DOI: 10.20103/j.stxb.202505131145
柳宏斌,上官彩霞,滕永忠,孙建军,孟瑶,王瑛,刘诗涵.足迹家族框架下河南省农业资源承载力评价.生态学报,2026,46(2):832-845.
Liu H B, Shangguan C X, Teng Y Z, Sun J J, Meng Y, Wang Y, Liu S H.Evaluation of agricultural resource carrying capacity in Henan Province under the footprint family framework.Acta Ecologica Sinica,2026,46(2):832-845.

足迹家族框架下河南省农业资源承载力评价

柳宏斌[1,2],上官彩霞[1,2,*],滕永忠[1,2],孙建军[1,2],孟　瑶[1,2],王　瑛[1,2],刘诗涵[1,2]
1 河南省农业科学院农业经济与农村发展研究所,郑州　450002
2 河南省农业科学院农业经济与农村发展研究所河南科技智库农业强省战略研究基地,郑州　450002

摘要:生态足迹体系是衡量人类对环境资源需求和生态系统承载能力之间关系的工具,能以直观的方式量化评价复杂的环境影响,为揭示区域资源消耗及可持续发展情况提供了路径。基于足迹家族理论框架,聚焦水、土、氮、碳的环境资源限制,从环境约束的角度构建水、氮、碳的承载力边界,采用基于空间异质性的本地化参数方案构建农业生态足迹,并对耕地非农化状态及资源环境负载情况展开分析,多维度测度农业生产与环境资源之间的相互作用关系。结果表明:①2015—2023 年间,河南省农业足迹呈降低态势,足迹组份均不同程度下降,绿色发展成效显著,水资源仍为首要环境制约。②省域农业承载能力增强,以水、氮承载力增长为主。区域中心城市农业承载力降低明显,呈现都市型农业特征。豫南农业核心区农业承载力持续上升。③全省耕地非农化态势减弱,地市耕地流出量以 5%—7%居多,多发于城市建成区周边。④省域环境资源负载降低,生态盈余提升。氮、碳负载盈余,水资源压力较大。郑州、洛阳生产性负载高,需外部资源输入满足城市发展需求,其余地市负载较低,仍处于农业生产外输的生态位。

关键词:生态足迹体系;氮承载力;资源环境负载;河南省

Evaluation of agricultural resource carrying capacity in Henan Province under the footprint family framework

LIU Hongbin[1,2], SHANGGUAN Caixia[1,2,*], TENG Yongzhong[1,2], SUN Jianjun[1,2], MENG Yao[1,2], WANG Ying[1,2], LIU Shihan[1,2]
1 *Institute of Agricultural Economics and Rural Development, Henan Academy of Agricultural sciences, Zhengzhou* 450002, *China*
2 *Henan Science and Technology Think Tank Strategic Research Base for Strong Agricultural Province, Institute of Agricultural Economics and Rural Development, Henan Academy of Agricultural sciences, Zhengzhou* 450002, *China*

Abstract: The ecological footprint system served as a tool for measuring the relationship between human demand for environmental resources and ecosystem carrying capacity. It provided an intuitive method to quantify complex environmental impacts, revealing regional resource consumption and sustainability status. Based on the footprint family theoretical framework, this study focused on environmental limits for water, soil, nitrogen and carbon, and established their carrying capacity boundaries from an environmental constraint perspective. We developed the agricultural ecological footprint through a localized scheme that incorporated spatial heterogeneity. Finally, we analyzed farmland conversion to non-agricultural uses and resource-environmental loads, employing applying a multidimensional approach to assess agricultural production-environment interactions. The results showed that: (1) From 2015 to 2023, agricultural footprints in Henan Province exhibited a declining trend, with all footprint components decreasing to varying degrees, reflecting progress in green development. However, water resources remained the primary environmental constraint. (2) Provincial agricultural carrying

基金项目:河南省软科学研究计划项目(202400410098);河南省农业科学院应用科技攻关项目(2025YG01)
收稿日期:2025-05-13;　　**网络出版日期**:2025-10-15
* 通讯作者 Corresponding author.E-mail: shangguancaixia@163.com

capacity improved, primarily driven by enhanced water and nitrogen capacities. Notably, regional central cities demonstrated a significant decline in agricultural carrying capacity, characterizing urban agriculture patterns, while core agricultural regions in southern Henan maintained sustained growth. (3) Farmland conversion to non-agricultural uses mitigated province-wide, with municipal-level outflow rates concentrated at 5%—7%, particularly in peri-urban built-up zones. (4) The provincial environmental resource load decreased while ecological surplus increased, with nitrogen and carbon loads achieving surplus status, though water resources remained under significant pressure. Zhengzhou and Luoyang exhibited high productive loads, requiring external resource inputs to meet urban development demands, whereas other prefecture-level cities maintained lower loads and retained an ecological niche characterized by agricultural output. This study reveals that unsustainable agricultural practices may trigger long-term ecological crises, while simultaneously demonstrating the effectiveness of policy interventions. Accordingly, we propose the following recommendations: As a vital agricultural production base in China, Henan Province exhibits high dependence on environmental resources. For regions with dominant agricultural production, ecological farming models should be promoted to reduce agricultural pollution, coupled with establishing cross-regional ecological compensation mechanisms to mitigate environmental impacts and enhance ecosystem stability. For urbanized areas with lower agricultural proportions, high-value-added and ecologically integrated development pathways should be adopted, with protective utilization of peri-urban farmland and wetlands to balance urban expansion and agroecological functions. By employing the footprint family framework, we quantitatively analyzed agricultural footprints and environmental carrying capacity in Henan Province, advancing the application of this methodology in systematic green agriculture assessments. However, limitations persist regarding data accuracy and classification inconsistencies, constrained finer-scale analysis. Moreover, traditional analytical approaches fail to adequately capture the lag effects of potential environmental risks in agricultural systems. Future studies should develop more comprehensive frameworks to evaluate human-environment interactions, bridging the gap between theoretical assessments and practical applications for sustainable agricultural management.

