王永瑜,张 乐,蒋琼琼.中国省际粮食贸易隐含虚拟耕地流动及其生态产品补偿研究 [J]. 中国环境科学, 2025,45(11):6501-6512.
Wang Y Y, Zhang L, Jiang Q Q, et al. Research on the hidden virtual cropland flow and ecological products compensation in China's inter-provincial grain trade [J]. China Environmental Science, 2025,45(11):6501-6512.

中国省际粮食贸易隐含虚拟耕地流动及其生态产品补偿研究

王永瑜[1*],张 乐[1],蒋琼琼[1,2] (1.兰州财经大学统计与数据科学学院,甘肃 兰州 730030；2.兰州财经大学经济学院,甘肃 兰州 730030)

摘要：基于 2017 年中国多区域投入产出表,构建环境扩展多区域投入产出模型(EE-MRIO)追踪虚拟耕地流动路径,结合当量因子法核算耕地生态产品价值,设计"受益者付费"补偿标准.研究发现:黄淮海平原(河南、山东)与东北平原(黑龙江)依托资源禀赋优势与政策倾斜效应,形成虚拟耕地供给核心区;同时黄淮海平原(河南、山东)与长三角(江苏)因人口集聚与产业转型需求,成为耕地资源的使用中心;全国虚拟耕地净流动呈现由北向南、由西向东的"梯度转移"特征,基本遵循"邻近效应",黑龙江、吉林、内蒙古等粮食主产区成为虚拟耕地的主要净流出源,广东、浙江、北京等经济发达地区为核心净流入地;关键路径分析揭示了如黑龙江-吉林、内蒙古-山西、黑龙江-浙江等跨省流动链上的显著耕地生态产品转移,凸显了发达地区对粮食主产区耕地生态产品的依赖;通过构建包含各区域耕地生态产品补偿的修正矩阵,不仅明确了耕地生态保护的责任归属,还提供了科学合理的补偿依据,为耕地资源的可持续利用与经济发展的和谐共生开辟了新路径.

关键词：虚拟耕地；耕地生态产品；耕地生态补偿；环境扩展多区域投入产出模型(EE-MRIO)；当量因子法
中图分类号：X24,F321.1,327 **文献标识码**：A **文章编号**：1000-6923(2025)11-6501-12

Research on the hidden virtual cropland flow and ecological products compensation in China's inter-provincial grain trade.

WANG Yong-yu[1*], ZHANG Le[1], JIANG Qiong-qiong[1,2] (1.School of Statistics and Data Science, Lanzhou University of Finance and Economics, Lanzhou 730030, China；2.School of Economics, Lanzhou University of Finance and Economics, Lanzhou 730030, China). *China Environmental Science*, 2025,45(11)：6501~6512

Abstract：This study, based on the 2017 multi-regional input-output table of China, constructed an Environmentally Extended Multi-Regional Input-Output (EE-MRIO) model to track the virtual cropland flow paths. It then quantified the value of land ecological products using the equivalent factor method and designed a "Beneficiary Pays" compensation standard. The research findings include: The Huang-Huai-Hai Plain (Henan, Shandong) and the Northeast Plain (Heilongjiang), leveraging their resource endowment advantages and policy support effects, have formed core virtual cropland supply regions; meanwhile, the Huang-Huai-Hai Plain (Henan, Shandong) and the Yangtze River Delta (Jiangsu) have emerged as centers of land resource use due to population concentration and industrial transformation needs. The national net virtual cropland flow shows a "gradient transfer" characteristic, moving from north to south and from west to east, basically adhering to the "proximity effect". Major grain-producing regions such as Heilongjiang, Jilin, and Inner Mongolia are the main net outflow sources of virtual cropland, while economically developed regions like Guangdong and Zhejiang are the core net inflow destinations. Key path analysis reveals significant transfers of land ecological products along cross-provincial flow chains such as Heilongjiang-Jilin, Inner Mongolia-Shanxi, and Heilongjiang-Zhejiang, highlighting the dependence of developed regions on the land ecological products of major grain-producing areas. By constructing a modified matrix incorporating compensation for land ecological products in each region, the study not only clarifies the accountability for land ecological protection, but also provides a scientifically sound basis for compensation. This opens up a new path for the sustainable utilization of land resources and the harmonious coexistence of economic development.

Key words：virtual cropland；ecological products of cropland；ecological compensation for cropland；Environmentally Extended Multi-Regional Input-Output (EE-MRIO) model；equivalent factor method

伴随消费升级与经济增长,粮食需求激增倒逼资源匹配效率提升,催生出"虚拟耕地"理论框架——通过量化粮食生产中的耕地资源投入,揭示自然禀赋与区域战略协同下的土地优化配给新范式[1-2].然而,耕地不仅提供粮食,还具有重要的生态服务功能,其外溢效益使粮食进口区无偿享用了生态产品,因此亟需构建生态补偿机制以弥补出口地

收稿日期：2025-04-05
基金项目：国家社会科学基金资助项目(22BTJ002)
* 责任作者, 教授, yongyu-wang@163.com

区提供的这些耕地生态产品.将耕地生态产品价值纳入环境经济核算体系,已成为协调“成本-效益”的关键.本研究从虚拟耕地流动引发的生态外溢出发,构建涵盖耕地生态产品的补偿标准,为完善生态保护市场化机制、推动农业生态文明转型提供科学依据,对统筹粮食安全与生态安全具有重要战略意义.

虚拟耕地概念以 Tony Allan[3](1993)提出的虚拟水理论为溯源起点,继承罗贞礼等[4]学者发展的虚拟耕地概念体系,将其界定为商品服务全生命周期内隐含的耕地资源量.现有研究聚焦农产品贸易中的虚拟耕地规模[5-8]、驱动机制[9-11]及其对农业可持续性[12-13]与生态补偿[14-16]的影响,核算方法依赖实物量法[5]导致终端需求溯源能力不足,而环境扩展多区域投入产出模型(EE-MRIO)恰能弥补此缺陷.在耕地生态价值核算领域,当量因子法[17-18]、替代市场法[19-20]、条件价值评估法[21-22]及能值分析法[23]虽构建多维度评估框架,却难以破解跨区域异质性背景下价值量化与补偿政策间的衔接难题,尤其面对虚拟耕地流动引致的生态产品价值转移,现有模型无法实现补偿标准与经济发展动态适配.国际学界通过法律-经济-技术协同框架已形成系统化补偿范式,深度整合农业环境政策与生态补贴体系[24-29].国内研究虽在补偿主体识别[30]、标准测度[31-33]及机制创新[34-36]三维度取得突破,但仍面临三重局限:方法论层面,补偿标准缺乏动态迭代机制,难以响应产业结构演进;制度设计层面,纵向支付主导模式存在“责任省域化-效益全域化”悖论,跨省横向补偿与市场化工具供给不足;研究视角层面,现有成果多聚焦土地利用类型补偿,尚未构建“虚拟耕地流动-生态产品外溢-生态补偿额度”传导模型,制约粮食安全与生态治理协同效能.

鉴于此,本研究从粮食贸易角度分析中国省际虚拟耕地流动格局,并设计相应的耕地生态产品横向补偿标准.本研究的边际贡献:(1)将 EE-MRIO 模型融入耕地生态补偿标准的制定,构建“经济-资源”耦合框架,通过追踪经济活动中的资源利用与环境影响,克服传统补偿标准制定中“空间模糊性”困境;(2)聚焦于粮食贸易单一因素下耕地生态补偿的合理额度,弥补了以往综合性转移支付政策在生态价值补偿方面的不足;(3)构建覆盖 31 省的耕地生态补偿“一对一”核算体系,通过量化生态产品溢出与省际享用关系,建立“受益者付费”模型,实现跨省差异化精准补偿,为区域生态合作提供可操作的对接方案.

1 研究设计与数据来源

1.1 基于虚拟耕地流动的耕地生态产品补偿逻辑框架

在区域粮食贸易中,粮食出口实质上隐含了耕地资源及依附其上的生态产品向进口地区的转移.本研究立足于“粮食安全与生态保护协同”立场,聚焦于此过程中耕地生态产品价值的跨域流转与补偿问题,旨在对其空间配置失衡进行补偿而非对生态破坏补偿.基于中国“谷物基本自给,口粮绝对安全”的新粮食安全观,本研究聚焦于稻谷、小麦、玉米三大谷物,通过将其播种面积嵌入中国多区域投入产出表,精准核算各省域供给侧和使用侧虚拟耕地的流动状况;继而深入剖析虚拟耕地随粮食贸易在各省域间的净流动方向与具体数量.在此基础上,依据虚拟耕地的净流动数据,结合各省独特的生态基底,分别核定各省耕地生态产品价值净流量;最终,通过融入社会发展阶段系数与地方政府支付能力指数,科学合理地核算耕地生态产品补偿额,确保补偿机制的公正性与可行性.

1.2 虚拟耕地 EE-MRIO 模型的构建

中国省域间投入产出表结构如表 1 所示,m 表示各省域,n 表示各部门;x_i^r 为 r 地区 i 部门总产出的货币价值;z_{ij}^{rs} 是 r 地区 i 部门生产商品或服务的货币价值,作为中间产品转移到 s 地区 j 部门;y_{it}^{rs} 是 r 地区 i 部门在 s 地区 t 类国内最终使用的投入,包括农村居民消费、城镇居民消费、政府消费、固定资本形成、存货增加 5 类;ex_i^r 是 r 地区 i 部门的海外出口;ε_i^r 表示各省域分行业误差项.经济活动平衡式为:

$$x_i^r = \sum_{s=1}^{m}\sum_{j=1}^{n} z_{ij}^{rs} + \sum_{s=1}^{m}\sum_{t=1}^{5} y_{it}^{rs} + ex_i^r + \varepsilon_i^r \tag{1}$$

引入直接消耗系数 a_{ij}^{rs},指 r 地区 i 部门生产单位价值产品所需要直接消耗 s 地区 j 部门的价值量,即反映两部门间的生产联系程度:

$$a_{ij}^{rs} = \frac{z_{ij}^{rs}}{x_j^s} \tag{2}$$

将式(1)用矩阵形式改写:

$$\boldsymbol{X} = \boldsymbol{AX} + \boldsymbol{F} = (\boldsymbol{I} - \boldsymbol{A})^{-1}\boldsymbol{F} \tag{3}$$

式中:$\boldsymbol{X}$ 为多区域投入产出模型的总产出矩阵;$\boldsymbol{A}$ 为直接消耗系数矩阵;$\boldsymbol{I}$ 为单位矩阵;$\boldsymbol{F}$ 为最终使用矩阵(包含国内最终使用和出口、误差项),$B=(I-A)^{-1}$ 为列昂惕夫逆矩阵,亦称完全消耗系数矩阵,该矩阵揭示了单位最终产品在整体经济框架内所涵盖的直接与间接的消耗总和.

