

引用格式：

王盼盼, 高佳, 张红梅. 吉林省辽河流域耕地生态价值时空分异及差异化生态补偿研究 [J]. 农业现代化研究, 2023, 44(4): 657-667.

Wang P P, Gao J, Zhang H M. Research on spatial and temporal variation of ecological value of cultivated land and differential ecological compensation in Liaohe River basin of Jilin Province [J]. Research of Agricultural Modernization, 2023, 44(4): 657-667.
DOI: 10.13872/j.1000-0275.2023.0073



吉林省辽河流域耕地生态价值时空分异及差异化生态补偿研究

王盼盼¹, 高佳^{2*}, 张红梅³

(1. 沈阳建筑大学管理学院, 辽宁 沈阳 110168; 2. 东北大学土地管理研究所, 辽宁 沈阳 110167;
3. 辽宁大学公共管理学院, 辽宁 沈阳 110136)

摘要：耕地保护生态补偿在确保耕地生态功能持续供应、内化耕地保护外部性方面扮演着重要角色。本研究基于耕地“三位一体”保护逻辑，通过引入景观格局指数，充分考虑耕地景观空间配置差异，建立流域多尺度耕地生态价值核算体系。结合耕地生态可承载能力，制定流域差异化耕地保护生态补偿额度及财政转移路径。研究结果表明：1) 2000—2020 年，吉林省辽河流域耕地生态价值逐渐凸显，且空间异质性显著，整体北部高于南部，中下游区域是耕地生态价值的主要贡献区域。2) 截止 2020 年，流域内耕地整体处于生态盈余状态，盈余量为 48.45 万 hm²。各区县耕地供需呈现出“县(市)盈余、区赤字”的特点。3) 流域耕地保护生态补偿额度和方式存在显著的空间差异和尺度依赖效应。其中流域耕地保护受偿总额度为 13.50 亿元，各区县耕地保护补偿额度为 -0.03 亿~6.57 亿元。因此，耕地保护生态补偿机制的建立应充分考虑耕地生态服务价值、可承载能力、区域差异及尺度依赖特征等相关因素，提高补偿的精度与有效性。同时，可以通过设立中介平台等方式实现耕地生态补偿的横、纵向财政转移。

关键词：生态补偿；耕地保护；耕地生态价值；差异化；辽河流域

中图分类号：F301.21

文献标识码：A

文章编号：1000-0275 (2023) 04-0657-11

Research on spatial and temporal variation of ecological value of cultivated land and differential ecological compensation in Liaohe River basin of Jilin Province

WANG Pan-pan¹, GAO Jia², ZHANG Hong-mei³

(1. School of Management, Shenyang Jianzhu University, Shenyang, Liaoning 110168, China; 2. Institute of Land Management, Northeast University, Shenyang, Liaoning 110167, China; 3. School of Public Management, Liaoning University, Shenyang, Liaoning 110136, China)

Abstract : Ecological compensation for cultivated land protection plays an important role in ensuring the continuous supply of ecological functions of cultivated land and internalizing the externalities of cultivated land protection. Based on the logic of "trinity" protection of cultivated land, this study introduces the landscape pattern index, takes into account the differences in spatial configuration of cultivated land, establishes a multi-scale accounting system for the ecological service value of cultivated land in watersheds, and formulates the ecological compensation amount for differential protection of cultivated land in watersheds by combining the ecological carrying capacity of cultivated land, and proposes a financial transfer path. The research results show that: 1) From 2000 to 2020, the ecological value of cultivated land in the Liaohe River basin of Jilin Province was gradually revealed, and the spatial heterogeneity was significant, with the overall northern region higher than the southern region, and the middle and lower reaches of the region being the main contributing region to the ecological value of cultivated land. 2) As of 2020, the cultivated land in the basin as a whole is in ecological surplus, with a surplus of 484.5 thousand hectares, and the supply and demand of

基金项目：国家自然科学基金项目(42101260; 42101254)。

作者简介：王盼盼(1992—)，女，黑龙江嫩江人，博士，副教授，主要研究方向为耕地保护、国土空间规划，E-mail: panpan@sjzu.edu.cn; 通信作者：高佳(1988—)，女，辽宁丹东人，博士，副教授，博士生导师，主要研究方向为土地利用与管理，E-mail: gaojia@wfxu.neu.edu.cn。

收稿日期：2023-05-29; **接受日期：**2023-09-13

Foundation item: National Natural Science Foundation of China (42101260; 42101254).

Corresponding author: GAO Jia, E-mail: gaojia@wfxu.neu.edu.cn.

Received 29 May, 2023; **Accepted** 13 September, 2023

cultivated land in various districts and counties are characterized by “surplus in counties (cities) and deficit in districts”. 3) There are significant spatial differences and scale-dependent effects in the amount and mode of ecological compensation for cultivated land protection in the watershed. The total amount of compensation for cultivated land protection in the watershed is 1.350 billion yuan, and the amount of compensation for cultivated land protection in each district and county is -0.003 billion ~0.657 billion yuan. Therefore, the establishment of the ecological compensation mechanism for cultivated land protection should take into full consideration the ecological service value of cultivated land, carrying capacity, regional differences, scale-dependent characteristics, and other relevant factors, so as to improve the precision and effectiveness of compensation. At the same time, horizontal and vertical financial transfers of cultivated land for ecological compensation can be realized through the establishment of intermediary platforms and other means.

Key words : ecological compensation; cultivated land protection; ecological value of cultivated land; differentiation; Liaoh River basin

耕地保护生态补偿是平衡区域经济发展与耕地保护之间矛盾的重要手段,对于耕地资源的可持续利用具有重要意义^[1]。耕地不仅提供基本的粮食生产功能,还承担着调节大气、固土保肥等关键生态系统服务功能,在整体生态平衡中占有重要地位^[2-3]。然而,由于耕地保护主体对于其生态功能认知不足,导致目前耕地的生态效益尚未得到充分显现。通过耕地保护生态补偿,可以提升耕地生态功能的可持续供应能力,并使耕地保护外部性内化^[4-5]。目前,关于耕地保护生态补偿的研究和实践仍然存在一些问题,如缺乏统一的补偿标准、不完善的耕地生态供需分析,补偿额度超出区域支付能力,导致实际操作可行性不佳等,这些问题与耕地保护的“三位一体”理念相悖^[6-7]。

耕地生态价值作为耕地保护的非市场价值,是制定耕地生态补偿标准的基础。国内外相关研究多从生态系统服务角度,采用当量因子法^[8-10]、综合生物圈模拟器 IBIS 模型^[11]、市场价值法^[12]及综合评估模型^[13]等,测算不同尺度下的耕地保护生态价值。一些研究基于耕地保护的外部性视角,运用当量因子法、功能价值法^[14]等方法,计算耕地保护产生的正向生态价值和负向生态价值。或基于效用价值理论^[15],构建自然资源的价值论,衡量耕地保护生态系统服务的边际效用。以及从微观角度考虑农民的支付意愿与受偿意愿^[16]等,采用条件价值评估法^[17],评价耕地的生态价值。

耕地生态供需差异分析是界定耕地生态补偿支付区与受偿区的依据。基于生态足迹模型计算耕地生态足迹与生态承载力,用于衡量耕地生态需求与供给的关系,已得到学者们广泛共识^[18-20]。在此基础上,部分研究通过以生产性足迹代替消费性足迹,以国家公顷代替全球公顷^[14],对生态足迹模型进行改进。通过净初级生产力^[21]和生态系统服务价值^[22]计算模型中的均衡因子与产量因子。一些研究引入足迹广度和足迹深度构建三维生态足迹模型^[23],或

