

基于耕地“三生”功能的耕地生态供需差异研究

——以吉林省辽河流域为例

王盼盼¹, 高佳², 王玥¹

(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)

摘要: [目的] 探究耕地生态供需差异特征, 为有效保障耕地生态功能的持续供给, 维护区域粮食安全和生态安全提供理论支持。[方法] 以吉林省辽河流域为例, 基于耕地“三生”功能, 综合耕地生产性足迹、生活性足迹和生态性足迹, 改进生态足迹模型, 明确研究区耕地生态供需差异。[结果] ①辽河流域耕地生产性足迹、生活性足迹和生态性足迹差异较大, 其中, 耕地生活性足迹最大, 生态性足迹最小。②辽河流域耕地利用处于显著的生态盈余状态, 整体表现为“县(市)盈余, 区赤字”的特征, 造成耕地生态赤字的原因因为耕地的生产性赤字。③辽河流域耕地生态供需状况在空间上具有显著的不平衡性, 整体呈“北盈南亏, 梯次递进”的空间分异特征。[结论] 构建基于耕地“三生”功能的生态足迹模型, 能够更加全面地探索耕地生态供需情况。基于耕地的多功能, 人类对耕地资源的占用与消耗差异显著。流域耕地生态补偿机制的建立应充分考虑其空间差异特征。

关键词: 耕地生态供需; 生态足迹; 耕地“三生”功能; 辽河流域; 吉林省

文献标识码: A

文章编号: 1000-288X(2023)04-0347-09

中图分类号: F301.21

文献参数: 王盼盼, 高佳, 王玥. 基于耕地“三生”功能的耕地生态供需差异研究[J]. 水土保持通报, 2023, 43(4): 347-355. DOI: 10.13961/j.cnki.stbctb.2023.04.040; Wang Panpan, Gao Jia, Wang Yue. Difference between ecological supply and demand of cultivated land based on productive-living-ecological functions [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2023, 43(4): 347-355.

Difference Between Ecological Supply and Demand of Cultivated Land Based on Productive-Living-Ecological Functions —A Case Study at Liaohe River Basin in Jilin Province

Wang Panpan¹, Gao Jia², Wang Yue¹

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

2. Institute of Land Management, Northeast University, Shenyang, Liaoning 110167, China)

Abstract: [Objective] The characteristics of cultivated land ecological supply and demand were analyzed in order to provide theoretical support for ensuring the sustainable supply of ecological functions of cultivated land and to maintain regional food security and ecological safety. [Methods] The study was conducted at Liaohe River basin in Jilin Province, and improves the ecological footprint model. Based on the productive-living-ecological functions of cultivated land, the production function footprint, living function footprint, and ecological function footprint of cultivated land were integrated, the ecological footprint model was improved, and the difference between cultivated land ecological supply and demand in the study area was clarified. [Results] ① The productive, living and ecological function footprints of cultivated land differed greatly at Liaohe River basin, among which the living function footprint of cultivated land was the largest and the ecological function footprint is the smallest. ② Cultivated land use was in a state of significant ecological

收稿日期: 2022-10-26

修回日期: 2022-12-09

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); 国家自然科学基金项目(42101254); 2022年辽宁省哲学社会科学青年人才培养对象委托课题(20221s1qncwtk-47)

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、国土空间规划方面的研究。Email: panpan@sjzu.edu.cn.

通讯作者: 高佳(1988—), 女(汉族), 辽宁省丹东市人, 博士, 副教授, 博士生导师, 主要从事土地利用与管理研究。Email: gaojia@wfyx.neu.edu.cn.

surplus at Liaohe River basin, with the overall characteristics of “county (city) surplus and district deficit”. The production function deficit of cultivated land was the main cause of the ecological deficit of cultivated land. ③ The cultivated land ecological supply and demand were significantly unbalanced in space at Liaohe River basin, and the overall spatial variation was characterized as “surplus in the north and deficit in the south, with gradual progression”. [Conclusion] The ecological footprint model based on the productive-living-ecological functions of cultivated land was conducive to a more comprehensive exploration of the cultivated land ecological supply and demand. Based on the multifunctional nature of cultivated land, human occupation and consumption of cultivated land resources varied significantly, and the establishment of ecological compensation mechanisms for cultivated land in watersheds should fully take into account their spatial variation characteristics.

Keywords: cultivated land ecological supply and demand; ecological footprint; productive-living-ecological functions of cultivated land; Liaohe River basin; Jilin Province

耕地作为粮食生产的重要载体,在人类开发利用过程中,面临着耕地数量减少、质量降低等问题,且耕地生态环境同样在接受着水土流失、生物多样性减少、地下水超采、面源污染等挑战^[1-3]。在生态文明体制改革背景下,基于生态系统服务价值及外部性等理论,耕地作为一种特殊的生态系统,其所蕴含的生态服务价值巨大,人类基于其生态系统功能获得产品和服务,不仅给人类社会带来可观的经济效益及社会效益,且在维持整个生态系统平衡中占据重要地位^[4],而耕地生态供需差异是判定耕地生态系统服务功能可持续性的重要标志,探究耕地生态供给与需求的关系,对于保障耕地资源的可持续利用,维护区域耕地的粮食安全和生态安全具有重要意义^[5]。