Key Words: ecological footprint system; nitrogen carrying capacity; resource environmental loading; Henan Province

社会经济发展与环境资源之间的关系复杂且相互影响,经济发展对自然资源的不当利用将会引发资源枯竭、环境污染等问题,最后反噬社会经济发展成果[1—2]。社会经济发展与资源环境保护并非零和博弈[3],现阶段正处于从“掠夺自然”向“自然共生”的发展范式转变阶段[4—5],如何精准描述人类对于生态环境资源的开发利用情况,是实现经济繁荣与生态健康双赢的关键[6—7]。生态足迹模型是一种能直观反映环境资源开发利用情况和资源环境承载力状态的量化方法[8],通过计算人类生产生活所需资源与环境资源消耗的平衡关系,评估人类活动对资源环境的影响[9]。自理论方法提出以来[10—11],学者们已从参数率定[12]、模型改进[13]、概念延伸[14]等多方面大大扩展了理论及模型的适用性,并将研究范围由宏观向中、微观层面扩展,促进了相关研究由单因素分析向多因素交互分析的转变。生态足迹研究历经三个阶段的演进:早期探索阶段,主要使用生态足迹模型进行自然资源开发程度测度并对模型方法的优缺点展开评价[15—18];快速发展期则以模型参数调整[19]、项目计算等方面修正[20]及相关方法改进为重点,研究方式也由静态研究逐步转向动态研究;现阶段则以多视角探索分析为主[21—22],并衍生出水足迹[23]、碳足迹[24]、农业足迹等相关概念,整合称为“足迹家族”[25—26]。农业生产与生态环境之间复杂而密切的相互作用,是相关学者长期关注问题之一,由生态足迹模型拓展而来的农业生态足迹法,作为衡量农业资源环境影响及可持续发展状况的计量工具,继承了生态足迹模型可操作性强、量化结果直观的特征,为评价区域农业生产与环境负载之间的关系提供了新的切入点[27]。针对农业过程的足迹研究多以农田承载力[28]、农业碳足迹[29]、农业水足迹[30]等方面开展,系统性从环境资源约束角度就农业生产多因素的环境资源负载评价仍较为缺乏。

因此,本研究聚焦农业生产的生态环境约束,即水土氮碳的限制性,基于足迹家族框架,从水资源消耗、环

境氮承载、环境碳承载、耕地非农化四个维度展开分析,同时,采用“当年当地”参数方案,保证空间异质性。以期能从多维度、系统性评价河南省农业生产与环境资源相互作用,为促进农业可持续发展提供参考。

1 研究区概况与数据来源

1.1 研究区概况

河南省,面积 16.7 万 km^2,位于我国中部,地处华中平原、黄淮海平原核心区,属暖温带-亚热带过渡气候,年均温 12—16℃,年降水量 500—1000mm,降水集中于夏季,农业生产条件优越,是我国粮食主产区之一,也是重要的农产品生产基地与交通物流枢纽。2023 年省内耕地面积约 8 万 km^2,其中基本农田面积 6.80 万 km^2,灌溉面积 5.92 万 km^2,农业用水总量 118 亿 m^3,占全省用水总量的 56.8%。2023 年粮食总产量 662.45 亿 kg,连续七年稳定在 650 亿 kg 以上,占全国粮食总产量的 9.8%。随着社会经济的高速发展、环境资源的开发利用规模日趋增大,现阶段河南省面临着水资源短缺、耕地可持续性降低的双重压力,如何平衡生态环境与农业生产之间的矛盾,是当前农业发展必须解决的难题。

1.2 数据来源

本研究采用的研究数据包括统计数据与遥感影像数据两个部分。行政区边界数据源自国家标准地图服务系统(http://bzdt.ch.mnr.gov.cn/),矢量边界未做更改。遥感影像数据来自中科院资源环境科学数据平台(www.resdc.cn)[31],提供的土地利用 30m 分辨率影像数据集(2015、2018、2020、2023 年),并根据相应的分类体系重分类,以满足研究需求。各地农产品产量、播种面积、农资投入、水资源情况、居民生活消费等统计数据源自《河南省统计年鉴》(2016、2019、2021、2024 年)、《河南省水资源公报》(2015、2018、2020、2023 年),及相关地市对应年份的统计年鉴及相关公报,由于统计口径变化造成的缺失值,由前一年数据替代。

2 研究方法

2.1 生态足迹账户

本研究将研究账户设定为生物性生产账户与非生物性生产账户(表 1)。其中,生物性生产账户,用于评价研究区内区域土地的生物性产品生产能力;非生物性生产账户包含水资源账户、氮排放账户、碳排放账户。

表 1 生态足迹账户构成

Table 1 Ecological footprint accounts and components

足迹类型 Footprint type	生物性生产账户 Biological productive account		非生物性生产账户 Non-biological productive account		
	耕地生产	林地生产	水足迹	氮足迹	碳足迹
账户构成 Account composition	稻谷、小麦、玉米、大豆、花生、油菜籽、棉花、烟叶、中草药材、蔬菜及食用菌、果用瓜、草莓、猪肉、蜂蜜、禽蛋	茶叶、梨、苹果、枣、葡萄、柿、桃、核桃	区域生产中的水资源消耗	区域生产中的活性氮排放	区域生产中的碳排放
承载力账户 Carrying capacity account	生物性生产边界		水边界	氮边界	碳边界

