

吉林省辽河流域耕地的生态补偿主体及差异化补偿标准

王盼盼¹, 鄂施璇², 张文琦³

(1.沈阳建筑大学 管理学院, 辽宁 沈阳 110168;

2.重庆工商大学 公共管理学院, 重庆 400067; 3.吉林农业大学 经济管理学院, 吉林 长春 130118)

摘要: [目的] 明确流域及流域内各区域耕地生态价值空间分异特征, 建立差异化的耕地生态补偿标准测算模型, 完善耕地保护生态补偿机制, 为流域耕地保护生态补偿政策的制定及实施提供参考依据。[方法] 以吉林省辽河流域为例, 界定耕地生态补偿支付主体及受偿主体, 分析流域耕地生态价值空间差异, 在此基础上, 衡量耕地生态外溢效益及边界, 结合区域耕地资源禀赋、社会经济发展阶段等关键因素, 建立差别化耕地生态补偿标准测算模型, 制定研究区耕地生态补偿标准及额度。[结果] ①2020年, 流域耕地整体存在生态盈余, 属于耕地生态受偿区。流域范围内, 除铁西区、龙山区及西安区属于耕地生态支付区。其他区域耕地生态服务可持续性良好, 对区域内的耕地生态消耗具有较强的承载作用, 均属于耕地生态受偿区。②流域耕地具有重要的生态价值, 且空间差异显著。流域耕地生态外溢价值达 8.73×10^9 元, 为其他区域提供了重要的生态产品及服务。流域范围内, 公主岭市和梨树县是主要的耕地生态价值外溢区。③流域耕地生态补偿标准为 5191.16 元/hm², 总受偿额度为 5.98×10^9 元, 各区域间由于耕地生态价值、耕地生态盈亏面积、耕地保护责任及发展阶段等差异, 其补偿标准及额度差异较大。[结论] 判别耕地生态补偿相关利益主体, 确定耕地生态外溢效益, 考虑空间尺度及地区实际, 进行差异化耕地生态补偿, 可以完善耕地生态补偿机制, 提高生态补偿的有效性。

关键词: 耕地生态补偿; 补偿标准; 补偿主体; 差异化; 辽河流域

文献标识码: B

文章编号: 1000-288X(2024)03-0171-09

中图分类号: F301.21

文献参数: 王盼盼, 鄂施璇, 张文琦. 吉林省辽河流域耕地的生态补偿主体及差异化补偿标准[J]. 水土保持通报, 2024, 44(3): 171-179. DOI: 10.13961/j.cnki.stbctb.2024.03.018; Wang Panpan, E Shixuan, Zhang Wenqi. Ecological compensation subject and differentiated compensation standards of cultivated land in Liaohe River basin of Jilin Province [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2024, 44(3): 171-179.

Ecological Compensation Subject and Differentiated Compensation Standards of Cultivated Land in Liaohe River Basin of Jilin Province

Wang Panpan¹, E Shixuan², Zhang Wenqi³

(1. School of Management, Shenyang Jianzhu University, Shenyang, Liaoning 110168, China;

2. School of Public Management, Chongqing Technology and Business University, Chongqing 400067,

China; 3. School of Economics and Management, Jilin Agricultural University, Changchun, Jilin 130118, China)

Abstract: [Objective] The spatial differentiation characteristics of the ecological value of cultivated land in river basins and regions within river basins were clarified, and a differential calculation model of the ecological compensation standard for cultivated land was established to improve the ecological compensation mechanism for cultivated land protection, in order to provide a reference for the formulation and implementation of ecological compensation policies for cultivated land protection in river basins. [Methods] The payers and beneficiaries of ecological compensation for cultivated land was defined, and the spatial differences in the ecological value of cultivated land in Liaohe River basin in Jilin Province were analyzed. On this basis, the ecological spillover benefits and boundaries of cultivated land were measured. Based on key

收稿日期: 2023-10-10

修回日期: 2023-12-11

资助项目: 国家自然科学基金项目“基于耕地‘三位一体’保护的流域多尺度耕地保护生态补偿研究”(42101260)

第一作者: 王盼盼(1992—), 女(汉族), 黑龙江省嫩江市人, 博士, 副教授, 主要从事耕地保护、国土空间规划与管理方面的研究。Email: panpan@sjzu.edu.cn.

通信作者: 鄂施璇(1987—), 女(汉族), 黑龙江省鸡西市人, 博士, 副教授, 主要从事土地利用与管理方面的研究。Email: eshixuan@ctbu.edu.cn.

factors such as regional cultivated land resource endowment and socio-economic development stage, a differentiated ecological compensation standard calculation model for cultivated land was established, and the ecological compensation standards and quotas for cultivated land in the research area were formulated. [Results] ① In 2020, there was an overall ecological surplus in the cultivated land of the research area, which belongs to the ecological compensation area. Except for Tiexi District, Longshan District, and Xi'an District, which belong to the cultivated land ecological payment area, the sustainability of cultivated land ecological services in other areas was good, and they had a strong carrying effect on the ecological consumption of cultivated land in the region, all of which belong to the cultivated land ecological compensation area. ② The cultivated land in the research area had an important ecological value, and its spatial differences were significant. The ecological spillover value of cultivated land reached 8.732 billion yuan, providing important ecological products and services for other regions, among which Gongzhuling City and Lishu County were the main areas of ecological spillover value of cultivated land. ③ The ecological compensation standard for cultivated land in the research area was 5 191.16 yuan/ha, with a total compensation amount of 5.976 billion yuan. Due to differences in ecological value, ecological profit and loss area, protection responsibility, and development stage of cultivated land, there were significant differences in compensation standards and amounts among different regions. [Conclusion] The research results scientifically identified the relevant stakeholders of ecological compensation for cultivated land and determined the ecological spillover benefits of cultivated land while considering spatial scale and regional reality, thereby achieving differentiated ecological compensation for cultivated land. The significance of the study is that it improves the mechanism of ecological compensation for cultivated land and enhances ecological compensation.