国内外对于耕地生态问题的相关研究主要集中在耕地生态价值测算及影响因素分析^[6]、耕地生态安全评价^[7]、耕地生态足迹及承载力研究^[8]、耕地生态补偿额度^[9]及耕地保护生态补偿财政转移路径等^[10]方面。基于生态足迹模型计算生态足迹和生态承载力被广泛认为是衡量生态是否存在超载的重要依据,利用耕地生态足迹及承载力代表耕地生态需求和供给已得到国内外学者的广泛认可。20世纪90年代,“生态足迹”概念由 Rees 首次提出^[11],Wackernagel 等进一步完善了生态足迹模型^[12],随后,生态足迹模型被广泛应用到资源环境领域,用来衡量资源环境的可持续状态。在此基础上,国内外学者展开了大量的关于耕地、水域、林地、建设用地等单项研究^[13-15],并且在传统的生态足迹模型基础上进行了丰富的改进,如以“国家公顷”代替“全球公顷”,以生产性生态足迹代替消费性生态足迹^[16],基于净初级生产力(NPP)^[17]、生态系统服务价值^[18]测算均衡因子与产量因子,引入碳足迹模型改进传统生态足迹模型^[19],增加生态足迹账户^[20],建立三维生态足迹模型^[21],综合传统生态足迹模型与改进模型比较等,以上研究为本研究提供了重要的技术与方法支撑。相关研

究在计算耕地生态足迹时,大多考虑的是基于耕地生产功能的耕地生产性足迹,即根据人类对各类粮食作物、经济作物等农产品的需求所折算的耕地面积,少数研究引入碳足迹模型计算耕地的生态性足迹^[21],即人类在获取农产品过程中,消纳各种破坏性行为产生的“副产品”所折算的耕地面积,相关研究忽略了耕地的生活功能,即社会保障功能,缺乏对耕地生活性足迹的相关考量。从耕地的多功能角度^[22]出发,探究人类基于耕地的生产、生活和生态功能对耕地资源的占用,明确耕地生态供需差异的研究亟待加强。

吉林省辽河流域作为全国重要粮食生产区,耕地面积占区域总面积 65% 以上,对于维护国家粮食安全具有重要意义。但区域内水土流失面积占总面积的 30% 以上,耕作层变薄、黑土地退化等问题严峻,导致研究区优质耕地锐减和生态环境恶化。鉴于此,本研究以吉林省辽河流域为例,基于耕地的“三生”功能,将耕地生态足迹分为耕地生产性足迹、生活性足迹和生态性足迹,以农产品消费为基础计算耕地生产性足迹,以维护耕地社会保障功能为前提计算耕地生活性足迹,引入碳足迹模型计算耕地生态性足迹,以此弥补相关研究只是从单一角度计算耕地生态足迹的不足。在明确研究区耕地生态足迹和耕地生态承载力基础上,判定耕地生态赤字/盈余量,分析耕地生态供需空间差异特征,相关研究成果对于耕地资源的合理利用和科学管理提供科学依据。

1 研究思路与方法

1.1 研究思路

本研究采用耕地生态足迹和耕地生态承载力代表耕地生态需求量和供给量,以此分析研究区耕地生态供需差异。在传统生态足迹模型上,基于耕地多功能,从类型化生态足迹核算项目及按照“舍小取大”原则改进模型(图 1)。

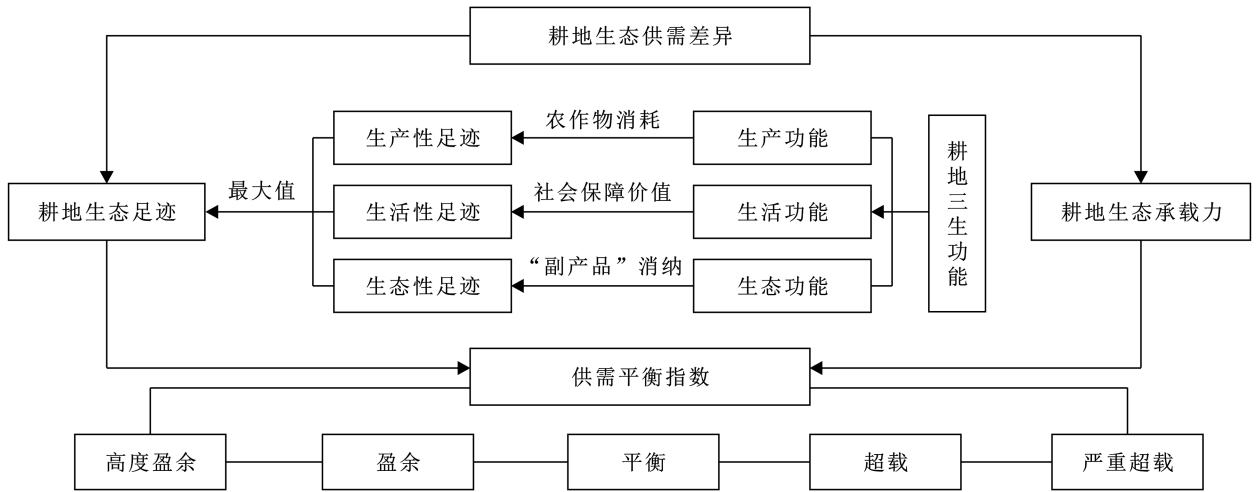


图 1 基于耕地“三生”功能的耕地生态供需研究框架

Fig.1 A research framework on ecological supply and demand of cultivated land based on productive-living-ecological functions of cultivated land

(1) 耕地生态足迹是指人类为维护自身的生存和发展对耕地资源的占用和消耗。首先,人类基本的食物需求来源于耕地产出的各类农产品。其次,耕地为农民提供最基本的养老、就业、医疗等社会保障。再次,人类在满足自身需要的同时,会对耕地生态环境造成不良影响。例如在农业生产过程中农药、化肥的使用等。因此,本研究基于耕地的生产、生活和生态功能,将耕地生态足迹分为耕地生产性足迹、耕地生活性足迹和耕地生态性足迹,按照“舍小取大”原则确定最终耕地生态足迹。

