

基于能值理论的秸秆利用生态足迹评估*

——以成都平原典型稻麦轮作区为例

黄春^{1,2} 邓良基^{1,2**} 高雪松^{1,2} 张世熔^{1,2}

(1. 四川农业大学资源环境学院 温江 611130; 2. 四川省土地资源信息实验室 温江 611130)

摘要 本文采用能值分析与生态足迹分析相结合的方法,以成都平原典型稻麦轮作区——广汉市和大邑县为例,对研究区各种利用方式的秸秆资源进行能值评估,并采用能值生态足迹方法对区域秸秆利用的人均生态足迹及人均生态承载力进行分析。结果表明,2011年广汉市稻草和麦秆利用的人均生态足迹分别为0.066 1 hm²和0.034 2 hm²,人均生态承载力分别为0.083 9 hm²和0.042 3 hm²,人均生态盈余达0.017 8 hm²和0.008 1 hm²,其中稻草不同利用方式的人均生态足迹表现为肥料化>原料化>焚烧及其他>饲料化>沼气化,麦秆表现为肥料化>焚烧及其他>原料化>沼气化>饲料化;2011年大邑县稻草和麦秆利用的人均生态足迹分别为0.051 6 hm²和0.020 9 hm²,人均生态承载力分别为0.061 0 hm²和0.021 7 hm²,人均生态盈余达0.009 4 hm²和0.000 8 hm²,其中稻草不同利用方式的人均生态足迹表现为原料化>肥料化>沼气化>焚烧及其他>饲料化,麦秆表现为肥料化>焚烧及其他>原料化>沼气化>饲料化。这表明广汉市和大邑县的秸秆利用还存在一定程度的消纳空间,尤其是现有秸秆处理结构中未经合理利用甚至废弃的秸秆资源,如能充分再利用,必定会带来显著的社会经济效益和环境生态效益。

关键词 秸秆 能值 生态足迹 稻麦轮作 可持续发展 成都平原

中图分类号: X712 文献标识码: A 文章编号: 1671-3990(2014)06-0722-07

Evaluation of ecological footprint of straw resources utilization based on emergy theory: A case study of typical rice-wheat rotation region in Chengdu Plain

HUANG Chun^{1,2}, DENG Liangji^{1,2}, GAO Xuesong^{1,2}, ZHANG Shirong^{1,2}

(1. College of Resources and Environment, Sichuan Agricultural University, Wenjiang 611130, China;

2. Key Laboratory of Land Information in Sichuan Province, Wenjiang 611130, China)

Abstract Using Guanghan City and Dayi County as typical regions of rice-wheat rotation system in Chengdu Plain, emergy and ecological footprint theories were applied in the determination of the utilization status of straw resources based on statistical and survey data in 2011. Firstly, the emergies of different ways of straw utilization were calculated and the values of ecological footprint and capacity per capita then estimated and analyzed using the ecological footprint analysis method. The results showed that the values of per capita ecological footprint of rice and wheat straw resources in Guanghan City were 0.066 1 hm² and 0.034 2 hm² and the per capita ecological surpluses corresponding were 0.017 8 hm² and 0.008 1 hm², respectively. As for different utilization ways, the ecological footprint per capita of rice straws was in the order of fertilizer > raw materials > incineration and other ways > feed > biogas; for wheat straws, it was in the order of fertilizer > incineration and other ways > raw materials > biogas > feed. The values of per capita ecological footprints of rice and wheat straw resources in Dayi County were 0.051 6 hm² and 0.020 9 hm² with corresponding per capita ecological capacities of 0.061 0 hm² and 0.021 7 hm² and per capita ecological surpluses of 0.009 4 hm² and 0.000 8 hm², respectively. As for different utilization ways, the ecological footprint per capita of rice straws was in the order of raw materials > fertilizer > biogas > incineration and other ways > feed; for wheat straws it was in the order of fertilizer > incineration and other ways > raw materials > biogas > feed. The above results indicated that there still existed some room for reutilization of straw resources in Guanghan City and Dayi County. Specifically, if the unused part of the current straw resources were reused fully, it

* “十二五”国家科技支撑课题(2012BAD14B18)资助

** 通讯作者: 邓良基, 主要从事农业资源利用方面的研究。E-mail: auh6@sicau.edu.cn

黄春, 主要从事农业废弃物循环利用方面的研究。E-mail: 79412310@qq.com

收稿日期: 2013-12-11 接受日期: 2014-03-11

would greatly promote agricultural development which could lead to significant economic, ecological and environmental benefits.