从生物资源足迹和碳足迹对生态足迹账户做类型化处理等^[24]。在衡量耕地生态价值,分析耕地生态供需差异基础上,还需考虑耕地生态补偿额度的实际操作性问题。部分研究通过引入区域社会发展阶段系数、政府支付能力指数等对耕地生态补偿额度进行了修正^[15,25]。

尽管以上研究为本研究提供了重要的理论和方法支撑,但在衡量不同尺度下耕地生态服务价值时,多数研究仅通过将区域尺度下的耕地生态价值累加作为更高层次尺度的总价值,从而忽视了耕地作为重要生态要素的内在联系和空间配置差异对其生态效益的影响。此外,对耕地生态足迹的计算往往以耕地的单一生产功能为基础,根据人类对各类农产品的消费需求,计算对耕地资源的占用与消耗,缺乏对耕地生活性足迹的考量。鉴于此,本研究以吉林省辽河流域为例,基于耕地数量、质量和生态“三位一体”保护理念,充分考虑耕地景观连通性、破碎度等空间配置对不同尺度下耕地生态价值的影响,建立流域多尺度耕地生态价值核算体系。在此基础上,通过类型化耕地生态足迹账户,改进生态足迹模型,开展研究区耕地生态供需差异的分析研究。以区域耕地生态空间外溢价值为基础,修正流域多尺度耕地保护生态补偿额度,并设计多级耕地保护生态补偿财政转移路径,为流域耕地保护生态补偿提供科学依据。

1 研究方法

1.1 研究区概况

吉林省辽河流域位于吉林省中南部(图1),是辽河源头和上游。流域东南区域地势较高,多为低山丘陵。中西部区域为台地及平原区,地形总体平缓。流域行政区域涉及四平市和辽源市两个地级市,下辖铁西区、铁东区、梨树县、伊通县、公主岭市、双辽市、龙山区、西安区、东辽县 9 个县(市、区),各县(市)均是全国重要的粮食主产区。流域内以

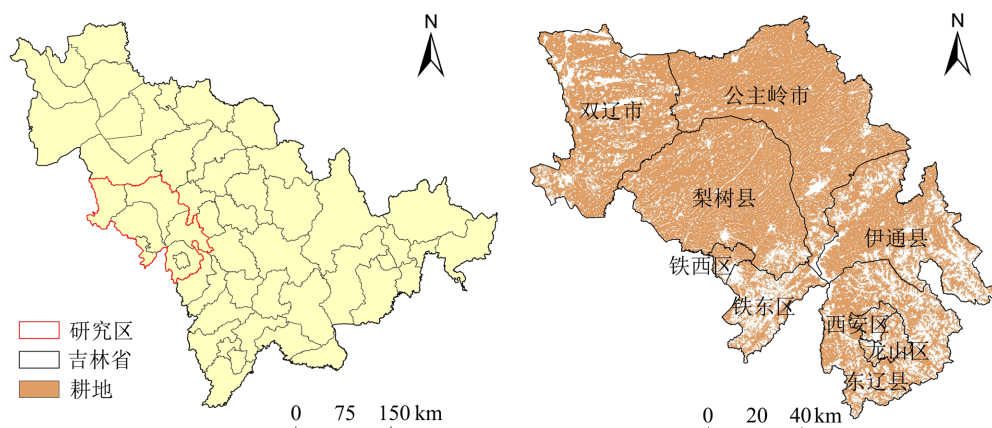


图1 研究区区位及行政区域图

Fig. 1 Location and administrative area of the study area

大黑山脉作为分界线，东南部为吉林省辽河流域上游地区，西北部为流域中下游地区。流域国土面积 1.7 万 km^2 ，耕地面积占土地总面积的 65% 以上，主要分布于大黑山脉以西的公主岭市、梨树县、双辽市等区域。截止 2020 年，研究区总人口 391.29 万人，其中农业人口 231.48 万人，占总人口的 59.16%，流域粮食播种面积 104.26 万 hm^2 ，粮食产量 761.57 万 t，占全省粮食产量的 20% 以上。

1.2 研究思路

耕地生态价值是耕地数量保护、质量保护及生态保护多重作用的结果。耕地数量及空间配置差异决定着耕地生态价值总量，而耕地质量保护将会进一步促进耕地生态价值的发挥。耕地生态保护可以约束耕地利用过程中的不良耕作方式，如农药、化肥等化学制品的过度使用等，从而遏制生态负外部性，降低其生态价值的损失。因此，本研究基于耕地“三位一体”保护的逻辑，建立以耕地数量及空间配置确定耕地生态价值总量、以耕地质量差异修正生态价值、以生态负外部性对价值量进行核减的多尺度耕地生态价值核算体系。从耕地生物资源足

迹、生活足迹和碳足迹类型化耕地生态足迹账户，改进生态足迹模型，并依据耕地生态供给与需求之间的差距衡量耕地生态补偿的支付区与受偿区。最后，以研究区不同空间尺度下耕地生态价值外溢量为基础，引入补偿系数，制定研究区不同空间尺度下耕地保护生态补偿额度、财政转移路径。主要研究思路如图 2 所示。

1.3 耕地生态价值测算

1.3.1 基于耕地数量及其空间配置耕地生态价值总量
耕地数量及空间配置情况是衡量耕地生态价值的基础。基于生态服务价值理论，采用谢高地等^[9]提出的当量因子法来测算以耕地数量为基数的耕地生态服务价值。本研究选取稻谷、小麦、玉米、薯类和豆类五种粮食作物参与耕地生态价值核算。计算公式如下：

$$E = V \times E_a \quad (1)$$

$$E_a = \frac{1}{7} \sum_{k=1}^n \frac{(c_k \times m_k \times p_k)}{C} \quad (2)$$

式中： E 代表以耕地数量为基数计算的耕地生态价

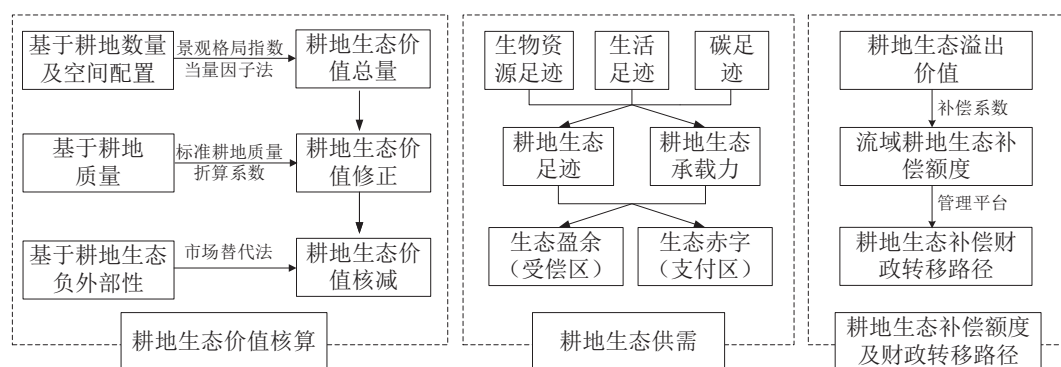


图2 流域耕地保护生态补偿研究思路

Fig. 2 Research ideas on ecological compensation for watershed cultivated land protection