表 1　中国省域间投入产出表结构

Table 1　Structure of China's interprovincial input-output table

项目		中间使用			国内最终使用			出口	误差项	总产出
		省域 1	…	省域m	省域 1	…	省域m			
中间投入	省域 1	z_{ij}^{rs}			y_{ik}^{rs}			ex_i^r	ε_i^r	x_i^r
	…									
	省域m									
进口		w_j^s								
增加值		v_j^s								
总投入		x_j^s								

引入直接耕地利用系数,即在投入产出表底部增加一行粮食播种面积,将耕地资源利用嵌套入投入产出表记录的经济活动中,以追踪和分析粮食贸易对耕地资源的利用程度[37].计算式如下:

$$al_j^s=\frac{l_j^s}{x_j^s} \tag{4}$$

式中:al_j^s 为 s 地区 j 部门粮食生产直接耕地利用系数,即单位经济产出所直接占用的耕地资源,l_j^s 为 s 地区 j 部门耕地资源利用量,x_j^s 为 s 地区 j 部门的总产出.

部门生产既直接消耗耕地,又通过中间品间接消耗耕地,二者共同构成粮食生产的完全耕地利用.本研究将 AL 对角化处理,再右乘列昂惕夫逆矩阵$(\boldsymbol{I}-\boldsymbol{A})^{-1}$,得到完全耕地利用系数矩阵.计算如下:

$$\mathrm{TL}=\widehat{\mathrm{AL}}(\boldsymbol{I}-\boldsymbol{A})^{-1} \tag{5}$$

式中:TL 为完全耕地利用系数矩阵;$\widehat{\mathrm{AL}}$ 为直接耕地利用系数的对角化处理;$(\boldsymbol{I}-\boldsymbol{A})^{-1}$ 为列昂惕夫逆矩阵.本研究关注的是农业部门与耕地资源的远程耦合效应,忽略其他部门的耕地利用,因此对于其他部门 $\widehat{\mathrm{AL}}$ 为 0.

基于式(1)~(5)的各省域最终使用引致的粮食贸易虚拟耕地足迹 LF 可由式(6)计算.

$$\mathrm{LF}=\widehat{\mathrm{AL}}(\boldsymbol{I}-\boldsymbol{A})^{-1}F$$

1.3　虚拟耕地净流动的核算

借鉴王文治[38]对中国省域碳排放的测算方法,式(6)中,矩阵 LF 的行向加总为各省域供给侧耕地利用(即式(7)的 $\mathrm{LF}_{Pl}^r=\sum_{s=1}^{m}\mathrm{LF}^{rs}$);列向加总为各省域使用侧耕地利用(即式(8)的 $\mathrm{LF}_{Cl}^r=\sum_{s=1}^{m}\mathrm{LF}^{sr}$).其中省域 r 的供给侧和使用侧耕地利用具体表达式如下:

$$\begin{aligned}\mathrm{LF}_{Pl}^r&=\sum_{s=1}^{m}\mathrm{LF}^{rs}\\&=\widehat{\mathrm{AL}}^r\sum_{s=1}^{m}B^{rs}Y^{sr}+\widehat{\mathrm{AL}}^rB^{rr}EX^r+\widehat{\mathrm{AL}}^rB^{rr}\varepsilon^r+\\&\quad\widehat{\mathrm{AL}}^r\sum_{s\neq r}^{m}\sum_{u=1}^{m}B^{ru}Y^{us}+\widehat{\mathrm{AL}}^r\sum_{s\neq r}^{m}B^{rs}EX^s+\widehat{\mathrm{AL}}^r\sum_{s\neq r}^{m}B^{rs}\varepsilon^s\end{aligned} \tag{7}$$

$$\begin{aligned}\mathrm{LF}_{Cl}^r&=\sum_{s=1}^{m}\mathrm{LF}^{sr}\\&=\widehat{\mathrm{AL}}^r\sum_{s=1}^{m}B^{rs}Y^{sr}+\widehat{\mathrm{AL}}^rB^{rr}EX^r+\widehat{\mathrm{AL}}^rB^{rr}\varepsilon^r+\\&\quad\widehat{\mathrm{AL}}^s\sum_{s\neq r}^{m}\sum_{u=1}^{m}B^{su}Y^{ur}+\widehat{\mathrm{AL}}^s\sum_{s\neq r}^{m}B^{sr}EX^r+\widehat{\mathrm{AL}}^s\sum_{s\neq r}^{m}B^{sr}\varepsilon^r\end{aligned} \tag{8}$$

式中:等号右侧前三项为省域r国内最终使用、出口和误差项引致的本省域耕地利用,后三项为外省域国内最终使用、出口和误差项引致的省域r耕地利用.式(8)中,等号右侧前三项同式(7),后三项为省域r国内最终使用、出口和误差项引致的外省域耕地利用(Y 为国内最终使用矩陈.EX 为出口列向量.ε为误差项列向量).

当具体以省域r和省域s为例,两省域间耕地净流动计算公式如下:

$$\mathrm{NL}^{rs}=\mathrm{LF}^{rs}-\mathrm{LF}^{sr}$$
$$=\left(\widehat{\mathrm{AL}}^{r}\sum_{u=1}^{m}B^{ru}Y^{us}+\widehat{\mathrm{AL}}^{r}B^{rs}EX^{s}+\widehat{\mathrm{AL}}^{r}B^{rs}\varepsilon^{s}\right)\quad(9)$$
$$\left(\widehat{\mathrm{AL}}^{s}\sum_{u=1}^{m}B^{su}Y^{ur}+\widehat{\mathrm{AL}}^{s}B^{sr}EX^{r}+\widehat{\mathrm{AL}}^{s}B^{sr}\varepsilon^{r}\right)$$

式中:若 $\mathrm{NL}^{rs}>0$ 表明由省域最终品消费、出口、误差项引致的省域 r 和省域 s 双边粮食流动使得省域 r 耕地净流出,省域 s 耕地净流入,即区域 r 为补偿客体,获得补偿金额;区域 s 为补偿主体,支付补偿金额(鉴于误差项 ε 是为了平衡投入产出表所置,无具体经济含义,在实际分析中不予考虑,该研究对误差项不计入统计).

1.4 耕地生态产品价值净流动的核算

核算耕地生态产品价值净流动的关键是先定单价再乘虚拟耕地净流量.本研究采用当量因子法对耕地生态产品价值进行量化,该方法依据专家调查数据,兼具科学性与可操作性.经核算,耕地生态系统当量因子价值等于本年度全国粮食平均市场价的 1/7[39].本研究将耕地的外部性定性为正外部性,仅核算其生态服务功能,共计 6.51 个当量因子,排除已通过市场实现经济价值的食物与原材料生产部分[40].据此核定单位耕地生态产品价值,计算公式如下:

$$V_r=6.51\cdot E_r \tag{10}$$

$$E_r=\frac{1}{7}\sum_{k=1}^{n}\frac{m_k\vec{p_k}q_k}{M} \tag{11}$$

式中:V_r 为 r 地区耕地生态产品价值,亿元/khm^2;E_r 表示 1 单位生物当量因子的价值量,亿元/khm^2;k 为农作物类型;m_k 为第 k 种粮食播种面积,khm^2;p_k 为第 k 种粮食平均价格,亿元/万 t;q_k 为第 k 种粮食面积单产,万 t/khm^2;M 为 n 种粮食播种总面积,khm^2;n 为粮食种类数.

据此,根据前文的虚拟耕地净流动得出耕地生态产品价值净流动 NV^{rs},计算公式如下:

$$\mathrm{NV}^{rs}=V_r\cdot\mathrm{NL}^{rs} \tag{12}$$

式中:若 $\mathrm{NV}^{rs}>0$ 表明由虚拟耕地净流动引致的耕地生态产品价值净流动,使得省域 r 耕地生态产品价值净流出,省域 s 耕地生态产品价值净流入.

1.5 耕地生态产品补偿额的确定

耕地生态产品补偿额的确定不仅基于价值净额评估,还需结合区域差异进行调整.只有统筹考虑生态保护价值、省域发展差距及地方经济承受能力,才能制定合理可行的补偿标准.基于此,本研究借鉴刘利花等对中国耕地生态补偿的研究[40],引入社会发展阶段系数与地方政府支付能力指数.前者反映地区经济社会发展水平与生态保护意识,避免“一刀切”带来的不公;后者衡量地方政府财政资源与补偿履行能力.通过这两项系数对补偿额进行修正,可增强标准的科学性、区域公平性与政策可操作性,为构建有效的生态补偿机制提供依据.具体如下:

社会进步带来了对生态产品价值认识的深化,以及支付意愿和能力的提升,该过程可通过皮尔生长曲线模拟,以刻画系统从初始到饱和的增长轨迹.采用恩格尔系数作为衡量居民生活水平和区域经济社会发展水平的指标,区域社会发展阶段系数的计算式如下:

$$h_s=\frac{1}{1+\mathrm{e}^{-t}} \tag{13}$$

$$t=\mathrm{EN}_{ns}=\mathrm{EN}_{as}\cdot\theta_s+\mathrm{EN}_{bs}\cdot(1-\theta_s) \tag{14}$$

式中:$h_s\in(0,1)$,为社会发展阶段系数,1 为最大值,表示极富阶段的生态补偿支付能力.θ_s 为 s 地区城镇化水平,EN_{as}、EN_{bs} 分别为 s 地区当年城镇和农村居民恩格尔系数,EN_{ns} 为 s 地区综合恩格尔系数.

