

孙佳歆, 齐鹏, 章光新, 等. 基于生态足迹法的农业水土资源承载力分析——以三江平原友谊农场为例 [J]. 地理科学, 2024, 44(6): 1060-1068. [Sun Jiaxin, Qi Peng, Zhang Guangxin et al. Agricultural water and land resources carrying capacity based on ecological footprint method: A case of Youyi Farm in Sanjiang Plain. Scientia Geographica Sinica, 2024, 44(6): 1060-1068.] doi: 10.13249/j.cnki.sgs.20221284

基于生态足迹法的农业水土资源承载力分析 ——以三江平原友谊农场为例

孙佳歆¹, 齐鹏¹, 章光新¹, 杜崇², 李赞^{1,2}

(1. 中国科学院东北地理与农业生态研究所湿地生态与环境重点实验室, 吉林 长春 130102;

2. 黑龙江大学水利电力学院, 黑龙江 哈尔滨 150080)

摘要: 本文以三江平原“黑土粮仓”——友谊农场为例, 应用生态足迹法对当地的水土资源承载力进行定量评估。结果表明: ① 人均农业水资源生态足迹多年平均值为 $5.26 \text{ hm}^2/\text{人}$, 生态承载力多年平均值为 $1.97 \text{ hm}^2/\text{人}$, 水资源生态赤字, 生态压力指数平均值为 2.82, 水资源利用处于不安全状态; 人均耕地资源生态足迹小于生态承载力, 耕地资源生态盈余, 生态压力指数平均值为 0.69, 耕地资源利用处于安全状态; ② 友谊农场农业水土资源生态足迹和水土资源生态承载力的耦合协调度总体处于一般协调状态; ③ 虽然农场土地资源丰富, 但水资源稀缺, 该地区的水土资源承载力协调水平还有很大的提升空间。研究结果对于黑土地保护, 实现农业水土资源可持续发展有重要意义。

关键词: 农业水土资源; 生态足迹法; 黑土粮仓; 友谊农场

中图分类号: S181 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-0690(2024)06-1060-09

农业水土资源是农业生产的基础条件, 对保障粮食安全和人类生存发展有重要意义。近年来, 为了提高粮食产量, 过度追求农业短期经济利益^[1], 使得区域水资源供不应求, 耕地分配不合理, 资源浪费等问题日益突出。中国已有地区存在水土资源不协调的问题, 例如东北地区耕地面积约占全国耕地面积的 20.2%, 而水资源占有量仅为 7.0%^[2]。为量化研究水土资源供需问题, 联合国粮食与农业组织首先提出了“资源承载力”这一概念^[3]。水土资源作为资源的重要组成部分^[4-5], 分析其承载力对区域资源协调发展具有重要的现实意义^[6]。其结果为区域水资源利用和耕地资源规划提供理论依据。因此, 当前亟待展开农业水土资源承载力评价工作。

目前, 水土资源承载力的评价方法包括: 模糊评价法、投影寻踪评价法和系统动力学法等。Fu^[7]等人以三江平原为研究区采用投影追踪(PP)模型评价了区域农业水土资源承载能力。Li^[8]等人基于

粒子群优化算法的投影寻踪模型简化较多变量导致的较大计算量, 对延安市农业水土资源承载力进行评价。姜秋香^[9]分别从水资源承载力和土地资源承载力角度出发, 采用粒子群优化投影寻踪模型对三江平原水土资源空间匹配格局、水土资源承载力空间组合进行研究。综合以往研究^[10-12], 现有水土资源研究大多将水资源和土地资源作为独立的研究对象, 分别建立评价模型, 而将水土资源承载力耦合评价的研究较少。

生态足迹法基于土地面积的量化指标, 通过标准化处理实现各类土地之间相互叠加和比较^[13-14], 弥补以往研究中水土资源耦合关系较弱的不足。在某些省市区已有研究采用了生态足迹法^[15-16], 比如王丽媛^[17]针对河南省 17 个地级市, 采用生态足迹法建立水土资源承载力耦合模型, 对不同行政区的结果进行分级讨论, 并为当地水土资源使用提供方向建议。目前针对三江平原地区水土资源综合研究

收稿日期: 2023-04-10; 修订日期: 2023-08-12

基金项目: 中国科学院战略先导项目(A类)(XDA28100105)、吉林省优秀青年科技人才项目(20230508099RC)资助。[Foundation: The Strategic Priority Research Program of the Chinese Academy of Science (XDA28100105), Outstanding Young Scientist Project in Jilin Province (20230508099RC).]

作者简介: 孙佳歆(1997—), 女, 黑龙江大庆人, 硕士研究生, 主要从事水土资源优化配置研究。E-mail: jiaxin_binggan@126.com

通信作者: 齐鹏。E-mail: qipeng@jga.ac.cn

已经开展^[18],但缺少关键区域水土资源承载力的研究分析。因此,本研究基于生态足迹理论,以生态承载力、生态赤字、生态压力指数,耦合协调度为评价指标,建立三江平原重点农业产区水土资源承载力耦合评价模型,综合分析水土资源承载能力,明确研究区农业水土资源的供给程度,为当地农业水土资源可持续利用提供参考。

1 研究区概况与数据来源

1.1 研究区概况

友谊农场地处黑龙江省三江平原腹地,位于东经 $131^{\circ}27'50''\text{E}$ ~ $132^{\circ}15'38''\text{E}$ 、北纬 $46^{\circ}28'14''\text{N}$ ~ $46^{\circ}59'38''\text{N}$ (图 1),属中温带大陆性季风气候^[19]。气温较低,年平均气温 $2\sim 5^{\circ}\text{C}$;夏季炎热短暂,冬季寒冷漫长;年平均日照时数 6.5 h,年平均相对湿度 80.4%,年平均降水量为 587.2 mm^[20]。友谊农场土地面积达 $18.88\times 10^4\text{hm}^2$,其中耕地面积占总面积的 56.5%,地势南部高,中部和西北部较低,主要种植作物类型有水稻、玉米和大豆^[21]。友谊农场年均可用水量 $2.86\times 10^8\text{m}^3$,其中多年平均地表可用水量 $1.01\times 10^8\text{m}^3$,年均地下水可用水量 $1.85\times 10^8\text{m}^3$ ^[22]。