值 (元/hm²); V 为单位耕地生物当量因子, 排除食物及和原材料生产的市场价值, 取值为 6.51^[5]; E_a 为单位生物当量因子价值量 (元/hm²); c_k 为 k 种农作物播种面积 (hm²); m_k 为 k 种农作物单产 (kg/hm²); p_k 为 k 种农作物单价 (元/kg); C 为农作物总播种面积 (hm²)。

人类活动可能造成耕地生态景观分割与孤立, 导致生态隔离与孤岛现象, 降低耕地生态价值。仅依赖耕地数量计算生态价值会忽视内部空间配置差异 (耕地集中连片程度、破碎度等) 对生态价值产生的影响。本研究引入耕地景观空间配置调整系数, 反映景观结构和人类活动对生态的影响, 用于修正基于耕地数量的生态价值, 弥补单一视角计算的不足。具体计算公式如下:

$$E_l = E \times LS \quad (3)$$

式中: E_l 为基于耕地数量及空间配置的耕地生态价值 (元/hm²); LS 为耕地景观空间配置调整系数, 由耕地景观综合评价与平均值比例计算得出。

耕地景观格局指数可以高度概括耕地景观格局信息, 反映其景观异质性及空间结构特征。利用多个指数构建综合性指标, 可以降低指数冗余性, 对区域耕地景观空间配置差异进行综合性表征。参考相关研究^[26-27], 本研究选取耕地景观最大斑块指数 (LPI)、斑块密度 (PD)、平均斑块形状指数 (SHAPE_MN) 和聚合指数 (AI) 综合评价研究区耕地景观空间配置情况 (表 1)。对各景观指数进行无量纲化处理, 采用熵权法计算不同景观指数权重, 在此基础上, 计算流域、地市及区县三个尺度下耕地景观空间配置评价价值。计算公式如下:

$$T_j = -\frac{1}{\ln(n)} \sum_{i=1}^n h_{ij} \times \ln h_{ij} \quad (4)$$

$$W_j = \frac{1 - T_j}{\sum_{j=1}^m (1 - T_j)} \quad (5)$$

$$AS = l_j \times W_j \quad (6)$$

式中: AS 为区域耕地景观空间配置综合评价价值; l_j 为 j 景观指标的无量纲化值; W_j 为 j 景观指标的权重值; T_j 为景观指标的熵权值; h_{ij} 为 j 指标值在 i 区域所占比重; n 为区域个数; m 为景观指标数。

1.3.2 耕地质量折算系数 本研究运用耕地质量折算系数, 对耕地生态价值总量进行修正。以全国耕地平均质量水平为标准, 依据区域耕地质量分类成果, 计算区域耕地质量折算系数。计算公式如下:

$$K = \sum_{j=1}^n \frac{R_{ij}}{R_i} \times \frac{100(n-j)}{n} / U \quad (7)$$

式中: K 为区域耕地质量折算系数; R_{ij} 为 i 区域 j 类别耕地的面积 (hm²); R_i 为 i 区域耕地总面积 (hm²); U 为全国耕地平均质量等级; n 为耕地质量等级。

1.3.3 耕地生态负面价值 吉林省辽河流域属于资源型重度缺水地区, 其水资源开发利用率远高于国际上公认的 40% 水资源开发利用警戒线。此外, 农药和化肥等大量使用导致严重的环境污染。因此, 本研究采用市场替代法和市场工程法, 核算农药、化肥、地膜过量使用及农业耗水所导致的负面生态价值。计算公式如下:

$$G = [a \times (1-u) \times P_a + b \times (1-\eta) \times P_e + p \times \gamma \times \lambda \times q \times P_m + \omega \times S \times M] / A \quad (8)$$

式中: G 为耕地使用农药、化肥、地膜及农业耗水产生的负面价值 (元/hm²); a 、 b 和 p 分别为农药使用量 (kg)、化肥使用量 (kg) 和农用地膜覆盖面

表 1 耕地景观指数计算公式及含义

Table 1 Cultivated land landscape index calculation formula and meaning

景观指数	计算公式	指数含义
最大斑块指数 (LPI)	$LPI = \frac{\max(a_{ij})}{A} \times 100$	a_{ij} 为斑块 ij 面积, A 为景观面积。0 < LPI ≤ 100%, 反映最大斑块对景观的影响程度, 其值越大, 耕地的集中连片程度越高。
斑块密度 (PD)	$PD = \frac{n_i}{A} \times 100$	n_i 为斑块 i 数量, A 为景观面积。PD > 0, 反映斑块的破碎程度, 其值越大, 景观的破碎度越高。
平均斑块形状指数 (SHAPE_MN)	$SHAPE_MN = \sum_{i=1}^n \frac{0.25P_i}{\sqrt{a_i}} / A$	P_i 为斑块 i 周长, a_i 为斑块 i 面积。SHAPE_MN ≥ 1, 反映斑块的形状指数, 其值越大, 斑块形状越复杂, 破碎度越高。
聚合指数 (AI)	$AI = \left[\sum_{i=1}^n \left(\frac{g_i}{\max \rightarrow g_i} \right) P_i \right] \times 100$	g_i 为 i 类景观斑块相似邻接的斑块数量, p_i 为 i 类景观斑块占景观比例。0 < AI ≤ 100%, 反映景观斑块的聚集度, 其值越高, 景观斑块的聚集程度越高。

积 (hm^2); P_d 、 P_e 和 P_m 分别为农药价格 (元/kg)、化肥价格 (元/kg) 和粮食市场价格 (元/kg); q 为粮食单产 (kg/hm^2); u 、 η 、 γ 和 λ 分别为农药利用率 (%)、化肥利用率 (%)、地膜残留比例 (%) 和粮食损失率 (%), 参考相关文献, 其取值分别为 34.17%、35.00%、41.70% 和 10.00%^[14]; ω 为农业耗水率 (%); S 为农业用水量 (m^3); M 为水库的蓄水成本, 取值为 1.17 元/ m^3 ^[14]; A 为耕地面积 (hm^2).

综合以上分析, 得到基于耕地数量、质量和生态“三位一体”保护逻辑的流域多尺度耕地生态服务价值 (CEV, 元/ hm^2), 计算公式如下:

$$\text{CEV} = E_i \times K - G \quad (9)$$

1.4 耕地生态足迹与承载力测算

耕地生态足迹 (EF) 体现了人类为维护自身的生存和发展对耕地资源的占用与消耗。相关研究在计算耕地生态足迹时, 忽略了耕地除提供基本的农产品外, 同样在维持社会稳定方面发挥着重要作用^[28-29], 缺少对耕地生活性足迹的相关考量。鉴于此, 本研究从耕地生物资源足迹 (EP)、生活性足迹 (EL) 和碳足迹 (EO) 对耕地生态足迹账户做类型化处理。对于各足迹账户的平衡, 以往研究通常引入平衡因子或按照“舍小取大”原则进行处理^[23]。考虑到生物资源足迹、生活足迹及碳足迹在核算过程中的交叉重叠, 本研究选取三者中的最大值作为区域耕地生态足迹值。其计算公式如下:

$$\text{EF} = \text{MAX}(\text{EP}, \text{EL}, \text{EO}) \quad (10)$$

$$\text{EP} = r \times e_p = r \times \sum_{i=1}^n \theta \times \frac{\text{PR}_i}{\text{PQ}_i} \quad (11)$$

$$\text{EL} = \theta \times \frac{B}{\text{PU}} = \theta \times \frac{B}{Q/D} = \theta \times \frac{B}{\frac{C \times Z}{N \times t} / D} \quad (12)$$

$$\begin{aligned} \text{EO} &= \theta \times \frac{\text{PE}}{\text{PC}} \\ &= \theta \times \frac{a \times a_1 + b \times b_1 + c \times c_1 + d \times d_1 + e \times e_1 + f \times f_1}{\sum_{i=1}^n [T_i \times Y_i \times (1 - O_i) \times (1 + L_i)] / H_i / r} \end{aligned} \quad (13)$$