Keywords Straw; Emergy; Ecological footprint; Rice-wheat rotation; Sustainable development; Chengdu Plain

(Received Dec. 11, 2013; accepted Mar. 11, 2014)

生态足迹模型是可持续发展评价的一种重要方法,它是通过测量人类对自然生态服务的需求与自然所能提供的生态服务之间的差距(基于土地面积的量化指标),分析人类对生态系统的利用状况,并在地区、国家和全球尺度上比较人类对自然的消费量与自然资本的承载量,进而评估不同尺度下生态服务的可持续利用状况^[1]。由于生态足迹方法的可操作性、可重复性和可比性强,因而在国内外得到了广泛应用和讨论^[2-4]。但随着研究的深入,传统生态足迹模型的缺陷逐渐显现,如:计算中采用全球生物产量,误差较大^[5];模型中人类活动对生态系统的影响评估不足,结果生态偏向性强^[6];计算生态承载力时,没有考虑风能、潮汐能、地热能等这些可为人类所利用的新能源等^[7]。为此,大量学者对传统生态足迹模型进行了完善和改进,其中能值生态足迹方法^[7]正是基于能值理论对传统生态足迹计算方法的一种改进形式。

能值理论是由美国生态学家 Odum 经过长期的研究,综合系统生态、能量生态和生态经济原理,于 20 世纪 80 年代末提出的。其分析方法是在传统能量分析的基础上,将任何流动的或贮存状态的能量所包含的太阳能的量称为其所具有的太阳能值(solar emergy),即把各种形式的能量转化为统一标准单位(太阳能焦耳, Solar Emjoule, 缩写为 Sej)的能值,从而突破了传统能量分析中不同能量类别难于比较分析的瓶颈^[8]。基于能值理论的生态足迹分析从能量角度对生态承载力和生态足迹进行了新的诠释^[9],因而该方法受到许多学者的关注。目前,我国学者已采用此方法对全国^[9]、省域^[10-13]、市域^[14-15]甚至县域^[16-17]的生态经济系统进行了研究。其中,边淑娟等^[18]运用能值生态足迹分析方法对福建省 1997—2006 年农业废弃物利用方式进行评估后发现,福建省农业废弃物再利用还存在较大空间。而需要指出的是,农业废弃物是一类容易被忽略的资源,在资源和能源短缺的今天,其循环再利用已成为社会经济可持续发展不可忽视的一个方面,但目前还鲜见单独针对区域某种农业废弃物资源生态足迹研究的报道。

农作物秸秆作为重要的有机物和能源资源,其开发利用关系到资源、环境以及农业的可持续发展,因而其利用问题越来越受到人们的关注^[19-22]。基于此,本文采用能值生态足迹分析方法,对成都平原

典型稻麦轮作区秸秆(包括稻草和麦秆)利用的合理性进行评价,以期为区域秸秆资源的合理利用提供一定的科学依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

成都平原位于四川盆地西部,是我国西南地区最大的平原。该区域气候温和,土地肥沃,种植制度为一年两熟制,主要为稻麦、稻油轮作,常年提供的商品粮、油分别占四川省的 1/5 和 2/5 以上,是四川乃至全国主要的商品粮、油生产基地之一。由于区域农作物秸秆产出量大,且小春作物收获后,茬口紧,导致农作物秸秆,特别是小春作物秸秆不能及时合理利用,秸秆就地焚烧、弃置乱堆现象时有发生^[23]。

本文选取成都平原区内广汉市和大邑县作为典型稻麦轮作区进行研究。广汉市位于成都平原东北部,龙泉山西麓,地跨北纬 30°53′~31°08′,东经 104°06′~104°29′,面积 538 km²。境内地势平坦,属亚热带湿润季风气候区,多年年均气温 16.4 °C,无霜期 284 d,年均降雨量 923.1 mm。区域土壤的成土母质为基岩风化物 and 松散堆积物两大类,水稻土为农业主要土壤类型。大邑县地处成都平原向川西北高原过渡的前沿地带,其西部为成都平原与龙门山脉隆起的缝合带,地跨北纬 30°25′~30°49′,东经 102°54′~103°45′,面积 1 327 km²。县域位于亚热带湿润季风气候区内,多年年均气温 16.0 °C(平原区),无霜期 284 d,年均降雨量 1 098.2 mm。境内成土因素复杂多样,水稻土为农业主要土壤类型。近年来,在成都平原大部分农业区(市)县大力调整农业产业结构,积极推进传统种植产业向花卉、苗木、水果、反季节蔬菜等特色产业转变的大背景下,广汉市和大邑县通过保护良田,推广良种、良法等先进实用技术,建立了稳定发展粮食生产的长效机制,确保了在发展区域特色农业的同时,粮食作物播种面积未减少。两个县(市)的农业生产条件、生产水平及生态气候特点在成都平原区具有典型性和代表性,且其“稻-麦”播种面积一直保持在粮食作物播种面积的 2/3 以上,是成都平原典型的稻麦轮作区域。

1.2 研究方法

1.2.1 基本原理

本文中,基于能值分析的生态足迹评价是依据

秸秆能值转换率,将研究区不同处理方式的秸秆量转换成对应的秸秆能值量,建立区域秸秆资源消耗账户,并引入全国和区域的秸秆能值密度,将秸秆不种处理方式消耗的能值换算成相应的生物生产性面积,计算出区域秸秆的人均生态足迹以及人均生态承载力,从而对区域秸秆利用的合理性进行评价。