对于地方政府来说,人均生产水品越高,其生态补偿的支付能力就越高.因此,引入地方政府支付能力指数对生态补偿标准进行修正,公式如下:

$$b_s=\mathrm{GDP}_s/\mathrm{GDP}_0 \tag{15}$$

式(15)中:b_s 为地方政府支付能力指数,GDP_s 表示 s 地区人均 GDP (亿元),GDP_0 表示全国人均 GDP (亿元).

则耕地生态保护补偿标准修正公式为:

$$\mathrm{ES}=\mathrm{NV}^{rs}\cdot h_s\cdot b_s$$

1.6 数据来源

研究覆盖中国大陆 31 个省级行政区(不含香港特别行政区、澳门特别行政区和台湾省),基于中国碳核算数据库(CEADs)发布的 2017 年中国多区域投入产出表进行核算.选取 2017 年数据主要基于以下考虑:其一,该年份为研究期最新可用区域间投入产出数据;其二,2017 年处于“十三五”规划中期,耕地保护政策执行稳定,可规避规划期首尾年份的政策考核波动(如 2015 年省级耕地保护目标验收)及突发性干扰(如 2020 年新冠疫情对粮食贸易的冲击).尽

管采用单一年份数据,但研究构建的核算模型系统揭示了省域间虚拟耕地流动方向、规模、净流量及其衍生的生态产品补偿差异化需求,这些关键规律性发现对于设计跨区域补偿机制具有重要的理论与实践价值.基础数据源自 2018 年《中国统计年鉴》《中国农村统计年鉴》《全国农产品成本收益资料汇编》《中国人口和就业统计年鉴》《中国国土资源统计年鉴》及各省统计年鉴.

2　实证分析

2.1　粮食贸易隐含虚拟耕地供给、使用与利用系数分析

2.1.1　粮食贸易隐含虚拟耕地供给、使用分析　根据式(6)的核算结果,表 2 展示了最终使用体现的耕地数量,同时构建空间转移图(图 1),清晰揭示了中国耕地资源的省际流动.供给侧维度,表征的是某一省域为满足本省以及其他省域的最终使用而出口的虚拟耕地量;使用侧维度,则体现的是某一区域为满足自身使用需求而从本省及其他省域进口的虚拟耕地量.根据全国虚拟耕地流动路径矩阵的整理结果,从供给端看,河南(10350.60khm^2)、黑龙江(9975.18khm^2)、山东(8204.42khm^2)三大粮食主产区构成虚拟耕地供给核心,这一格局的形成既源于黄淮海平原与东北平原的沃土优势,也得益于国家粮食安全战略的政策倾斜.与之形成对照的是使用端特征:河南、山东、江苏三省分别以 8595.61khm^2、8157.62khm^2、6287.14khm^2 的使用量位居前列.值得注意的是,河南、山东两省在供给、使用两端均占据显著地位,这折射出粮食主产区与人口大省的双重属性——在承担国家粮食生产重任的同时,庞大的人口基数和发达的食品加工业催生了巨大的内生需求.同时,珠三角(广东)、长三角(江苏、浙江)等经济发达区域虚拟耕地使用量显著超越青藏(西藏、青海)、东北(黑龙江)等生态功能区.这种空间错位,本质上是区域经济结构分化的投影:发达地区通过产业转型升级,将有限土地资源优先配置于高附加值工业与服务业,其粮食消费需求通过虚拟耕地贸易实现空间置换;而欠发达区域则更多保留初级产品供给功能,形成“生产在外围、消费在中心”的垂直分工格局.

表 2　2017 年中国省际粮食贸易隐含虚拟耕地资源使用与供给

Table 2　Virtual cropland resources use and supply in China’s interprovincial grain trade (2017) (khm^2)

省份	耕地使用(khm^2)	当地耕地使用占比(%)	耕地供给(khm^2)	当地耕地供给占比(%)	省份	耕地使用(khm^2)	当地耕地使用占比(%)	耕地供给(khm^2)	当地耕地供给占比(%)
北京	2 110.16	2.12	61.15	73.24	湖北	5 325.55	73.11	4 320.39	90.12
天津	1 143.02	19.74	341.29	66.13	湖南	4 264.98	70.29	4 642.25	64.58
河北	4 178.68	69.92	6 014.21	48.58	广东	5 939.61	22.11	1 938.80	67.73
山西	3 442.29	57.30	2 371.19	83.19	广西	2 299.04	60.13	2 444.03	56.56
内蒙古	2 592.96	69.47	4 519.45	39.86	海南	410.82	13.74	246.76	22.88
辽宁	2 940.87	56.96	3 205.53	52.26	重庆	2 047.71	33.15	1 137.93	59.65
吉林	2 998.27	49.42	5 030.12	29.46	四川	4 926.85	75.13	4 431.04	83.54
黑龙江	3 736.75	76.87	9 975.18	28.79	贵州	1 873.90	47.81	1 865.15	48.03
上海	1 427.30	7.33	128.21	81.57	云南	3 015.63	56.15	2 980.62	56.81
江苏	6 287.14	51.67	5 219.11	62.24	西藏	177.46	22.88	45.11	90.01
浙江	4 457.32	10.86	778.33	62.20	陕西	2 167.62	27.04	2 265.41	25.87
安徽	4 949.54	74.66	6 594.59	56.03	甘肃	1 231.38	70.05	1 816.72	47.48
福建	1 733.30	31.09	656.28	82.10	青海	204.37	32.79	133.57	50.16
江西	2 889.22	64.19	3 565.41	52.02	宁夏	710.09	49.73	511.99	68.98
山东	8 157.62	77.88	8 204.42	77.44	新疆	1 784.97	49.11	2 225.19	39.39
河南	8 595.61	67.07	10 350.60	55.70					

前述分析已呈现各省域对全国虚拟耕地的供给与使用状况,然而本省自身对耕地资源的利用能力同样不容忽视.如表 2 所示,对于中国绝大多数省份来说,对当地耕地资源的使用在其耕地资源总使用中占据主导地位,印证了“属地优先”的资源利用原则.但北京、上海、浙江等经济发达区域呈现显著的外源依赖特征,其对当地耕地资源的使用率仅占2.12%,7.33%,10.86%.这种空间非均衡性在供给端同样存在分化:湖北、西藏有高达 90%以上的耕地供给给了本省,这主要归因于当地的人口结构特征以

及交通条件的制约;同时,四川、山西、福建、上海也有 80%以上的耕地供给给了本省.更具战略意义的是黑龙江、吉林、内蒙古等省份,其半数以上耕地资源通过“北粮南运”支撑全国需求,这种输出能力不仅源于东北黑土带的先天优势,更映射出国家粮食生产功能区布局的深远考量.

2.1.2 粮食贸易隐含虚拟耕地直接利用系数分析 直接耕地利用系数是衡量耕地实际投入生产利用程度、反映区域耕地资源利用效率的关键指标,对合理规划耕地资源、保障粮食安全及优化农业布局意义重大.本研究基于式(4)的核算结果,展示了图 2 所示的中国直接耕地利用系数空间特征分析,区域间直接耕地利用系数呈现显著的非均衡分布格局.其中,吉林、黑龙江、山西、内蒙古和安徽位列全国前五位,形成明显的空间集聚现象.该系数作为表征单位耕地面积承载经济活动强度的综合指标,其区域差异主要由耕地资源禀赋与经济活动规模的双重作用决定.具体而言,东北地区(吉林、黑龙江)及内蒙古依托其广袤的耕地资源与集约化农业生产模式,实现了耕地资源的高效利用,其直接耕地利用系数反映了粮食主产区对耕地生产力的深度开发.安徽作为长江中下游传统农业区,精耕细作的耕作传统与较高的复种指数共同提升了直接耕地利用系数.山西的直接耕地利用系数较高,这主要源于其相对较小的经济总产出.

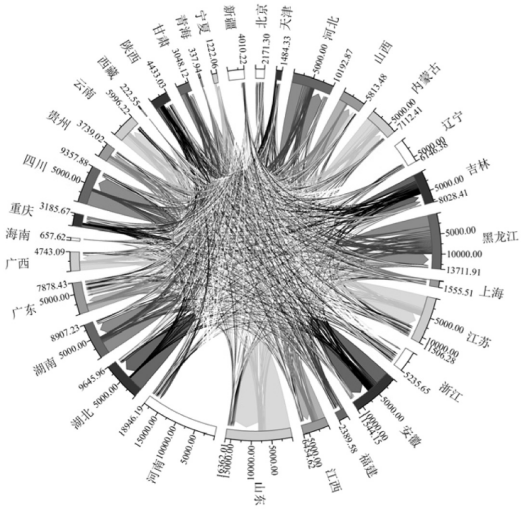


图 1 2017 年中国省际粮食贸易隐含虚拟耕地流动情况

Fig.1 Virtual cropland flows embodied in China’s interprovincial grain trade (2017)

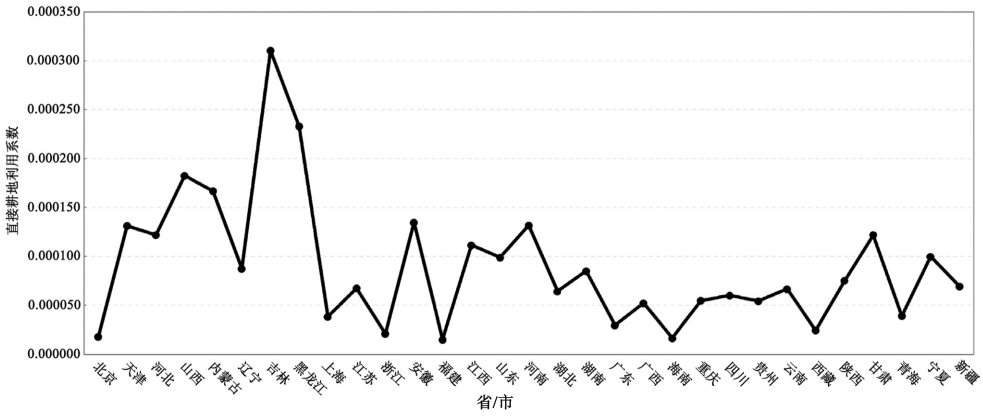


图 2 2017 年中国省际粮食贸易直接耕地利用系数

Fig.2 Direct cropland use coefficients in China's interprovincial grain trade (2017)

2.2 虚拟耕地净流动空间转移格局

基于前文对虚拟耕地供给方(流出方)和使用方(流入方)流量的核算,进一步解析省际虚拟耕地净流动格局,揭示资源责任的空间转移本质.若仅以虚拟耕地总流出量或总流入量为基础核算耕地生态产品补偿额,将导致省域间补偿责任重叠:例如,某资源赤字省份虽依赖大量进口,却因微量出口而被判为流出方并获补偿,导致不必要的资金频繁转手.为此,需构建虚拟耕地净流动矩阵,通过总流入与总流出差额明确各省份在全国虚拟耕地流动中的净流动属性.进一步,基于省际双边净流动数据,确定各省域作为虚拟耕地资源净流入方或净流出方的真实角色,为差异化补偿机制提供科学依据.