2.2 生态足迹体系及相关参数

2.2.1 生态足迹模型及参数

生态足迹,是指产生满足区域内人类生产生活所需的物质,以及吸纳区域内人类产生的废物所需要的生物性生产土地面积。采用以下方式计算:

$$EF = EF_{bio} + WF + NF + CF \tag{1}$$

式中,EF 为区域总生态足迹,EF_{bio} 为区域生物性生产足迹,WF 为区域水足迹,NF 为区域氮足迹,CF 为区域碳足迹。

(1)生物性生产足迹

生物性生产足迹,用于评价区域内农业生物性产品生产能力,考虑到不同生物性产品直接求和无意义,本部分采用热值法计算[32],将相关生物性产出转换为标准热量,进行相关计算,热值参数源自《农业技术经济手册》,采用传统生态足迹[33]方式计算:

$$EF_{\text{bio}} = n \times ef = n \times \sum r_i(aa_i) = n \times \sum r_i \times \left(\frac{\overline{c_i}}{\overline{u_i}}\right) \tag{2}$$

$$r_i = \frac{\overline{p_i}}{\overline{P}} = \frac{\frac{q_i}{s_i}}{\frac{\sum q_i}{\sum s_i}} \tag{3}$$

式中,n 为区域当年人口数量,ef 为人均生物性生产足迹,$\overline{c_i}$为区域第 i 种生物产品的人均消费量,$\overline{u_i}$为区域第 i 种生物产品的平均生产能力。r_i 为当年省域 i 种土地类型的均衡因子[32],表征省域各类土地平均生产力与省域全部平均生产力的关系,$\overline{p_i}$为省域第 i 类土地的平均生产力,$\overline{P}$ 为省域全部生产性土地的平均生产力,q_i 为省域第 i 类土地的生物性产量, s_i 为省域第 i 类土地的面积。

(2)水足迹

水足迹用于评价区域水资源开发利用情况,表征一定时期内生产生物性产品消耗的水资源量,体现为产生所需水量的产水土地面积,包含绿水足迹、蓝水足迹、灰水足迹三个部分[34],计算方式如下:

$$WF = WF_{\text{green}} + WF_{\text{blue}} + WF_{\text{grey}} \tag{4}$$

$$WF_{\text{green}} = \left(\sum S_i \times V \times g\right) / \frac{Q_{\text{total}}}{S_{\text{district}}} \tag{5}$$

$$WF_{\text{blue}} = \left(\sum Q_{\text{A}} \times t\right) / \frac{Q_{\text{total}}}{S_{\text{district}}} \tag{6}$$

$$WF_{\text{grey}} = \left(\frac{NE \times P_0}{C_{\max}^{\text{N}} - C_{\text{net}}^{\text{N}}}\right) / \frac{Q_{\text{total}}}{S_{\text{district}}} \tag{7}$$

式中,WF_{green}为区域绿水足迹,表征农作物生长过程中所消耗的储存在土壤中的水量, S_i 为区域农作物 i 的播种面积,V 为区域有效降水量采用 cropwat8.0 计算得到,g 为区域复种指数,为当年播种面积与耕地面积的比值,Q_{total}为区域当年水资源总量,S_{district}为区域面积。WF_{blue}为区域蓝水足迹,表征农作物生长过程中对于地表水与地下水的消耗情况,Q_A 为区域农业用水量,t 为当年的灌溉水有效利用系数。WF_{grey}为区域灰水足迹,表征在化肥施用后,为稀释淋溶污染物至环境标准水平所消耗的水量,NE 为氮肥的淋失率,数值源自《第一次全国污染源普查-农业污染源肥料流失系数手册》,P_0 为农业生产氮肥施用折纯量, $C_{\max}^{\text{N}}$为国标水污染物浓度,取值 0.01kg/m^3,$C_{\text{net}}^{\text{N}}$为水体污染物初始浓度,由于缺乏数据,取值为 0。

(3)氮足迹

氮足迹用于表征区域内,农业生产周期内活性氮损失及排放情况,以氮当量计(N-eq),体现为固定损失的活性氮所需的土地面积,包含农资投入氮、氧化亚氮、游离氨态氮、硝态氮、铵盐态氮[35],计算方式如下:

$$NF = NF_{\text{input}} + NF_{\text{N}_2\text{O}} + NF_{\text{NH}_3} + NF_{\text{NO}_3^-} + NF_{\text{NH}_4^+} \tag{8}$$

$$NF_{\text{input}} = \left(\sum P_i \times X_i\right) / \frac{\sum N_i \times SA_i}{SR} \tag{9}$$

$$NF_{\text{N}_2\text{O}} = \left((p_0 \times xs_1 + p_0 \times xs_2 + p_0 \times xs_3) \times \frac{28}{44}\right) / \frac{\sum N_i \times SA_i}{SR} \tag{10}$$

$$NF_{\text{NH3}} = (p_0 \times xs_4) / \frac{\sum N_i \times SA_i}{SR} \tag{11}$$

$$NF_{NO_3^-} = (p_0 \times xs_5) / \frac{\sum N_i \times SA_i}{SR} \tag{12}$$

$$NF_{NH_4^+} = (p_0 \times xs_6) / \frac{\sum N_i \times SA_i}{SR} \tag{13}$$

式中,NF_{input}为相关农资投入氮排放,P_i 为种植过程中的相关农资投入量(农用柴油、农药、农用薄膜),X_i 为对应农资的氮排放系数[35—36],N_i 为第 i 种作物的固氮系数[37],SA_i 为对应作物的播种面积,SR 为区域的耕地面积。NF_{N_2O}为以 N_2O 形式排放的活性氮,包括直接排放、气态沉降、径流淋溶三部分,其中 xs_1 为氮肥投入 N_2O 直接排放因子,xs_2 为氮沉降引起的 N_2O 间接排放因子,xs_3 为径流损失和土壤淋失的 N_2O 间接排放因子,三者取值均源自《省级温室气体编制指南》,28/44 为 N_2O-N 与 N_2O 的分子质量之比。NF_{NH_3}为游离氨态氮足迹,xs_4 为NH_3 挥发损失系数,数值采用相关研究系数[38]。$NF_{NO_3^-}$为硝态氮足迹,xs_5 为NO_3^- 淋溶系数,数值源自《肥料流失系数手册》。$NF_{NH_4^+}$为铵盐态氮足迹,xs_6 为NH_4^+ 淋溶系数,数值源自《肥料流失系数手册》。