1.2.2 方法步骤

1) 秸秆可收集量估算

农作物秸秆可收集量可依据农作物的产量计算得出,具体公式如下:

$$S = Q \times r_1 \times r_2 \quad (1)$$

式中: S 为稻草(麦秆)可收集量; Q 为水稻(小麦)产量; r_1 为秸秆折算系数(草谷比),其中水稻草谷比取值为 0.85,小麦草谷比取值为 1.16; r_2 为秸秆可收集系数,取值为 0.83^[24]。

2) 秸秆能值估算

秸秆的能值量可依据其能量折算系数和太阳能值转换率计算得出,具体公式如下:

$$E = Q \times C_v \times t \quad (2)$$

式中: E 为稻草(麦秆)能值; Q 为稻草(麦秆)可收集量; C_v 为秸秆能量折算系数(热值),其中稻草热值取值为 $1.42 \times 10^{10} \text{ J} \cdot \text{t}^{-1}$,麦秆热值取值为 $1.37 \times 10^{10} \text{ J} \cdot \text{t}^{-1}$ ^[25]; t 为秸秆能值转换率,取值为 $4.53 \times 10^4 \text{ sej} \cdot \text{J}^{-1}$ (太阳能值转换率基于新的全球能值基线: $15.83 \text{ E} + 24 \text{ sej} \cdot \text{y}^{-1}$,即 2000 年前测算的太阳能值转换率需乘以 1.676 9 进行校正)^[26]。

3) 秸秆人均生态足迹分析

该分析步骤参考相关的基于能值理论改进的生态足迹模型研究^[10,12,14,18],具体如下:

① 计算研究区域稻草(麦秆)不同处理方式的能值流向;

② 计算研究区域稻草(麦秆)的人均生态承载力,公式如下:

$$E_c = E_a / \rho_1 = (q \times t) / (E / s) \quad (3)$$

式中: E_c 为研究区稻草(麦秆)人均生态承载力; E_a 为

研究区人均消耗稻草(麦秆)理论能值,其中 q 为区域人均稻草(麦秆)生产量, t 为稻草(麦秆)能值转换率; ρ_1 为全国稻草(麦秆)能值密度,其中 E 为全国稻草(麦秆)总能值, s 为全国水稻(小麦)播种面积。根据《2012 年中国统计年鉴》,2011 年全国水稻播种面积为 3 005.7 万 hm^2 ,产量为 20 100.1 万 t; 小麦播种面积为 2 427.0 万 hm^2 ,产量为 11 740.1 万 t。

③ 计算研究区域稻草(麦秆)处理方式的人均生态足迹,具体公式如下:

$$E_f = \sum_{i=1}^n e f_i = \sum_{i=1}^n (e_i / \rho_2) \quad (4)$$

式中: E_f 为研究区稻草(麦秆)处理方式的人均生态足迹; i 为稻草(麦秆)处理方式种类; $e f_i$ 为第 i 种稻草(麦秆)处理方式的人均生态足迹; e_i 为第 i 种稻草(麦秆)处理方式的均能值; ρ_2 为研究区稻草(麦秆)能值密度,即研究区稻草(麦秆)总能值除以区域水稻(小麦)播种面积。

④ 计算研究区稻草(麦秆)的生态赤字或者盈余,进而对区域稻草(麦秆)利用的合理性进行评价。

1.3 数据来源

本文数据来源主要有以下两部分: ① 研究区农业人口数量、稻麦产量、不同利用方式的秸秆数量等来自于《2012 年广汉统计年鉴》、《2012 年大邑统计年鉴》、农业局统计资料及农户随机抽样调查; ② 其他数据,包括全国稻麦产量和播种面积、能量折算系数、能值转换率等来自于《2012 年中国统计年鉴》及研究文献^[24-26]。

2 结果与分析

2.1 秸秆可收集量估算

2011 年,广汉市和大邑县的“稻-麦”播种面积分别占其粮食总播种面积 82% 和 69%。由于区域稻麦单产较高,因而稻草和麦秆产出量大。根据公式(1)计算出广汉市和大邑县 2011 年秸秆可收集总量,见表 1。

表 1 2011 年广汉市和大邑县稻麦生产情况统计

Table 1 Production statistics of rice and wheat in Guanghan City and Dayi County in 2011

地区 Region	粮食总播种面积 Total grain sowing area (hm^2)	播种面积 Sowing area (hm^2)		作物产量 Crop yield (10^4 t)		秸秆可收集量 Straw quantity (10^4 t)	
		小麦 Wheat	水稻 Rice	小麦 Wheat	水稻 Rice	小麦 Wheat	水稻 Rice
广汉 Guanghan	47 588	13 356	25 819	7.993	21.920	7.696	15.465
大邑 Dayi	33 088	6 527	16 142	3.282	12.761	3.160	9.003

数据来源于广汉市和大邑县 2011 年农业统计报表。The data were from the agricultural statistical tables of Guanghan City and Dayi County in 2011.