具体而言,通过式(7)−式(9),构建粮食贸易隐含虚拟耕地净流动矩阵,精准刻画虚拟耕地省际净转移路径(如图 3 及表 5 所示).实证结果显示,(1)全国范围内形成 14 个虚拟耕地净流出区和 17 个净流入区的非对称格局,其中黑龙江(6238.44khm^2)、吉林(28

28.53khm^2)和内蒙古(2113.32khm^2)分别贡献全国净流出总量的 22.45%、10.18%和 7.60%,三省区累计占比达 40.23%.这主要归因于东北及华北粮食主产区耕地资源禀赋优势与人口经济规模的空间错配,形成“北粮南运”的空间格局;(2)虚拟耕地净流入前三位为广东(4292.32khm^2)、浙江(3741.81khm^2)和北京(2049.01khm^2),占全国虚拟耕地净流入的 15.45%、13.46%、7.37%,三省区累计占比达 36.28%,凸显东南沿海及经济发达地区耕地资源赤字与粮食安全保障的深层矛盾;(3)值得关注的是河南的特殊情形:作为全国粮食生产核心省份,其虚拟耕地供给与使用规模虽居首位,但净流出量仅列第五位,且呈现从邻近省份内蒙古、陕西净流入的现象.这反映出粮食生产大省与消费大省双重身份的内在矛盾——人口增长驱动的消费结构升级与食品加工产业的集聚效应,共同强化了本地耕地资源的供需失衡.

总体而言,虚拟耕地净流动呈现“梯度转移”与“邻近效应”双重特征,空间上形成由北向南、由西向东的转移主轴.这种流动模式本质上是中国区域经济非均衡发展的空间映射:东部地区通过虚拟耕地输入缓解经济发展与资源保护的矛盾,而中西部地区则通过资源输出实现经济价值的空间置换.值得注意的是,这种流动隐含着耕地生态产品的转移,接收地区在获取粮食安全保障的同时,并未对附着于粮食上的生态产品“买单”,客观上造成区域生态责任的失衡.因此,基于虚拟耕地净流动核算耕地生态产品价值净流动,进而核算合理的耕地生态补偿标准,对于区域耕地生态系统的保护具有重要意义.

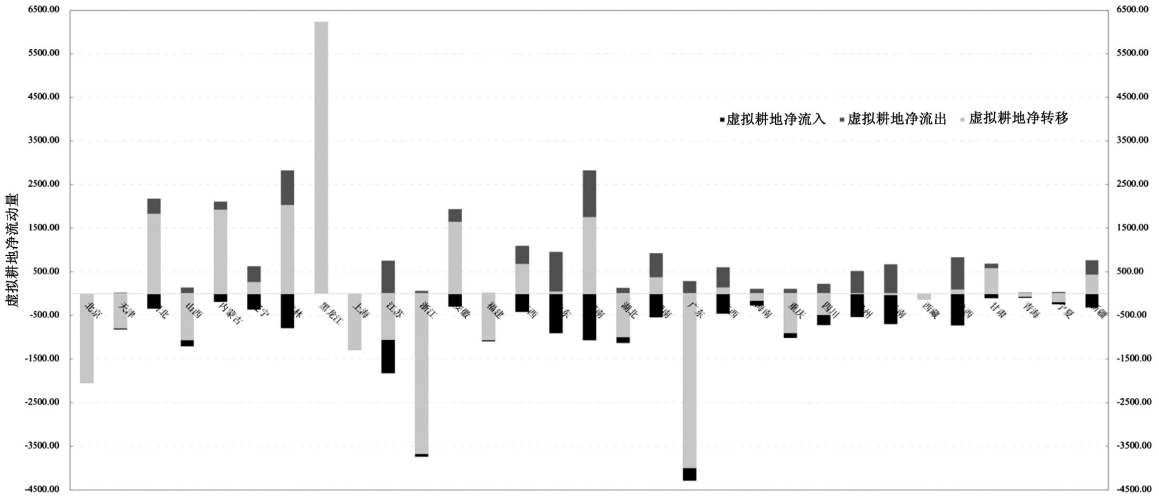


图 3　2017 年中国省际粮食贸易隐含虚拟耕地净流动量(khm^2)

Fig.3　Net virtual cropland flows embodied in China's interprovincial grain trade (2017) (khm^2)

2.3　耕地生态产品价值净流动路径

根据省际虚拟耕地净流动矩阵确定耕地生态产品价值净流动矩阵,虚拟耕地的净流出即为耕地生态产品的外溢,反之即为耕地生态产品的获得.这一定位有效可视化了耕地生态系统的外部性,实现了量化分析.各省域间耕地生态产品的转移量,不仅受制于虚拟耕地贸易规模的变动,也与各自区域生态价值基底密切相关.因此,根据式(9)~(12)的核算结果,表 3 列示了前 10 大耕地生态产品净流动路径,在各省“一对一”的耕地生态产品价值净转移分析中,黑龙江-吉林的转移价值以 100.37 亿元高居榜首.紧随其后的是内蒙古-山西(82.67 亿元)、黑龙江-浙江(69.48 亿元)等路径,均显示出较大的生态产品价值转移.

在深入分析中国各省虚拟耕地生态产品价值净转移过程中,我们观察到几个显著的特征.首先,黑龙江是唯一对所有省份净流出耕地生态产品的省份,这一现象凸显了黑龙江在生态产品价值创造和交换中的显著优势.其次,北京市表现出独特的“零净流出”特征,这与其首都功能定位下第三产业主导的产业结构形成耦合.长三角、珠三角城市群形成显著的价值虹吸效应,上海、浙江、福建、广东四省域构成净输入核心节点,经济发达地区对其他省域耕地生态产品价值的占用可见一斑.再者,浙江的耕地

生态产品价值流入主要集中于上海和福建,形成了一种区域性的价值流动网络,这种特定的流动模式可能与这些省份之间的地理邻近性、经济联系以及生态互补性有关.此外,吉林、内蒙古、新疆的耕地生态产品价值流动显示出广泛的净流出特点,该格局既体现了东北平原、河套灌区等商品粮基地的规模优势,也反映了这些区域通过生态产品输出参与全国耕地资源再平衡的战略价值.上述空间分异格局本质上是区域资源禀赋差异、经济发展阶段梯度与制度政策导向共同作用的结果.这种“空间套利”行为在强化区域经济联系的同时,也加剧了供给区生态产品的资源耗竭风险,凸显了构建跨区域生态补偿机制的紧迫性.

表 3 前 10 大耕地生态产品价值净流动路径(亿元)

Table 3 Top 10transfer paths of cropland ecological product value ($\times10^8$Yuan)

排名	净流出省份	净流入省份	净流动额
1	黑龙江	吉林	100.37
2	内蒙古	山西	82.67
3	黑龙江	浙江	69.48
4	河南	广东	64.40
5	河南	浙江	60.81
6	黑龙江	广东	58.17
7	广西	广东	57.39
8	黑龙江	江苏	51.45
9	河北	山东	46.74
10	河北	北京	43.17

2.4 差异化耕地生态产品补偿核算结果分析

2.4.1 耕地生态补偿整体测度 根据耕地生态产品价值净流动结果确定生态补偿支付区域和受偿区域,通过式(12)~(16)系统识别生态补偿主客体身份(表 4).本研究最终生成的耕地生态产品补偿矩阵,在引入各省生态产品价值、社会发展阶段系数及支付能力指数后,不再保持原始净流量矩阵的反对称性,该矩阵旨在量化“受益者付费”原则下的支付责任.在确定最终补偿额度时选取补偿矩阵中的正值作为有效依据,该值体现了元素所在纵向省份因生态受益而应向横向省份支付的补偿.矩阵中的负值仅表示省际流动方向的相反,其对应的补偿责任已通过矩阵结构转换至对应省份的横向正值表达,从而确保补偿关系的清晰与可操作.实证研究表明,浙江、广东、北京、上海等经济发达省份呈现显著负向补偿值,构成核心补偿主体,其高强度粮食输入实质形成对粮食主产区生态系统的空间占用,因而需履行主要补偿责任;反观黑龙江、吉林、河北、河南等粮食主产省域,则呈现显著正向补偿值,作为关键受偿客体,其通过粮食输出承担了维系国家粮食安全与生态系统服务的双重功能,长期承受耕地生态产品的隐性价值流失.这种“北粮南运”格局下形成的生态补偿空间分异特征,凸显了构建基于生态产品价值转移的省际补偿机制的必要性.