(2) 在计算耕地生产性足迹时,以“国家公顷”代替“全球公顷”,为体现区域农作物的真实消费量,且考虑到中国将长期坚持国内粮食基本自给的方针,因此在不考虑国际贸易仅考虑国内粮食流转的前提下,不同农作物的人均消费量以人均生产量为基础,按照各地区所占比例,依据省级生产量减去调出量同比例缩减,且以世界粮农组织确定的人均粮食消费量 400 kg/人为安全线,当区域人均粮食消费量小于安全底线时,按照人均粮食消费量 400 kg/人计算人均耕地生产性足迹,而该区域的粮食缺口在流域范围内的其他县(市、区)进行同比例缩减。对于不同区域,采用不同的耕地产量因子,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作为该农作物的产量因子,综合农作物种植面积占耕地面积比重,确定不同区域的耕地产量因子。耕地均衡因子采用基于净初级生产力(NPP)的吉林省耕地均衡因子结果。

(3) 在计算耕地生活性足迹时,为充分体现耕地的生活功能,即社会保障功能,计算保障区域内农民的生活所需要的耕地面积作为耕地生活性足迹。城

镇居民享受政府提供的养老保险、医疗保险、工伤保险等社会保障金,而中国农民的社会养老保障体系尚未完善,耕地作为农民的生存根本,为农民提供最基本的社会保障^[23]。计算耕地生活性足迹的关键在于确定耕地的社会保障能力,参考相关研究^[24],区域内耕地的社会保障能力按照耕地的社会保障价值与农村居民最低生活保障金的比值进行衡量,以此作为计算保障农民生活所需的耕地面积,探索耕地的生活性足迹。

(4) 在计算耕地生态性足迹时,结合农田生态系统中碳足迹的方法^[25],引入碳足迹模型,计算在农业生产过程中由于农药、化肥、农膜和农业机械的投入和使用以及灌溉等碳排放对耕地的占用和消耗,根据不同农作物产量,及农作物的含碳率、根冠比、水分系数及经济系数等计算耕地的固碳能力,依据在农业生产过程中的碳排放量以及农作物的固碳能力,确定耕地生态性足迹。引入碳足迹模型的主要原因为其在农田生态系统的应用较为成熟,且碳足迹“脱胎于”生态足迹,其结果可以用面积表征^[21]。

1.2 耕地生态足迹与承载力

根据以上分析,耕地生态足迹(EF)及生态承载力(EC)计算公式为:

$$EF = \text{MAX}(EP, EL, EO) \\ = \text{MAX}(A \times e_f, EL, EO) \quad (1)$$

$$EC = 0.88 \times A \times e_c = 0.88 \times A \times x \times y \times d \quad (2)$$

式中:EF,EC 分别为耕地生态足迹和耕地生态承载力(hm²); EP,EL,EO 分别为耕地生产性足迹、耕地生活性足迹和耕地生态性足迹(hm²); A 为人口数量(万人); e_f,e_c 分别为人均耕地生产性足迹和人均耕

地生态承载力($\text{hm}^2/\text{人}$); x, y 为耕地的均衡因子和产量因子; d 为人均生物生产性耕地面积($\text{hm}^2/\text{人}$)。

耕地面积的 12% 用以维持生物多样性, 剩余比例 0.88。耕地均衡因子采用基于净初级生产力(NPP)的吉林省耕地均衡因子结果 1.09^[16]。根据耕地产量因子计算方法^[26] 计算可得, 铁西区、铁东区、梨树县、伊通县、公主岭市、双辽市、龙山区、西安区和东辽县的耕地产量因子分别为 1.161 6, 1.157 5, 1.316 9, 1.361 7, 1.355 1, 1.173 2, 0.996 4, 0.996 8 和 1.142 4(如表 1 所示)。

表 1 基于不同农作物分类的辽河流域耕地产量因子
Table 1 Cultivated land yield factors based on different crop classifications at Liaohe River basin

地区	稻谷	玉米	豆类	薯类	耕地
铁西区	1.062 4	1.161 7	1.173 6	0.000 0	1.161 6
铁东区	1.140 6	1.161 7	0.934 5	0.000 0	1.157 5
梨树县	1.197 6	1.329 1	1.196 9	0.993 7	1.316 9
伊通县	1.214 2	1.373 8	1.030 5	1.162 2	1.361 7
公主岭市	1.173 6	1.361 4	1.391 8	1.334 5	1.355 1
双辽市	1.170 7	1.169 0	1.224 2	1.411 6	1.173 2
龙山区	0.881 8	1.001 1	1.223 3	0.768 1	0.996 4
西安区	0.881 7	1.001 1	0.000 0	0.000 0	0.996 8
东辽县	0.902 7	1.140 6	1.409 3	1.107 0	1.142 4

1.2.1 耕地生产性足迹 人均耕地生产性足迹(e_f)的计算公式为:

$$e_f = \sum_{i=1}^n x_i \times \frac{\text{PR}_i}{\text{PQ}_i} \quad (3)$$

式中: PR_i , PQ_i 分别为 i 类农作物的人均消费量($\text{kg}/\text{人}$)和全国平均生产力(kg/hm^2); i 为农作物消费项目类型。本研究选取稻谷、小麦、玉米、薯类和豆类 5 种粮食作物作为农作物消费项目。

1.2.2 耕地生活性足迹 耕地生活性足迹(EL)计算公式如下:

$$\text{EL} = \frac{B}{\text{PU}} = \frac{B}{V/D} \quad (4)$$

式中: B 为保障人口数, 即区域农业人口(万人); PU 为区域耕地社会保障能力($\text{人}/\text{hm}^2$); V 为耕地社会保障功能价值($\text{元}/\text{hm}^2$); D 为人均需求($\text{元}/\text{人}$), 本研究采用最低生活保障金额表征人均需求, 即 12 月 \times 人均月最低生活保障金^[24]。