Keywords: ecological compensation of cultivated land; compensation standards; compensation subject; differentiation; Liaohe River basin

随着人们对耕地生态功能认知的不断深化,国内外学者对耕地生态保护等相关问题的研究也在不断拓展。目前,针对耕地保护生态补偿的研究主要集中在耕地生态价值的量化、生态补偿责任主体的认定、生态外溢价值的衡量、补偿标准及补偿机制的制定等方面。关于耕地生态价值量化等研究,大多基于耕地生态系统服务理论,采用当量因子法,或在当量因子法基础上进行适当修正及改进,测算耕地生态价值^[1-3];部分研究采用非市场技术,结合问卷调查,对区域内城乡居民进行耕地生态功能认知、耕地生态补偿支付意愿及受偿意愿等相关调查,进而量化耕地保护生态价值^[4-5];或采用市场替代法,针对耕地的气体调节、净化环境、涵养水源等多功能,对各项功能找到其可替代的市场价值,进而估算耕地的生态价值^[6-7]。耕地生态价值量化目前还未形成统一的测算方法或体系。关于耕地生态补偿主体划定的研究,多从粮食安全^[8]、生态安全^[9]、虚拟耕地^[10-11]或粮食安全与生态安全相结合^[12-13]等视角,衡量耕地的供给与需求,以供需差异作为判定其利益主体的依据。在耕地生态补偿标准制定等方面,多以耕地生态价值及耕地供需差异为基础,引入耕地生态超载指数^[14]、社会经济

发展程度、人民生活水平^[15]、耕地保护事权与财权^[16]等指标,对其进行修正的基础上,制定耕地生态补偿标准。或考虑耕地保护的机会损失成本,以耕地转化成建设用地带来的收益,包括土地出让金及各项税收来确定其补偿标准^[17]。

界定生态补偿的利益相关主体,确定耕地生态价值外溢量,制定补偿标准是耕地生态补偿的关键核心内容。另外,耕地生态补偿具有明显的空间差异特征及尺度依赖效应^[18],受多种因素影响,诸如耕地生态功能的认知水平、社会经济发展速度、地方耕地保护责任、政府支付能力或意愿等^[15,19],忽略地区差异及空间尺度的特征,会降低耕地生态补偿的有效性和针对性,造成耕地生态效益的损失。因此,充分考虑以上相关因素,建立差别化的耕地生态补偿标准,是完善耕地生态补偿机制,提高生态补偿效率的关键。

本研究以吉林省辽河流域为例,在界定耕地保护生态补偿责任主体的基础上,综合考虑耕地生态服务正向与负向价值,明确流域及流域内各区域耕地生态价值空间分异特征,衡量流域耕地生态外溢价值及边界,结合地区耕地资源禀赋条件、发展财权能力及社会经济发展阶段等因素,建立差异化的耕地生态补偿标准测算模型,制定流域及各区域耕地生态补偿标准

及额度,完善耕地保护生态补偿机制,相关研究成果可以为流域耕地保护生态补偿政策的制定及实施提供参考依据。

1 研究区概况与数据来源

1.1 研究区概况

吉林省辽河流域位于整个辽河流域上游,处于吉林省东南部(图1),主要包括东辽河、西辽河、招苏台河、条子河等,涉及长春市、四平市、辽源市3个地级市,下辖东辽县、西安区、龙山区、双辽市、梨树县、伊通县、铁西区、铁东区和公主岭市9个县(市、区)。地势由东南向西北缓降,东南部为低山丘陵地带,中西部为起伏的台地和平缓的平原区。流域国土面积1.7万 km^2 ,耕地面积占国土面积的65%以上,是全国重要的优质商品粮基地和吉林省重要的菜篮子产品生产供应基地,在保障区域粮食安全及生态安全中占据重要地位。由于流域汇水范围内耕地面积占比较大,有机肥使用量相对较少,农药化肥随地表径流冲刷或农田退水进入河流,对水体水质造成影响。且流域范围内普遍存在水资源短缺、土地退化、水土流失严重等问题,对农业生产和粮食安全造成一定威胁。

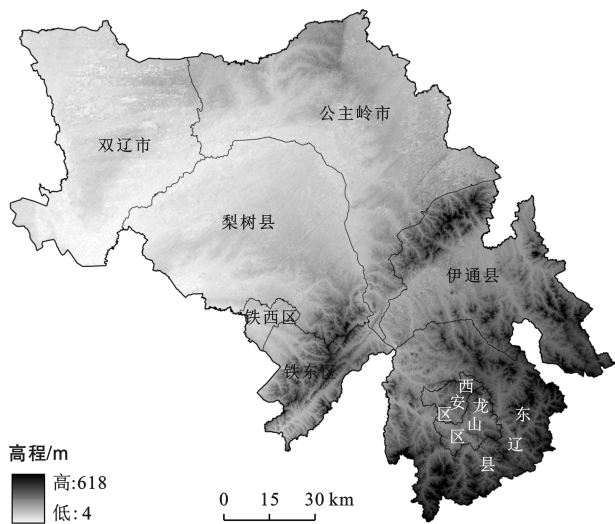


图1 吉林省辽河流域地形与区划图

Fig.1 Topography and zoning map of Liaohe River basin in Jilin Province

1.2 数据来源

本研究选取稻谷、小麦、玉米、豆类和薯类五种粮食作物参与研究区耕地生态价值及补偿标准计算,研究区各粮食作物的粮食产量、播种面积、农药、化肥、农膜使用量、农业机械总动力、总人口、耕地面积、人均GDP、人均财政支出、城镇居民恩格尔系数、农村居民恩格尔系数、农业用水量及耗水率等数据均来自于《中国农村统计年鉴》《吉林省统计年鉴》《辽源市统

计年鉴》《四平市统计年鉴》及各县(市、区)国民经济与社会发展统计公报、水资源公报、环境公报等。粮食作物市场价格、农药化肥市场价格等来源于《中国农产品价格调查年鉴》和《全国农产品成本收益资料汇编》,以上相关数据年份均为2020年。各县(市、区)的耕地质量等别来源于2018年农用地分等定级成果,全国的平均质量等别来源于全国耕地质量等别更新评价成果。