表 4 2017 年粮食贸易引起的耕地生态补偿各省总额(亿元)

Table 4 Provincial cropland eco-compensation totals via grain trade (2017) ($\times10^8$Yuan)

省份	支付总计	受偿总计	生态补偿额	补偿行为	主客体身份
北京	301.74	0.00	−301.74	支付补偿	补偿主体
天津	113.93	3.04	−110.89	支付补偿	补偿主体
河北	18.46	217.36	198.90	获得补偿	补偿客体
山西	50.48	11.31	−39.17	支付补偿	补偿主体
内蒙古	14.63	117.39	102.76	获得补偿	补偿客体
辽宁	23.20	64.20	41.00	获得补偿	补偿客体
吉林	52.85	266.76	213.91	获得补偿	补偿客体
黑龙江	0.00	528.67	528.67	获得补偿	补偿客体
上海	196.12	0.18	−195.94	支付补偿	补偿主体
江苏	231.43	103.82	−127.61	支付补偿	补偿主体
浙江	418.32	11.35	−406.97	支付补偿	补偿主体
安徽	16.90	178.68	161.78	获得补偿	补偿客体
福建	115.91	2.82	−113.09	支付补偿	补偿主体
江西	23.26	125.34	102.08	获得补偿	补偿客体
山东	76.36	96.18	19.82	获得补偿	补偿客体
河南	50.61	248.52	197.91	获得补偿	补偿客体
湖北	85.32	17.69	−67.64	支付补偿	补偿主体
湖南	32.22	109.13	76.91	获得补偿	补偿客体
广东	423.45	42.84	−380.60	支付补偿	补偿主体
广西	21.22	70.99	49.77	获得补偿	补偿客体
海南	16.53	11.44	−5.09	支付补偿	补偿主体
重庆	77.20	11.39	−65.80	支付补偿	补偿主体
四川	39.85	28.63	−11.22	支付补偿	补偿主体
贵州	24.02	50.88	26.87	获得补偿	补偿客体
云南	28.79	61.73	32.93	获得补偿	补偿客体
西藏	6.64	0.03	−6.61	支付补偿	补偿主体
陕西	43.77	47.99	4.23	获得补偿	补偿客体
甘肃	3.62	41.49	37.87	获得补偿	补偿客体
青海	5.05	1.65	−3.40	支付补偿	补偿主体
宁夏	14.47	5.11	−9.36	支付补偿	补偿主体
新疆	17.57	67.31	49.73	获得补偿	补偿客体

需明确的是,本研究探讨的生态产品补偿机制,在概念与目标上区别于宏观层面的财政转移支付体系.二者核心差异在于:生态补偿旨在解决生态

产品的隐性流动与价值转移问题,而转移支付主要解决区域间财政能力的显性差距.研究核心聚焦于揭示粮食贸易中虚拟耕地流动所隐含的生态产品价值,并致力于该价值的量化与补偿机制设计.它不直接涉及传统的、以资金统筹分配为核心的转移支付制度,而是聚焦于构建一套基于生态价值转移的精准补偿机制,从而在现有财政框架内强化对耕地生态产品价值的完善与细化,推动其更好地融入区域协调政策体系,最终提升生态产品供给区的可持续发展能力.

表 5　2017 年中国省际粮食贸易隐含虚拟耕地净流动路径(khm^2)

Table 5　Net virtual cropland flow paths embodied in provincial-level grain trade across China (2017) (khm^2)

省份	耕地流入地区																												
	北京	天津	河北	山西	内蒙古	辽宁	吉林	黑龙江	上海	江苏	浙江	安徽	福建	江西	山东	河南	湖北	湖南	广东	广西	海南	重庆	四川	贵州	云南	西藏	陕西	甘肃	青海	宁夏	新疆
北京	0.00	−7.97	−387.20	−13.79	−68.68	−66.96	−197.72	−316.35	−0.78	−87.36	−12.64	−114.64	−5.08	−57.62	−98.97	−211.69	−20.35	−52.63	−25.56	−29.80	−4.57	−10.83	−34.16	−29.65	−46.67	−0.12	−54.09	−23.50	−2.67	−7.18	−59.77
天津	7.97	0.00	−323.23	−2.50	−20.15	−19.74	−68.65	−107.11	3.08	−17.02	9.25	−43.07	1.06	−12.70	−32.39	−64.41	−2.45	−14.44	5.31	−8.74	−1.26	0.67	−4.47	−10.28	−18.31	0.15	−17.67	−4.94	−1.70	−1.32	−32.68
河北	387.20	323.23	0.00	20.94	−38.69	19.38	−79.91	−185.33	79.73	182.37	224.83	−17.09	27.63	23.99	419.18	8.49	30.51	17.28	203.90	14.29	10.26	68.08	31.12	11.28	28.56	5.70	22.26	−0.62	3.14	15.50	−21.68
山西	13.79	2.50	−20.94	0.00	−853.59	−12.33	−60.92	−87.90	15.41	19.38	49.67	−34.74	2.08	−6.29	−13.87	−92.66	2.42	−6.42	28.41	−0.58	2.69	5.34	−5.96	−1.07	−2.00	1.03	−6.64	−5.63	0.44	0.93	−3.65
内蒙古	68.68	20.15	38.69	853.59	0.00	17.48	−46.16	−111.57	49.50	95.06	167.77	−25.19	27.36	18.66	12.87	311.19	30.30	33.94	164.42	23.19	11.96	59.14	25.30	22.51	17.44	5.40	22.18	3.21	3.59	9.73	−3.91
辽宁	66.96	19.74	−19.38	12.33	−17.48	0.00	8.55	−257.53	50.00	33.53	97.76	−39.74	26.77	−5.37	3.58	−22.04	32.72	16.36	124.84	17.96	10.08	37.42	19.23	17.87	8.42	3.66	8.44	0.08	4.04	10.21	−4.33
吉林	197.72	68.65	79.91	60.92	46.16	−8.55	0.00	−788.14	103.97	197.82	297.35	56.04	101.20	51.06	182.66	150.32	133.95	72.01	307.97	66.95	24.61	89.42	93.90	53.47	120.36	9.64	91.20	28.63	12.16	34.13	96.34
黑龙江	316.35	107.11	185.33	87.90	111.57	257.53	788.14	0.00	246.67	403.99	545.58	121.92	191.83	146.25	214.77	223.02	222.41	205.88	456.77	169.45	69.47	234.28	213.12	158.96	145.87	18.29	151.80	55.55	22.06	53.97	112.61
上海	0.78	−3.08	−79.73	−15.41	−49.50	−50.00	−103.97	−246.67	0.00	−88.29	−32.18	−87.14	−3.63	−33.81	−80.03	−155.41	−16.59	−25.64	−14.47	−20.39	−3.11	−6.18	−26.55	−19.79	−32.06	−0.09	−38.56	−16.29	−0.86	−4.43	−45.99
江苏	87.36	17.02	−182.37	−19.38	−95.06	−33.53	−197.82	−403.99	88.29	0.00	230.78	−159.36	85.12	−213.59	−66.82	−179.11	29.64	−137.59	158.90	−5.48	5.26	18.39	6.17	−2.38	19.74	4.56	−19.41	−95.69	0.12	7.76	−15.58
浙江	12.64	−9.25	−224.83	−49.67	−167.77	−97.76	−297.35	−545.58	32.18	−230.78	0.00	−261.81	17.66	−187.68	−204.32	−522.88	−41.98	−149.90	−250.14	−55.66	−5.79	−19.92	−58.17	−47.85	−62.29	0.34	−102.17	−74.48	−3.71	−13.86	−56.18
安徽	114.64	43.07	17.09	34.74	25.19	39.74	−56.04	−121.92	87.14	159.36	261.81	0.00	94.74	−118.84	64.93	43.86	150.48	46.86	254.30	46.37	13.48	64.94	58.01	39.83	92.05	11.68	83.03	11.67	20.85	21.06	40.94
福建	5.08	−1.06	−27.63	−2.08	−27.36	−26.77	−101.20	−191.83	3.63	−85.12	−17.66	−94.74	0.00	−131.46	−29.71	−77.65	−7.16	−92.05	8.60	−17.30	−2.23	−0.74	−15.78	−18.97	−33.24	0.30	−25.97	−6.28	−3.19	−2.30	−55.15
江西	57.62	12.70	−23.99	6.29	−18.66	5.37	−51.06	−146.25	33.81	213.59	187.68	118.84	131.46	0.00	−12.12	−49.98	72.45	−104.40	140.42	6.52	6.33	37.68	19.35	5.35	23.43	4.55	8.86	−0.84	2.23	5.88	−16.94
山东	98.97	32.39	−419.18	13.87	−12.87	−3.58	−182.66	−214.77	80.03	66.82	204.32	−64.93	29.71	12.12	0.00	20.05	31.09	28.63	173.69	5.61	8.44	48.60	10.74	16.32	25.85	5.88	29.04	−2.60	2.67	13.14	−10.58
河南	211.69	64.41	−8.49	92.66	−311.19	22.04	−150.32	−223.02	155.41	179.11	522.88	−43.86	77.65	49.98	−20.05	0.00	88.82	43.26	553.75	51.63	40.91	169.95	64.99	93.58	196.21	26.69	−305.59	−7.84	11.56	36.91	71.26
湖北	20.35	2.45	−30.51	−2.42	−30.30	−32.72	−133.95	−222.41	16.59	−29.64	41.98	−150.48	7.16	−72.45	−31.09	−88.82	0.00	−176.76	37.12	−13.42	2.44	4.18	−6.06	−11.90	−22.12	1.24	−23.16	−9.46	−2.00	−0.43	−48.57
湖南	52.63	14.44	−17.28	6.42	−33.94	−16.36	−72.01	−205.88	25.64	137.59	149.90	−46.86	92.05	104.40	−28.63	−43.26	176.76	0.00	142.36	−3.77	4.05	−3.32	7.72	−3.05	−3.14	3.72	−2.56	−6.35	−2.14	6.44	−58.32
广东	25.56	−5.31	−203.90	−28.41	−164.42	−124.84	−307.97	−456.77	14.47	−158.90	250.14	−254.30	−8.60	−140.42	−173.69	−553.75	−37.12	−142.36	0.00	−398.87	−94.60	−16.48	−68.82	−359.45	−335.10	1.34	−135.80	−59.19	−1.78	−11.60	−49.87
广西	29.80	8.74	−14.29	0.58	−23.19	−17.96	−66.95	−169.45	20.39	5.48	55.66	−46.37	17.30	−6.52	−5.61	−51.63	13.42	3.77	398.87	0.00	7.86	23.58	12.08	2.55	−6.35	3.04	−10.85	−4.00	1.71	2.91	−39.55
海南	4.57	1.26	−10.26	−2.69	−11.96	−10.08	−24.61	−69.47	3.11	−5.26	5.79	−13.48	2.23	−6.33	−8.44	−40.91	−2.44	−4.05	94.60	−7.86	0.00	2.26	−4.79	−6.22	−13.61	0.35	−11.09	−3.90	0.10	−0.12	−20.75
重庆	10.83	−0.67	−68.08	−5.34	−59.14	−37.42	−89.42	−234.28	6.18	−18.39	19.92	−64.94	0.74	−37.68	−48.60	−169.95	−4.18	3.32	16.48	−23.58	−2.26	0.00	38.73	15.50	−40.39	0.65	−21.45	−21.89	−2.53	−4.37	−67.56
四川	34.16	4.47	−31.12	5.96	−25.30	−19.23	−93.90	−213.12	26.55	−6.17	58.17	−58.01	15.78	−19.35	−10.74	−64.99	6.06	−7.72	68.82	−12.08	4.79	−38.73	0.00	−12.71	−25.53	2.94	−17.53	−9.52	−4.12	0.75	−54.40
贵州	29.65	10.28	−11.28	1.07	−22.51	−17.87	−53.47	−158.96	19.79	2.38	47.85	−39.83	18.97	−5.35	−16.32	−93.58	11.90	3.05	359.45	−2.55	6.22	−15.50	12.71	0.00	−21.31	2.27	−18.95	−5.19	−1.14	0.88	−51.41
云南	46.67	18.31	−28.56	2.00	−17.44	−8.42	−120.36	−145.87	32.06	−19.74	62.29	−92.05	33.24	−23.43	−25.85	−196.21	22.12	3.14	335.10	6.35	13.61	40.39	25.53	21.31	0.00	3.94	−11.00	−11.70	1.83	1.70	−3.99
西藏	0.12	−0.15	−5.70	−1.03	−5.40	−3.66	−9.64	−18.29	0.09	−4.56	−0.34	−11.68	−0.30	−4.55	−5.88	−26.69	−1.24	−3.72	−1.34	−3.04	−0.35	−0.65	−2.94	−2.27	−3.94	0.00	−5.02	−2.19	−0.09	−0.54	−7.35
陕西	54.09	17.67	−22.26	6.64	−22.18	−8.44	−91.20	−151.80	38.56	19.41	102.17	−83.03	25.97	−8.86	−29.04	305.59	23.16	2.56	135.80	10.85	11.09	21.45	17.53	18.95	11.00	5.02	0.00	−307.00	−0.36	5.81	−11.37
甘肃	23.50	4.94	0.62	5.63	−3.21	−0.08	−28.63	−55.55	16.29	95.69	74.48	−11.67	6.28	0.84	2.60	7.84	9.46	6.35	59.19	4.00	3.90	21.89	9.52	5.19	11.70	2.19	307.00	0.00	4.12	4.99	−3.75
青海	2.67	1.70	−3.14	−0.44	−3.59	−4.04	−12.16	−22.06	0.86	−0.12	3.71	−20.85	3.19	−2.23	−2.67	−11.56	2.00	2.14	1.78	−1.71	−0.10	2.53	4.12	1.14	−1.83	0.09	0.36	−4.12	0.00	−0.16	−6.29
宁夏	7.18	1.32	−15.50	−0.93	−9.73	−10.21	−34.13	−53.97	4.43	−7.76	13.86	−21.06	2.30	−5.88	−13.14	−36.91	0.43	−6.44	11.60	−2.91	0.12	4.37	−0.75	−0.88	−1.70	0.54	−5.81	−4.99	0.16	0.00	−11.74
新疆	59.77	32.68	21.68	3.65	3.91	4.33	−96.34	−112.61	45.99	15.58	56.18	−40.94	55.15	16.94	10.58	−71.26	48.57	58.32	49.87	39.55	20.75	67.56	54.40	51.41	3.99	7.35	11.37	3.75	6.29	11.74	0.00