式中: EF 为耕地生态足迹 (hm^2); EP、EL 和 EO 分别为生物资源足迹、生活性足迹和碳足迹 (hm^2); e_p 为人均生物资源足迹 ($\text{hm}^2/\text{人}$); r 为人口数量 (万人); θ 为耕地均衡因子, 采用基于净初级生产力的吉林省耕地均衡因子结果, 取值为 1.09^[21]; PR_i 和 PQ_i 分别为 i 类农作物的人均消费量 ($\text{kg}/\text{人}$) 和 i 类农作物的全国平均生产力 (kg/hm^2); B 、 PU 、 Q 和 D 分别代表区域保障人口数量 (万人)、耕

地社会保障能力 (人/ hm^2)、耕地社会保障价值 (元/ hm^2) 和人均生活需求 (元/人); C 、 N 、 Z 和 t 分别代表农村居民家庭人均纯收入 (元)、城镇居民家庭人均可支配收入 (元)、政府为城镇居民提供的社会养老保险金 (元/人) 和人均耕地面积 ($\text{hm}^2/\text{人}$); PE 和 PC 分别代表区域耕地碳排放量 (kg) 和固碳能力 (kg/hm^2); a 、 b 、 c 、 d 、 e 和 f 分别代表区域农药使用量 (kg)、化肥使用量 (kg)、地膜使用量 (kg)、农作物种植面积 (hm^2)、农业机械总动力 (kW) 和灌溉面积 (hm^2); a_1 、 b_1 、 c_1 、 d_1 、 e_1 、 f_1 分别为农药使用碳排放系数 (kg/kg)、化肥使用碳排放系数 (kg/kg)、地膜使用碳排放系数 (kg/kg)、农作物种植碳排放系数 (kg/hm^2)、农业机械耕作碳排放系数 (kg/kW) 和灌溉的碳排放系数 (kg/hm^2), 参考相关研究, 取值分别为 4.93、0.89、5.18、16.47、0.18 和 266.48^[30]; T_i 、 Y_i 、 O_i 、 L_i 和 H_i 分别代表 i 类农作物含碳率 (%), 产量 (kg)、果实的水分系数、根冠比系数和经济系数, 相关参数参考李明琦等^[30]研究而定; i 为农作物种类。

耕地生态承载力是一定区域内能够提供给人类的生物生产性耕地面积。按照世界环境与发展委员会的报告建议, 在区域能为人类提供的生物生产性土地面积中, 应扣除 12% 以维持生物多样性。计算公式如下:

$$\text{EC} = 0.88 \times r \times e_c = 0.88 \times r \times \theta \times y \times \varphi \quad (14)$$

式中: EC 为耕地生态承载力 (hm^2); e_c 为人均耕地生态承载力 ($\text{hm}^2/\text{人}$); r 为人口数量 (万人); θ 为耕地均衡因子; y 为耕地产量因子, 根据不同区域农作物平均产量与全国农作物平均产量之比, 综合农作物种植面积占耕地面积比重计算而得; φ 为人均生物生产性耕地面积 ($\text{hm}^2/\text{人}$)。

1.5 耕地保护生态补偿额度及转移路径

依据区域耕地生态供给和需求, 确定耕地生态可承载指数 (EFI), 并结合耕地生态价值 (CEV) 计算得到区域耕地生态溢出价值 (ESV)。然而, 直接将耕地生态溢出价值作为耕地生态补偿额度可能会超出地方政府的实际支付能力, 从而降低耕地保护补偿的实际操作水平^[24]。因此, 本研究综合区域社会发展阶段和支付能力, 采用耕地补偿系数对耕地生态溢出价值进行修正, 计算得到研究区耕地生态补偿额度 (FCA)。在测算流域、地市及区县三个尺度下耕地保护生态补偿额度的基础上, 建立耕地生态保护补偿的财政转移路径。计算公式如下:

$$ESV = CEV \times A \times EFI = CEV \times A \times \frac{EC - EF}{EC} \quad (15)$$

$$FCA = ESV \times ge = ESV \times \frac{1}{1 + e^{-f(x)}} \times \frac{GDP_i}{GDP_{i0}} \quad (16)$$

$$f(x) = EU_i \times z + EV_i \times (1 - z) \quad (17)$$

式中: ESV 为耕地生态溢出价值 (元); A 为耕地面积 (hm^2); EFI 为耕地生态可承载指数, 当耕地生态供给大于需求时, 耕地生态可承载指数为正, 代表该区域为受偿区; 当耕地生态供给小于需求时, 耕地生态可承载指数为负, 该区域为支付区; FCA 为耕地保护补偿额度 (元); ge 为补偿系数; GDP_i 为 i 区域人均 GDP (元); GDP_{i0} 为全国人均 GDP (元); EU_i 为 i 区域城镇居民恩格尔系数; EV_i 为 i 区域农村居民恩格尔系数, z 为城镇化率 (%)。

1.6 数据来源

本研究的相关数据来源于《吉林省统计年鉴》《辽源市统计年鉴》《四平市统计年鉴》, 以及相关县、市统计年鉴、国民经济和社会发展统计公报。其中, 全国粮食播种面积和产量数据来源于《中国农村统计年鉴》; 粮食作物市场价格数据来源于《中国农产品价格调查年鉴》; 农药和化肥市场价格数据来源于《全国农产品成本收益资料汇编》《中国农村统计年鉴》; 辽源市和四平市农业用水量及耗水率数据来源于省、市 (区) 水资源公报。城镇职工基本养老保险的缴存比例、基本养老保险计发基数以及农村最低生活保障金额来源于吉林省人力资源和社会保障厅官方网站及吉林省民政厅、财政厅官方网站。

2000 年、2010 年和 2020 年的耕地分布数据 (分辨率为 $30 \text{ m} \times 30 \text{ m}$) 来源于中国科学院地理科学与资源研究所。全国耕地平均质量等来源于自然资源部官方网站。研究区耕地质量等别来源于 2018 年四平市与辽源市农用地分等定级成果数据库。