2.2 秸秆不同处理方式的能值估算

近年来, 成都平原各市(县)政府及有关部门积极推广秸秆再利用技术, 如秸秆肥料化、饲料化、原料化和沼气化等。对此, 本文通过实地走访, 以随机问卷方式对广汉市连山镇、金鱼镇、西高镇、高坪镇和大邑县韩场镇、蔡场镇、安仁镇、桤泉镇的

部分从事稻麦轮作生产的农户进行调查。在调查中, 共向农户发放问卷 266 份, 收回有效问卷 237 份, 问卷有效率达 89%, 其中广汉市 114 份, 大邑县 123 份。根据调查结果, 估算出研究区不同处理方式的秸秆数量(表 2), 进而计算出秸秆不同处理方式的能值构成(表 3)。

表 2 2011 年广汉市和大邑县秸秆利用状况
Table 2 Utilization status of rice and wheat straws in Guanghan City and Dayi County in 2011 10^4 t

地区 Region	秸秆类型 Straw type	总计 Total	肥料化 Fertilizer	原料化 Raw material	饲料化 Feed	沼气化 Biogas	焚烧 Incineration	其他 Others
广汉 Guanghan	稻草 Rice straw	15.465	10.551±1.718	2.986±0.438	0.738±0.071	0.065±0.008	0.170±0.012	0.954±0.150
	麦秆 Wheat straw	7.696	5.369±0.948	0.239±0.043	0.008±0.002	0.021±0.003	0.393±0.078	1.667±0.322
大邑 Dayi	稻草 Rice straw	9.003	1.641±0.340	6.459±1.836	0.254±0.041	0.351±0.048	0.013±0.001	0.285±0.041
	麦秆 Wheat straw	3.160	1.945±0.331	0.421±0.111	0.003±0.001	0.042±0.007	0.197±0.045	0.552±0.102

表中数值为基于区域调查样本中不同秸秆利用方式所占比例平均值的换算结果, 下表同。Values in the table are converted from the average of percentage of different use ways of straw according to the regional investigation samples. The same as table 3.

表 3 2011 年广汉市和大邑县秸秆不同处理方式的能值构成
Table 3 Emery composition of straw utilization ways in Guanghan City and Dayi County in 2011 10^{18} sej

地区 Region	秸秆类型 Straw type	总计 Total	肥料化 Fertilizer	原料化 Raw material	饲料化 Feed	沼气化 Biogas	焚烧 Incineration	其他 Others
广汉 Guanghan	稻草 Rice straw	99.477	67.873±11.052	19.209±2.815	4.745±0.458	0.418±0.050	1.094±0.080	6.138±0.965
	麦秆 Wheat straw	47.762	33.319±5.884	1.481±0.267	0.048±0.010	0.129±0.019	2.441±0.482	10.345±1.966
大邑 Dayi	稻草 Rice straw	57.912	10.577±2.189	41.546±11.808	1.633±0.261	2.259±0.307	0.081±0.006	1.836±0.266
	麦秆 Wheat straw	19.609	12.071±2.057	2.610±0.690	0.020±0.004	0.261±0.041	1.224±0.278	3.424±0.635

1) 秸秆肥料化

秸秆中富含有机碳、N、P、K 以及中微量元素, 是一种重要的有机肥源物质^[27]。秸秆肥料化包括秸秆直接还田、堆沤还田和过腹还田等。由于秸秆过腹还田量数据收集较为困难, 因而本文秸秆肥料化主要考虑研究区农村最为常见的秸秆直接还田和堆沤还田。调查分析表明, 秸秆作为肥料直接还田是研究区秸秆利用的主要方式, 其中广汉市稻草和麦秆还田量分别为 10.551 万 t 和 5.369 万 t, 占到其可收集利用量的 68%以上, 而大邑县的麦秆还田量也达到 1.945 万 t, 还田比例达 61%(表 2)。秸秆直接还田需要一定的机械投入, 因而机械化水平的高低一定程度上影响着区域秸秆还田利用率的高低。研究区地处成都平原区, 农业机械化水平较高, 加之是实行秸秆直接还田的试点区域, 政策引导力度大, 因而农户秸秆还田意识较强, 区域秸秆肥料化利用率较高。

2) 秸秆原料化

秸秆作为工农业原料用途广泛, 其不仅可作保温材料、纸浆原料、菌类培养基、各类轻质板材和包装材料的原料, 还用于编织业、酿酒制醋、生产人造棉、人造丝、饴糖等, 或从中提取淀粉、木糖

醇、糖醛等^[20]。调查发现, 研究区秸秆原料化主要是秸秆作为原料用于食用菌生产, 其中大邑县秸秆原料化利用量达 6.880 万 t, 占区域秸秆可收集利用量的 56%。这主要与大邑县农业产业结构密切相关。在大邑县调研乡镇中, 韩场镇、蔡场镇先后荣获“中国食用菌之乡”称号。目前, 两镇已建成标准化菇房近 2 000 座(1 个菇房占地 120 m², 其种植面积相当于占地 666.7 m² 的常规蘑菇大棚种植面积, 每年可消纳秸秆 8 t 以上), 因而用于食用菌生产的秸秆量较大。