耕地流出地区

2.4.2　耕地生态补偿具体核算　表 5 列示了省际耕地生态产品保护补偿路径,利用式(12)~(16)对省域间耕地资源生态补偿进行具体分析,明晰各省域“一对一”补偿路径(表 6).结果显示,省际耕地生态补偿呈现显著网络化特征,北京仅为支付主体,黑龙江仅为受偿客体,其余所有行政单元均兼具支付主体与受偿客体双重属性.北京、天津、上海、江苏等发达地区在耕地补偿系数的修正下,需支付比原耕地生态产品价值更多的补偿金额.其他省份在社会发展阶段系数和地方政府支付能力指数的调整下,支付数值均有所下降,这更符合现实可操作性.耕地生态补偿数额高值路径有浙江-黑龙江(61.30 亿元)、浙江-河南(53.64 亿元)、江苏-黑龙江(52.61 亿元)等,揭示了中国耕地生态产品价值保护的补偿呈现从南向北、从东向西的流动格局.由于区域资源禀赋差异,耕地丰富地区承

担更多粮食安全与生态责任,其发展权受到限制,若缺乏实质补偿将影响保护积极性.公众生态认知提升也推高了补偿期望,因此,基于生态产品价值、结合发展阶段与支付能力制定差异化补偿标准,对建立有效补偿机制、促进生态与区域协调发展至关重要.

表 6 2017 年粮食贸易引起的各省虚拟耕地“一对一”生态补偿额(亿元)

Table 6 Provincial bilateral virtual cropland eco-compensation via grain trade (2017) ($\times 10^8$Yuan)