2 结果与分析

2.1 耕地生态价值时空分异特征

根据流域多尺度耕地生态价值核算体系, 对吉林省辽河流域、地市和区县三个尺度的耕地生态价值进行计算。为消除价格变动对耕地生态价值可比性的影响, 本研究在计算不同时点实际耕地生态价值的基础上, 使用 2020 年粮食价格为基准, 计算了 2000 年和 2010 年的可比耕地生态价值 CEV_0 (表 2), 并利用 GIS 软件进行空间可视化处理 (图 3)。结果表明, 2000—2020 年, 吉林省辽河流域的耕地生态服务价值先增加后减少, 整体呈增长趋势, 从 2000 年的 $11\,707 \text{ 元}/\text{hm}^2$ 增长至 2020 年的 $15\,998 \text{ 元}/\text{hm}^2$, 耕地生态服务价值逐渐显现。2010 年耕地生态价值达到峰值, 值为 $22\,360 \text{ 元}/\text{hm}^2$, 主要受粮食单产等影响。2010 年流域粮食作物的平均单产达 $9\,951 \text{ kg}/\text{hm}^2$, 明显高于 2000 年和 2020 年。在地市尺度, 四平市耕地生态服务价值先增加后减少, 2010 年达到峰值, 值为 $17\,291 \text{ 元}/\text{hm}^2$ 。辽源市耕地生态服务价值有小幅减少, 从 2000 年的 $11\,283 \text{ 元}/\text{hm}^2$ 减少到 2020 年的 $10\,879 \text{ 元}/\text{hm}^2$ 。在区县尺度, 耕地生态价值呈波动变化特征, 除东辽县耕地生态价值有小幅减少外, 其他各县区的耕地生态价值均有所增加。其中, 双辽市的增加值最

表 2 研究区耕地生态服务价值
Table 2 Ecological service value of cultivated land in the study area

区域	2000 年						2010 年						2020 年			
	耕地数量 保护生态 价值 (元 / hm^2)	空间配 置调整 系数	负向 价值 (元/ hm^2)	耕地生 态实际 价值 (元 / hm^2)	耕地生 态可比 价值 (元 / hm^2)	耕地数量 保护生态 价值 (元 / hm^2)	空间配 置调整 系数	负向价 值 (元/ hm^2)	耕地生 态实际 价值 (元 / hm^2)	耕地生 态可比 价值 (元 / hm^2)	耕地数量 保护生态 价值 (元 / hm^2)	空间配 置调整 系数	负向价 值 (元/ hm^2)	耕地生 态实际 价值 (元 / hm^2)	耕地生 态可比 价值 (元 / hm^2)	耕地生 态实际 价值 (元 / hm^2)
铁西区	2 299	0.948	1 483	652	2 707	8 254	0.817	2 949	3 658	3 796	14 510	0.784	2 690	8 452		
铁东区	4 837	0.564	2 107	393	2 440	13 427	0.591	3 744	3 532	3 582	14 402	0.581	1 787	5 882		
梨树县	4 909	1.547	1 458	6 774	18 218	21 502	1.492	2 628	32 148	35 068	17 709	1.305	3 447	21 605		
伊通县	4 913	0.898	1 643	1 544	5 062	19 613	0.944	2 658	10 714	11 681	17 006	0.930	3 237	8 191		
公主岭市	4 852	1.432	1 512	5 075	13 815	20 843	1.324	2 717	23 442	25 484	17 524	1.417	3 894	19 642		
双辽市	3 092	1.236	1 410	1 666	5 213	17 513	1.223	2 203	15 037	17 003	15 906	1.310	2 577	14 193		
龙山区	6 282	0.390	1 700	210	1 822	12 323	0.556	1 878	3 459	3 767	12 619	0.742	2 154	5 142		
西安区	2 516	0.804	1 429	230	2 007	13 399	0.823	2 708	6 331	6 949	12 445	0.789	2 807	5 246		
东辽县	6 227	0.949	1 436	4 519	12 384	13 901	1.000	2 299	11 710	12 656	14 377	0.982	2 490	11 741		
四平市	4 574	0.995	1 505	2 668	7 772	19 991	1.005	2 602	15 827	17 291	17 089	0.942	3 302	11 458		
辽源市	6 182	0.932	1 469	4 072	11 283	13 752	0.937	2 287	10 101	10 929	14 213	0.978	2 484	10 879		
辽河流域	4 750	1.305	1 501	4 215	11 707	19 390	1.289	2 619	20 423	22 360	16 788	1.241	3 209	15 998		

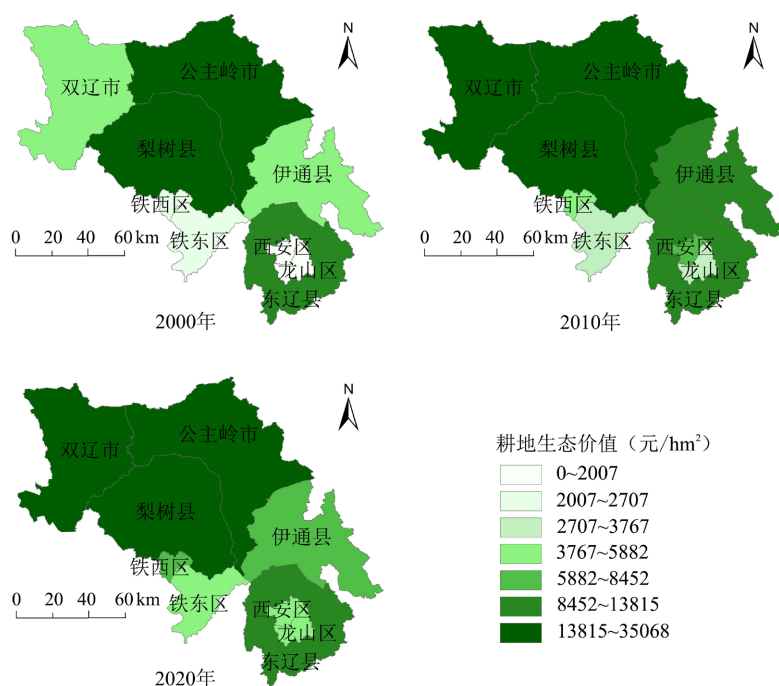


图3 研究区耕地生态价值空间分异

Fig. 3 Spatial differentiation of ecological value of cultivated land in the study area

大, 增加值为 8 979 元 / hm^2 , 其次为公主岭市, 增加值为 5 827 元 / hm^2 。总体而言, 吉林省辽河流域耕地生态保护绩效较为显著。流域耕地生态保护不仅保障了区域的粮食安全, 维持区域社会稳定, 且提供了丰富的生态产品与服务。然而, 耕地生态价值的负外部性同时表现显著。2020 年, 由农业耗水、农药、化肥、地膜等因素导致的负向价值为 3 209 元 / hm^2 , 占流域耕地生态价值的 20%。农业生产要素的投入给生态环境造成了严重压力, 是耕地生态价值测算体系中不容忽视的问题。

从不同游段和各区县的耕地生态价值结果来看, 流域上游区域 (包括铁东区、伊通县、龙山区、西安区及东辽县) 单位面积平均耕地生态价值为 8 995 元 / hm^2 , 而中下游区域单位面积平均耕地生态价值为 18 655 元 / hm^2 , 是上游的 2 倍以上。同时, 结合流域不同游段耕地面积, 流域中下游区域的耕地生态价值远超过上游区域。两区域占研究区总生态价值的比例分别为 84% 和 16%, 这表明吉林省辽河中下游是耕地生态价值的主要贡献区域。此外, 各区县耕地生态价值差异较大。2000—2020 年, 梨树县和公主岭市的生态服务价值均最大。梨树县作为全国粮食生产先进县、国家重点商品粮基地县, 其秸秆还田加免耕播种的“梨树模式”得到全国的推广。公主岭市同样为全国重要的商品粮基地, 证明其保护性的耕作方式对于提高耕地生态价值具有