1.2 数据来源

本研究采用友谊农场耕地面积、人口、农业用水量等与农业水土相关资料作为基础数据,均来源于友谊农场统计资料(图 2)。受农场统计资料限制,故选取研究时段为 2010—2019 年。地表可用水量

数据相关资料由保安水文站提供,主要作物分布数据来源于国家科技基础条件平台——国家地球系统科学数据中心(<http://www.geodata.cn>)。

2 研究方法

2.1 农业水土资源承载力计算

在核算生态环境资源的模型中,生态足迹具有可行性强、易于比较等优点。此外,生态足迹作为生态环境资源核算工具,可以很好的与其他定量分析工具相结合,能够为生态监控提供参考依据^[23]。生态足迹法将区域可供人类消耗的各种资源量转化为相对应的生物生产性土地面积^[24]。生态足迹值越高,代表人类对资源的消耗越多,对生态环境影响越严重。

1)水资源生态足迹,用以表示一个区域内人均用水量转化为土地面积,本文用于反映区域农业用水的消耗水平^[25]。其中的转换系数为均衡因子^[26],采用世界自然基金会(WWF)计算的值^[27];全球水资源平均生产能力取 $3\,140\text{ m}^3/\text{hm}^2$ ^[28]。

2)水资源生态承载力,表示一个区域内人均可利用水资源量转化为土地面积。生态足迹反映的是对资源的需求,而生态承载力反映资源的供给量^[29]。

3)水资源生态赤字,表示研究区水资源能否可持续利用^[30]。当 EC_w (水资源承载力) $< EF_w$ (水资源生态足迹)时为水资源生态赤字,表明水资源平衡被破坏,处于不可可持续发展的状态;当 $EC_w = EF_w$ 时

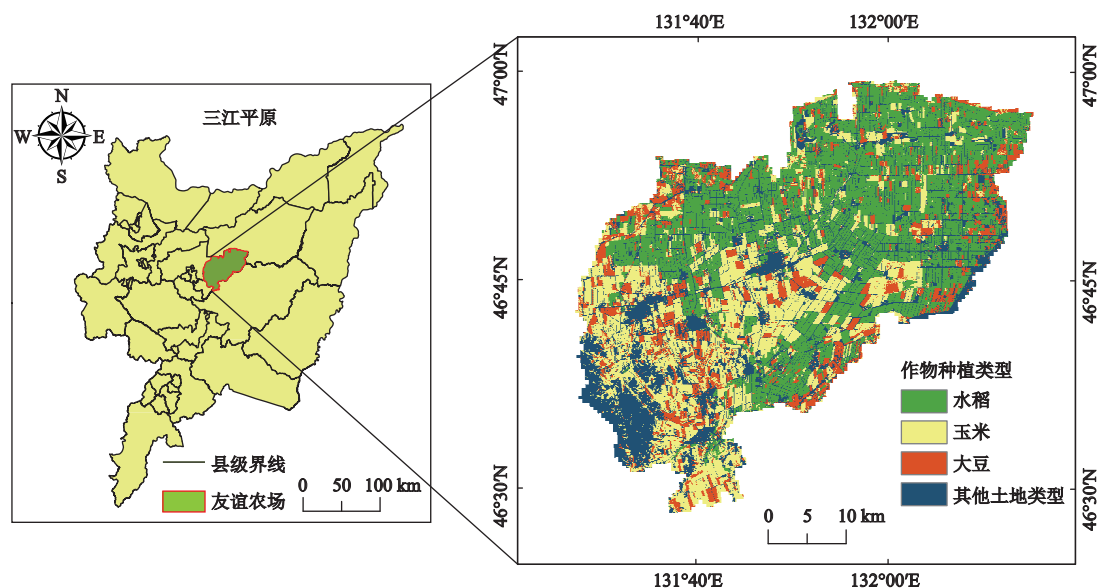


图 1 友谊农场位置及作物种植分布(2019 年)

Fig.1 Location of Youyi Farm and distribution of crops in 2019

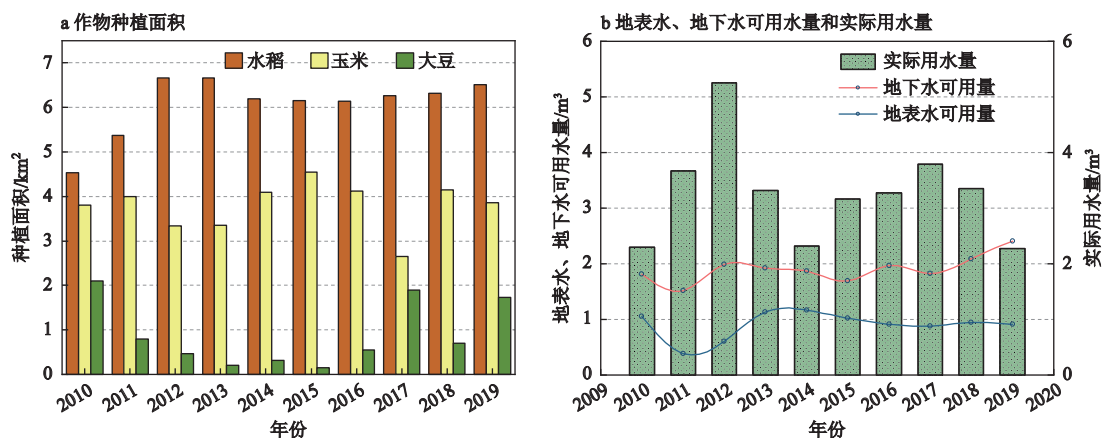


图2 友谊农场作物种植面积及地表水、地下水可用水量 and 灌溉实际用水量

Fig.2 Crop planting area, surface water, groundwater availability and total irrigation water use in Youyi Farm