本研究采用替代市场法, 通过对城镇社会养老保险价值进行修正^[27], 计算研究区耕地资源对农民的社会保障价值(V):

$$V = \frac{x_1 \times E}{x_2 \times t} \quad (5)$$

式中: x_1 为农村居民家庭人均纯收入(元); x_2 为城镇居民家庭人均可支配收入(元); E 为政府为城镇居民提供的社会养老保险金(元/人); t 为人均耕地面积($\text{hm}^2/\text{人}$)。根据《吉林省落实降低社会保险费率实施方案的通知》, 自 2019 年 5 月 1 日起, 降低城镇职工基本养老保险(包括企业和机关事业单位基本养老保险)单位缴费比例, 由 20% 降至 16%, 因此, 政府为城镇居民提供的社会养老保险金采用各县(市、区)基本养老保险计发基数与单位缴费比例相乘所得。

1.2.3 耕地生态性足迹 耕地生态性足迹(EO)计算公式为:

$$\text{EO} = \frac{E'}{\text{PC}} \quad (6)$$

式中: E' 为区域耕地碳排放量(kg); PC 为耕地的固碳能力(kg/hm^2)。

参考农田生态系统碳足迹计算方法^[28], 本研究考虑在农业生产过程中农药、化肥、地膜等使用, 以及农业机械及灌溉等应用过程中的碳排放量(E'), 计算公式为:

$$E' = a \times a_1 + b \times b_1 + c \times c_1 + d \times d_1 + e \times e_1 + f \times f_1 \quad (7)$$

式中: a, b, c 分别为农药、化肥、地膜使用量(kg); d 为农作物种植面积(hm^2); e 为农业机械总动力(kW); f 为灌溉面积(hm^2)。 $a_1, b_1, c_1, d_1, e_1, f_1$ 分别为农药、化肥、地膜、农作物、农业机械和灌溉的碳排放系数, 其取值分别为 4.93 kg/kg , 0.89 kg/kg , 5.18 kg/kg , 16.47 kg/hm^2 , 0.18 kg/kW , 266.48 kg/hm^2 。

耕地的固碳能力(PC)计算公式为:

$$\text{PC} = \frac{\sum_{i=1}^n [C_i \times R_i \times (1 - U_i) \times (1 + S_i)] / G_i}{A} \quad (8)$$

式中: C_i 为含碳率; R_i 为农作物产量(kg); U_i 为果实的水分系数; S_i 为根冠比系数; G_i 为经济系数; i 为农作物类型。不同农作物的含碳率、果实水分系数、根冠比及经济系数参考李明琦等研究而定^[28](如表 2 所示)。

表 2 不同农作物的植被碳储量估算参数
Table 2 Vegetation carbon stock estimating parameters of different crops

农作物	经济系数	根冠比	含碳量/%	水分系数/%
水稻	0.49	0.60	41.7	11.9
小麦	0.36	0.40	47.1	11.7
玉米	0.46	0.16	46.4	12.2
大豆	0.38	0.13	44.5	15.0
薯类	0.68	0.18	43.3	77.1

1.2.4 耕地生态供需指数 依据耕地“三生”功能,确定耕地生态足迹(生态需求)及生态承载力(生态供给)的基础上,借鉴生态供需平衡指数(ECCI)探索耕地生态供需空间差异^[29],其计算公式为:

$$ECCI = \frac{EF}{EC} \quad (9)$$

式中: ECCI 为耕地生态供需指数,当 ECCI 小于 1 时,耕地生态供给大于需求,即耕地生态承载力大于生态足迹时,为耕地生态盈余区;当 ECCI 大于 1 时,耕地生态供给小于需求,即耕地生态承载力小于生态足迹时,为耕地生态赤字区。由于耕地生态足迹和生态承载力不可能完全对等,因此将 ECCI 上下浮动 10% 作为生态临界区,依据生态赤字区、临界区和盈余区内部 ECCI 的平均值进行进一步细分,得到研究区耕地生态承载状况分级表(表 3)。

表 3 辽河流域耕地生态承载状况分级

Table 3 Grading of ecological bearing status of cultivated land at Liaohe River basin

类型	耕地生态供需指数(ECCI)	耕地生态承载状况
生态盈余区	≤0.56	高度盈余
	(0.56, 0.9]	盈余
生态临界区	(0.9, 1.1]	平衡
生态赤字区	(1.1, 1.76]	超载
	>1.76	严重超载

2 区域概况与数据来源

2.1 研究区概况

吉林省辽河流域总体位于吉林省中南部,是辽河源头和上游,行政区域涉及东辽县、龙山区、西安区、双辽市、梨树县、伊通县、铁东区、铁西区以及公主岭市 9 个县(市、区),国土面积 $1.70 \times 10^4 \text{ km}^2$,耕地面积 $1.15 \times 10^4 \text{ km}^2$,占土地总面积的 67.72%,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,总人口 396.27 万人,其中农业人口 234.26 万人,占总人口 59.12%。流域地势呈由东向西逐渐降低的趋势,东南部地势较高,多为低山丘陵,中西部为台地及平原区。流域最高海拔为 650 m,平均海拔 328 m。气候属于温带半湿润半干旱的季风气候,多年平均气温为 6.3 °C,年最高气温基本集中在 7—8 月,年平均降水量在 298.55~784.95 mm 之间,平均降水量为 547.47 mm,土壤以钙层土和淋溶土为主。流域粮食播种面积为 $9.90 \times 10^5 \text{ hm}^2$,占吉林省粮食播种面积的 17.5%,粮食产量达 $7.89 \times 10^6 \text{ t}$,占全省粮食产量