3) 秸秆饲料化

秸秆中较高的粗纤维含量, 限制了瘤胃中的微生物和消化酶对细胞壁内溶物的消化作用, 导致秸秆适口性和营养性差, 因而秸秆用作饲料需进一步加工调制。目前, 秸秆饲料化包括秸秆青贮、黄贮、氨化、碱化、糖化及微贮等, 技术要求及成本较高。从调查结果看, 研究区农户主要是将稻草粉碎, 直接喂养, 区域秸秆饲料加工技术相对缺乏, 秸秆饲料化利用率低(广汉市和大邑县秸秆饲料化利用量仅有 0.746 万 t 和 0.257 万 t)。

4) 秸秆沼气化

秸秆沼气化是指秸秆用作辅料发酵产沼气。通常, 沼气池中秸秆、人畜粪便和水的配比为 1 1 8,

在产沼过程中,需定期投入发酵基质及清理沼渣^[20]。调查发现,研究区秸秆用于沼气辅料的比重低,其中广汉市秸秆沼气化利用量仅占其可收集利用量的 0.37%。在各级政府逐步加大对农村沼气工程扶持力度的情况下,研究区用作沼气辅料的秸秆仍然较少。这主要是由于: 秸秆沼气化需定期投入一定的人力物力,而研究区农户在农闲时节多选择在就近城镇务工,对于秸秆沼气化的参与度不够; 随着区域农村经济的进一步发展以及农业结构的优化调整,调查区农村已出现了一定程度的“人畜分离”状况,直接导致产沼所需的发酵基质数量不足,从而阻碍了区域秸秆沼气化利用的进一步推广。

5) 焚烧及其他

研究区秸秆的处理方式,除上述几种外,还包括就地焚烧、弃置乱堆以及其他一些未利用方式。调查分析表明,该部分秸秆量分别占广汉市和大邑县秸秆可收集利用量的 14%和 9%,并以麦秆为主(比例为 68%)。这不仅造成了巨大的资源浪费,而且使区域生态环境日趋恶化,因此亟待有关部门采取有效措施,加强引导,促进区域秸秆资源的合理利用。

2.3 秸秆资源的生态足迹分析

根据公式(3)和(4)计算出广汉市和大邑县 2011 年秸秆资源的人均生态承载力和秸秆不同处理方式

的人均生态足迹(表 4)。

从表 4 可以看出,广汉市和大邑县 2011 年不同秸秆处理方式的人均生态足迹呈现出较大差异,其中:广汉市稻草处理表现为肥料化>原料化>焚烧及其他>饲料化>沼气化,麦秆处理表现为肥料化>焚烧及其他>原料化>沼气化>饲料化,肥料化在区域秸秆资源人均生态足迹中占主导地位;大邑县稻草处理则表现为原料化>肥料化>沼气化>焚烧及其他>饲料化,麦秆处理表现为肥料化>焚烧及其他>原料化>沼气化>饲料化,原料化和肥料化在区域秸秆资源人均生态足迹中占主导地位。这主要与两地的农业产业结构及相关秸秆再利用技术的推广力度密切相关。由各秸秆处理方式的人均生态足迹累加可得出,2011 年广汉市稻草和麦秆利用的人均生态足迹分别为 0.066 1 hm²和 0.034 2 hm²,而其人均生态承载力分别为 0.083 9 hm²和 0.042 3 hm²,人均生态盈余达 0.017 8 hm²和 0.008 1 hm²。2011 年大邑县稻草和麦秆利用的人均生态足迹(0.051 6 hm²和 0.020 9 hm²)和人均生态承载力(分别为 0.061 0 hm²和 0.021 7 hm²)均低于广汉市水平,尽管区域稻草和麦秆利用仍处于生态盈余状态,但人均盈余量仅为 0.009 4 hm²和 0.000 8 hm²。显然,研究区秸秆资源的利用处于区域生态经济系统的承载能力之内,还存在一定程度的秸秆消纳空间。

表 4 2011 年广汉市和大邑县秸秆不同处理方式的生态足迹汇总

Table 4 Ecological footprint summary of straw utilization ways in Guanghan City and Dayi County in 2011

地区 Region	秸秆类型 Straw type	秸秆利用方式的生态足迹 Eco-footprint of different straw utilization way						总生态足迹 Total eco-footprint	生态承载力 Eco-capacity	生态赤字(-)/ 盈余(+) Eco-deficit (-)/ surplus (+)
		肥料化 Fertilizer	原料化 Raw material	饲料化 Feed	沼气化 Biogas	焚烧 Incineration	其他 Others			
广汉 Guanghan	稻草 Rice straw	4.507±0.734	1.275±0.187	0.315±0.030	0.028±0.003	0.073±0.005	0.408±0.064	6.605±1.728	8.385	1.780±1.728
	麦秆 Wheat straw	2.383±0.421	0.106±0.019	0.003±0.001	0.009±0.001	0.175±0.035	0.740±0.143	3.417±0.930	4.227	0.810±0.930
大邑 Dayi	稻草 Rice straw	0.941±0.195	3.702±1.052	0.146±0.023	0.201±0.027	0.007±0.001	0.164±0.024	5.161±1.431	6.100	0.940±1.431
	麦秆 Wheat straw	1.285±0.219	0.278±0.073	0.002±0.000	0.028±0.004	0.130±0.030	0.364±0.068	2.087±0.480	2.169	0.082±0.480