为水资源生态平衡状态,当 $EC_w > EF_w$ 时,为生态盈余,表明水资源处于可持续发展的状态。生态承载力按程度分为3个级别^[31]:①生态盈余,即 $EC_w - EF_w > 0$;②轻度赤字,即 $-1 < EC_w - EF_w < 0$;③重度赤字,即 $EC_w - EF_w < -1$,土地资源生态赤字模型与此同理。

4)水资源生态压力指数。水资源生态压力用以表示区域安全程度。 S_w (水资源生态压力指数)=1时,代表该区域水资源生态环境供给平衡,水资源利用处于临界状态; $S_w > 1$ 时,区域水资源生态环境受到威胁,水资源利用处于不安全状态; $0 < S_w < 1$ 时,水资源利用处于安全状态^[32],耕地资源生态压力指数模型与此同理。

2.2 农业土地资源承载力计算

①耕地生态足迹,耕地生态足迹表示一个区域内人均可利用耕地资源面积^[33],反映区域农业用地的消耗水平。②耕地生态承载力,表示一个区域内人均可利用耕地资源面积^[34-35]。③耕地资源生态赤字,与水资源生态赤字计算方法同理,表示研究区耕地资源能否可持续利用。④耕地资源生态压力指数,用以表示区域耕地资源的安全程度。

2.3 农业水土资源承载力耦合计算

耦合度反映区域农业水土资源之间的作用程度,耦合协调度模型可用于评判该区域水土资源耦合协调程度的好坏^[36],公式如下:

$$C = 2[(U_1 \times U_2)/(U_1 + U_2)]^{\frac{1}{2}} \quad (1)$$

$$T = \alpha U_1 + \beta U_2 \quad (2)$$

$$D = \sqrt{C \times T} \quad (3)$$

式中, U_1 为人均耕地生态足迹; U_2 为人均农业用水生态足迹,生态承载力计算同理; C 为耦合度, $0 \leq C < 1$,当 C 趋向1时, U_1 与 U_2 处于最佳耦合状态; $C = 0$ 时 U_1 与 U_2 呈无序态; T 为农业水资源与耕地资源调和指数; α 、 β 为待定权重,系数应满足 $\alpha + \beta = 1$,以往相关文献对水、土资源这两个系统展开分析时认为水、土资源的权重一样,按 $\alpha = \beta = 0.5$ 取值^[37]; D 为耦合协调度,值在 $[0, 1]$ 区间内变化,当 $D = 1$ 时,两者的协调度最强,当 $D = 0$ 时,两者处于绝对不协调状态(表1)。

表1 耦合协调度等级与程度划分

Table 1 The level and degree of coupling coordination division

耦合协调度D值区间	协调等级	耦合协调程度
(0.0, 0.1)	1	极度失调
[0.1, 0.2)	2	严重失调
[0.2, 0.3)	3	中度失调
[0.3, 0.4)	4	轻度失调
[0.4, 0.5)	5	濒临失调
[0.5, 0.6)	6	勉强协调
[0.6, 0.7)	7	初级协调
[0.7, 0.8)	8	中级协调
[0.8, 0.9)	9	良好协调
[0.9, 1.0)	10	优质协调

3 结果与讨论

3.1 友谊农场水资源承载力

友谊农场2012年人均农业水资源生态足迹值

达到 8.453 hm²/人, 2019 年仅为 3.369 hm²/人; 2011 年人均农业水资源生态承载力值最低, 为 1.311 hm²/人, 2010 年最高达到 2.399 hm²/人, 2010 年单位灌溉面积的水资源可用量高于其他年份, 降水量较高和水田种植比例较少是导致水资源生态承载力高的重要原因。根据生态承载力分级方式可知, 友谊农场农业水资源重度赤字; 农业水资源生态压力指数均值为 2.820 > 1, 区域农业水资源消耗量超过供给量, 水资源利用处于不安全状态(表 2)。

表 2 友谊农场人均农业水资源生态足迹、生态承载力、生态赤字和生态压力指数

Table 2 Ecological footprint, ecological carrying capacity, ecological deficit and ecological pressure index of agricultural water resources per capita in Youyi Farm

年份	农业水资源			
	生态足迹/ (hm ² /人)	生态承载力/ (hm ² /人)	生态赤字/ (hm ² /人)	生态压力 指数
2010	3.744	2.399	-1.344	1.560
2011	5.909	1.311	-4.598	4.506
2012	8.453	1.617	-6.836	5.228
2013	5.357	2.183	-3.174	2.454
2014	3.76	2.197	-1.564	1.712
2015	5.12	1.881	-3.239	2.722
2016	5.273	2.045	-3.228	2.578
2017	6.115	1.99	-4.124	3.072
2018	5.466	2.016	-3.45	2.711
2019	3.369	2.031	-1.338	1.659

近年来, 友谊农场的农业水资源生态压力大, 尽管友谊农场农业水资源生态赤字有逐渐改善的趋势, 但仍然常年处于负值且呈现重度赤字状态, 水资源承载力早已不能满足当地农业发展。从黑龙江全省范围内看, 三江平原水土流失严重, 不合理的耕种方式造成湿地面积大幅萎缩、植被覆盖率降低、林地湿地大面积缩减, 导致三江平原承载力一直处于超载水平^[38]。友谊农场以种植水田为主, 水稻灌溉用水量大, 且灌溉农田的供给水源主要是地下水, 地表水利用较少, 地下水常年为过度开采状态^[39], 使得友谊农场地下水水位下降, 地下水的补给和排泄平衡被打破^[40], 造成了当地农业水资源供不应求的局面。因此, 在友谊农场这种地下水资源量紧缺的地区, 持续开采水资源必然引起水资源量的短缺, 从而使得当地农业水资源承载力长期处于较低水平。