重要的意义。相比之下, 龙山区、西安区、铁西区和铁东区的耕地生态价值普遍偏低。流域内耕地生态价值在不同游段和区域之间呈不均衡分布, 整体而言, 北部区域高于南部, 呈现显著的空间异质性。

2.2 耕地生态供需差异分析

本研究以 2020 年为例, 根据耕地生态足迹及耕地生态承载力计算公式, 得到研究区 2020 年耕地生态供需情况 (表 3)。结果表明, 吉林省辽河流域耕地生态足迹为 90.82 万 hm^2 , 耕地生态承载力为 139.27 万 hm^2 , 整体处于生态盈余状态, 其盈余量达到 48.45 万 hm^2 。在地市尺度, 四平市和辽源市耕地均处于生态盈余状态, 属于耕地生态补偿的受偿区。在区县尺度, 耕地生态盈余量的大小依次为梨树县 (18.78 万 hm^2)、公主岭市 (17.96 万 hm^2)、双辽市 (5.36 万 hm^2)、东辽县 (5.20 万 hm^2)、伊通县 (3.27 万 hm^2), 而生态赤字量的排序为铁西区 (-0.94 万 hm^2)、龙山区 (-0.92 万 hm^2)、西安区 (-0.22 万 hm^2)、和铁东区 (-0.04 万 hm^2)。梨树县和公主岭市的耕地盈余量占流域总盈余量的 76%, 是流域范围内耕地生态空间的主要外溢区。而龙山区和铁西区的生态赤字量占总赤字量的 86%, 是流域范围内耕地生态空间的主要消耗区。总体来看, 各区县的耕地生态供需空间差异显著, 整体表现出“县(市)盈余、区赤字”的特征, 这与区域主体功能定位相符合。本研究在计算耕地生态供给与需求时, 考虑

表 3 研究区耕地生态供需差异 (万 hm²)
Table 3 Differences in ecological supply and demand of cultivated land in the study area (10⁴ hm²)

地区	生物资源足迹	生活足迹	碳足迹	耕地生态足迹	耕地生态承载力	耕地生态赤字 / 盈余	支付类型
铁西区	1.79	0.88	0.20	1.79	0.86	-0.94	支付区
铁东区	1.68	3.21	0.40	3.21	3.17	-0.04	支付区
梨树县	12.90	18.48	2.58	18.48	37.26	18.78	受偿区
伊通县	4.49	12.49	1.54	12.49	15.76	3.27	受偿区
公主岭市	14.11	26.95	3.37	26.95	44.91	17.96	受偿区
双辽市	5.94	16.32	2.08	16.32	21.68	5.36	受偿区
龙山区	1.76	0.90	0.17	1.76	0.84	-0.92	支付区
西安区	0.73	0.78	0.15	0.78	0.56	-0.22	支付区
东辽县	3.98	9.03	1.15	9.03	14.24	5.20	受偿区
四平市	—	—	—	79.25	123.63	44.38	受偿区
辽源市	—	—	—	11.57	15.64	4.07	受偿区
辽河流域	—	—	—	90.82	139.27	48.45	受偿区

了耕地在满足粮食需求的同时,对社会稳定的重要作用。这方面,引入了生物资源足迹、生活足迹和碳足迹等不同类型的耕地生态足迹账户,可以更全面地分析研究区耕地生态供需差异,准确界定耕地生态补偿的受益主体。

2.3 耕地生态补偿额度及财政转移路径分析

在区域耕地生态服务价值及耕地生态供需分析基础上,计算得到 2020 年研究区流域、地市及区县尺度下耕地生态补偿额度(表 4)及财政转移路径(图 4)。结果表明,吉林省辽河流域耕地生态空间外溢量为 64.07 亿元,对流域外的生态产品与服务贡献显著。在地市尺度,四平市耕地生态外溢量达 41.69 亿元,辽源市外溢量为 3.89 亿元,耕地生态外溢效应存在明显的差异。在区县尺度,梨树县的外溢效应最大,为 27.32 亿元,其次是公主岭市,为 26.65 亿元。这些差异主要受限于地方资源禀赋、耕地保护性耕种方式,以及耕地保护政策和实施效果等因素的影响。

综合考虑吉林省辽河流域作为一个整体区域的情况,其耕地生态保护效益跨流域范围外溢。修正后结果表明,2020 年吉林省辽河流域耕地保护生态补偿额度为 13.50 亿元,宜采用中央一级纵向转移支付的受偿方式,补偿额度占区域 GDP 的 1.31%。对于四平市和辽源市,由于它们均属于受偿区,其补偿额度分别为 8.66 亿元和 0.87 亿元,因此可以采用二级纵向的受偿方式。在区县尺度下,耕地保护补偿额度在 -0.03 亿元至 6.57 亿元之间,梨树县、公主岭市和双辽市是耕地保护生态补偿的主要受偿区,而铁西区和龙山区等则是支付区。其补偿方式宜采用横向与纵向受偿和横向转移支付的方式。对于受偿区,耕地生态补偿可以进一步激发其保护行为,提升耕地的数量和质量,采取更环保的耕作方式降低生态负外部性,从而提升耕地的生态价值,实现良性循环。至于支付区,地方应采取积极的应对措施,提高耕地保护的动机,提升耕地的“三位一体”保护能力,减少支付额度,使其从支付区转

表 4 耕地保护生态补偿额度及补偿方式
Table 4 The amount of ecological compensation for cultivated land protection and compensation methods

地区	耕地生态服务价值 (元 /hm ²)	耕地生态承载系数	耕地生态空间外溢量 (亿元)	社会发展阶段补偿系数	经济发展补偿系数	补偿额度 (亿元)	占 GDP 的比重 (%)	补偿方式
铁西区	8 452	-1.091 4	-1.02	0.572 0	0.311 4	-0.18	-0.23	横向转移支付
铁东区	5 882	-0.014 1	-0.03	0.571 6	0.328 3	-0.01	-0.01	横向转移支付
梨树县	21 605	0.504 0	27.32	0.575 7	0.291 1	4.58	2.96	横向与纵向受偿
伊通县	8 191	0.207 4	2.66	0.575 8	0.309 2	0.47	0.48	横向与纵向受偿
公主岭市	19 642	0.399 9	26.65	0.575 8	0.428 0	6.57	2.09	横向与纵向受偿
双辽市	14 193	0.247 0	7.56	0.574 4	0.343 4	1.49	1.55	横向与纵向受偿
龙山区	5 142	-1.090 2	-0.60	0.570 4	0.453 2	-0.15	-0.16	横向转移支付
西安区	5 246	-0.387 9	-0.18	0.570 4	0.254 4	-0.03	-0.10	横向转移支付
东辽县	11 741	0.365 6	5.08	0.576 0	0.385 9	1.13	1.23	横向与纵向受偿
四平市	11 458	0.359 0	41.69	0.574 8	0.361 4	8.66	1.06	二级纵向受偿
辽源市	10 879	0.260 1	3.89	0.572 8	0.388 7	0.87	0.40	二级纵向受偿
辽河流域	15 998	0.347 9	64.07	0.574 4	0.366 8	13.50	1.31	一级纵向受偿