的 20.34%。各县(市)均是全国重要粮食生产区,对于保障国家粮食安全具有重要价值,且在维护区域生态平衡中占据重要地位。

2.2 数据来源

各县(市、区)的稻谷、玉米、小麦、豆类、薯类等粮食产量、粮食播种面积、化肥使用量、农药使用量、农膜使用量、地膜使用量、灌溉面积、农业机械总动力、农村居民家庭纯收入、城镇居民家庭人均可支配收入、总人口、农村人口等数据均来源于《吉林省统计年鉴 2020 年》《辽阳市统计年鉴 2020 年》《四平市统计年鉴 2020 年》及相关县、市统计年鉴、国民经济和社会发展统计公报等,基本养老保险计发基数及农村最低生活保障金额等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。全国粮食播种面积、粮食产量、粮食单产、区域平均生产力来源于《中国农村统计年鉴 2020 年》。各县(市、区)的耕地面积数据来源于全国第 3 次国土调查。

3 结果与分析

3.1 辽河流域耕地生态足迹与承载力

根据相应计算公式,得到辽河流域 9 个县(市、区)的耕地生产性足迹、生活性足迹及生态性足迹,依据“舍小取大”原则,得到最终耕地生态足迹及承载力结果(表 4)。基于耕地“三生”功能,辽河流域耕地生态足迹总值为 $8.10 \times 10^5 \text{ hm}^2$ 。从耕地“三生”性足迹结果来看,辽河流域耕地生产性足迹为 $4.71 \times 10^5 \text{ hm}^2$,耕地生活性足迹为 $7.76 \times 10^5 \text{ hm}^2$,耕地生态性足迹为 $1.14 \times 10^5 \text{ hm}^2$,三者差异较大,耕地生活性足迹最大,表明耕地发挥社会保障功能,保障区域内农民生活所需的耕地面积最大;耕地生态性足迹最小,表明人类从事农业活动过程中所产生的废弃物对耕地的占用和消耗最小。

从耕地生态足迹的空间分布来看,公主岭市最大($2.45 \times 10^5 \text{ hm}^2$),梨树县次之($1.62 \times 10^5 \text{ hm}^2$),西安区最小($1.02 \times 10^4 \text{ hm}^2$),人均耕地生态足迹最大的为双辽市($0.356 \text{ 4 hm}^2/\text{人}$),梨树县次之($0.253 \text{ 4 hm}^2/\text{人}$),西安区最小($0.063 \text{ 1 hm}^2/\text{人}$),由于双辽市人均耕地面积在流域范围内为最大值,因此其人均耕地生态足迹较大。公主岭市耕地生产性、生活性和生态性足迹值均为最大值,分别为 1.34×10^5 , 2.45×10^5 , $3.27 \times 10^4 \text{ hm}^2$;梨树县次之,分别为 1.03×10^5 , 1.62×10^5 , $2.60 \times 10^4 \text{ hm}^2$;西安区耕地生产性、生活性和生态性足迹值均为最小值,分为 1.02×10^4 , 6 381.69 , 1 644.20 hm^2 ,以上数值的大小与区域总人口、农业人口及耕地面积等有直接的关

系,公主岭市的总人口、农业人口及耕地面积在流域范围内均为最大值,而西安区均为最小值。辽河流域耕地生态承载力为 $1.41 \times 10^6 \text{ hm}^2$,其中公主岭市最大,值为 $4.41 \times 10^5 \text{ hm}^2$,其次为梨树县和双辽市,分别为 $3.17 \times 10^5, 2.43 \times 10^5 \text{ hm}^2$,最小的为西安区,值为 $8\ 258.51 \text{ hm}^2$,总体呈“北高南低”的空间格局,与生态足迹存在空间一致性。吉林省辽河流域作为国

家重要的粮食主产区,各县(市)均是吉林省重要的商品粮生产基地,其耕地主要集中在公主岭市、梨树县、双辽市等区域,且公主岭市是我国首批确定的商品粮基地和黑土地保护工程试点区域,梨树县属于国家重点商品粮基地和全国粮食生产先进县,作为率先建设全国最大黑土地改良基地的区域,经典的“梨树模式”被全国认可,因此其耕地的生态承载力均较大。

表 4 辽河流域耕地生态足迹及承载力

Table 4 Ecological footprint and carrying capacity of cultivated land at Liaohe River basin

地区	生产性足迹/ 10^5 hm^2	生活性足迹/ 10^5 hm^2	生态性足迹/ 10^5 hm^2	耕地生态足迹		耕地生态承载力	
				总值/ 10^5 hm^2	人均/ hm^2	总值/ 10^5 hm^2	人均/ hm^2
铁西区	0.25	0.08	0.02	0.25	0.063 6	0.12	0.039 3
铁东区	0.22	0.27	0.04	0.27	0.086 5	0.45	0.160 3
梨树县	1.03	1.62	0.26	1.62	0.253 4	3.17	0.563 2
伊通县	0.58	1.06	0.14	1.06	0.237 8	2.04	0.519 3
公主岭市	1.34	2.45	0.33	2.45	0.238 1	4.41	0.487 2
双辽市	0.65	1.40	0.21	1.40	0.356 4	2.43	0.703 8
龙山区	0.21	0.08	0.02	0.21	0.063 5	0.10	0.038 9
西安区	0.10	0.06	0.02	0.10	0.063 1	0.08	0.063 1
东辽县	0.34	0.74	0.11	0.74	0.222 7	1.30	0.441 1