(4)碳足迹

碳足迹用于表征区域内农业生产的碳排放情况,以二氧化碳当量计(CO_2-eq),体现为固定农业生产碳排放所需土地面积,包括农业生产资料投入产生的碳足迹、稻田种植排放碳足迹、化肥使用的 N_2O 排放,计算方式如下:

$$CF = CF_{input} + CF_{CH_4} + CF_{CN_2O} \tag{14}$$

$$CF_{input} = \frac{\sum P_i \times X_i}{Cs} \tag{15}$$

$$CF_{CH_4} = \frac{Sr \times Y \times 27}{Cs} \tag{16}$$

$$CF_{CN_2O} = \frac{(p_0 \times xs_1 + p_0 \times xs_2 + p_0 \times xs_3) \times 273}{Cs} \tag{17}$$

$$Cs = \frac{\left(\sum \frac{b_i U_i (1 - w_i)(1 + z_i)}{l_i} \times \frac{44}{12} + f_{soil} \times SR \right)}{SR} \tag{18}$$

式中,CF_{input}为农业生产资料投入产生的碳足迹,P_i 为种植过程中的相关农资投入量, X_i 为对应农资的碳排放系数[35—36]。CF_{CH_4}为稻田种植碳足迹,Sr 为区域稻田面积、Y 为稻田CH_4 排放因子,27 为 100a 尺度上,CH_4 的增温潜势(IPCC6)。CF_{CN_2O}为由于化肥使用引起的碳排放足迹,273 为 100a 尺度上,N_2O 的增温潜势(IPCC6)。Cs 为固碳转换参数,体现为单位面积生产性土地固碳量,采用固碳法计算,包含生物性生产固碳和土壤固碳两部分,b_i 为 i 种作物碳吸收率[39],U_i 为作物 i 的产量,w_i、z_i 为作物 i 的含水率及根冠比[39],l_i 为作物 i 的经济系数[39],44/12 为C-CO_2 转换系数,f_{soil}为农田土壤固碳速率[39—40],取值 0.916t hm^{-2} a^{-1}。

2.2.2 生态承载力模型及参数

生态承载力指区域生态环境对人类活动的承载能力。农业生态承载力,指区域耕地生态系统对人类活动、资源消耗、环境污染的负载能力及区域环境资源的供给能力。本研究承载力体系采用以下方式计算:

$$EC = EC_{bio} + WC + NC + CC \tag{19}$$

式中,EC_{bio}为生产性承载力,WC 为区域水资源承载力,NC 为区域氮承载边界,CC 为区域碳边界。

(1)生物性生产边界

生物性生产承载力,指在当年人口条件下,区域生物性生产土地面积对人类生物性消费的承载能力,计算方式如下[33]:

$$EC_{bio} = N \times ec = N \times \sum a_i r_i y_i \tag{20}$$

$$y_i=\frac{\overline{p_i^j}}{\overline{P_i}}=\frac{\frac{q_i^j}{s_i^j}}{\frac{Q_i}{S_i}} \tag{21}$$

式中,N 为当年人口,a_i 为人均生物性生产土地面积。y_i 为当年市域产量因子[32],表征地市各类土地平均生产力与省域各类土地平均生产力的差异,$\overline{p_i^j}$为 j 市 i 种土地的平均生产力,$\overline{P_i}$为省域 i 种土地的平均生产力,q_i^j 为 j 市 i 种土地的生物性产量,s_i^j 为 j 市 i 种土地的面积,Q_i 为省域 i 种土地的生物性产量,S_i 为省域 i 种土地的面积。

(2)水资源开发边界

水资源承载力指区域用于农业生产及环境污染物净化的最大水资源量,体现为产生该水资源量所需要的产水土地面积,计算方式如下:

$$WC=\left(Q_{\text{total}}\times 0.4\times\frac{Q_A}{Q_{\text{supply}}}\right)/\frac{Q_{\text{total}}}{S_{\text{district}}} \tag{22}$$

式中,考虑到区域水生态保护,设定 40%为区域水资源最大开采比例[41],Q_{supply}为当年供水总量。

(3)氮承载边界

氮边界设定为氮最大水环境允许浓度条件下,淋溶至水体中的氮量与种植作物所需要的氮养分需求量之和[42—43],体现为固定该氮量所需要的生物性生产土地面积,计算方式如下:

$$NC=\left(\left(Q_{\text{total}}\times 0.4\times\frac{Q_A}{Q_{\text{supply}}}\right)\times(C_{\max}^N-C_{\text{net}}^N)+\sum_{i=1}^{n}U_i\times V_i\right)/\frac{\sum N_i\times SA_i}{SR} \tag{23}$$

式中,V_i 为第种 i 作物形成 100 千克产量所需要的氮量,参数源自《畜禽粪污土地承载力测算技术指南》,其余参数已在相关公式中解释,此处不做赘述。

(4)碳承载边界

碳承载力设定为区域生物性生产土地对于农业生产过程中所产生碳排放的最大固定量。考虑到农业生产过程中,发挥主要固碳作用的是生物固碳和土壤固碳[39],因此,设定区域耕地面积为碳承载边界。

2.3　耕地非农化评价

耕地作为农业生产的首要约束条件,也是“水土氮碳”评价体系重要的组成部分,本研究基于研究时段土地利用遥感影像,采用土地利用转移矩阵[44],测度区域内地市的耕地非农化速率、用地类型转化情况、及空间分布特征。

2.4　环境资源负载评价

借鉴生态赤字/生态盈余的概念进行环境资源负载评价,计算方式为足迹与承载力的比值,表征区域足迹占对应承载力的份额[21]。该指标大于 1 则表明区域处于生态赤字状态,即本地环境资源不能够支撑需求,环境资源负载过高,需要外部补充;等于 1 则表明本地环境资源恰好能够支撑发展需求;小于 1 则表明区域处于生态盈余状态,即本地环境资源能够支撑需求,并且存在富余的分配资源,可以补充其他区域的环境资源缺口。