省份		支付补偿地区																												
		北京	天津	河北	山西	内蒙古	辽宁	吉林	黑龙江	上海	江苏	浙江	安徽	福建	江西	山东	河南	湖北	湖南	广东	广西	海南	重庆	四川	贵州	云南	西藏	陕西	甘肃	青海	宁夏	新疆
获得补偿地区	北京	0.00	−0.97	−17.51	−0.58	−4.40	−3.60	−10.86	−13.29	−0.10	−9.42	−1.18	−5.11	−0.43	−2.56	−7.24	−9.90	−1.24	−2.64	−2.14	−1.17	−0.23	−0.71	−1.58	−1.14	−1.63	−0.01	−3.11	−0.68	−0.12	−0.36	−2.72
	天津	1.07	0.00	−15.66	−0.11	−1.38	−1.14	−4.04	−4.82	0.42	−1.97	0.92	−2.06	0.10	−0.61	−2.54	−3.23	−0.16	−0.78	0.48	−0.37	−0.07	0.05	−0.22	−0.43	−0.68	0.01	−1.09	−0.15	−0.08	−0.07	−1.59
	河北	51.44	41.44	0.00	0.93	−2.62	1.10	−4.64	−8.23	10.65	20.79	22.12	−0.81	2.50	1.13	32.42	0.42	1.97	0.92	18.06	0.59	0.55	4.71	1.53	0.46	1.05	0.26	1.35	−0.02	0.15	0.83	−1.04
	山西	1.40	0.25	−0.76	0.00	−44.17	−0.54	−2.70	−2.98	1.57	1.69	3.73	−1.25	0.14	−0.23	−0.82	−3.50	0.12	−0.26	1.92	−0.02	0.11	0.28	−0.22	−0.03	−0.06	0.04	−0.31	−0.13	0.02	0.04	−0.13
	内蒙古	7.93	2.24	1.61	32.75	0.00	0.86	−2.33	−4.30	5.74	9.41	14.33	−1.03	2.15	0.76	0.86	13.37	1.70	1.56	12.65	0.83	0.56	3.55	1.08	0.80	0.56	0.21	1.17	0.09	0.15	0.45	−0.16
	辽宁	10.09	2.87	−1.05	0.62	−1.34	0.00	0.56	−12.97	7.57	4.34	10.91	−2.13	2.74	−0.29	0.31	−1.24	2.40	0.99	12.54	0.84	0.62	2.94	1.07	0.83	0.35	0.19	0.58	0.00	0.22	0.62	−0.24
	吉林	31.67	10.61	4.61	3.24	3.77	−0.59	0.00	−42.20	16.74	27.19	35.26	3.19	11.03	2.90	17.03	8.96	10.43	4.61	32.88	3.34	1.60	7.46	5.55	2.63	5.35	0.53	6.68	1.06	0.69	2.19	5.59
	黑龙江	48.00	15.69	10.12	4.43	8.63	16.71	52.29	0.00	37.62	52.61	61.30	6.57	19.80	7.86	18.97	12.60	16.41	12.48	46.21	8.01	4.29	18.51	11.93	7.41	6.14	0.95	10.54	1.94	1.19	3.29	6.19
	上海	0.18	−0.68	−6.52	−1.16	−5.74	−4.86	−10.33	−18.75	0.00	−17.22	−5.42	−7.03	−0.56	−2.72	−10.59	−13.15	−1.83	−2.33	−2.19	−1.44	−0.29	−0.73	−2.23	−1.38	−2.02	−0.01	−4.01	−0.85	−0.07	−0.40	−3.79
	江苏	16.03	3.01	−12.04	−1.18	−8.89	−2.63	−15.87	−24.78	16.28	0.00	31.35	−10.38	10.63	−13.88	−7.14	−12.23	2.64	−10.08	19.44	−0.31	0.39	1.76	0.42	−0.13	1.01	0.28	−1.63	−4.04	0.01	0.57	−1.03
	浙江	2.51	−1.77	−16.08	−3.28	−17.00	−8.31	−25.84	−36.26	6.43	−39.37	0.00	−18.47	2.39	−13.22	−23.64	−38.69	−4.06	−11.90	−33.15	−3.45	−0.47	−2.06	−4.26	−2.92	−3.44	0.02	−9.29	−3.41	−0.26	−1.11	−4.04
	安徽	17.21	6.24	0.92	1.73	1.93	2.55	−3.68	−6.12	13.15	20.53	29.10	0.00	9.68	−6.32	5.67	2.45	10.99	2.81	25.45	2.17	0.82	5.08	3.21	1.84	3.84	0.60	5.70	0.40	1.11	1.27	2.23
	福建	0.98	−0.20	−1.92	−0.13	−2.70	−2.21	−8.55	−12.39	0.71	−14.12	−2.53	−6.50	0.00	−9.00	−3.34	−5.58	−0.67	−7.10	1.11	−1.04	−0.18	−0.07	−1.12	−1.13	−1.78	0.02	−2.30	−0.28	−0.22	−0.18	−3.86
	江西	9.77	2.08	−1.46	0.35	−1.61	0.39	−3.78	−8.29	5.76	31.08	23.56	7.15	15.16	0.00	−1.20	−3.15	5.97	−7.07	15.87	0.34	0.44	3.33	1.21	0.28	1.10	0.26	0.69	−0.03	0.13	0.40	−1.04
	山东	14.29	4.51	−21.77	0.67	−0.95	−0.22	−11.53	−10.36	11.61	8.28	21.84	−3.33	2.92	0.62	0.00	1.08	2.18	1.65	16.71	0.25	0.50	3.65	0.57	0.72	1.04	0.29	1.92	−0.09	0.14	0.76	−0.55
	河南	29.33	8.61	−0.42	4.27	−21.98	1.31	−9.11	−10.33	21.65	21.30	53.64	−2.16	7.32	2.45	−1.62	0.00	5.98	2.39	51.16	2.23	2.30	12.26	3.32	3.98	7.55	1.26	−19.38	−0.25	0.57	2.05	3.58
	湖北	3.47	0.40	−1.87	−0.14	−2.64	−2.39	−9.99	−12.68	2.84	−4.34	5.30	−9.11	0.83	−4.38	−3.09	−5.64	0.00	−12.04	4.22	−0.71	0.17	0.37	−0.38	−0.62	−1.05	0.07	−1.81	−0.37	−0.12	−0.03	−3.00
	湖南	9.38	2.48	−1.11	0.38	−3.08	−1.25	−5.61	−12.27	4.59	21.04	19.78	−2.96	11.16	6.59	−2.97	−2.87	15.32	0.00	16.92	−0.21	0.29	−0.31	0.51	−0.17	−0.16	0.23	−0.21	−0.26	−0.14	0.46	−3.76
	广东	4.85	−0.97	−13.92	−1.79	−15.91	−10.13	−25.55	−28.98	2.76	−25.88	35.15	−17.13	−1.11	−9.44	−19.19	−39.11	−3.43	−10.79	0.00	−23.58	−7.30	−1.63	−4.82	−20.96	−17.65	0.09	−11.79	−2.58	−0.12	−0.88	−3.43
	广西	5.11	1.45	−0.88	0.03	−2.03	−1.32	−5.02	−9.71	3.51	0.81	7.07	−2.82	2.02	−0.40	−0.56	−3.29	1.12	0.26	45.59	0.00	0.55	2.11	0.76	0.13	−0.30	0.18	−0.85	−0.16	0.10	0.20	−2.46
	海南	0.66	0.18	−0.53	−0.13	−0.88	−0.62	−1.56	−3.36	0.45	−0.65	0.62	−0.69	0.22	−0.32	−0.71	−2.20	−0.17	−0.23	9.12	−0.35	0.00	0.17	−0.26	−0.28	−0.55	0.02	−0.73	−0.13	0.00	−0.01	−1.09
	重庆	1.93	−0.12	−4.37	−0.32	−5.38	−2.85	−6.97	−13.97	1.11	−2.82	2.63	−4.11	0.09	−2.38	−5.05	−11.28	−0.36	0.24	1.96	−1.31	−0.16	0.00	2.55	0.85	−2.00	0.04	−1.75	−0.90	−0.16	−0.31	−4.36
	四川	5.65	0.71	−1.85	0.33	−2.13	−1.36	−6.79	−11.79	4.42	−0.88	7.13	−3.41	1.78	−1.13	−1.03	−4.00	0.49	−0.51	7.59	−0.62	0.32	−3.34	0.00	−0.65	−1.17	0.17	−1.33	−0.36	−0.24	0.05	−3.26
	贵州	4.13	1.38	−0.57	0.05	−1.60	−1.06	−3.26	−7.40	2.77	0.29	4.94	−1.97	1.80	−0.26	−1.32	−4.85	0.81	0.17	33.39	−0.11	0.35	−1.12	0.65	0.00	−0.82	0.11	−1.21	−0.17	−0.06	0.05	−2.59
	云南	6.42	2.43	−1.41	0.09	−1.22	−0.50	−7.24	−6.71	4.43	−2.33	6.35	−4.50	3.11	−1.14	−2.07	−10.05	1.48	0.17	30.74	0.27	0.76	2.89	1.30	0.90	0.00	0.18	−0.69	−0.37	0.09	0.09	−0.20
	西藏	0.02	−0.02	−0.29	−0.05	−0.39	−0.22	−0.59	−0.86	0.01	−0.55	−0.04	−0.58	−0.03	−0.23	−0.48	−1.40	−0.09	−0.21	−0.13	−0.13	−0.02	−0.05	−0.15	−0.10	−0.15	0.00	−0.32	−0.07	0.00	−0.03	−0.38
	陕西	5.44	1.72	−0.81	0.22	−1.14	−0.36	−4.01	−5.11	3.90	1.68	7.61	−2.96	1.78	−0.32	−1.70	11.44	1.13	0.10	9.11	0.34	0.45	1.12	0.65	0.59	0.31	0.17	0.00	−7.11	−0.01	0.23	−0.41
	甘肃	2.40	0.49	0.02	0.19	−0.17	0.00	−1.28	−1.89	1.67	8.37	5.62	−0.42	0.44	0.03	0.15	0.30	0.47	0.26	4.02	0.13	0.16	1.16	0.36	0.16	0.33	0.08	14.32	0.00	0.15	0.20	−0.14
	青海	0.27	0.16	−0.11	−0.01	−0.18	−0.17	−0.53	−0.74	0.09	−0.01	0.28	−0.74	0.22	−0.08	−0.16	−0.43	0.10	0.09	0.12	−0.05	0.00	0.13	0.15	0.03	−0.05	0.00	0.02	−0.09	0.00	−0.01	−0.23
	宁夏	1.04	0.18	−0.81	−0.04	−0.72	−0.63	−2.16	−2.62	0.65	−0.96	1.49	−1.08	0.23	−0.30	−1.11	−1.99	0.03	−0.37	1.12	−0.13	0.01	0.33	−0.04	−0.04	−0.07	0.03	−0.39	−0.17	0.01	0.00	−0.62
	新疆	9.07	4.79	1.18	0.18	0.30	0.28	−6.39	−5.71	7.01	2.03	6.31	−2.20	5.69	0.91	0.93	−4.02	3.58	3.53	5.04	1.87	1.28	5.34	3.04	2.40	0.17	0.38	0.79	0.13	0.34	0.71	0.00

3 结论与建议

3.1 结论

3.1.1 中国虚拟耕地供给、使用存在空间分异,河南、黑龙江、山东等粮食主产区是供给核心,河南、山东、江苏等人口集聚与经济发达区使用量大.多数省份“属地优先”利用耕地,发达区域外源依赖显著;

3.1.2 第二,全国形成 14 个虚拟耕地净流出区与 17 个净流入区的非对称格局,黑龙江、吉林、内蒙古等粮食主产区成为虚拟耕地的主要净流出源,广东、浙江、北京等经济发达地区为核心净流入地;

3.1.3 第三,基于虚拟耕地净流动确定耕地生态产品价值净流动矩阵,黑龙江“零净流入”,北京“零净流出”,长三角、珠三角城市群虹吸明显;

3.1.4 第四,构建各省域“一对一”耕地生态产品补偿修正矩阵,揭示浙江-黑龙江、浙江-河南、江苏-黑龙江等从南向北、从东向西的高值补偿路径.

3.2 建议

3.2.1 实施靶向耕地生态保护补偿 第一,采取灵活多样的补偿方式,确保补偿措施更具针对性和可行性.打破压力型体制下的刚性管控,鼓励补偿主体与客体根据各自优势选择最合适的补偿路径,注重

非货币型补偿方式的应用,如股权合作、技术支持等,以增强被补偿地区的自我发展能力;第二,加强耕地生态补偿与城乡融合、绿色农业发展的有机结合,推动形成差异化、阶梯化的补偿机制,以更好地适应不同地区的发展需求和生态环境特点.

3.2.2　创新跨域生态补偿协商制度　第一,在中央层面设立耕地生态补偿协调委员会,基于虚拟耕地流动路径建立跨省域生态契约制度,将补偿额度与区域粮食安全贡献度挂钩;第二,推行“纵向转移支付+横向市场交易”复合模式,允许东部发达地区通过购买中西部耕地生态信用履行补偿责任;第三,建立补偿标准动态协商机制,依据社会发展阶段系数和地方政府支付能力指数变化每年调整补偿系数,实现生态责任与经济发展动态适配.

3.2.3　构建“数字孪生-智能合约”补偿执行系统　第一,搭建虚拟耕地数字孪生平台:基于 EE-MRIO 模型实时映射各省虚拟耕地流动状态,当监测到某省虚拟耕地进口量超过基准值时,自动生成补偿预警(红色预警触发额外 5%补偿附加费);第二,搭建区块链智能合约链:在虚拟耕地贸易量大的省域间部署联盟链,开发智能合约模板,设定相关条款,如黑龙江净流入浙江虚拟耕地超 500khm^2 时,支付额外生态费,合约履行数据实时上链,违约方自动列入生态信用黑名单.

参考文献:

[1] Meier T, Christen O, Semler E, et al. Balancing virtual land imports by a shift in the diet. Using a land balance approach to assess the sustainability of food consumption. Ger. *Ex* [J]. Appetite, 2014,74:20-34.

[2] Yawson D O. Estimating virtual land use under future conditions: Application of a food balance approach using the UK [J]. Land Use Policy, 2021,101:105132.

[3] Allan J A. Fortunately there are substitutes for water otherwise our hydro-political futures would be impossible [J]. Priorities for Water Resources Allocation and Management, 1993,13(4):26.

[4] 罗贞礼,龙爱华,黄　璜,等.虚拟土战略与土地资源可持续利用的社会化管理 [J]. 冰川冻土, 2004,(5):624-631.
Luo Z L, Long A H, Huang H, et al. Virtual land strategy and socialization of management of sustainable utilization of land resources [J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2004,(5):624-631.

[5] 强文丽,张翠玲,刘爱民,等.全球农产品贸易的虚拟耕地资源流动演变及影响因素 [J]. 资源科学, 2020,42(9):1704-1714.
Qiang W L, Zhang C L, Liu A M, et al. Evolution of global virtual land flow related to agricultural trade and driving factors [J]. Resources Science, 2020,42(9):1704-1714.

[6] 吴常艳,陈博文,黄贤金,等.耕地利用变化的近远程驱动机制研究——以长江经济带为例 [J]. 地理研究, 2023,42(11):3003-3019.
Wu C Y, Chen B W, Huang X J, et al. Analysis of the proximity and telecoupling mechanism of cultivated land use change: A case study of Yangtze River Economic Belt [J]. Geographical Research, 2023,42(11):3003-3019.