2 研究思路与方法

2.1 耕地保护生态补偿主体划分

2.1.1 耕地生态足迹及承载力 根据外部性理论及公共物品理论,耕地作为特殊的生态空间具有显著的外部性,且其外部效益具有跨区域的特征及非排他性和非竞争性的特点,导致耕地生态保护的受益主体与责任主体之间时常错位。识别耕地生态补偿主体,界定耕地生态补偿的受益方与责任方,是进行耕地保护生态补偿的前提。本研究基于生态足迹模型,从区域耕地生态的供给与需求角度出发,计算耕地生态足迹与耕地生态承载力,判定耕地生态盈余/赤字,作为衡量耕地生态受偿区与支付区的依据。在计算耕地生态足迹时,将耕地生态足迹分为耕地生物生产性足迹及碳足迹。生物生产性足迹是指人类为满足最基本的食物性需求,基于不同农作物的人均消费量及平均生产力而计算的耕地生态需求量。采用碳足迹模型核算人类破坏性行为而产生的“副产品”对耕地资源的占用与消耗。为避免直接将二者之和作为耕地生态足迹而造成重复计算的问题,引入平衡因子修正碳足迹结果。计算公式为:

$$ef = ef_1 + \omega \times cb \quad (1)$$

$$ec = P \times \gamma \times \beta \times \eta \times 0.88 \quad (2)$$

式中:ef代表耕地生态足迹(hm^2);ec代表耕地生态承载力(hm^2); ef_1 代表耕地生物生产性足迹(hm^2);cb代表耕地碳足迹(hm^2); ω 代表平衡因子,取值为0.5; P 代表区域总人口(10^4 人); γ 代表耕地均衡因子,参考刘某某等^[20]研究,吉林省耕地均衡因子采用基于净初级生产力的测算结果,取值为1.09; β 代表耕地产量因子,采用不同农作物的平均产量与全国平均产量的比值,结合农作物播种面积的比例做线性加权处理求取; η 代表人均生物生产性耕地面积($\text{hm}^2/\text{人}$)。

其中,耕地生物生产性足迹的计算公式如下:

$$ef_1 = P \times \sum_{i=1}^n \gamma_i \times \frac{c_i}{s_i} \quad (3)$$

式中: c_i 代表*i*类农作物人均消费量($\text{kg}/\text{人}$); s_i 代

表 i 类农作物全国平均生产力 (kg/hm^2)。

碳足迹的计算公式为:

$$cb = \frac{eb_1}{eb_2} \quad (4)$$

$$eb_1 = \sum_{j=1}^n \theta_j \times B_j \quad (5)$$

$$eb_2 = \sum_{i=1}^n [t_i \times w_i \times (1-d_i) \times (1+g_i)] / \pi_i / A \quad (6)$$

式中: eb_1 代表耕地碳排放量 (kg); eb_2 代表耕地固碳能力 (kg/hm^2); B_j 代表 j 类行为的用量, 本研究选取耕地利用过程中化肥、农药、农膜的使用、灌溉、农业机械耕作及农作物种植 6 种行为计算耕地碳释放量; θ_j 代表 j 类行为的碳排放系数, 参考农田生态系统的碳排放计算^[21], 以上农业利用行为的碳排放系数分别为 0.89, 4.93, 5.18 kg/kg , 266.48 kg/hm^2 , 0.18 kg/kW 及 16.47 kg/hm^2 ; t_i 代表农作物 i 的含碳率 (%); w_i 代表农作物 i 的产量 (kg); d_i 代表农作物 i 的水分系数 (%); g_i 代表农作物 i 的根冠比系数; π_i 代表农作物 i 的经济系数, 具体参数见表 1。

表 1 农作物碳吸收量相关系数

Table 1 Correlation coefficient of crop carbon absorption

农作物	含碳量/%	水分系数/%	根冠比	经济系数
玉米	46.4	12.2	0.16	0.46
水稻	41.7	11.9	0.6	0.49
小麦	47.1	11.7	0.4	0.36
薯类	43.3	77.1	0.18	0.68
大豆	44.5	15	0.13	0.38

2.1.2 耕地生态超载指数 耕地生态超载指数是耕地生态承载力与耕地生态足迹之差占耕地生态承载力的比值, 反映耕地生态盈亏程度, 用以测算耕地生态补偿量。计算公式为:

$$R = \frac{ec - ef}{ec} \quad (7)$$

式中: R 代表耕地生态超载指数。当 $R = 0$ 时, 区域耕地生态消耗与供给维持平衡状态; 当 $R > 0$ 时, 区域耕地生态利用维持在其承载能力范围内, 其值越大, 耕地生态盈余程度越高; 当 $R < 0$ 时, 区域耕地生态利用过度, 其绝对值越大, 耕地生态超载程度越高。

2.2 耕地生态外溢价值

在确定耕地生态补偿主体的基础上, 衡量区域耕地生态外溢量, 是进行差异化耕地生态补偿的关键。耕地生态外溢价值为耕地生态服务价值与耕地生态超载指数相乘而得。计算公式为:

$$esv = LES \times A \times \frac{ec - ef}{ec} \quad (8)$$

式中: esv 代表耕地生态外溢量 (元); LES 代表单位

耕地生态服务净价值 (元/ hm^2); A 代表区域耕地面积 (hm^2)。若该区域耕地生态处于超载状态, 则耕地生态外溢价值为负, 表明其耕地生态服务不能满足本区域需求, 需额外占用其他区域的耕地生态效益; 若该区域耕地生态处于盈余状态, 则耕地生态外溢价值为正, 表明耕地生态服务不仅可以满足本区域的需求, 同时为其他区域提供了额外的生态产品。

2.2.1 单位耕地生态服务净价值 (LES) 耕地作为特殊的生态系统, 具有净化土壤、保护生物多样性等多种生态服务功能, 作为耕地生态服务的正向价值。同时, 耕地利用过程中化肥、农药等化学制品的使用, 会带来耕地生态的负外部性, 使其产生负向价值。单位耕地生态服务净价值 (LES) 为耕地生态服务正向价值减去耕地生态服务负向价值。计算公式为:

$$LES = AE - nee \quad (9)$$

式中: AE 代表单位耕地生态服务正向价值 (元/ hm^2); nee 代表耕地生态负面价值 (元/ hm^2)。

2.2.2 单位耕地生态服务正向价值 单位耕地生态服务正向价值 (AE) 采用当量因子法, 同时考虑耕地质量差异的影响, 采用耕地质量水平修正耕地生态服务正向价值。计算公式为:

$$AE = f \times E_a \times \varphi \quad (10)$$

$$E_a = \frac{1}{7} \sum_{i=1}^n \frac{l_i \times q_i \times p_i}{L} \quad (11)$$

$$\varphi = \sum_{j=1}^n \frac{A_j}{A} \times \frac{100(n-j)}{n} / N \quad (12)$$