3　结果与分析

3.1　农业足迹明显下降,生产效率显著提升

总体上,研究时段内河南省农业足迹呈现显著下降趋势(图 1),由 $4.48\times10^7\text{hm}^2$降低至 $3.14\times10^7\text{hm}^2$,表明了省内农业生产方式有所优化,产生的环境负担显著减小。从足迹构成来看,生物性生产足迹有所提升,由 2015 年的 $2.84\times10^6\text{hm}^2$提高至 2023 年的 $3.48\times10^6\text{hm}^2$,提高约 1.22 倍,表明省内农产品的平均生产能力和居民生活主要食品消费水平均有显著提升。水足迹从 $2.71\times10^7\text{hm}^2$降至 $1.83\times10^7\text{hm}^2$,降低约 30%,组分中绿水

足迹显著提升,表明省内土地利用水平及复种率有明显提高,农业种植方式有所优化;灰水足迹则呈现显著降低态势,总体下降三分之一,主要原因是农业氮肥施用量大幅度降低,反映出河南省化肥减量增效行动效果显著,由施肥导致的生态压力进一步降低。氮、碳足迹均呈现显著降低趋势,分别由 2015 年 $1.38\times10^7 hm^2$ 和 $1.03\times10^6 hm^2$ 降至 2023 年 $8.87\times10^6 hm^2$、$7.63\times10^5 hm^2$;主要原因是研究时段内农业生产相关农资投入量均有所降低,氮肥投入量降低显著,大幅度减少了环境影响;此外,农业种植结构的优化及种植技术的进步,使得单位面积生产性土地固氮、固碳能力有所提升,进一步降低了农业生产对环境的氮碳污染。

图 1 2015—2023 年省域农业足迹及承载力变化

Fig.1 Provincial agricultural footprint and carrying capacity changes, 2015—2023

从市域角度看,研究时段内除信阳市外,其余地市农业足迹呈现降低态势(图 2)。其中,安阳、南阳、商丘、驻马店显著降低,商丘市降幅最大达 $2.01\times10^6 hm^2$。足迹构成中,5 个地市生物性生产足迹表现下降特征,但降幅均小于 $1\times10^4 hm^2$,整体稳定。水足迹除济源市略微增加外,均呈降低态势,降幅较大的为安阳市和驻马店市分别为 $1.67\times10^6 hm^2$、$1.62\times10^6 hm^2$,主要原因是随着科学种植意识的普及、高标准农田建设和化肥减量增效行动的推进,有效提高了耕地利用效率,降低了水资源损失、减少了水环境污染,使得农业生产对于水资源的负面影响得到了有效遏制。各地市氮足迹均有不同程度下降,其中南阳、商丘、新乡降幅最大。碳足迹同样以降低为主,且以南阳、商丘、新乡降幅最大,信阳市作为河南省水稻主产区,稻田 CH_4 排放较大,导致研究时段内碳足迹及农业足迹较其他地市高。

3.2 总体承载力略微波动,区域差异显著

省域农业承载力在研究时段内略微上升,涨幅为 $8.74\times10^4 hm^2$。从成分来看,生产性承载力呈现小幅度下降,约 $2.14\times10^5 hm^2$;水资源承载力稍有提高,增量为 $1.94\times10^5 hm^2$;环境氮承载力提高了约 $3.70\times10^5 hm^2$,主要原因是水资源利用结构的优化及降肥增效行动的开展,为环境提供了更多的氮容量;碳承载力降低了 $2.62\times10^5 hm^2$,即耕地面积减少了约 26 万 hm^2。地市中,农业承载力呈现增加态势的有 8 个,增幅较大的是周口、三门峡、商丘,最大增幅达 $6.78\times10^5 hm^2$。呈现降低态势的 10 个地市中,以郑州、洛阳、许昌降幅最大,分别为 $2.33\times10^6 hm^2$、$2.10\times10^6 hm^2$、$6.99\times10^5 hm^2$,反映出这几个城市在省域农业生产中的比重在逐渐降低。

从承载力组分来看,生产性承载力占农业承载力比重约 10%、水资源承载力与碳承载力分别占 5%、10%,而氮承载力占比高达 75%。研究时段内,各地市生产性承载力呈现不同态势,其中南阳、周口、驻马店增幅较大,三地市农产品热量产出分别增长了 1.23 倍、1.16 倍、1.13 倍,表明三地市的农业生产效率提升明显,耕地

图 2　2015—2023 年地市足迹及承载力变化量热图

Fig.2　Heat map of urban footprint and carrying capacity changes, 2015—2023

使用效率也有所提升;郑州由于土地非农化规模较大,导致生产性承载力降低;信阳生态承载力下降则与土地非农化与人口流出有关,安阳则是与农业种植结构调整有关。水资源承载力降低的有 7 个地市,其中以郑州降幅最大,原因是郑州作为河南省省会和国家中心城市,其农业发展在城市化进程中呈现“都市型农业”特征,体现为农业规模比重逐渐降低,耕地非农化加快、农业用水比重降低,导致其水资源承载力大幅度下降;承载力有所提升的城市有 11 个,其中以信阳、三门峡、南阳居首,均是由于农业用水比重增加,导致承载力上升显著,同时三门峡、南阳的农产品热量产出分别增加了 1.28 倍、1.23 倍。氮承载力呈现降低城市中,以郑州、洛阳、许昌降幅最大,分别达 $2.19\times10^6 hm^2$、$2.09\times10^6 hm^2$、$6.38\times10^5 hm^2$,许昌、洛阳由于种植结构优化,作物需氮量下降,导致氮承载力降低。各地市碳边界均有不同程度下降,以郑州居首位。

总体而言,农业承载力较高的均为农业规模较大、农产品产量较大的地市。以 2023 年为例(图 3),耕地面积较大的地市为南阳、信阳、驻马店,农产品产出较高的地市为南阳、周口、驻马店、商丘、信阳,以豫南地区居多,进一步体现了省内农产品产区的地域差异。