3.2 辽河流域耕地生态赤字/盈余

依据辽河流域各县(市、区)的耕地生态足迹及耕地生态承载力,得到研究区耕地生态赤字/盈余量(表 5)。耕地生态赤字区域为铁西区($-1.24 \times 10^4 \text{ hm}^2$)、龙山区($-1.04 \times 10^4 \text{ hm}^2$)和西安区($-1\ 974.30 \text{ hm}^2$);耕地生态盈余区域为铁东区($1.73 \times 10^4 \text{ hm}^2$)、梨树县($1.55 \times 10^5 \text{ hm}^2$)、伊通县($9.81 \times 10^4 \text{ hm}^2$)、公主岭市($1.96 \times 10^5 \text{ hm}^2$)、双辽市($1.03 \times 10^5 \text{ hm}^2$)和东辽县($5.52 \times 10^4 \text{ hm}^2$),总体呈盈余状态,总盈余量为 $6.00 \times 10^5 \text{ hm}^2$,盈余量最大的依然为公主岭市,占盈余总量的 32.70%,其次为梨树县和双辽市,占比分别为 25.83%和 17.17%,符合区域的主体功能定位。基于耕地“三生”功能,造成耕地生态赤字的主要原因是耕地的生产性赤字,铁西区、龙山区和西安区均存在耕地生产性赤字,其耕地生态性和生活性不存在赤字区域,均为盈余区。这说明铁西区、龙山区和西安区的粮食产量不足以维持本区域内的人口,耕地的可持续性差,需要从其他盈余区进行补充。而其他区域在耕地的生产、生活和生态功能方面,均能满足自身的需求,均属于盈余区。

3.3 辽河流域耕地生态供需指数空间差异

根据生态供需平衡指数计算公式,得到研究区耕地生态供需指数(表 6),依据自然断点法,将辽河流域耕地生产性供需指数、生活性供需指数和生态性供需指数划分为 4 个等级(I, II, III, IV)。根据耕地生

态承载状况分级情况,将辽河流域耕地生态供需指数分为高度盈余区、盈余区、平衡区、超载区和严重超载区(图 2)。

表 5 辽河流域耕地生态赤字/盈余

Table 5 Ecological deficit/surplus of cultivated land at Liaohe River basin

地区	耕地生产性 赤字/盈余/ 10^5 hm^2	耕地生活性 赤字/盈余/ 10^5 hm^2	耕地生态性 赤字/盈余/ 10^5 hm^2	耕地生态 赤字/盈余/ 10^5 hm^2
铁西区	-0.12	0.05	0.10	-0.12
铁东区	0.23	0.17	0.41	0.17
梨树县	2.14	1.55	2.91	1.55
伊通县	1.47	0.98	1.90	0.98
公主岭市	3.07	1.96	4.08	1.96
双辽市	1.78	1.03	2.22	1.03
龙山区	-0.10	0.02	0.08	-0.10
西安区	-0.02	0.02	0.07	-0.02
东辽县	0.95	0.55	1.18	0.55

从耕地生产性供需指数空间分布来看,梨树县、公主岭市、伊通县、双辽市、东辽县均属于 I 级区域,符合区域主体功能定位,各县(市)均属于粮食主产区,耕地面积及粮食产量占比高,从人类消费的各类农产品对耕地的占用和消耗来看,均属于高度盈余,既可以满足自身需求,又可以为其他区域做出贡献。从耕地生活性供需指数空间分布来看,辽河流域耕地

生活性供需指数均小于 1,证明区域内耕地均可以保障区域内农民的生活,梨树县和伊通县属于 I 级区域,公主岭市、双辽市和东辽县属于 II 级区域,整体中部地区高于其他区域。从耕地生态性供需指数空间分布来看,辽河流域耕地生态性供需指数均小于 1,且最大值仅为 0.199 1,表明区域耕地可以满足人类从事农业活动过程中所产生的废弃物对其的占用和消耗,公主岭市和伊通县属于 I 级区域,整体北部高于南部。从耕地生态供需指数的空间分布来看,梨树县、公主岭市和伊通县属于高度盈余区,供需指数分别为 0.511 2,0.555 4,0.520 3;双辽市、东辽县和铁东区属于盈余区,供需指数分别为 0.575 4,0.573 8,0.612 8;西安区属于超载区,供需指数为 1.239 1;铁西区 and 龙山区属于严重超载区,供需指数分别为 2.006 4和 2.023 8,均大于 2。结果显示,辽河流域耕

地生态供需情况呈“北盈南亏,梯次递进”的空间分布特征,空间差异显著。

表 6 辽河流域耕地生态供需指数
Table 6 Ecological supply and demand index of cultivated land at Liaohe River basin

地区	耕地生产性供需指数	耕地生活性供需指数	耕地生态性供需指数	耕地生态供需指数
铁西区	2.006 4	0.610 6	0.156 9	2.006 4
铁东区	0.493 6	0.612 8	0.086 6	0.612 8
梨树县	0.324 1	0.511 2	0.082 2	0.511 2
伊通县	0.281 7	0.520 3	0.070 9	0.520 3
公主岭市	0.303 7	0.555 4	0.074 1	0.555 4
双辽市	0.267 5	0.575 4	0.085 0	0.575 4
龙山区	2.023 8	0.773 0	0.187 4	2.023 8
西安区	1.239 1	0.772 7	0.199 1	1.239 1
东辽县	0.265 3	0.573 8	0.087 0	0.573 8