式中: E_a 代表单位生物当量因子值 (元/ hm^2); 耕地生态系统的 9 种服务功能价值当量总计 7.9, 但食物生产及原材料生产的两种功能价值已在市场中体现, 因此, 剔除该部分价值后, 仅计算不能被市场衡量的价值当量, f 取值为 6.51; φ 代表耕地质量水平修正系数; l_i , q_i 和 p_i 分别代表农作物 i 的播种面积 (hm^2)、单产 (kg/hm^2) 及单价 (元/ kg); L 代表区域农作物总播种面积 (hm^2); i 为农作物类型, 主要包括稻谷、玉米、小麦、豆类及薯类五种粮食作物; A_j 和 A 分别代表区域 j 等耕地的面积及区域耕地总面积 (hm^2); N 代表全国耕地的平均等别; n 为耕地等别, 根据农用地分等定级成果, 全国耕地共分为 15 等。

2.2.3 单位耕地生态服务负向价值 耕地生态服务负向价值 (nee) 主要包括过量使用农药、化肥、农膜造成的环境污染, 以及农业水资源过量消耗等。本研究采用市场替代法计算以上农业生产方式产生的生态负向价值, 计算公式为:

$$nee = (nee_1 + nee_2 + nee_3 + nee_4) / A \quad (13)$$

$$nee_1 = pf_1 \times (1-x) \times P_1 \quad (14)$$

$$nee_2 = pf_2 \times (1-y) \times P_2 \quad (15)$$

$$nee_3 = \partial \times \epsilon \times P_3 \times Q \times M \quad (16)$$

$$nee_4 = G \times \mu \times P_4 \quad (17)$$

式中: nee_1, nee_2, nee_3 和 nee_4 分别代表耕地利用过程中农药、化肥、农膜及农业耗水产生的耕地生态负向价值(元); pf_1 和 pf_2 分别代表农药和化肥使用量(kg); P_1, P_2, P_3 和 P_4 分别代表农药市场价格(元/kg)、化肥市场价格(元/kg)、粮食市场价格(元/kg)和水库蓄水成本(元/m³); x, y, ∂, ϵ 和 μ 分别代表农药利用率(%), 化肥利用率(%), 农膜残留比率(%), 粮食损失率(%) 和农业耗水率(%); Q, M 和 G 分别为农膜覆盖面积(hm²)、粮食市场价格(元/kg)和农业用水量(m³)。研究区涉及的农药利用率、化肥利用率、农膜残留比率、粮食损失率、水库的蓄水成本参考刘利花等^[12]针对耕地生态补偿的相关研究而定,其取值分别为34.17%, 35.00%, 41.70%, 10.00%和1.17元/m³。

2.3 差异化耕地生态补偿标准

耕地生态补偿标准及制度若采用“一刀切”的方式,会降低补偿标准在区际及区间分配的合理性。各地方政府因耕地保护责任的不同,利益也不同。承担过多耕地保护责任,会抑制区域产业结构转型与发展,发展财权受限。相比之下,承担耕地保护责任较少的区域具备更多的发展机会。耕地保护生态补偿作为实现区域统筹协调发展的重要手段,应充分考虑区域耕地保护事权的责任及发展财权的能力。此外,由于区域社会发展阶段及经济发展速度的不同,人们对耕地生态功能的认知及支付意愿存在较大差异。因此,为将以上因素纳入到耕地生态补偿中,本研究以区域耕地生态外溢量为基础,综合考虑区域社会发展阶段、经济发展差异、耕地保护事权及耕地发展财权等对耕地生态补偿的影响,针对不同空间尺度及区域差异,建立耕地生态补偿标准测算模型。将流域作为一个整体来考虑,在流域尺度下,耕地保护生态补偿标准计算公式为:

$$ecs_r = \begin{cases} esv_r \times \frac{1}{1+e^{-v}} \times \frac{gdp_r}{gdp_{r0}} \times \frac{alpr_r}{alpr_{r0}} / A_r & (esv_r > 0) \\ esv_r \times \frac{1}{1+e^{-v}} \times \frac{gdp_r}{gdp_{r0}} \times \frac{alpf_r}{alpf_{r0}} / A_r & (esv_r < 0) \end{cases} \quad (18)$$

式中: ecs_r 代表流域耕地生态补偿标准(元/hm²); esv_r 代表流域整体耕地生态外溢量(元); v 代表城镇居民与农村居民的综合恩格尔系数; gdp_r 代表流域人均 GDP(元/人); gdp_{r0} 代表全国人均 GDP(元/人); $alpr_r$ 和 $alpf_r$ 分别代表流域耕地保护事权和耕地发展

财权; $alpr_{r0}$ 和 $alpf_{r0}$ 分别代表全国耕地保护事权和耕地发展财权; A_r 代表流域耕地面积(hm²)。其中,耕地保护事权采用人均耕地保有面积(hm²/人)进行表征,耕地发展财权采用人均财政支出(元/人)进行表征。

在流域范围内,耕地保护生态补偿标准计算公式为:

$$ecs_i = \begin{cases} esv_i \times \frac{1}{1+e^{-v}} \times \frac{gdp_i}{gdp_{i0}} \times \frac{alpr_i}{alpr_r} / A_i & (esv_i > 0) \\ esv_i \times \frac{1}{1+e^{-v}} \times \frac{gdp_i}{gdp_{i0}} \times \frac{alpf_i}{alpf_r} / A_i & (esv_i < 0) \end{cases} \quad (19)$$

式中: ecs_i 代表流域内区域耕地生态补偿标准(元/hm²); esv_i 代表流域内区域耕地生态外溢量(元); gdp_i 代表区域人均 GDP(元/人); gdp_{i0} 代表流域范围内各区域人均 GDP 的最大值(元/人); $alpr_i$ 和 $alpf_i$ 分别代表区域耕地保护事权与发展财权; A_i 代表区域耕地面积(hm²)。

3 结果与分析

3.1 耕地生态补偿主体及超载指数分析

根据生态足迹模型及生态超载指数计算公式,得到吉林省辽河流域耕地生态足迹、承载力、耕地生态赤字/盈余量及耕地生态盈亏程度,将耕地保护生态补偿责任主体划分为支付区与受偿区(表2)。根据结果可知,流域耕地生态足迹及承载力分别为 5.32×10^5 hm², 1.39×10^6 hm², 整体处于生态盈余状态,耕地生态盈余量为 8.61×10^5 hm², 耕地生态盈余指数为 0.618 0, 供给明显高于需求,属于耕地生态受偿区。