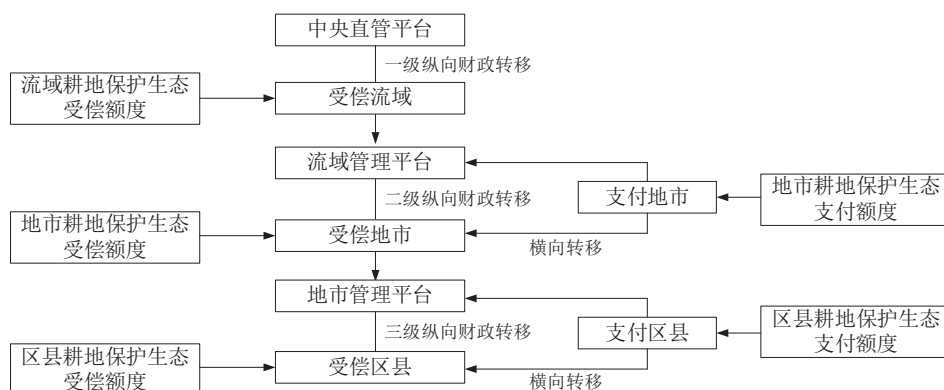


图4 流域耕地生态补偿财政转移路径

Fig. 4 Fiscal transfer path for ecological compensation of cultivated land in Watersheds

变为受偿区。

尽管耕地生态补偿的额度及利益主体已经明确，但耕地作为具备公共物品属性的载体，耕地生态补偿涉及到利益再分配的过程。在这个过程中，让支付区主动承担补偿费用的难度较大。同时，由于支付区与受偿区往往涉及较多地域，若采取支付主体与受偿主体进行一对一自主协调的方式成本较高，可执行力不强，且支付额度与受偿额度之间的差额无法弥补。因此，本研究构建以中央、流域及地市管理平台为中介的耕地生态补偿财政转移支付网络，以协调支付区与受偿区之间的补偿差额及拨付受偿主体相应受偿资金等（图4）。在流域层面，由中央直管采用一级纵向财政转移进行补偿，相应的补偿资金进入专项监管账户。在地市层面，支付地市将补偿资金缴纳到流域管理平台专用账户。通过流域管理平台的协调和统筹，确定受偿地市的补偿额度，并拨付相应的资金，实现地市耕地生态补偿之间的横向和纵向财政转移。同理，区县层面的财政转移也在地市管理平台的监管与协调下完成。支付区县将补偿资金缴纳到地市管理平台专用账户，由地市管理平台确定受偿区县的受偿额度并进行资金拨付，实现区县耕地生态补偿之间的横、纵向财政转移。关于耕地生态补偿机制的建立，本研究重点讨论了责任主体、补偿额度、补偿方式等问题。在实际操作中，本研究构建了中央、流域和地市管理平台作为中介，以协调不同尺度的财政转移。但是，对于支付区和受偿区的协调仍面临一些挑战，因此还需要进一步研究和实践。

3 结论

本研究基于耕地“三位一体”保护逻辑，构建流域多尺度耕地生态价值核算体系。改进生态足迹

模型，明确耕地生态供需差异。在此基础上，制定耕地生态补偿额度及路径，为流域耕地保护生态补偿的相关实践提供理论支撑。具体结论如下：

1) 吉林省辽河流域耕地生态服务价值逐渐显现，2000—2020年，吉林省辽河流域的耕地生态服务价值先增加后减少，整体呈增加趋势，共增长4291元/hm²。且空间分布不均衡，异质性显著，整体北部区域高于南部，中下游区域是其耕地生态价值的主要贡献区。

2) 研究区耕地生态足迹为90.82万hm²，耕地生态承载力为139.27万hm²，耕地生态整体处于盈余状态，盈余量为48.45万hm²。流域内各区县的耕地生态供需空间差异显著，整体表现出“县（市）盈余、区赤字”的特征。耕地生态盈余量较大的区域主要集中在梨树县和公主岭市，其盈余量占总盈余量的四分之三以上，与区域主体功能定位相符合。

3) 吉林省辽河流域耕地生态空间存在明显的外溢现象，耕地保护生态补偿额度和补偿方式存在显著的空间差异和尺度依赖效应。2020年，流域整体耕地生态保护受偿额度为13.50亿元，四平市和辽源市的耕地保护受偿额度为8.66亿元和0.87亿元，各区县耕地保护补偿额度在-0.03亿元至6.57亿元之间，差异较大。通过建立中央、流域及地市管理平台作为中介，实现流域耕地生态补偿的横、纵向财政转移。

参考文献：

- [1] 欧名豪，王坤鹏，郭杰. 耕地保护生态补偿机制研究进展[J]. 农业现代化研究，2019，40(3): 357-365.
Ou M H, Wang K P, Guo J. Research progress on ecological compensation mechanism of farmland protection[J]. Research of Agricultural Modernization, 2019, 40(3): 357-365.
- [2] Wallace K J. Classification of ecosystem services: Problems and solutions[J]. Biological Conservation, 2007, 139(3/4): 235-246.