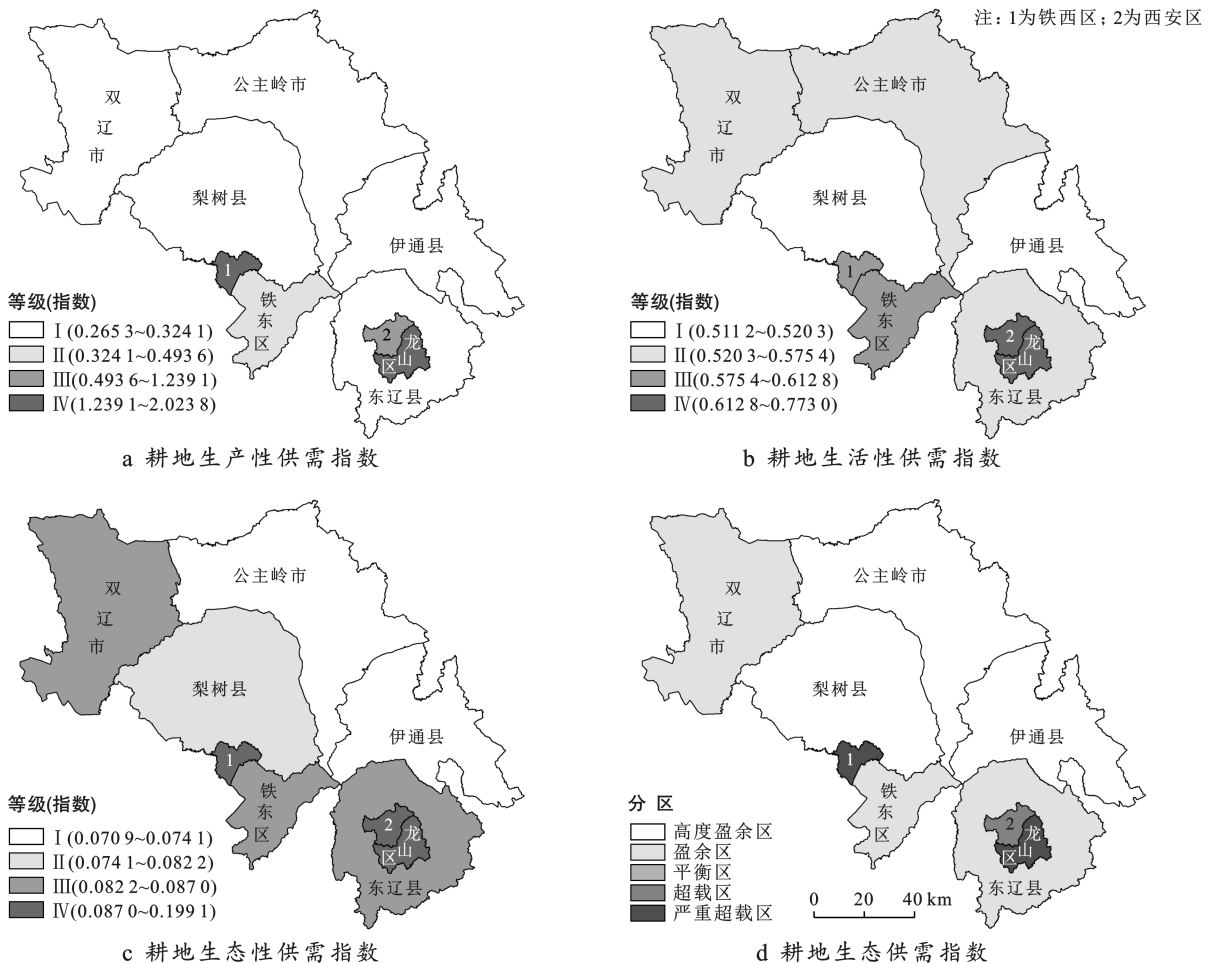


图 2 辽河流域耕地生态供需指数空间分异

Fig.2 Spatial variation of cultivated land supply and demand index at Liaohe River basin

4 结论与讨论

4.1 结论

(1) 基于耕地“三生”功能,辽河流域耕地生产性

足迹、生活性足迹和生态性足迹差异较大,其从大到小排列依次为耕地生活性足迹、耕地生产性足迹和耕地生态性足迹。依据“舍小取大”原则,辽河流域耕地生态足迹总值为 $8.10 \times 10^5 \text{ hm}^2$ 。

(2) 耕地生态承载力较大的区域集中在研究区北部的粮食主产区和重要的商品粮基地,与耕地生态足迹存在空间一致性。

(3) 辽河流域耕地利用处于显著的生态盈余状态,整体表现为“县(市)盈余、区赤字”的特征,其中,公主岭市、梨树县和双辽市的耕地生态盈余量占总盈余量的四分之三以上,造成耕地生态赤字的原因是因为耕地的生产性赤字,耕地生活性和生态性均盈余。

(4) 辽河流域耕地生产性供需、生活性供需及生态性供需指数空间差异显著,综合来看,耕地生态供需状况在空间上的不平衡性较突出,整体呈“北盈南亏,梯次递进”的空间分异特征。高度盈余区主要集中在研究区北部的公主岭市、梨树县、伊通县等区域,严重超载区主要集中在南部的铁西区和龙山区。

4.2 讨论

探究耕地生态供需差异是进行耕地保护生态补偿的前提,相关研究在衡量耕地供需时,大多采用传统生态足迹模型、能值法、三维生态足迹模型等,考虑耕地作为粮食生产的载体,人类所获取的各种农产品对耕地的占用与消耗,从而折算出耕地的生物资源足迹^[8-9],即为本研究所考量的耕地生产性足迹,耕地不仅发挥着重要的生产功能,其生活及生态功能同样占据重要地位^[22-23]。因此,本研究在计算耕地生态足迹时,充分考虑耕地在发挥其生产、生活和生态功能的过程中,对耕地的占用和消耗,以耕地的“三生”功能为基础,开展流域尺度下耕地生态供给和需求的差异分析,为耕地供需等相关研究提供新视角,同时为流域范围内耕地保护生态补偿等相关政策的制定提供科学依据。

吉林省辽河流域作为全国重要粮食主产区,对于保障耕地的可持续利用及维护区域粮食安全和生态安全具有重要意义。第一,针对梨树县和公主岭市等耕地生态高度盈余区,应继续保持其耕地的保护性耕作行为,提高耕地可持续利用水平,对于铁西区和龙山区等耕地生态超载区,则要采用多种措施提高耕地生态供给能力,坚守耕地底线,严格控制非农建设占用优质耕地,防止“占优补劣”等现象,增加耕地后备资源数量,同时合理减少农药、化肥等使用,防止农业面源污染等。第二,鉴于辽河流域耕地整体处于生态盈余区,且流域范围内耕地生态供需空间差异显著,因此需要建立差别化的耕地保护生态补偿方案,提高耕地保护生态补偿的实际可操作性。以耕地生态赤字/盈余为基础,确定耕地生态补偿支付区和受偿区,建立纵向(流域)尺度及横向(地市、区县)尺度“一纵两横”的耕地保护生态补偿财政转移路径,实现区际