流域范围内,耕地生态足迹与耕地生态承载力在空间分布上具有一致性的特征,一般耕地生态足迹较大的区域,耕地生态承载力也较大。各区域的耕地生态足迹及承载力相差较悬殊,流域内大部分区域耕地存在生态盈余,而铁西区、龙山区及西安区的耕地存在生态赤字,赤字量分别为 -1.04×10^4 , -1.00×10^4 和 -2.40×10^3 hm², 且铁西区与龙山区均已达到严重超载的状态,其耕地生态超载指数分别为 $-1.210 0$ 和 $-1.192 3$, 代表其耕地生态需求量是其可供量的 2 倍以上,耕地生态服务不能满足本区域内的需求,可持续性差,对其他区域进行了占用与消耗,理应作为流域内耕地生态的支付区,对受偿区进行相应的生态补偿。公主岭市、梨树县、铁东区、伊通县、双辽市及东辽县耕地均存在生态盈余,作为流域范围内耕地生态补偿的受偿区。耕地生态盈余最大的是公主岭市,盈余量为 2.91×10^5 hm², 其次为

梨树县,盈余量为 $2.31 \times 10^5 \text{ hm}^2$,从各区域盈余量占总盈余量的比例来看,公主岭市和梨树县是流域耕地生态盈余的主要贡献区域,其盈余量占流域盈余量的

60.64%。除铁东区外,其他盈余区域的耕地生态盈余指数均大于 0.6,表明其耕地生态服务可持续性良好,对区域内的耕地生态消耗具有较强的承载作用。

表 2 吉林省辽河流域耕地生态足迹及承载力

Table 2 Ecological footprint and carrying capacity of cultivated land in Liaohe River basin of Jilin Province

地区	耕地产量因子	生物生产性足迹/ 10^4 hm^2	碳足迹/ 10^4 hm^2	耕地生态足迹/ 10^4 hm^2	耕地生态承载力/ 10^4 hm^2	耕地生态赤字与盈余比/ 10^4 hm^2	耕地生态盈亏程度	支付类型
铁西区	1.161 6	1.79	0.20	1.90	0.86	-1.04	-1.210 0	支付区
铁东区	1.157 5	1.68	0.40	1.88	3.17	1.28	0.405 6	受偿区
梨树县	1.316 9	12.90	2.58	14.19	37.26	23.07	0.619 1	受偿区
伊通县	1.361 7	4.49	1.54	5.26	15.76	10.50	0.666 3	受偿区
公主岭市	1.355 1	14.11	3.37	15.79	44.91	29.12	0.648 4	受偿区
双辽市	1.173 2	5.94	2.08	6.98	21.68	14.70	0.677 9	受偿区
龙山区	0.996 4	1.76	0.17	1.85	0.84	-1.00	-1.192 3	支付区
西安区	0.996 8	0.73	0.15	0.80	0.56	-0.24	-0.430 2	支付区
东辽县	1.142 4	3.98	1.15	4.55	14.24	9.68	0.680 2	受偿区
辽河流域	—	47.38	11.65	53.20	139.27	86.07	0.618 0	受偿区

3.2 耕地生态价值及外溢价值分析

根据耕地生态价值核算模型,得到 2020 年研究区耕地生态正向、负向及净价值(表 3)。2020 年,吉林省辽河流域单位面积耕地生态净价值为 $12\ 273.68 \text{ 元}/\text{hm}^2$,生态价值总量为 1.41×10^{10} 元,其耕地生态服务功能显著。其中,耕地生态正向价值为 $15\ 476.72 \text{ 元}/\text{hm}^2$,由

于农药化肥过度使用、农膜覆盖及农业耗水引起的流域耕地生态负向价值为 $3\ 203.04 \text{ 元}/\text{hm}^2$,占单位耕地生态净价值量的 21.13%。其中,化肥过量使用引起的负向价值是耕地生态负向价值的主要来源,其占负向价值的比例均在 70%以上,生产要素的投入不仅带来粮食产量的增加,同样会对耕地生态造成不良影响。

表 3 吉林省辽河流域耕地生态价值量及外溢效益

Table 3 Ecological value and spillover of cultivated land in Liaohe River basin of Jilin Province

区域	当量因子 价值量/ (元· hm^{-2})	耕地质量 修正系数	耕地生态 正向价值/ (元· hm^{-2})	化肥负向 价值/ (元· hm^{-2})	农药负向 价值/ (元· hm^{-2})	农膜负向 价值/ (元· hm^{-2})	农业耗水 负向价值/ (元· hm^{-2})	耕地生态 负向价值/ (元· hm^{-2})	单位耕地 生态净价值/ (元· hm^{-2})	生态 外溢量/ 10^8 元	生态价值/ 10^8 元	生态外溢 价值比例/ %
铁西区	2 228.88	0.98	14 219.83	2 148.16	126.92	0.65	414.71	2 690.44	11 529.39	-1.55	1.28	-121.00
铁东区	2 212.25	0.92	13 209.28	1 215.68	150.20	6.86	414.71	1 787.45	11 421.83	1.87	4.60	40.56
梨树县	2 720.33	1.08	19 202.24	2 894.71	130.08	7.13	414.71	3 446.63	15 755.61	24.48	39.53	61.91
伊通县	2 612.34	0.72	12 285.39	2 641.85	177.74	2.82	414.71	3 237.12	9 048.27	9.44	14.16	66.63
公主岭市	2 691.87	0.95	16 609.34	3 215.43	239.13	25.07	414.71	3 894.35	12 714.99	27.98	43.15	64.84
双辽市	2 443.36	0.80	12 801.37	2 056.52	103.28	2.64	414.71	2 577.16	10 224.21	14.94	22.03	67.79
龙山区	1 938.35	0.78	9 833.71	1 512.30	189.90	4.23	447.16	2 153.58	7 680.13	-0.98	0.82	-119.23
西安区	1 911.66	0.82	10 204.82	1 998.66	348.57	12.92	447.16	2 807.31	7 397.51	-0.27	0.64	-43.02
东辽县	2 208.51	1.01	14 496.74	1 816.61	217.46	8.39	447.16	2 489.61	12 007.13	9.66	14.20	68.02
辽河流域	2 578.78	0.92	15 476.72	2 593.85	173.98	10.42	424.79	3 203.04	12 273.68	87.32	141.30	61.80

从不同游段的耕地生态价值结果来看,流域上游区域的单位面积耕地生态净价值及生态负向价值分别为 $10\ 294.58, 2\ 752.38 \text{ 元}/\text{hm}^2$,中下游区域的单位面积耕地生态净价值及生态负向价值分别为 $12\ 975.77, 3\ 392.97 \text{ 元}/\text{hm}^2$,结合各区域耕地面积,流域中下游区域的耕地生态价值总量远高于上游区域,其占流域耕地总生态价值的比例分别为 75% 和 25%,达到