计算农作物秸秆利用的人均生态承载力和人均生态足迹时采用农业人口,广汉市按 39.09 万人计,大邑县按 31.28 万人计,数据来源于两地 2012 年统计年鉴;总生态足迹为不同秸秆处理方式生态足迹累加±标准差。The ecological carrying capacity per capita and ecological footprint per capita for straw utilization ways were calculated according to agricultural population, which was 390 900 persons in Guanghan City and 312 800 persons in Dayi County. The data was come from the statistical yearbooks of the two regions in 2012. The total ecological footprint per capita was expressed as the accumulated ecological footprint for different straw treatment ways with the standard deviation.

3 讨论与结论

将能值分析与生态足迹分析相结合,对成都平原典型稻麦轮作区——广汉市和大邑县 2011 年秸秆利用进行生态足迹评估发现:广汉市稻草和麦秆利用的人均生态足迹分别为 0.066 1 hm²和 0.034 2 hm²,其人均生态盈余达 0.017 8 hm²和 0.008 1 hm²;大邑县

稻草和麦秆利用的人均生态足迹分别为 0.051 6 hm²和 0.020 9 hm²,其人均生态盈余为 0.009 4 hm²和 0.000 8 hm²。这表明广汉市和大邑县秸秆资源的利用处于区域生态经济系统的承载能力之内,还存在一定程度的秸秆消纳空间。

需要指出的是,2011 年广汉市和大邑县露天焚烧、弃置以及其他未作利用处理的秸秆资源人均生

态足迹分别达到 0.014 0 hm² 和 0.006 7 hm², 占到区域秸秆资源总量的 14%和 9%。已有研究表明, 随着我国社会经济的发展, 农村能源消费结构中秸秆资源所占比例从 1989 年的 34.8%下降到了 2005 年的 17.1%^[28]。这一秸秆利用趋势在黄靖强等^[4]的研究中也有体现。然而, 秸秆作为农村能源的比重下降导致了大量的秸秆被露天焚烧或弃置^[22]。据估算, 我国露天焚烧的秸秆量占到秸秆产出总量的 23%左右, 排放的一些污染物, 如黑碳(BC)、挥发性有机物(VOC)、CO、CO₂等, 对全国总排放量的贡献非常明显^[29], 造成的直接生物资源损失和大气污染损失超过 309 亿元, 并存有交通事故和火灾事故风险^[30]。由此, 尽管研究区未合理利用的秸秆数量比例低于全国平均水平, 但这一部分秸秆资源仍造成了当地农业资源的浪费, 并且成为了区域大气、水体污染源之一。同时, 可以预见, 随着成都平原农村社会的不断发展, 包括农村地区商品能源的普及(主要为天然气和煤气)以及循环农业理念的引领(成都平原二、三经济圈层的各区(市)县均建立了较大规模的秸秆还田核心示范区, 并且部分区(市)县针对性地建立起了“粮食作物—秸秆—食用菌—菌渣—粮食作物”循环农业模式示范区), 秸秆肥料化和原料化在一定时间段内仍将是区域秸秆资源循环再利用的主要方式。因此, 研究区各级政府及相关部门应进一步加大相关秸秆资源再利用技术的推广, 如秸秆覆盖还田技术、机械化粉碎还田技术、微生物发酵技术等, 并加强政策引导力度, 以提高区域秸秆资源的有效利用率。

基于能值理论的生态足迹分析将复合生态系统中的物质循环和能量流动紧密联系起来, 从能量的角度分析需求与供给的关系, 进而探讨区域资源的生态足迹和生态承载力。许多学者已对基于能值理论的生态足迹分析和传统的生态足迹分析进行了对比, 并论证了前者在可持续发展评价中的优势, 即前者所采用的能值转换率、能值密度等参数较后者所采用的全球平均生产力、均衡因子、产量因子等参数更加稳定, 更能反映区域资源的利用特征^[7,9,10,14,31]。但与此同时, 也应该看到, 基于能值理论的生态足迹分析仍然存在许多不足之处, 比如: 由于区域生态环境和技术条件存在差异, 不同地区经济社会中各种物质的太阳能值转换率不尽相同, 因而在该方法的应用过程中, 各地区太阳能值转换率的测算有待进一步深入开展, 以使分析更加准确, 从而便于计算结果的横向和纵向比较。