3.2 友谊农场耕地资源承载力

2018 年人均耕地资源生态足迹值达到 2.564 hm²/人, 2011 年为 2.366 hm²/人; 2018 年人均耕地资源生态承载力值最大, 2011 年最小, 相差 0.290 hm²/人。人均耕地资源承载力均为生态盈余, 与人均农业水资源生态赤字呈现相反的结果, 生态盈余整体呈现小幅上升趋势; 生态压力指数常年维持在 0.685, 基本稳定, 耕地资源供给量大于消耗量, 耕地资源利用处于安全状态(表 3)。

表 3 友谊农场人均耕地资源生态足迹、生态承载力、生态赤字和生态压力指数

Table 3 Ecological footprint, ecological carrying capacity, ecological deficit and ecological pressure index of arable land resources per capita in Youyi Farm

年份	耕地资源			
	生态足迹/ (hm ² /人)	生态承载力/ (hm ² /人)	生态赤字/ (hm ² /人)	生态压力 指数
2010	2.433	3.555	1.121	0.685
2011	2.366	3.456	1.090	0.685
2012	2.436	3.558	1.123	0.685
2013	2.37	3.462	1.092	0.685
2014	2.467	3.604	1.137	0.685
2015	2.512	3.670	1.158	0.685
2016	2.505	3.660	1.154	0.685
2017	2.507	3.662	1.155	0.685
2018	2.564	3.746	1.182	0.685
2019	2.487	3.633	1.146	0.685

自 1985 年以来, 伴随着气候变暖以及水旱种植结构的调整, 三江平原地区已由雨养农业型向雨养-灌溉兼具型转变, 与此同时, 其农业水土资源空间配置状况也发生了较大变化^[41]。因友谊农场主要种植类型由旱田向水田倾斜, 导致水田面积不断扩大, 玉米面积有所增加, 大豆及其他作物种植面积占比快速减小^[42], 虽然种植结构发生变化, 但是该地区土地利用率、人口密度、人均土地资源拥有量可支撑其社会发展, 耕地总面积基本稳定, 不存在过度占用其他类型土地的问题, 加上友谊农场各年人员流动不大, 人均耕地资源生态承载力一直维持较为稳定的状态。同时, 中国环境与发展国际合作委员会和 WWF 共同发布的《中国生态足迹报告》(<https://www.wwfchina.org/>)指出中国土地总体出现生态赤字, 所以尽管友谊农场目前耕地资源能承受该区域的发展, 但仍存在承载力赤字的可能, 如

果不合理利用和保护耕地资源,未来耕地资源也存在不能承载该区域发展的风险。

3.3 农业水土资源耦合承载力

1)农业水土资源生态足迹耦合结果。在已有的数据在基础上,将友谊农场 2010—2019 年的人均农业水资源生态足迹和人均耕地资源生态足迹做数据标准化处理。得到友谊农场生态足迹耦合度呈现波动变化趋势,年均耦合度大于 0.700,农业水土资源生态足迹整体相互作用明显,农业水土资源彼此相互依赖、相互影响。友谊农场人均农业水土资源生态足迹的耦合协调度不高,协调程度主要在濒临失调到中级协调类型范围内。耦合协调程度年际变化呈现明显波动变化趋势,其中 2018 年耦合协调度最优,等级为良好协调;2011 年和 2019 年耦合协调度最差,等级为中度失调,年际平均耦合协调度等级为勉强协调(表 4)。

表 4 友谊农场人均农业水土资源生态足迹耦合度和耦合协调度

Table 4 Coupling degree and coupling coordination degree of per capita agricultural water and land resources ecological footprint in Youyi Farm

年份	耦合度 C 值	协调指数 T 值	耦合协调 度 D 值	协调 等级	耦合协 调程度
2010	0.790	0.212	0.410	5	濒临失调
2011	0.277	0.255	0.266	3	中度失调
2012	0.882	0.673	0.770	8	中级协调
2013	0.520	0.212	0.332	4	轻度失调
2014	0.702	0.297	0.457	5	濒临失调
2015	0.934	0.540	0.710	8	中级协调
2016	0.954	0.538	0.717	8	中级协调
2017	0.991	0.623	0.786	8	中级协调
2018	0.912	0.702	0.80	9	良好协调
2019	0.252	0.309	0.279	3	中度失调

2)农业水土资源生态承载力的耦合结果。从时间维度上来看,友谊农场生态承载力耦合度变化幅度较小(表 5)。除 2013 年人均水资源和土地资源生态承载力耦合度值小于 0.400 外,其余年份的承载力耦合度均在 0.850 以上,年平均耦合度大于 0.900,农业水土资源生态承载力整体趋近于最佳耦合状态,相互作用明显。2010—2019 年友谊农场人均农业水土资源生态承载力耦合协调程度变化波动较大,整体上呈增加趋势,人均农业水土资源承载力的协调度略优于人均农业水土资源生态足迹的协

表 5 友谊农场人均农业水土资源生态承载力耦合度和耦合协调度

Table 5 Coupling degree and coupling coordination degree of per capita agricultural water and land resources ecological carrying capacity in Youyi Farm

年份	耦合度 C 值	协调指数 T 值	耦合协调 度 D 值	协调 等级	耦合协 调程度
2010	0.874	0.666	0.763	8	中级协调
2011	0.999	0.010	0.100	2	严重失调
2012	0.994	0.321	0.565	6	勉强协调
2013	0.380	0.413	0.396	4	轻度失调
2014	0.974	0.658	0.800	9	良好协调
2015	0.986	0.628	0.787	8	中级协调
2016	0.999	0.685	0.828	9	良好协调
2017	0.998	0.665	0.814	9	良好协调
2018	0.977	0.817	0.894	9	良好协调
2019	0.999	0.634	0.796	8	中级协调

调度。耦合协调度主要在中级协调到良好协调类型范围内。其中,在 2011 年和 2013 年农业水资源与耕地资源承载力耦合协调度差于其他年份,分别为严重失调和轻度失调状态。