[7] 梁流涛,唐林昊,李士超,等.基于生态网络架构的虚拟耕地流动格局及其稳定性评价 [J]. 经济地理, 2020,40(1):140-149.
Liang L T, Tang L H, Li S C, et al. Virtual cultivated land flow pattern and its stability evaluation of based on ecological network architecture [J]. Economic Geography, 2020,40(1):140-149.

[8] Su D, Cao Y, Wang J Y, et al. Toward constructing an eco-account of cultivated land by quantifying the resources flow and eco-asset transfer in China [J]. Land Use Policy, 2023,132:106822.

[9] Wang Y W, Bai Y P, Hu Y C, et al. Tele-connecting local consumption to cultivated land use and hidden drivers in China [J]. Science of The Total Environment, 2024,912:169523.

[10] Bai Y P, Wang Y W, Xuan X, et al. Tele-connections, driving forces and scenario simulation of agricultural land, water use and carbon emissions in China's trade [J]. Resources, Conservation and Recycling, 2024,203:107433.

[11] 窦羽星,刘秀丽.居民食物消费变化引致的环境足迹测算 [J]. 中国环境科学, 2023,43(1):446-455.
Dou Y X, Liu X L. Measuring the environmental footprints caused by the changes of residents' food consumption [J]. China Environmental Science, 2023,43(1):446-455.

[12] 曹　冲,陈　俭,夏　咏.中国主要农产品贸易中隐含的虚拟耕地资源“尾效”研究 [J]. 中国人口·资源与环境, 2019,29(2):72-78.
Cao C, Chen J, Xia Y. Research on 'tail effect' of virtual cultivated land resources implicit in Chinese major agricultural products trade [J]. China Population, Resources and Environment, 2019,29(2):72-78.

[13] Shu J Y, Bai Y P, Chen Q, et al. Dynamic simulation of the water-land-food nexus for the sustainable agricultural development in the north China plain [J]. Science of The Total Environment, 2024,912:168771.

[14] 樊鹏飞,梁流涛,许明军,等.基于虚拟耕地流动视角的省际耕地生态补偿研究 [J]. 中国人口·资源与环境, 2018,28(1):91-101.
Fan P F, Liang L T, Xu M J, et al. Study on inter-provincial cultivated land ecological compensation from perspective of virtual cultivated land flow [J]. China Population, Resources and Environment, 2018,28(1):91-101.

[15] 梁流涛,祝孔超.区际农业生态补偿:区域划分与补偿标准核算——基于虚拟耕地流动视角的考察 [J]. 地理研究, 2019,38(8):1932-1948.
Liang L T, Zhu K C. Interregional agricultural eco-compensation based on virtual cultivated land flow: Regional division and compensation standard accounting [J]. Geographical Research, 2019,38(8):1932-1948.

[16] 梁流涛,高　攀,刘琳轲.区际农业生态补偿标准及“两横”财政跨区域转移机制——以虚拟耕地为载体 [J]. 生态学报, 2019,39(24):9281-9294.
Liang L T, Gao P, Liu L K. The “Two Horizon” inter-regional agro-ecological compensation standard and cross-regional financial transfer mechanism: A study based on virtual cultivated land [J]. Acta Ecologica Sinica, 2019,39(24):9281-9294.

[17] 谢高地,甄　霖,鲁春霞,等.一个基于专家知识的生态系统服务价值

化方法 [J]. 自然资源学报, 2008,(5):911-919.
Xie G D, Zhen L, Lu C X, et al. Expert knowledge base valuation method of ecosystem services in China [J]. Journal of Natural Resource, 2008,(5):911-919.

[18] 覃 洁,秦 成,周慧杰,等.基于生态承载力供需与生态服务价值的广西耕地生态补偿研究 [J]. 江西农业学报, 2016,28(3):77-81.
Tan J, Qin C, Zhou H J, et al. Research on ecological compensation of arable land in Guangxi based on supply and demand of ecological carrying capacity and ecological service value [J]. Acta Agriculturae Jiangxi, 2016,28(3):77-81.

[19] Geneletti D. An approach based on spatial multicriteria analysis to map the nature conservation value of agricultural land [J]. Journal of Environmental Management, 2007,83(2):228-235.

[20] Mann M L, Kaufmann R K, Bauer D M, et al. Ecosystem service value and agricultural conversion in the Amazon: Implications for policy intervention [J]. Environmental & Resource Economics, 2012,53(2):279-295.

[21] Bandara R, Tisdell C. The net benefit of saving the Asian elephant: A policy and covaluation study [J]. Ecological Economics, 2004,48(1):93-07.

[22] Loureixo M L, Lotade J. Interviewer effects on the valuation of goods with ethical and environmental attribute [J]. Environmental and Resource Economics, 2005,30(1):49-72.

[23] 高 攀,梁流涛,诸培新.耕地公共生态产品供给状况及能力提升路径——以河南省为例 [J]. 自然资源学报, 2023,38(7):1815-1832.
Gao P, Liang L T, Zhu P X. The supply situation of cultivated land public ecological products and the path of capacity improvement: Taking Henan province as an example [J]. Journal of Natural Resources, 2023,38(7):1815-1832.

[24] Stroman D A, Kreuter U P, Gan J. Balancing property rights and social responsibilities: Perspectives of conservation easement landowners [J]. Rangeland Ecology and Management, 2017,70(3):255-263.

[25] Sina S, Peter C J, Eoin O. An analysis of the factors influencing transaction costs in transferable development rights programmes [J]. Ecological Economics, 2019,159:409-419.

[26] Liu M B, Zhang A L, Zhang X, et al. Research on the game mechanism of cultivated land ecological compensation standards determination: Based on the empirical analysis of the Yangtze River Economic Belt, China [J]. Land, 2022,11(9):1583.

[27] Ding Z M, Yao S B. Theory and valuation of cross-regional ecological compensation for cultivated land: A case study of Shanxi Province, China [J]. Ecological Indicators, 2022,136:108609.

[28] Chen A Q, He H X, Wang J, et al. A study on the arable land demand for food security in China [J]. Sustainability, 2019,11(17):4769.

[29] Gao X, Shen J Q, He W J, et al. Changes in ecosystem services value and establishment of watershed ecological compensation standards [J]. International Journal of Environmental Research and Public Health, 2019,16(16):2951.

[30] 马爱慧.耕地生态补偿及空间效益转移研究 [M]. 北京:科学出版社, 2015.
Ma A H. The study of cultivated land eco-compensation and spatial benefits transfer [M]. Beijing: Science Press, 2015.

[31] 崔宁波,生世玉.基于公平视角的耕地生态补偿标准量化研究 [J]. 水土保持通报, 2021,41(1):138-143.
Cui N B, Sheng S Y. Quantitative research on cultivated land ecological compensation standard based on equity [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2021,41(1):138-143.

[32] 温良友,张蚌蚌,孔祥斌.基于区域协同的我国耕地保护补偿框架构建及其测算 [J]. 中国农业大学学报, 2021,26(7):155-171.
Wen L Y, Zhang B B, Kong X B. Construction and calculation of cultivated land protection compensation framework based on regional coordination in China [J]. Journal of China Agricultural University, 2021,26(7):155-171.

[33] 钱凤魁,徐 欢,逄然然.基于三维生态足迹模型辽宁省耕地生态补偿额度估算分析 [J]. 中国农业资源与区划, 2023,44(6):97-109.
Qian F K, Xu H, Pang R R. Estimation and analysis of cultivated land ecological compensation in Liaoning province based on three-dimensional ecological footprint model [J]. Chinese Journal of Agricultural Resources and Regional Planning, 2023,44(6):97-109.

[34] 宋 戈,柳 清,王 越.基于耕地发展权价值的东北粮食主产区耕地保护补偿机制研究 [J]. 中国土地科学, 2014,28(6):58-64.
Song G, Liu Q, Wang Y. Study on compensation mechanism for cultivated land protection in northeast major grain producing areas based on the value of farmland development rights [J]. China Land Sciences, 2014,28(6):58-64.

[35] 任 平,吴 涛,周介铭.基于耕地保护价值空间特征的非农化区域补偿方法 [J]. 农业工程学报, 2014,30(20):277-287.
Ren P, Wu T, Zhou J M. Method of quantitative compensation for cultivated land conversion based on spatial characteristics of cultivated land protection value [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2014,30(20):277-287.

[36] 张俊峰,贺三维,张光宏.流域耕地生态盈亏、空间外溢与财政转移——基于长江经济带的实证分析 [J]. 农业经济问题, 2020,(12):120-132.
Zhang J F, He S W, Zhang G H. Ecological benefit, spatial spillover and fiscal transfer of farmland in watershed: Evidence from the Yangtze River Economic Belt [J]. Issues in Agricultural Economy, 2020,(12):120-132.

[37] United Nations. System of environmental-economic accounting 2012: Applications and extensions [R]. New York: United Nations Statistics Division, 2017.

[38] 王文治.我国省域消费侧碳排放责任分配的再测算——基于责任共担和技术补偿的视角 [J]. 统计研究, 2022,39(6):3-16.
Wang W Z. Recalculation of responsibility distribution of China's provincial consumption-side carbon emissions: Based on the perspectives of shared responsibility and technical compensation [J]. Statistical Research, 2022,39(6):3-16.

[39] 谢高地,鲁春霞,冷允法,等.青藏高原生态资产的价值评估 [J]. 自然资源学报, 2003,(2):189-196.
Xie G D, Lu C X, Leng Y F, et al. Ecological assets valuation of the Tibetan Plateau [J]. Journal of Natural Resource, 2003,(2):189-196.

[40] 刘利花,杨彬如.中国省域耕地生态补偿研究 [J]. 中国人口·资源与环境, 2019,29(2):52-62.
Liu L H, Yang B R. Research on ecological compensation of provincial cultivated land in China [J]. China Population, Resources and Environment, 2019,29(2):52-62.

作者简介： 王永瑜(1965-),男,甘肃民勤人,教授,博士,主要从事国民经济核算、资源环境核算研究.发表论文 47 篇.13919197869@163.com.