本文在计算广汉市和大邑县 2011 年秸秆利用人均生态足迹时, 由于数据资料的不足, 导致计算结

果存在一定的误差, 主要包括: ①由于研究区生产力水平较高以及区域农田生态系统的复杂多样, 使得能值转换率和能量折算系数在引用值和实际值间存在误差; ②由于区域农业生产措施和农田生物资源的差异, 导致秸秆折算系数和秸秆可收集系数的计算存在一定误差。但总体而言, 能值生态足迹方法有其理论先进性, 研究结果能较为客观真实地反映研究区秸秆资源的利用状况, 进而能够为决策部门制定相关政策提供一定的科学依据。

参考文献

- [1] 蒋玲燕, 闻岳, 周琪. 生态足迹分析方法及其在国内的应用[J]. 四川环境, 2006, 25(4): 43-47
Jiang L Y, Wen Y, Zhou Q. Introduction of ecological footprint analysis and its application in China[J]. Sichuan Environment, 2006, 25(4): 43-47
- [2] Wackernagel M, Monfreda C, Erb K H, et al. Ecological footprint time series of Austria, the Philippines and South Korea for 1961-1999: Comparing the conventional approach to an 'actual land area' approach[J]. Land Use Policy, 2004, 21(3): 261-269
- [3] 刘宇辉. 中国 1961—2001 年人地协调度演变分析——基于生态足迹模型的研究[J]. 经济地理, 2005, 25(2): 219-222
Liu Y H. The analysis of China's human-environment relationship fluctuations between 1961-2001: Study based on the EF (ecological footprint) model[J]. Economic Geography, 2005, 25(2): 219-222
- [4] 黄靖强, 尚杰, 于法稳. 基于生态足迹的黑龙江省农村能源利用动态研究[J]. 中国生态农业学报, 2011, 19(4): 932-935
Huang J Q, Shang J, Yu F W. Determining the dynamic of energy consumption in rural Heilongjiang Province from ecological footprint[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2011, 19(4): 932-935
- [5] 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
- [6] Van Vuuren D P, Smeets E M W. Ecological footprints of Benin, Bhutan, Costa Rica and the Netherlands[J]. Ecological Economics, 2000, 31(1): 115-130
- [7] Zhao S, Li Z Z, Li W L. A modified method of ecological footprint calculation and its application[J]. Ecological Modeling, 2005, 185(1): 65-75
- [8] Odum H T. Environmental accounting: Emery and environmental decision making[M]. New York: John Wiley, 1996: 1-15
- [9] Chen B, Chen G Q. Ecological footprint accounting based on emery: A case study of the Chinese society[J]. Ecological Modeling, 2006, 198(1/2): 101-114
- [10] 王明全, 王金达, 刘景双, 等. 基于能值的生态足迹方法在黑龙江和云南二省中的应用与分析[J]. 自然资源学报, 2009, 24(1): 73-81
Wang M Q, Wang J D, Liu J S, et al. Application of the emergent ecological footprint method to Heilongjiang and