3:1 的比值。从各县(市、区)的耕地生态价值结果来看,梨树县单位面积耕地生态价值最大,价值为 $15\ 755.61 \text{ 元}/\text{hm}^2$,其次为公主岭市,价值为 $12\ 714.99 \text{ 元}/\text{hm}^2$,单位面积耕地生态价值最小的是西安区,价值为 $7\ 397.51 \text{ 元}/\text{hm}^2$ 。结合各区域耕地面积,公主岭市与梨树县的耕地生态价值总量占流域耕地生态价值总量的 58.52%,梨树县与公主岭市作为全国重要

的商品粮基地,其耕地不仅保障区域粮食安全,同样提供了重要的生态产品与服务价值。

结合耕地生态服务价值及耕地生态超载指数,得到研究区耕地生态外溢量。根据结果可知,流域耕地生态外溢量达 8.73×10^9 元,占流域耕地生态价值的比例为 61.80%,证明其有大部分的生态价值外溢到流域范围外的其他区域,为流域外的区域提供了相应的生态产品与服务。流域范围内,耕地生态外溢量最大的为公主岭市,其次为梨树县,外溢价值分别为 2.80×10^9 元和 2.45×10^9 元,其外溢价值占生态价值总量的比例均超过 60%,两者之和占流域总外溢量同样达到 60%,梨树县与公主岭市一直是耕地生态外溢价值的核心区域,在

流域范围内承担着更多的耕地生态保护责任,应作为耕地保护生态补偿的重点区域与优先区域。总体来看,流域耕地生态价值空间差异显著,外溢明显。

3.3 耕地生态补偿标准及补偿额度

在明确流域耕地生态补偿主体及耕地生态外溢价值的基础上,运用耕地生态补偿标准计算公式,得到研究区耕地保护生态补偿标准及额度(表 4)。由结果可知,充分考虑区域社会经济发展阶段的差异、耕地保护事权及发展财权,流域耕地生态补偿标准为 5 191.16 元/hm²,作为耕地生态补偿的受偿区,总受偿额度为 5.98×10^9 元。将流域作为一个整体,进行跨流域的耕地保护补偿,可以激发流域范围耕地保护的热情。

表 4 吉林省辽河流域耕地生态补偿标准及额度

Table 4 Ecological compensation standard and amount of cultivated land in Liaohe River basin of Jilin Province

地区	单位耕地生态价值/ (元·hm ⁻²)	生态外溢量/ 亿元	社会发展 补偿系数	经济发展 补偿系数	补偿系数	补偿额度/ 亿元	补偿标准/ (元·hm ⁻²)
铁西区	11 529.39	-1.55	0.572 0	0.687 1	0.103 6	-0.16	-1 444.94
铁东区	11 421.83	1.87	0.571 6	0.724 4	0.180 8	0.34	837.82
梨树县	15 755.61	24.48	0.575 7	0.642 3	0.498 0	12.19	4 857.78
伊通县	9 048.27	9.44	0.575 8	0.682 2	0.471 0	4.44	2 839.82
公主岭市	12 714.99	27.98	0.575 8	0.944 3	0.618 6	17.31	5 099.81
双辽市	10 224.21	14.94	0.574 4	0.757 6	0.652 7	9.75	4 523.99
龙山区	7 680.13	-0.98	0.570 4	1.000 0	0.178 0	-0.17	-1 630.31
西安区	7 397.51	-0.27	0.570 4	0.561 3	0.144 5	-0.04	-459.72
东辽县	12 007.13	9.66	0.576 0	0.851 3	0.603 4	5.83	4 928.65
辽河流域	12 273.68	87.32	0.574 4	0.366 8	0.684 4	59.76	5 191.16

公主岭市、梨树县和双辽市的耕地补偿标准为 5 099.81, 4 857.78, 4 523.99 元/hm², 受偿额度分别为 1.73×10^8 , 1.22×10^9 和 9.75×10^8 元, 流域中下游作为研究区耕地生态外溢价值的主要贡献区, 必然是耕地生态受偿额度较大的区域。由于其耕地保护责任和义务的不同, 耕地保护受偿的标准在流域范围内也存在较大的差异。东辽县、伊通县及铁东区的补偿标准分别为 4 928.65, 2 839.82, 837.82 元/hm²。铁东区耕地生态补偿标准最低, 由于其耕地保护事权相对于其他区域来说较低, 因此, 由耕地保护事权确定的补偿系数较小。耕地保护生态补偿的支付区域主要是铁西区、龙山区和西安区, 耕地生态超载程度较大, 应该主动承担本行政辖区外的耕地生态保护成本, 补偿标准分别为 -1 444.94, -1 630.31 和 -459.72 元/hm², 总支付额度分别为 1.60×10^7 , 1.70×10^7 和 4.00×10^6 元, 该部分区域的人均财政支出相比于流域整体的人均财政支出较小, 在补偿系数中, 针对于耕地发展财权的调整额度较大, 经调整后, 可以依据地区实际减少地方对于耕地补偿的财政压力, 提高耕地生态补偿实际可操作性。

4 讨论

针对耕地生态补偿的相关研究大多在耕地生态价值及耕地生态供需平衡分析的基础上^[3,9], 进行补偿标准及补偿额度的测算, 或以此为基础, 进行耕地生态补偿运行机制设计^[8,15]。本研究依据耕地生态供给与需求, 划分区域耕地生态补偿相关主体, 以耕地生态服务净价值及耕地生态超载指数判定耕地生态外溢量, 在此基础上, 充分考虑空间尺度及地区差异, 结合耕地资源禀赋条件、社会发展阶段等关键因素, 建立差别化的耕地生态补偿标准测算模型, 以期提高耕地生态补偿标准的精准度, 更加贴合地方实际, 促进耕地生态补偿政策的落地实施。由于吉林省对于耕地生态补偿还处于前期探索阶段, 尚未形成实践补偿标准, 对比刘利花等^[19]、崔宁波等^[8]等对于中国省域及东北地区耕地生态补偿的研究, 吉林省耕地生态补偿标准基本介于 3 919.44 与 5 429.19 元/hm² 之间, 本研究所测算的流域耕地生态补偿标准位于该区间内, 整体未脱离实际。