及区内的耕地保护生态补偿。其中,流域层面由中央直管采用一级纵向财政转移进行补偿,地市级层面采用省级管理平台,实现耕地生态补偿支付区与受偿区的二级横向财政转移,区县级层面采用市级管理平台,实现耕地生态补偿支付区和受偿区的三级横向财政转移。通过耕地保护生态补偿刺激耕地保护行为,调节区域耕地保护事权与财权的关系,从而保障区域的公平发展。

对于耕地生产性足迹、生活性足迹和生态性足迹的科学准确表达是判定区域耕地生态供需差异的基础,区域粮食安全不仅受制于区域内的粮食生产能力,同样受区域间市场流动的影响^[21],将区域间粮食进出口等因素纳入耕地生态供需平衡分析中,以期更加准确地把握耕地生态供给与需求,鉴于当前各地区对耕地保护生态补偿的相关实践探索,建立流域多尺度耕地生态价值核算体系,计算耕地保护生态补偿额度,设计耕地保护生态补偿财政转移路径作为下一步的研究重点和方向。

[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.
- [2] 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.
- [3] 吴宇哲,许智钊.休养生息制度背景下的耕地保护转型研究[J].资源科学,2019,41(1):9-22.
- [4] Zhang Q, Song C, Chen X. 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.
- [5] 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(12):120-132.
- [6] Wang Kunpeng, Ou Minghao, 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.
- [7] 杨青,逯承鹏,周锋,等.基于能值—生态足迹模型的东北老工业基地生态安全评价:以辽宁省为例[J].应用生态学报,2016,27(5):1594-1602.
- [8] 罗海平,朱勤勤,罗逸伦,等.耕地生态足迹与生态承载力研究:基于中国粮食主产区 2007—2016 年面板数据[J].华东经济管理,2019,33(5):68-75.
- [9] 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.
- [10] 曹瑞芬,张安录,万珂.耕地保护优先序省际差异及跨区

- 域财政转移机制:基于耕地生态足迹与生态服务价值的实证分析[J].中国人口·资源与环境,2015,25(8):34-42.
- [11] Rees W E. Ecological footprint and appropriated carrying capacity: what urban economics leaves out [J]. Environment and Urbanization, 1992,4(2):121-130.
- [12] Wackernagel M, Rees W E. Perceptual and structural barriers to investing in natural capital: economics from an ecological footprint perspective [J]. Ecological Economics, 1997,20(1):3-24.
- [13] 安慧,范历娟,吴海林,等.基于BP神经网络的淮河流域水生态足迹分析与预测[J].长江流域资源与环境,2021,30(5):1076-1087.
- [14] 马橙,高建中.森林生态补偿、收入影响与政策满意度:基于陕西省公益林区农户调查数据[J].干旱区资源与环境,2020,34(11):58-64.
- [15] Rana A K, Alaa S, Ranin E A G. Analysis of ecological balance issue for the built-up land and cropland footprints in Alexandria City, Egypt during this time-series(2005-2019) [J]. International Journal of Sustainable Development and Planning, 2020,15(6):911-920.
- [16] 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.
- [17] 刘某承,李文华,谢高地.基于净初级生产力的中国生态足迹产量因子测算[J].生态学杂志,2010,29(3):592-597.
- [18] 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.
- [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.
- [20] 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.
- [21] 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.
- [22] 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.
- [23] 王成,彭清,唐宁,等.2005—2015年耕地多功能时空演变及其协同与权衡研究:以重庆市沙坪坝区为例[J].地理科学,2018,38(4):590-599.
- [24] 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.
- [25] 叶文伟,王城城,赵从举,等.近20年海南岛热带农田生态系统碳足迹时空格局演变[J].中国农业资源与区划,2021,42(10):114-126.
- [26] 崔宁波,生世玉.粮食安全视角下的东北黑土区耕地生态补偿研究[J].浙江农业学报,2021,33(9):1759-1769.
- [27] 王亚辉,李秀彬,辛良杰,等.耕地资产社会保障功能的空间分异研究:不同农业类型区的比较[J].地理科学进展,2020,39(9):1473-1484.
- [28] 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.
- [29] 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.

(上接第346页)

- [58] Barry G, Peter B, Bruno M. Review: wind impacts on plant growth, mechanics and damage [J]. Plant Science, 2016,245:94-118.
- [59] Harder D L, Speck O, Hurd C L, et al. Reconfiguration as a prerequisite for survival in highly unstable flow-dominated habitats [J]. Journal of Plant Growth Regulation, 2004,23(2):98-107.
- [60] Etnier S A, Vogel S. Reorientation of daffodil (*Narcissus*: Amaryllidaceae) flowers in wind: drag reduction and torsional flexibility [J]. American Journal of Botany, 2000,87(1):29-32.
- [61] Zhang X X, Nepf H. Flow-induced reconfiguration of aquatic plants, including the impact of leaf sheltering [J]. Limnology and Oceanography, 2020, 65(11):2697-2712.
- [62] Andreoli A, Chiaradia E A, Cislaghi A, et al. Roots reinforcement by riparian trees in restored rivers [J]. Geomorphology, 2020,370:1-11.
- [63] Lee J T, Yen L Z, Chu M Y, et al. Growth characteristics and anti-wind erosion ability of three tropical foredune pioneer species for sand dune stabilization [J]. Sustainability, 2020,12(8):1-15.