- [3] Zhang Q, Song C H, Chen X D. Effects of China's payment for ecosystem services programs on cropland abandonment: A case study in Tiantangzhai Township, Anhui, China[J]. Land Use Policy, 2018, 73: 239-248.
- [4] 罗海平, 潘柳欣, 胡学英, 等. 我国粮食主产区粮食安全保障的生态代价评估: 2000—2018年[J]. 干旱区资源与环境, 2022, 36(1): 1-7.
Luo H P, Pan L X, Hu X Y, et al. Assessment of ecological cost of food security in major grain producing areas in China: 2000-2018[J]. Journal of Arid Land Resources and Environment, 2022, 36(1): 1-7.
- [5] 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.
- [6] 吴宇哲, 钱恬楠, 郭珍. 休养生息制度背景下耕地保护生态补偿机制研究[J]. 郑州大学学报(哲学社会科学版), 2020, 53(3): 27-31, 127.
Wu Y Z, Qian T N, Guo Z. On the ecological compensation mechanism of cultivated land protection under the background of rehabilitation system[J]. Journal of Zhengzhou University (Philosophy and Social Sciences Edition), 2020, 53(3): 27-31, 127.
- [7] 洪顺发, 郭青海, 李达维. 基于生态足迹理论的中国生态供需平衡时空动态[J]. 资源科学, 2020, 42(5): 980-990.
Hong S F, Guo Q H, Li D W. Spatiotemporal dynamics of ecological supply and demand based on ecological footprint theory[J]. Resources Science, 2020, 42(5): 980-990.
- [8] 张俊峰, 贺三维, 张光宏, 等. 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, 41(12): 120-132.
Zhang J F, He S W, Zhang G H, et al. Ecological benefit, spatial spillover and fiscal transfer of farmland in watershed: Evidence from the Yangtze River economic belt[J]. Issues in Agricultural Economy, 2020, 41(12): 120-132.
- [9] 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, 23(5): 911-919.
Xie G D, Zhen L, Lu C X, et al. Expert knowledge based valuation method of ecosystem services in China[J]. Journal of Natural Resources, 2008, 23(5): 911-919.
- [10] Wang L Y, Ke X L, Abu Hatab A. Trade-offs between economic benefits and ecosystem services value under three cropland protection scenarios for Wuhan city in China[J]. Land, 2020, 9(4): 117.
- [11] 任平, 洪步庭, 马伟龙, 等. 基于IBIS模型的耕地生态价值估算——以成都崇州市为例[J]. 地理研究, 2016, 35(12): 2395-2406.
Ren P, Hong B T, Ma W L, et al. Ecological value estimation of cultivated land based on the IBIS model: A case study of Chongzhou city[J]. Geographical Research, 2016, 35(12): 2395-2406.
- [12] 汤进华, 陈志, 朱俊成, 等. 武汉城市圈耕地资源生态服务价值核算[J]. 中国农学通报, 2015, 31(4): 237-244.
Tang J H, Chen Z, Zhu J C, et al. Evaluation on ecological service value of arable land resource in Wuhan city circle[J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2015, 31(4): 237-244.
- [13] 唐秀美, 潘瑜春, 刘玉. 北京市耕地生态价值评估与时空变化分析[J]. 中国农业资源与区划, 2018, 39(3): 132-140.
Tang X M, Pan Y C, Liu Y. Evaluation and spatio-temporal analysis of ecological value of cultivated land in Beijing[J]. Chinese Journal of Agricultural Resources and Regional Planning, 2018, 39(3): 132-140.
- [14] 刘利花, 张丙昕, 刘向华. 粮食安全与生态安全双视角下中国省域耕地保护补偿研究[J]. 农业工程学报, 2020, 36(19): 252-263.
Liu L H, Zhang B X, Liu X H. Compensation of provincial cultivated land protection in China from the dual perspectives of food security and ecological security[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2020, 36(19): 252-263.
- [15] 俞奉庆, 蔡运龙. 耕地资源价值探讨[J]. 中国土地科学, 2003, 17(3): 3-9.
Yu F Q, Cai Y L. A new insight of cultivated land resource value[J]. China Land Science, 2003, 17(3): 3-9.
- [16] Wang K P, Ou M H, Wolde Z. Regional differences in ecological compensation for cultivated land protection: An analysis of Chengdu, Sichuan Province, China[J]. International Journal of Environmental Research and Public Health, 2020, 17(21): 8242.
- [17] 唐建, 沈田华, 彭珏. 基于双边界二分式CVM法的耕地生态价值评价——以重庆市为例[J]. 资源科学, 2013, 35(1): 207-215.
Tang J, Shen T H, Peng J. Appraisal of the ecological value of cultivated land based on double-bounded contingent valuation methods[J]. Resources Science, 2013, 35(1): 207-215.
- [18] 石飞, 杨庆媛, 王成, 等. 基于耕地能值-生态足迹的耕地休耕规模研究——以贵州省松桃县为例[J]. 生态学报, 2021, 41(14): 5747-5763.
Shi F, Yang Q Y, Wang C, et al. Scale of the cultivated land fallow based on the emergy-ecological footprint in Songtao County, Guizhou Province, China[J]. Acta Ecologica Sinica, 2021, 41(14): 5747-5763.
- [19] 苏娇萍, 李智国. 基于改进生态足迹模型的云南省耕地可持续利用研究[J]. 云南农业大学学报(自然科学), 2021, 36(1): 124-131.
Su J P, Li Z G. Research on the sustainable utilization of cultivated land based on improved ecological footprint model in Yunnan Province[J]. Journal of Yunnan Agricultural University (Natural Science), 2021, 36(1): 124-131.
- [20] 施开放, 刁承泰, 孙秀锋, 等. 基于耕地生态足迹的重庆市耕地生态承载力供需平衡研究[J]. 生态学报, 2013, 33(6): 1872-1880.
Shi K F, Diao C T, Sun X F, et al. Ecological balance between supply and demand in Chongqing City based on cultivated land ecological footprint method[J]. Acta Ecologica Sinica, 2013, 33(6): 1872-1880.
- [21] 刘某承, 李文华. 基于净初级生产力的中国各地生态足迹均衡因子测算[J]. 生态与农村环境学报, 2010, 26(5): 401-406.
Liu M C, Li W H. Calculation of equivalence factor used in ecological footprint for China and its provinces based on net primary production[J]. Journal of Ecology and Rural Environment, 2010, 26(5): 401-406.
- [22] 郭慧, 董士伟, 吴迪, 等. 基于生态系统服务价值的生态足迹模型均衡因子及产量因子测算[J]. 生态学报, 2020, 40(4): 1405-1412.
Guo H, Dong S W, Wu D, et al. Calculation and analysis of

- equivalence factor and yield factor of ecological footprint based on ecosystem services value[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2020, 40(4): 1405-1412.
- [23] 靳亚亚, 柳乾坤, 李陈. 基于改进三维生态足迹模型的耕地承载力评价——以江苏省为例 [J]. *中国土地科学*, 2020, 34(9): 96-104.
Jin Y Y, Liu Q K, Li C. Evaluation of cultivated land carrying capacity based on an improved three-dimension ecological footprint model: A case study of Jiangsu Province[J]. *China Land Science*, 2020, 34(9): 96-104.
- [24] 钱凤魁, 徐欢, 逢然然, 等. 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, et al. 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.
- [25] 张皓玮, 方斌, 魏巧巧, 等. 区域耕地生态价值补偿量化模型构建——以江苏省为例 [J]. *中国土地科学*, 2015, 29(1): 63-70.
Zhang H W, Fang B, Wei Q Q, et al. Building quantitative model of ecological value compensation for regional arable land: A case study of Jiangsu Province[J]. *China Land Sciences*, 2015, 29(1): 63-70.
- [26] 张显源, 蔡忠亮, 李桂娥, 等. 耕地景观破碎化成因及对农村收入影响分析 [J]. *测绘科学*, 2020, 45(4): 134-141.
Zhang X Y, Cai Z L, Li G E, et al. Assessment of determinants of cultivated land fragmentation and its impacts on rural income[J]. *Science of Surveying and Mapping*, 2020, 45(4): 134-141.
- [27] 张彭, 张超, 李春泽, 等. 基于地形的耕地破碎度指数设计与应用 [J]. *中国农业大学学报*, 2022, 27(9): 226-236.
Zhang P, Zhang C, Li C Z, et al. Design and application of cultivated land fragmentation index based on terrain[J]. *Journal of China Agricultural University*, 2022, 27(9): 226-236.
- [28] 苏浩, 吴次芳. 基于“三生”功能的黑土区耕地资源价值影响因素分析——以黑龙江省克山县为例 [J]. *中国土地科学*, 2020, 34(9): 77-85.
Su H, Wu C F. Analysis of the influencing factors of the cultivated land resources value in black soil region based on the production-living-ecological functions: A case study in Keshan County, Heilongjiang Province[J]. *China Land Science*, 2020, 34(9): 77-85.
- [29] 许多艺, 濮励杰, 黄思华, 等. 江苏省耕地多功能时空动态分析及对耕地数量变化响应研究 [J]. *长江流域资源与环境*, 2022, 31(3): 575-587.
Xu D Y, Pu L J, Huang S H, et al. Spatial and temporal dynamic analysis of cultivated land multifunction in Jiangsu Province and its response to cultivated land change[J]. *Resources and Environment in the Yangtze Basin*, 2022, 31(3): 575-587.
- [30] 李明琦, 刘世梁, 武雪, 等. 云南省农田生态系统碳足迹时空变化及其影响因素 [J]. *生态学报*, 2018, 38(24): 8822-8834.
Li M Q, Liu S L, Wu X, et al. Temporal and spatial dynamics in the carbon footprint and its influencing factors of farmland ecosystems in Yunnan Province[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2018, 38(24): 8822-8834.

(责任编辑: 孟岑)