在确定耕地生态补偿主体的基础上, 针对耕地保

护补偿责任主体与受益主体之间如何实现财政转移的问题,若采用责任主体与受益主体自主协调的方式,其难度较大,协调成本较高,且受偿额度与支付额度之间的差额难以弥补。因此,可以通过建立中介平台等方式解决以上问题。采用中央直管平台对流域进行纵向耕地生态补偿,实现纵向财政转移。在流域及区县之间设置地市管理平台,由支付区县将补偿资金上缴到地市管理平台,纳入专项账户进行管理,由地市管理平台进行统筹和协调的基础上,确定受偿区县的受偿额度,并进行相应拨付,实现区县之间的横、纵向财政转移。

为保证耕地生态效益的发挥,应采取多种措施及手段提高耕地生态正向价值,减少耕地生态负向价值。耕地数量底线及质量提升是耕地生态价值的保障,加强耕地占补平衡、进出平衡、耕地非农化及非粮化等管理,遏制优质耕地锐减,坚决维护耕地红线及永久基本农田红线,通过高标准农田建设等措施,提升耕地生产能力。针对耕地利用过程中带来的水土流失、土地退化等环境问题,应合理减少农药、化肥等化学制品的使用,引入高效节水技术,解决农业耗水等问题,以农业绿色的生产方式代替其传统耕作模式,如有效推广“梨树模式”的保护性耕作方式,以作物秸秆覆盖免耕栽培为核心,包括机械收获与秸秆覆盖、免耕播种与施肥、轮作等技术环节。秸秆覆盖在地表,免耕播种减少对土壤的扰动,有利于土壤有机质的积累,同时保护土壤入渗能力,将更多的雨水蓄留在耕层,减少风及降水对土壤的侵蚀。该模式对于遏制黑土地退化,防风蚀水蚀,恢复黑土地的生态功能,保证耕地的可持续利用具有重要价值。

本研究针对耕地生态补偿主要关注的重点仍然是宏观尺度上责任主体划定、补偿标准量化等问题,但耕地生态补偿涉及农民及城镇居民等微观主体,农民作为耕地利用的直接主体,其耕地生态保护意识、生态耕种方式等会对耕地生态价值产生重要影响,且关于耕地生态补偿的资金来源、补偿方式、相关配套的保障政策等是建立耕地保护生态补偿机制的关键,以上将作为下一步的研究重点与方向。

5 结论

(1) 吉林省辽河流域耕地整体存在生态盈余,耕地生态盈余量为 $8.61 \times 10^5 \text{ hm}^2$,供给明显高于需求,应作为耕地生态受偿区接受相应补偿。流域范围内,除铁西区、龙山区及西安区存在耕地生态赤字,作为耕地生态支付区,其他区域均存在生态盈余,且根据耕地生态超载指数可知,大部分区域耕地生态服务可

持续性良好,对区域内的耕地生态消耗具有较强的承载作用。

(2) 2020年,吉林省辽河流域单位面积耕地生态净价值为 $12\,273.68 \text{ 元/hm}^2$,流域耕地具有重要的生态价值,且空间差异显著。流域耕地生态外溢价值达 $8.73 \times 10^9 \text{ 元}$,大部分的生态价值外溢到流域范围外,为其他区域提供了重要的生态产品及服务,流域范围内,公主岭市和梨树县作为主要的生态价值外溢区。

(3) 流域耕地生态补偿标准为 $5\,191.16 \text{ 元/hm}^2$,总受偿额度为 $5.98 \times 10^9 \text{ 元}$ 。由于其耕地保护责任与义务、发展财权、经济社会发展阶段的不同,耕地保护补偿标准在流域范围内也存在较大的差异,各县(市、区)补偿标准在 $-1\,630.31 \sim 5\,099.81 \text{ 元/hm}^2$,补偿额度在 $-1.70 \times 10^7 \sim 1.73 \times 10^9 \text{ 元}$ 。差异化的耕地生态补偿,可以提高其补偿的可操作性。

参考文献(References)

- [1] 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,2003,18(2):189-196.
Xie Gaodi, Lu Chunxia, Leng Yunfa, et al. Ecological assets valuation of the Tibetan Plateau [J]. Journal of Natural Resources, 2003,18(2):189-196.
- [2] 朱文娟,李建兵,高阳,等.基于经济—社会—生态价值的耕地价值量核算研究:以Y市为例[J].长江流域资源与环境,2022,31(9):2086-2095.
Zhu Wenjuan, Li Jianbing, Gao Yang, et al. Cultivated land value accounting based on economic-social-ecological value: A case study of Y City [J]. Resources and Environment in the Yangtze basin, 2022,31(9):2086-2095.
- [3] 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 Haowei, Fang Bin, Wei Qiaoqiao, 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.
- [4] 马爱慧,张安录.选择实验法视角的耕地生态补偿意愿实证研究:基于湖北武汉市问卷调查[J].资源科学,2013,35(10):2061-2066.
Ma Aihui, Zhang Anlu. Cultivated land ecological compensation willingness based on choice experiments [J]. Resources Science, 2013,35(10):2061-2066.
- [5] 葛颖,徐崇森,李坦.农户视角下耕地生态服务保护补偿意愿研究[J].云南农业大学学报(社会科学),2020,14(5):104-111.
Ge Ying, Xu Chongsen, Li Tan. The compensation willingness of cultivated land ecological service protection from the perspective of farmers [J]. Journal of Yunnan