10 a 间友谊农场农业水土资源生态足迹和水土资源生态承载力的耦合协调度平均值分别为勉强协调状态和初级协调状态,其协调程度整体均呈现出上升的趋势。友谊农场农业水土资源生态足迹和承载力的耦合协调性各年份等级差距较大,其主要原因是各年有效降水量和作物灌溉水量需求变化较大,丰水年水资源承载力较好,水土资源耦合协调关系较强;反之,枯水年水土资源耦合协调关系较差。

3)耦合结果分析。2010—2019 年友谊农场水土资源生态足迹耦合度和耦合协调度变化趋势基本相同,整体呈现上升趋势,生态承载力耦合度和耦合协调度变化趋势不相同,分 2 个阶段:① 2010—2013 年耦合度增加但协调度降低。② 2014—2019 年耦合度和协调度均增加。水土资源生态承载力耦合度和耦合协调度变化并非保持一致^[43],耦合度增加仅说明水土资源生态承载力内部干扰减弱^[44],联系更为紧密,农业水资源与耕地资源生态承载力的相互作用程度增加,而不会影响耦合协调状态的好坏变化趋势。水土资源承载力耦合协调度年际波动大,既有年份承载力严重失调,又有年份承载力协调度较高,2016—2019 年水土资源承载力耦合协调度变化较为稳定,保持在中级协调和良好协调这 2

个等级内。友谊农场作物用水量每年变化较大,是造成耦合协调关系波动大的直接原因之一。此外,松嫩-三江平原水土资源分布的这种空间错位,制约了该区域资源的可持续利用,不利于保障区域的粮食安全^[45]。“十三五”规划以来,开展农业与水利现代化建设,政府加大了对水土资源的合理利用的监管力度,黑龙江省的农业水土资源承载能力从极差趋于相对合理,但区域范围的农业水土资源匹配情况却不尽合理^[46]。三江平原整体资源承载指数受制于水资源这一指标,全区的水资源平均利用率已达到 73%,水资源开发利用潜力仅有 0.5%,对于三江平原整个区域来说,水资源已经成为该区域今后发展的制约性因素^[47]。本研究发现,友谊农场耕地面积为 1.03 hm²/人,高于同期黑龙江省人均耕地面积 0.31 hm²/人^[48];人均农业用水量 2770 m³/人,高于黑龙江农业用水量 2276 m³/人^[49],二者分别是全省水平的 3.3 倍和 1.2 倍。友谊农场大面积种植水稻,地表水资源开发利用率低而地下水资源开采过度,是导致该区域农业水土资源匹配不协调的主要原因。该区域水土匹配水平具有较大提升空间,有关部门应进一步提升水土资源利用效率,以实现区域水土资源协调发展。

综上所述,虽然友谊农场土地资源丰富,但是水资源紧缺。受种植结构的影响,水资源开发利用程度大,整体表现出“地表水资源利用率低而地下水资源过量开采”的特点,使得该区域水资源不能满足农业灌溉需要。水资源承载力水平较差,进而造成了农业水土资源耦合承载力协调度较差的局面。在水土资源承载力耦合协调程度差的时期应考虑合理调整本地的作物种植结构,大力推广农业水资源可持续利用技术,提高友谊农场地表水的利用效率,加强引水工程的建设^[50];而在水土资源利用较好,承载力耦合协调程度优良的时期,加大种植经济效益高的作物,适度增加耕地面积以保障粮食安全,推动区域经济快速发展。从而实现友谊农场地区农业水土资源系统向良性的、更优的协调程度发展。

4 结论

本研究选取三江平原友谊农场为典型研究区,利用生态足迹法对 2010—2019 年农业水土资源耦合承载力进行评价,得到如下结论:

1)生态足迹法可将农业水土资源的评价指标

量化为人均土地面积大小,统一单位后得到的水土资源生态足迹、生态承载力、生态赤字、生态压力,耦合协调度均可直接进行比较,评价结果能更客观的反映出区域水土资源协调状况,可直接应用于评价区域水土资源承载力。

2)近 10 a 友谊农场人均农业水资源生态足迹平均值为 5.26 hm²/人,承载力为 1.97 hm²/人,水资源生态赤字,利用状况差;人均耕地资源生态足迹平均值为 2.47 hm²/人,承载力为 3.60 hm²/人,耕地资源生态盈余,利用情况较好。应加强区域水资源的优化配置和耕地种植结构的调整,从而缓解农业水资源与耕地资源之间的矛盾。

3)友谊农场人均农业水土资源生态足迹的耦合协调度年际变化呈现明显波动变化趋势,耦合协调度等级为勉强协调。人均农业水土资源生态承载力耦合协调度年际变化幅度较小,耦合协调度等级为初级协调。人均农业水土资源承载力的耦合度和耦合协调度均优于人均农业水土资源生态足迹的耦合度和耦合协调度。农场应加强水土优化方案,提高农业水土资源承载力,以实现农业水土资源的可持续发展。

参考文献(References):

- [1] Yang X, Lin E, Ma S M et al. Adaptation of agriculture to warming in Northeast China[J]. *Climatic Change*, 2007, 84(1): 45-58.
- [2] 伍大利. 滴灌施肥对春玉米产量、养分水分利用效率及根系分布的影响 [D]. 北京: 中国农业大学, 2018. [Wu Dali. Effects of drip fertigation on yield, nutrient and water productivity and root distribution of spring maize. Beijing: China Agricultural University, 2018.]
- [3] Zhang F L, Zhu F Z. Exploring the temporal and spatial variability of water and land resources carrying capacity based on ecological footprint: A case study of the Beijing-Tianjin-Hebei urban agglomeration, China[J]. *Current Research in Environmental Sustainability*, 2022, 4: 100135.
- [4] Zhang M, Liu Y M, Wu J et al. Index system of urban resource and environment carrying capacity based on ecological civilization[J]. *Environmental Impact Assessment Review*, 2018, 68: 90-97.
- [5] Sun T, Feng Z M, Yang Y Z et al. Research on land resource carrying capacity: Progress and prospects[J]. *Journal of Resources and Ecology*, 2018, 9(4): 331-340.
- [6] Tan K, Zhao X Q, Pu J W et al. Zoning regulation and development model for water and land resources in the Karst Mountainous Region of Southwest China[J]. *Land Use Policy*, 2021, 109:

- 105683.
- [7] Fu Q, Jiang Q X, Wang Z L. Comprehensive evaluation of regional agricultural water and land resources carrying capacity based on DPSIR concept framework and PP model[C]/Li D L et al. Computer and computing technologies in agriculture V. Heidelberg: Springer, 2012.
- [8] Li H, Zhou W, Zhuang Y et al. Agricultural water and soil resources matching patterns and carrying capacity in Yan'an City[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2016, 32(5): 156-162.
- [9] 姜秋香. 三江平原水土资源承载力评价及其可持续利用动态仿真研究 [D]. 哈尔滨: 东北农业大学, 2011. [Jiang Qiuxiang. Study on carrying capacity evaluation and dynamic simulation of sustainable utilization of water and land resources in Sanjiang Plain. Harbin: Northeast Agricultural University, 2011.]
- [10] 肖月洁, 杨中华, 马历, 等. 基于模糊综合评价的四川省水土资源承载力时空演变分析 [J]. 灌溉排水学报, 2018, 37(5): 106-114. [Xiao Yuejie, Yang Zhongjian, Ma Li et al. Spatiotemporal change in carrying-capacity of land and water resources in Sichuan Province calculated using fuzzy assessment method. Journal of Irrigation and Drainage, 2018, 37(5): 106-114.]
- [11] 刘洋. 四川农业水土资源承载力研究 [D]. 北京: 中国农业科学院, 2010. [Liu Yang. Study on the agricultural water and land carrying capacity in Sichuan Province. Beijing: Chinese Academy of Agricultural Sciences, 2010.]
- [12] Wang G, Xiao C L, Qi Z W et al. Development tendency analysis for the water resource carrying capacity based on system dynamics model and the improved fuzzy comprehensive evaluation method in the Changchun City, China[J]. *Ecological Indicators*, 2021, 122: 107232.
- [13] 邓雄. 应用生态足迹方法研究区域可持续发展的优缺点 [J]. *经济研究导刊*, 2009, 44(6): 110-111. [Deng Xiong. Advantages and disadvantages of applying ecological footprint method to study regional sustainable development. *Economic Research Guide*, 2009, 44(6): 110-111.]
- [14] Wang S, Yang F L, Xu L et al. Multi-scale analysis of the water resources carrying capacity of the Liaohe Basin based on ecological footprints[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2013, 53: 158-166.
- [15] 张可云, 傅帅雄, 张文彬. 基于改进生态足迹模型的中国 31 个省级区域生态承载力实证研究 [J]. *地理科学*, 2011, 31(9): 1084-9. [Zhang Keyun, Fu Shuaxiong, Zhang Wenbin. Ecological carrying capacity of 31 provinces based on an improved ecological footprint model. *Scientia Geographica Sinica*, 2011, 31(9): 1084-1089.]
- [16] He Y, Wang Z. Water-land resource carrying capacity in China: Changing trends, main driving forces, and implications[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2022, 331: 130003.
- [17] 王丽媛. 河南省水土资源承载力时空分异及其耦合特征研究 [D]. 郑州: 河南大学, 2019. [Wang Liyuan. Study on spatial-temporal differentiation and coupling characteristics of water and land resources bearing capacity in Henan Province. Zhengzhou: Henan University, 2019.]
- [18] 任守德. 基于宏观尺度的三江平原农业水土资源承载力研究 [D]. 哈尔滨: 东北农业大学, 2011. [Ren Shoude. Research on agriculture water and soil resources carrying capacity based on macro-micro scale in Sanjiang Plain. Harbin: Northeast Agricultural University, 2011.]
- [19] 李鑫川, 徐新刚, 王纪华, 等. 基于时间序列环境卫星影像的作物分类识别 [J]. *农业工程学报*, 2013, 29(2): 169-76+298. [Li Xinchuan, Xu Xinguang, Wang Jihua et al. Crop classification recognition based on time-series images from HJ satellite. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2013, 29(2): 169-176+298.]
- [20] 于潇, 吴克宁, 郅文聚, 等. 三江平原现代农业区景观生态安全时空分异分析 [J]. *农业工程学报*, 2016, 32(8): 253-259. [Yu Xiao, Wu Kening, Yu Wenju et al. Analysis on temporal and spatial variation of landscape ecological security in modern agricultural area. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2016, 32(8): 253-259.]
- [21] 于志海. 黑龙江垦区友谊农场现代农业发展研究 [D]. 长春: 吉林大学, 2017. [Yu Zhihai. Study on modern agriculture development situation of Friendship Farm in Heilongjiang Reclamation Area. Changchun: Jilin University, 2017.]
- [22] 郑涛, 崔守斌, 裴仲旭, 等. 黑龙江七星河国家级湿地自然保护区生态旅游开发的 SWOT 分析 [J]. *哈尔滨师范大学自然科学学报*, 2011, 27(5): 68-72. [Zheng Tao, Cui Shoubin, Pei Zhongxu et al. The SWOT analysis on the ecological tourism development of Heilongjiang national Qixinghe wetland nature reserve. *Natural Sciences Journal of Harbin Normal University*, 2011, 27(5): 68-72.]
- [23] 吴德存. 城镇化进程中江苏省生态足迹时空演变与影响机理研究 [D]. 北京: 中国矿业大学, 2017. [Wu Decun. Study on spatio-temporal evolution and influencing mechanism of ecological footprint during the process of urbanization in Jiangsu Province. Beijing: China University of Mining and Technology, 2017.]
- [24] Wang H M, Wang H E, Sun H Y et al. Assessment of the ecological security in the three gorges reservoir area by using the ecological footprint method[J]. *Journal of Mountain Science*, 2012, 9(6): 891-900.
- [25] 李怡. 基于生态足迹法的延边州水土资源承载力时空变化及耦合协调分析 [D]. 延吉: 延边大学, 2021. [Li Yi. Spatial-temporal variation and coupling and coordination analysis of soil and water resource carrying capacity in Yanbian Prefecture based on ecological footprint method. Yanji: Yanbian University, 2021.]
- [26] 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 Hui, Dong Shiwei, Wu Di et al. Calculation and analysis of equivalence factor and yield factor of ecological footprint based on ecosystem services value. *Acta Ecologica Sinica*, 2020, 40(4): 1405-1412.]