3.3　耕地非农化态势减弱,中心城市耕地流失较大

2015—2023 年间,土地利用变化主要集中于耕地与建设用地之间的转换(图 4),耕地净流出约 2.5%。2015 年至 2018 年,约 4%的耕地流出至其它用地,其中 70%变更为建设用地;同时,2018 年新增的 3%耕地中,有 60%源自建设用地,即 2015—2018 年间,约有 1%的耕地净流出。2018—2020 年间,约 3.3%的耕地流出,变更为建设用地的占 57%,而 2020 年新增的 3%的耕地中,有 58%来自建设用地,时段内耕地净流出约 0.38%。2020—2023 年间,约 4%的耕地流出,其中 64.60%变更为建设用地,2023 年新增的 3.32%耕地中,约 58.52%源自建设用地,时段内耕地净流出 0.97%。总体来看,全省耕地规模波动较小,河南省作为农业大省,耕地非农化规模关系到区域经济发展、粮食安全、耕地效益等诸多方面,随着现代化农业的推进,部分地区农业特征体现了城市化进程中郊区农业的典型转型路径,从传统农业生产向科技化升级,耕地产出效率提升显著,但对于耕地非农化现象,应予以持续重点关注,进一步平衡耕地保护与城市扩张之间的矛盾。

研究时段内,所有地市耕地均呈现不同程度流出状态(图 5),较 2015 年相比,耕地流出率小于 1%的只有

图 3 2023 年地市承载力构成

Fig.3 Urban carrying capacity composition in 2023

图 4 2015—2023 年省域土地利用转换

Fig.4 Provincial land use conversion 2015—2023

济源一地,流出率在 1%至 3%的有安阳、濮阳、鹤壁、焦作、三门峡、开封、许昌、商丘、漯河九地,流出率在 5%至 7%的有新乡、洛阳、平顶山、驻马店、周口五处,大于 7%是郑州、南阳、信阳三地。地市中耕地流出最大的是郑州市,总流出量占研究初期耕地面积的 9.20%,这种现象与郑州市的高速发展及城市转型密切相关,2015—2023 年间,郑州市建设用地面积增长了 20.59%,耕地转换为建设用地的地块,均集中在大型建设用地周边,表明多是城市发展扩张对周边耕地的吞并所致,同时也有少许边缘建设用地复垦为耕地。南阳、信阳等其他城市,均呈现此类特征,但增长速率较低。

图 5　2015—2023 年省域耕地非农化率分布

Fig.5　Distribution of provincial cultivated land non-agriculturalization rate,2015—2023

3.4　环境资源负载降低,水资源矛盾突出

研究时段内,省域农业环境资源负载呈现降低趋势,负载指数由研究初期 0.46 降低至研究末期 0.32,生态盈余提高 14%,农业生产对环境的影响进一步降低。从组分来看,生产性负载由 0.26 上升至 0.32,仍处于安全区间内,表明区域内人口的物质消耗仅占物质生产的 30%左右,可形成稳定的农业生产对外供给,这与河南省农业大省、全国粮食安全“压舱石”的定位相匹配。省域氮负载与碳负载均持续位于低于 0.3 的良好区间内,呈现净收益状态,即环境氮碳容量仍有 70%以上的余量;2015—2023 年间,作物生产需氮量中氮肥施用占比由 107%下降至 69%,由过量施氮转变为适量施氮,氮肥利用效率显著提高;碳负载则始终低于 10%,即碳足迹占据碳承载力的 10%,呈碳汇盈余状态,可对其他碳源产生的过量碳排放进行固存,是较为良好的可持续发展状态。

水资源负载从 7.59 降低至 4.85,表明省域农业用水结构趋于合理,水资源利用率有所提升,但整体上水资源负载仍处于高位。河南省耕地面积广大、农业用水占比高、灌溉需求大,同时河南省人口众多,城镇化与工业化加速推高了生活及社会生产用水需求,区域农业与生活用水矛盾较为突出。以南水北调中线工程缓解城市缺水、以引黄工程补充农业用水,虽在一定程度上缓解的缺水情况,但是水资源供需矛盾仍是长期挑战。

各地市中(图 6),环境资源负载提升的只有郑州市,其余地市均呈现不同程度降低态势,表明地市农业足迹降低或农业承载力提升较为明显。生产性负载方面,郑州市在研究时段内均处于极高区间,且持续上升,2023 年需要 2.73 倍生物性承载才能平衡生产性足迹,说明郑州市的居民生活消耗依赖外部供给,且人口增长迅速,省会对其他地市人口的虹吸效应明显,是“强省会”战略的成果体现;洛阳市生产性负载由 2015 年 0.71 增长至 2023 年 1.00,表明洛阳市人口增长明显、农业生产比重有所下降,体现了洛阳市作为省域副中心城市取得的显著进展;平顶山、三门峡、济源处于 0.6—0.8 区间,表明区域转型发展取得了一定的成效,农业产出的盈余量逐渐减少,逐步向综合型城市转变;其他地市则均处于小于 0.3 的低位区间,表明农业生产盈余较多,仍处于农业生产外输的生态位。水资源负载虽有所减低,但各地市水资源压力均较大,农业用水比例依然较高,与其它产业用水之间的矛盾仍然突出,应积极推进高标准农田建设及高效节水技术普及,多措并举提高水资源利用效率,以减少区域综合发展的环境资源制约。

图 6 2015—2023 年各地市资源环境要素负载率

Fig.6 Resource and environmental factor loadings by cities, 2015—2023

4　讨论

4.1　局限与不足

生态足迹体系为定量评价人地关系提供了路径,也为系统性考量农业生产与环境资源的相互作用提供了视角。本研究聚焦农业生产的生态环境约束,即水、土、氮、碳的限制性,基于足迹家族理论框架,从水量消耗、水环境氮负载与作物生长氮需求、碳固持、耕地非农化四个方面构建农业资源承载力评价体系,并采用基于空间异质性的本地化参数方案构建农业足迹,分析评价农业生产与环境资源的相互作用关系。生态足迹体系较为依赖区域宏观数据,但受制于数据精度及分类体系差异,本研究部分数据不够精准,难以在更加具体尺度上展开,在进行分析时,可能掩盖局部差异性。此外,多因素之间的相关作用关系,没有体现出来。耕地作为农业生产的主要支撑与约束,本研究仅从耕地数量及利用方式转变展开了分析,缺乏对于耕地质量退化的相关评价。且生态足迹的下降,主要是源于政策主导的“用量控制”,未必等同于资源环境风险的大幅度降低,环境风险的滞后性,是传统分析方法难以捕捉的。如何克服相关局限,更加全面系统的评价人类活动与生态环境的关系,使其可以起到指导生产实践的实际作用,在今后的研究中有待学者们进一步深入讨论。

