水—能—碳”系统适应性评价及空间关联特征. 中国人口·资源与环境, 2024, 34(6): 187-199.
- [45] 李志英, 朱晓珊, 杨丽, 王晓云, 田涵. 云南省土地利用碳排放时空演变特征及影响因素. 水土保持通报, 2023, 43(5): 297-303, 311.
- [46] 陈义忠, 乔友凤, 卢宏玮, 夏军. 长江中游城市群水-碳生态足迹变化特征及其平衡性分析. 生态学报, 2022, 42(4): 1368-1380.
- [47] 李华, 袁鹏飞, 王洁, 李晓英, 王文玉. 四川省农田生态系统碳足迹和碳生态效率时空变化. 江苏农业科学, 2023, 51(11): 192-201.
- [48] 阳君, 肖作林, 刘睿, 戴技才, 刘文利. 水足迹视角下四川省主要粮食作物种植结构优化及用水效率分析. 农业工程学报, 2024, 40(12): 117-127.