- [27] 黄林楠, 张伟新, 姜翠玲, 等. 水资源生态足迹计算方法 [J]. *生态学报*, 2008, 28(3): 1279-1286. [Huang Linnan, Zhang Weixin, Jiang Cuiling et al. Ecological footprint method in water resources assessment. *Acta Ecologica Sinica*, 2008, 28(3): 1279-1286.]
- [28] 于强, 王金龙, 王亚南. 基于水资源足迹分析的河北省城镇化发展路径 [J]. *经济地理*, 2014, 34(11): 69-73+106. [Yu Qiang, Wang Jinlong, Wang Yanan. Hebei urbanization based on analysis of the water resources ecological footprint. *Economic Geography*, 2014, 34(11): 69-73+106.]
- [29] 张军, 张仁陟, 周冬梅. 基于生态足迹法的疏勒河流域水资源承载力评价 [J]. *草业学报*, 2012, 21(4): 267-274. [Zhang Jun, Zhang Renzhi, Zhou Dongmei. A study on water resource carrying capacity in the Shule River basin based on ecological footprints. *Acta Prataculturae Sinica*, 2012, 21(4): 267-274.]
- [30] 刘宇辉, 彭希哲. 中国历年生态足迹计算与发展可持续性评估 [J]. *生态学报*, 2004, 24(10): 2257-2262. [Liu Yuhui, Peng Xizhe. Ecological footprint calculation and development sustainability assessment of China over the years. *Acta Ecologica Sinica*, 2004, 24(10): 2257-2262.]
- [31] 葛石冰, 丛明珠, 张峰松, 等. 沈阳经济区生态环境承载能力研究 [C]. 中国土地学会, 2015 年中国土地学会学术年会论文集, 南京, 2015. [Ge Shibing, Cong Mingzhu, Zhang Fengsong et al. Study on the ecological and environmental carrying capacity of Shenyang Economic Zone//China Land Science Society, Proceedings of the 2015 Academic Annual Conference of the China Land Science Society, Nanjing, 2015.]
- [32] 郝帅, 孙才志, 宋强敏. 基于 ESTDA 模型的中国水生态足迹及水生态压力评价 [J]. *生态学报*, 2021, 41(12): 4651-4662. [Hao Shuai, Sun Caizhi, Song Qiangmin. Evaluation of water ecological footprint and water ecological pressure based on ESTDA model in China. *Acta Ecologica Sinica*, 2021, 41(12): 4651-4662.]
- [33] Tsou J Y, Gao Y F, Zhang Y Z et al. Evaluating urban land carrying capacity based on the ecological sensitivity analysis: A case study in Hangzhou, China[J]. *Remote Sensing*, 2017, 9(6):529.
- [34] 臧淑英, 智瑞芝, 孙学孟. 基于生态足迹模型的资源型城市可持续发展定量评估——以黑龙江省石油城市大庆市为例 [J]. *地理科学*, 2006(4): 4420-5. [Zang Shuying, Zhi Ruizhi, Sun Xuemeng. Quantitive evaluation of sustainable development of resources-rich cites based on Ecological Track Model—A case study of Daqing the petroleum city in Heilongjiang Province. *Scientia Geographica Sinica*, 2006(4): 4420-5.]
- [35] 韩怡. 基于生态足迹的哈大齐区域土地资源可持续利用研究 [D]. 哈尔滨: 东北农业大学, 2018. [Han Yi. Study on sustainable utilization of land resources in Ha-Da-Qi region based on ecological footprint. Harbin: Northeast Agricultural University, 2018.]
- [36] Li Y, Li Y, Zhou Y et al. Investigation of a coupling model of coordination between urbanization and the environment[J]. *Journal of Environmental Management*, 2012, 98: 127-133.
- [37] 任志远, 徐茜, 杨忍. 基于耦合模型的陕西省农业生态环境与经济协调发展研究 [J]. *干旱区资源与环境*, 2011, 25(12): 14-19. [Ren Zhiyuan, Xu Xi, Yang Ren. On coordination development of agricultural ecological-environment and economy in Shaanxi Province based on coupling degree model. *Journal of Arid Land Resources and Environment*, 2011, 25(12): 14-19.]
- [38] 康凯. 基于复合生态系统理论的区域水生态承载力评价研究 [D]. 哈尔滨: 东北农业大学, 2019. [Kang Kai. Study on evaluation of regional water ecological carrying capacity based on complex ecosystem theory. Harbin: Northeast Agricultural University, 2019.]
- [39] 卢静. 黑龙江省友谊农场地下水资源评价与可持续利用建议 [D]. 哈尔滨: 东北农业大学, 2016. [Lu Jing. Assessment and suggestions for sustainable utilization of groundwater resources in the farm of Friendship. Harbin: Northeast Agricultural University, 2016.]
- [40] 高宏宇. 黑龙江垦区红兴隆分局友谊农场地下水资源评价 [D]. 哈尔滨: 黑龙江大学, 2015. [Gao Hongyu. Groundwater resources evaluation of Youyi Farm, Hongxinglong Branch, Heilongjiang Reclamation Area. Harbin: Heilongjiang University, 2015.]
- [41] 栾福超, 张郁, 葛晋. 水足迹视角下三江平原地区农业水土资源空间配置格局研究 [J]. *中国农学通报*, 2018, 34(24): 88-94. [Luan Fuchao, Zhang Yu, Ge Jin. Spatial matching patterns of agricultural land and water resources in Sanjiang Plain: Based on water footprint. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2018, 34(24): 88-94.]
- [42] 于凤荣, 杜国明, 薛剑, 等. 黑龙江省垦区大豆和玉米重迎茬遥感监测研究——以友谊农场为例 [J]. *农业现代化研究*, 2013, 34(2): 248-252. [Yu Fengrong, Du Guoming, Xue Jian et al. A remote sensing monitoring research on continuous and alternate cropping of soybeans and corn in Heilongjiang reclamation region with Friendship Farm as an example. *Research of Agricultural Modernization*, 2013, 34(2): 248-252.]
- [43] 熊建新, 陈端吕, 彭保发, 等. 洞庭湖区生态承载力系统耦合协调度时空分异 [J]. *地理科学*, 2014, 34(9): 1108-1116. [Xiong Jianxin, Chen Duanlyu, Peng Baofa et al. Spatial-temporal differentiation of coupling coordination degree of ecological carrying capacity system in Dongting Lake area. *Scientia Geographica Sinica*, 2014, 34(9): 1108-1116.]
- [44] 姜诗慧, 彭剑峰, 宋永会, 等. 沈阳市 2005—2012 年水足迹与水资源承载力分析 [J]. *环境工程技术学报*, 2017, 7(1): 15-23. [Jiang Shihui, Peng Jianfeng, Song Yonghui et al. Analysis of water footprint and water resources carrying capacity in Shenyang in 2005—2012. *Journal of Environmental Engineering Technology*, 2017, 7(1): 15-23.]
- [45] 聂晓, 刘兴士, 王毅勇. 松嫩—三江平原地区农业水土资源匹配格局研究 [J]. *湖北农业科学*, 2016, 55(18): 4894-7. [Nie Xiao, Liu Xingtu, Wang Yiyong. Study on matching patterns of land and water resources in Songnen and Sanjiang Plain. *Hubei Ag-*