- Yunnan Provinces and analysis[J]. *Journal of Natural Resources*, 2009, 24(1): 73-81
- [11] 张雪花, 李建, 张宏伟. 基于能值-生态足迹整合模型的城市生态性评价方法研究——以天津市为例[J]. *北京大学学报: 自然科学版*, 2011, 47(2): 344-352
Zhang X H, Li J, Zhang H W. Emergy-ecological footprint integrated model for eco-city evaluation: A case of Tianjin City[J]. *Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Pekinensis*, 2011, 47(2): 344-352
- [12] 赵雪艳, 刘霜, 赵海莉. 基于能值分析理论的生态足迹在区域可持续发展评价中的应用——以甘肃省为例[J]. *干旱区研究*, 2011, 28(3): 524-531
Zhao X Y, Liu S, Zhao H L. Application of ecological footprint in evaluating regional sustainable development based on emergy analysis theory: A case study in Gansu Province[J]. *Arid Zone Research*, 2011, 28(3): 524-531
- [13] 刘志杰, 陈克龙, 赵志强, 等. 基于能值理论的西宁市生态足迹分析[J]. *国土与自然资源研究*, 2011(1): 5-7
Liu Z J, Chen K L, Zhao Z Q, et al. Analysis of ecological footprint of Xining city based on emergy theory[J]. *Territory & Natural Resources Study*, 2011(1): 5-7
- [14] 王国刚, 杨德刚, 张新焕, 等. 基于能值理论的生态足迹改进模型及其应用[J]. *中国科学院研究生学报*, 2012, 29(3): 352-358
Wang G G, Yang D G, Zhang X H, et al. Modified ecological footprint model based on emergy analysis and its application[J]. *Journal of Graduate University of Chinese Academy of Sciences*, 2012, 29(3): 352-358
- [15] 张宇钰, 刘建军, 马长欣, 等. 基于能值-生态足迹的安康市可持续发展评价[J]. *西北林学院学报*, 2013, 28(1): 67-72
Zhang Y Y, Liu J J, Ma C X, et al. Assessment of sustainable development based on emergy theory and ecological footprint: A case study of Ankang[J]. *Journal of Northwest Forestry University*, 2013, 28(1): 67-72
- [16] 汤萃文, 苏研科, 杨国靖, 等. 基于能值分析的甘肃天祝县生态足迹研究[J]. *冰川冻土*, 2011, 33(1): 220-226
Tang C W, Su Y K, Yang G J, et al. Ecological footprint in Tianzhu County based on emergy analysis[J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2011, 33(1): 220-226
- [17] 张清华, 韩梅, 杨利民. 1949-2008 年吉林省乾安县能值生态足迹的动态研究[J]. *西北农林科技大学学报: 自然科学版*, 2012, 40(5): 173-178
Zhang Q H, Han M, Yang L M. Dynamic analysis of energetic ecological footprint of Qian'an County, Jilin Province from 1949 to 2008[J]. *Journal of Northwest A & F University: Natural Science Edition*, 2012, 40(5): 173-178
- [18] 边淑娟, 黄民生, 李娟, 等. 基于能值生态足迹理论的福建省农业废弃物再利用方式评估[J]. *生态学报*, 2010, 30(10): 2678-2686
Bian S J, Huang M S, Li J, et al. An evaluation on the using ways of agricultural wastes reutilization in Fujian based on emergy and ecological footprint theory[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2010, 30(10): 2678-2686
- [19] Lai R. World crop residues production and implications of its use as a biofuel[J]. *Environment International*, 2005, 31(4): 575-584
- [20] 石磊, 赵由才, 柴晓利. 我国农作物秸秆的综合利用技术进展[J]. *中国沼气*, 2005, 23(2): 11-14
Shi L, Zhao Y C, Chai X L. Comprehensive utilization techniques progress of crop straws in China[J]. *China Biogas*, 2005, 23(2): 11-14
- [21] Liu H, Jiang G M, Zhuang H Y, et al. Distribution, utilization structure and potential of biomass resources in rural China: With special references of crop residues[J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2007, 12(5): 1402-1418
- [22] 高利伟, 马林, 张卫峰, 等. 中国作物秸秆养分资源数量估算及其利用状况[J]. *农业工程学报*, 2009, 25(7): 173-179
Gao L W, Ma L, Zhang W F, et al. Estimation of nutrient resource quantity of crop straw and its utilization situation in China[J]. *Transactions of the CSAE*, 2009, 25(7): 173-179
- [23] 肖瑶. 四川省秸秆焚烧与利用分析[J]. *绿色科技*, 2012(11): 72-74
Xiao Y. The analysis of straw burning and use[J]. *Journal of Green Science and Technology*, 2012(11): 72-74
- [24] 毕于运, 王道龙, 高春雨, 等. 中国秸秆资源评价与利用[M]. 北京: 中国农业科学技术出版社, 2011: 55-58
Bi Y Y, Wang D L, Gao C Y, et al. Straw Resources Evaluation and Utilization in China[M]. Beijing: China Agricultural Science and Technology Press, 2011: 55-58
- [25] 骆世明. 农业生态学[M]. 北京: 中国农业出版社, 2001: 451
Luo S M. Agricultural Ecology[M]. Beijing: China Agricultural Press, 2011: 451
- [26] 蓝盛芳, 钦佩, 陆宏芳. 生态经济系统能值分析[M]. 北京: 化学工业出版社, 2002: 384
Lan S F, Qin P, Lu H F. Emergy Analysis of Eco-economic System[M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2002: 384
- [27] 戴志刚, 鲁剑巍, 李小坤, 等. 不同作物还田秸秆的养分释放特征试验[J]. *农业工程学报*, 2010, 26(6): 272-276
Dai Z G, Lu J W, Li X K, et al. Nutrient release characteristic of different crop straws manure[J]. *Transactions of the CSAE*, 2010, 26(6): 272-276
- [28] Zhou Z R, Wu W L, Chen Q, et al. Study on sustainable development of rural household energy in northern China[J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2008, 8(12): 2227-2239
- [29] 曹国良, 张小曳, 王亚强, 等. 中国区域农田秸秆露天焚烧排放量的估算[J]. *科学通报*, 2007, 52(15): 1826-1831
Cao G L, Zhang X Y, Wang Y Q, et al. Estimating the quantity of crop residues burnt in open field in China[J]. *Chinese Science Bulletin*, 2007, 52(15): 1826-1831
- [30] 王丽, 李雪铭, 许妍. 中国大陆秸秆露天焚烧的经济学损失研究[J]. *干旱区资源与环境*, 2008, 22(2): 170-175
Wang L, Li X M, Xu Y. The economic losses caused by crop residues burnt in open field in China[J]. *Journal of Arid Land Resources and Environment*, 2008, 22(2): 170-175
- [31] 陈春锋, 王宏艳, 肖笃宁, 等. 基于传统生态足迹方法和能值生态足迹方法的黑龙江省可持续发展状态比较[J]. *应用生态学报*, 2011, 19(11): 2544-2549
Chen C F, Wang H Y, Xiao D N, et al. Comparison of sustainable development status in Heilongjiang Province based on traditional ecological footprint method and emergy ecological footprint method[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2011, 19(11): 2544-2549