4.2　展望

河南省地处黄淮海平原,气候温和、土地平坦,农耕文化厚重,为河南省农业发展奠定了坚实的发展基础。作为农业大省,河南省农业规模大,农产品品类丰富且产量高,粮食产量已占全国总产量十分之一,农业产业集群优势也逐渐凸显。在新质生产力背景下,河南省作为农业大省,需通过科技创新和绿色转型推动农业高质量发展,实现从传统生产模式向高效、低碳、智能的现代农业跃迁。对于农业用水量大、灌溉效率低的现状,应加强设施保障,继续推进高标准农田、节水灌溉等基础设施建设,积极改善由于灌溉技术落后、灌溉设施陈旧导致的低效灌溉;针对耕地流失及土壤养分失衡问题,应限制或有序引导耕地非农化,并继续落实土地整治、占补平衡等相关政策,推进测土配方、有机资源还田等科学施肥工作,推广保护性休耕、轮作模式等种植方式,做到耕地面积不减少、耕地质量不下降;化肥农药利用率低、面源污染严重是现阶段绿色发展面临的核心挑战,减量增效虽取得一定成效,但长效机制的建立仍面临诸多瓶颈,应积极推广生物制农药、有机肥的施用,加大宣传力度促进农民认知行为转变,并完善绿色农资市场机制,提升政策支持、激励的精准度与持久度。同时,加强数字赋能,推进建设农业大数据平台,实现土壤、气象、病虫害等数据实时监测,精准指导土壤优化、化肥农药施用等决策,实现精准化生产管理,拓宽绿色农业体系。政府部门应积极推进科技创新驱动绿色生产改革,寻求技术突破,并出台相关政策,促进农业技术推广体系构建等深层次制度创新,系统性推进政策设计及部门协同治理,以应对绿色农业转型步入深水区面临的持久挑战。

5　结论

(1)研究时段内,河南省农业足迹下降明显,农业生产环境负担大幅度减小。以豫南农业核心区降幅较大,表现为氮肥施用量降低,环境氮余量提升,水资源开发利用效率提高。绿色发展成效显著,但水资源仍是河南省农业绿色高质量发展的首要环境制约。

(2)省域承载力略微增长,以水、氮承载力增长为主,节水推广及降肥增效行动效果显著。区域中心城市郑州、洛阳等地农业承载力明显降低,农业规模缩减,呈现都市型农业特征;农业承载力较高的仍为豫南农业大市。

(3)全省耕地非农化态势减弱。净流出耕地面积显著降低,且以转换为建设用地为主。地市耕地流出量在 5%—7%的居多,郑州、南阳、信阳三地居首,流出耕地主要分布于建成区周边。

(4)省域环境资源负载下降,呈现生态盈余状态。负载指数由 0.46 降低至 0.32,盈余提高,省内可实现自给自足,并形成对外输出。氮、碳负载处于低位,呈盈余状态;水资源负载仍处高位,供需矛盾持续。洛阳、郑州生产性负载最高,本地供给无法满足居民生活消耗,需要外部供给补充,其余地市负载较低,仍处于农业生

产外输的生态位。

参考文献(References):

[1] 朱青, 蔡永立. 生态风险与生态系统健康对生态系统服务的影响. 地理学报, 2024, 79(5): 1303-1317.

[2] 高阳, 沈振, 张中浩, 熊巨华. 生态系统服务视角下的社会—生态系统耦合模拟研究进展. 地理学报, 2024, 79(1): 134-146.

[3] 范育鹏, 方创琳. 城市可持续发展新型定量研究方法进展. 生态学报, 2023, 43(8): 3020-3031.

[4] 王晗, 张丹妮, 华廷, 赵宇豪, 王振宇, 吴健生. 社会-生态系统: 研究态势、主题演进与地域实践. 生态学报, 2023, 43(15): 6499-6513.

[5] 刘海猛, 卢佳祎, 王成新, 丁宇辰, 杨志伟, 李智勇, 乔建民. 基于栅格尺度的黄河流域人地关系时空耦合分析. 生态学报, 2024, 44(15): 6499-6512.

[6] 陶果丰, 薛万来, 袁博, 李添雨, 李文忠, 李杰, 赵琳琳, 崔宇然, 徐为业, 魏香琴, 贾坤. 基于遥感技术的水生态空间健康综合评价体系. 遥感学报, 2025, 29(3): 689-699.

[7] 张向徐, 韩美, 徐婷, 孔祥伦, 孙金欣, 朱纹君. 黄河干流生态健康评价研究. 地理学报, 2025, 80(3): 661-677.

[8] 柳宏斌, 夏国柱, 林涛, 徐欢, 连帅明, 许仲林. 基于改进生态足迹模型的可持续发展评价——以北疆为例. 生态学报, 2023, 43(1): 234-248.

[9] 魏柏浩, 阿里木江·卡斯木, 如克亚·热合曼, 赵永玉. 天山北坡城市群生态承载力演变与生态敏感性分析. 生态学报, 2023, 43(4): 1399-1411.

[10] Rees W E. Ecological Footprints and Appropriated Carrying Capacity: What Urban Economics Leaves Out. Environment and Urbanization, 1992, 4(2): 121-130.

[11] Wackernagel M, Rees W E. Our Ecological Footprint: Reducing Human Impact on the Earth. Gabriola Island: New Society Publishers, 1996.