- Agricultural University (Social Science), 2020, 14(5): 104-111.
- [6] 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 Xiumei, Pan Yuchun, Liu Yu. 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.
- [7] 蒋琳莉,黄好钦,何苏榕,等.广西稻田生态系统服务价值评估及其时空演变特征[J].西南农业学报,2022,35(11):2633-2640.
Jiang Linli, Huang Haoqin, He Surong, et al. Service value evaluation and spatial-temporal evolution characteristics of paddy field ecosystem in Guangxi [J]. Southwest China Journal of Agricultural Sciences, 2022, 35(11):2633-2640.
- [8] 崔宁波,生世玉,方袁意如.粮食安全视角下省际耕地生态补偿的标准量化与机制构建[J].中国农业大学学报,2021,26(11):232-243.
Cui Ningbo, Sheng Shiyu, Fang Yuanyiru. Standard quantification and mechanism construction of inter-provincial cultivated land ecological compensation from the perspective of food security [J]. Journal of China Agricultural University, 2021, 26(11):232-243.
- [9] 阮熹晟,李坦,张藕香,等.基于生态服务价值的长江经济带耕地生态补偿量化研究[J].中国农业资源与区划,2021,42(1):68-76.
Ruan Xisheng, Li Tan, Zhang Ouxiang, et al. A quantitative study on ecological compensation of cultivated land in the Yangtze River economic belt based on ecological service value [J]. Chinese Journal of Agricultural Resources and Regional Planning, 2021, 42(1):68-76.
- [10] 高攀,梁流涛,刘琳轲,等.基于虚拟耕地视角的河南省县际耕地生态补偿研究[J].农业现代化研究,2019,40(6):974-983.
Gao Pan, Liang Liutao, Liu Linke, et al. Study of the ecological compensation of inter-county farmland from the virtual farmland perspective: A case study of Henan Province [J]. Research of Agricultural Modernization, 2019, 40(6):974-983.
- [11] 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 Liutao, Gao Pan, Liu Linke. 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.
- [12] 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 Lihua, Zhang Bingxin, Liu Xianghua. 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.
- [13] 靳亚亚,赵凯,肖桂春.陕西省耕地保护经济补偿分区研究:基于粮食安全与生态安全双重视角[J].中国土地科学,2015,29(10):12-19.
Jin Yaya, Zhao Kai, Xiao Guichun. The economic compensation zoning of the cultivated land protection in Shanxi Province: From the perspective of food and ecological security [J]. China Land Science, 2015, 29(10):12-19.
- [14] 李晓燕.基于生态价值量和支付能力的耕地生态补偿标准研究:以河南省为例[J].生态经济,2017,33(2):151-155,161.
Li Xiaoyan. Study on the ecological compensation standard of cultivated land based on the ecological value and the ability of payment: Taking Henan Province as an example [J]. Ecological Economy, 2017, 33(2):151-155,161.
- [15] 张俊峰,梅岭,张雄,等.长江经济带耕地保护生态价值的时空特征与差别化补偿机制[J].中国人口·资源与环境,2022,32(9):173-183.
Zhang Junfeng, Mei Ling, Zhang Xiong, et al. Spatial and temporal characteristics of the ecological value of cultivated land and its differentiated compensation mechanisms in the Yangtze River economic belt [J]. China population, resources and environment, 2022, 32(9):173-183.
- [16] Zhang Junfeng, Zhang Anlu, Song Min. Ecological benefit spillover and ecological financial transfer of cultivated land protection in river basins: A case study of the Yangtze River economic belt, China [J]. Sustainability, 2020, 12(17):7085.
- [17] 党昱譞,孔祥斌,温良友,等.中国耕地生态保护补偿的省级差分分区及补偿标准[J].农业工程学报,2022,38(6):254-263.
Dang Yuxuan, Kong Xiangbin, Wen Liangyou, et al. Provincial eco-compensation zonings and standards of cultivated land in China [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2022, 38(6):254-263.
- [18] Moore D W, Booth P, Alix A, et al. Application of ecosystem services in natural resource management decision making [J]. Integrated Environmental Assessment and Management, 2017, 13(1):74-84.

- system in semiarid regions of China [J]. *Agricultural Water Management*, 2018,208:414-421.
- [30] Zhang Shulan, Li Pingru, Yang Xueyun, et al. Effects of tillage and plastic mulch on soil water, growth and yield of spring-sown maize [J]. *Soil and Tillage Research*, 2011,112(1):92-97.
- [31] Ge Jiamin, Fan Jun, Yuan Hongyou, et al. Soil water depletion and restoration under inter-conversion of food crop and alfalfa with three consecutive wet years [J]. *Journal of Hydrology*, 2020, 585.
- [32] Huang Ze, Liu Yu, Cui Zeng, et al. Soil water storage deficit of alfalfa (*Medicago sativa*) grasslands along ages in arid area (China) [J]. *Field Crops Research*, 2018,221:1-6.
- [33] Li Xianglin, Su Derong, Yuan Qinghua. Ridge-furrow planting of alfalfa (*Medicago sativa* L.) for improved rainwater harvest in rainfed semiarid areas in Northwest China [J]. *Soil and Tillage Research*, 2007,93(1):117-125.
- [34] Li Weiwei, Zhuang Qianlai, Wu Wei, et al. Effects of ridge-furrow mulching on soil CO₂ efflux in a maize field in the Chinese Loess Plateau [J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2019,264:200-212.
- [35] Wang Qi, Song Xingyang, Li Fuchun, et al. Optimum ridge-furrow ratio and suitable ridge-mulching material for alfalfa production in rainwater harvesting in semiarid regions of China [J]. *Field Crops Research*, 2015, 180:186-196.
- [36] Wang Yunqi, Gao Fuli, Wang Lixin, et al. Crop yield and soil organic carbon under ridge-furrow cultivation in China: A meta-analysis [J]. *Land Degradation & Development*, 2021,32(10):2978-2991.
- [37] Guimaraes Silva J F, de Souza Linhares A J, Goncalves W G, et al. Are the yield of sunflower and *Paspalum paspalodesgrass* biomass influenced by soil physical quality? [J]. *Soil & Tillage Research*, 2021, 208.
- [38] Lipiec J, Hatano R. Quantification of compaction effects on soil physical properties and crop growth [J]. *Geoderma*, 2003,116(1/2):107-136.
- [39] Tian Shenzhong, Dong Xiaoxia, Guo Honghai, et al. Key soil nutrient requirements for different yield levels in North China [J]. *Soil Science and Plant Nutrition*, 2019,65(5):519-524.
- [40] Li Shengxiu, Wang Zhaohui, Malhi S S, et al. Chapter 7 nutrient and water management effects on crop production, and nutrient and water use efficiency in dryland areas of China [M]// *Advances in Agronomy*. Amsterdam: Elsevier, 2009:223-265.
- [41] Shi Jiao, Zhou Huaiping, Xu Minggang, et al. Fertilization highly increased the water use efficiency of spring maize in dryland of Northern China: A Meta-Analysis [J]. *Agronomy Basel*, 2023,13(5).
- [42] Zhang Shaohui, Wang Haidong, Sun Xin, et al. Effects of farming practices on yield and crop water productivity of wheat, maize and potato in China: A meta-analysis [J]. *Agricultural Water Management*, 2021,243:106444.
- [43] YuanTian, Su Derong, Li Fengmin, et al. Effect of rainwater harvesting with ridge and furrow on yield of potato in semiarid areas [J]. *Field Crops Research*, 2003,84(3):385-391.

(上接第 179 页)

- [19] 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 Lihua, Yang Binru. Research on ecological compensation of provincial cultivated land in China [J]. *China population, resources and environment*, 2019,29(2):52-62.
- [20] 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 Moucheng, Li Wenhua. 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.
- [21] 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 Mingqi, Liu Shiliang, Wu Xue, 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.