- ricultural Sciences, 2016, 55(18): 4894-4897.]
- [46] 侯淑涛, 袁伟豪, 陈建龙, 等. 黑龙江省农业水土资源匹配格局与区域调控 [J]. *水土保持通报*, 2022, 42(1): 150-157+65. [Hou Shutao, Yuan Weihao, Chen Jianlong et al. Matching pattern and regional regulation of agricultural water and land resources in Heilongjiang Province. *Bulletin of Soil and Water Conservation*, 2022, 42(1): 150-157+65.]
- [47] 付强, 李伟业. 三江平原沼泽湿地生态承载力综合评价 [J]. *生态学报*, 2008, 28(10): 5002-5010. [Fu Qiang, Li Weiye. The comprehensive analysis and evaluation on the ecological carrying capacity of marsh wetlands in Sanjiang Plain. *Acta Ecologica Sinica*, 2008, 28(10): 5002-5010.]
- [48] 刘清娟. 黑龙江省种粮农户生产行为研究 [D]. 哈尔滨: 东北农业大学, 2012. [Liu Qingjuan. Research of grain farmers' production behavior in Heilongjiang Province. Harbin: Northeast Agricultural University, 2012.]
- [49] 张瑶. 中国水资源利用与经济发展的匹配性研究: 基于农业虚拟水量与水质足迹的测算 [D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2022. [Zhang Yao. Research on the matching of water resources utilization and economic development in China: Calculation based on agricultural virtual water volume and water quality footprint. Yangling: Northwest A & F University, 2022.]
- [50] Ren S, Fu Q, Wang K. Regional agricultural water and soil resources carrying capacity based on macro-micro scale in Sanjiang Plain[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2011, 27(2): 8-14.

Agricultural water and land resources carrying capacity based on ecological footprint method: A case of Youyi Farm in Sanjiang Plain

Sun Jiaxin¹, Qi Peng¹, Zhang Guangxin¹, Du Chong², Li Zan^{1,2}

(1. Key Laboratory of Wetland Ecology and Environment, Northeast Institute of Geography and Agroecology, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130102, Jilin, China; 2. Institute of Water Conservancy and Electric Power, Heilongjiang University, Harbin 150080, Heilongjiang, China)

Abstract: The coordinated development of regional agricultural water and land resources is of great significance to ensure agricultural production. However, the study on coupling evaluation of agricultural water and land resources is still insufficient. This article applies the ecological footprint method to quantitatively assess the carrying capacity of local land and water resources, taking the Youyi Farm of Sanjiang Plain, a scientific and technological demonstration area of the Black Earth Granary, as an example. The results showed that: 1) The ecological footprint of per capita agricultural water resources was 5.26 hm², and the ecological carrying capacity of per capita was 1.97 hm². The ecological footprint of per capita water resources was far more than the ecological carrying capacity. The ecological deficit of water resources was 2.82. The utilization of water resources was in an unsafe state. Per capita ecological footprint of cultivated land resources was less than the ecological carrying capacity, ecological surplus of cultivated land resources, the average ecological pressure index was 0.69. The use of cultivated land resources was in a safe state. 2) The coupling coordination degree of the ecological footprint of agricultural land and water resources and the ecological carrying capacity of land and water resources of Youyi Farm is generally in the state of barely coordinated and primary coordination. 3) In summary, although Youyi Farm was rich in land resources, water resources were scarce, indicating a significant room for improvement in the level of water and land matching in the region. Analyzing whether the carrying capacity of agricultural water and land resources is within a reasonable and controllable range is of great significance for coordinating the relationship between agricultural water and land resources and realizing the sustainable development of agricultural water and land resources.

Key words: agricultural water and land resources; ecological footprint method; granary in Black Soil; Youyi Farm