[12] Mózner Z, Tabi A, Csutora M. Modifying the yield factor based on more efficient use of fertilizer—The environmental impacts of intensive and extensive agricultural practices. Ecological Indicators, 2012, 16: 58-66.

[13] 熊鹰, 艾赣雄, 周晨, 姚颖, 谢庆. 基于改进三维生态足迹模型的洞庭湖区生态可持续时空演化研究. 生态学报, 2022, 42(3): 1165-1179.

[14] 唐玉芝, 石铁柱, 刘潜, 王梦迪, 颜凤芹, 吕品, 邓东平, 张紫红, 王志华, 胡忠文, 邬国锋, 苏奋振. 基于空间场景的海岸带与海域生态承载力及可持续评价. 地理学报, 2023, 78(11): 2811-2832.

[15] 徐中民, 程国栋, 张志强. 生态足迹方法:可持续性定量研究的新方法——以张掖地区 1995 年的生态足迹计算为例. 生态学报, 2001, 21(9): 1484-1493.

[16] 杨开忠, 杨咏, 陈洁. 生态足迹分析理论与方法. 地球科学进展, 2000, 15(6): 630-636.

[17] 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): 598-609.

[18] 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, 16(10): 8-10.

[19] 李金城, 严长安, 高伟. 基于本土参数的流域生态足迹评估与不确定分析. 生态学报, 2019, 39(2): 739-747.

[20] 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.

[21] 赵东升, 郭彩赟, 郑度, 刘磊, 吴绍洪. 生态承载力研究进展. 生态学报, 2019, 39(2): 399-410.

[22] 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.

[23] Pierrat É, Laurent A, Dorber M, Rygaard M, Verones F, Hauschild M. Advancing water footprint assessments: Combining the impacts of water pollution and scarcity. Science of The Total Environment, 2023, 870: 161910.

[24] 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.

[25] 方恺. 足迹家族研究综述. 生态学报, 2015, 35(24): 7974-7986.

[26] 方恺. 足迹家族: 概念、类型、理论框架与整合模式. 生态学报, 2015, 35(6): 1647-1659.

[27] 孙佳歆, 齐鹏, 章光新, 杜崇, 李赞. 基于生态足迹法的农业水土资源承载力分析——以三江平原友谊农场为例. 地理科学, 2024, 44(6): 1060-1068.

[28] Xu Y X, Ma T, Yuan Z, Tian J X, Zhao N. Spatial patterns in pollution discharges from livestock and poultry farm and the linkage between manure nutrients load and the carrying capacity of croplands in China. Science of The Total Environment, 2023, 901: 166006.

[29] Cui Y, Khan S U, Sauer J, Zhao M J. Exploring the spatiotemporal heterogeneity and influencing factors of agricultural carbon footprint and carbon footprint intensity: Embodying carbon sink effect. Science of The Total Environment, 2022, 846: 157507.

[30] Yan Y N, Wang R, Chen S, Zhang Y, Sun Q L. Three-dimensional agricultural water scarcity assessment based on water footprint: A study from a humid agricultural area in China. Science of The Total Environment, 2023, 857: 159407.

[31] 刘纪远, 匡文慧, 张增祥, 徐新良, 秦元伟, 宁佳, 周万村, 张树文, 李仁东, 颜长珍, 吴世新, 史学正, 江南, 于东升, 潘贤章, 迟文峰. 20 世纪 80 年代末以来中国土地利用变化的基本特征与空间格局. 地理学报, 2014, 69(1): 3-14.

[32] 张恒义, 刘卫东, 王世忠, 单娜娜, 梁红梅. “省公顷”生态足迹模型中均衡因子及产量因子的计算——以浙江省为例. 自然资源学报, 2009, 24(1): 82-92.

[33] 李鹏辉, 徐丽萍, 张军民, 金梦婷, 张茹倩. 干旱区内陆河流域三维生态足迹时空变化分析——以玛纳斯河流域为例. 生态学报, 2020, 40(19): 6776-6787.

[34] 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.

[35] 温桂香, 姚金哲, 韩晴, 李鸽子, 王志勇, 张丛光, 李岚涛, 刘世亮, 王宜伦, 介晓磊, 柳海涛. 河南省小麦玉米生产体系碳氮足迹时空变化特征及驱动因素分析. 环境科学, 2025, 46(2): 1002-1015.

[36] 陈中督, 徐春春, 纪龙, 方福平. 基于农户调查的长江流域双季稻生产碳、氮足迹分析——以江西和湖南为例. 作物杂志, 2023(2): 229-237.

[37] 向蓉燕, 谢标, 秦俊, 李婧, 王延华. 中国农业生态系统生物固氮量的时空分布. 湖北农业科学, 2013, 52(18): 4333-4336.

[38] 胡春胜, 张玉铭, 秦树平, 王玉英, 李晓欣, 董文旭. 华北平原农田生态系统氮素过程及其环境效应研究. 中国生态农业学报, 2018, 26(10): 1501-1514.

[39] 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.

[40] 谭美秋, 崔耀平, 马晓哲, 刘朋, 樊雷, 芦艳艳, 文雯, 陈准. 河南省农田生态系统碳汇核算研究. 生态与农村环境学报, 2022, 38(9): 1129-1137.

[41] 马晓蕾, 王婕, 刘若男. 中国“水量”和“水质”生态足迹及可持续能力量化方法与实证研究. 生态学报, 2023, 43(9): 3677-3688.

[42] 刘晨峰, 汪志锋, 赵兴征, 沈忱, 李松. 基于二污普数据果菜茶畜禽粪污氮承载评估. 环境科学研究, 2020, 33(12): 2657-2664.

[43] 孙亚敏. 安徽省果菜茶粪肥氮承载力评估. 环境科学导刊, 2022, 41(4): 51-55.

[44] 马彩虹, 安斯文, 文琦, 滑雨琪, 李聪慧. 基于土地利用转移流的国土空间格局演变及其驱动机制研究——以宁夏原州区为例. 干旱区地理, 2022, 45(3): 925-934.