

引用格式: 罗怀良. 山区农产品主产区种养关联碳减排潜力估算——以四川洪雅、开江、盐亭和兴文县为例[J]. 山地学报, 2024, 42(3): 287-299.

LUO Huailiang. Potential of carbon emission reduction by crop-livestock integration in main producing areas of mountain farm-produces—taking four counties in Sichuan province, China as examples [J]. Mountain Research, 2024, 42(3): 287-299.

山区农产品主产区种养关联碳减排潜力估算 ——以四川洪雅、开江、盐亭和兴文县为例

罗怀良

(四川师范大学 地理与资源科学学院, 成都 610101)

摘 要: 种养关联既可有效利用农业废弃物, 又具碳减排效应。已有研究主要聚焦农业废弃物资源化利用及其污染控制, 对农业种养关联碳减排缺乏关注。本文以四川盆地山地丘陵农产品主产区的洪雅、开江、盐亭和兴文 4 县为研究对象, 采用草谷比法估算作物秸秆量, 依据能量转化构建秸秆饲料化利用碳减排潜力估算法, 采用排泄系数法估算畜禽粪便量, 依据营养物质循环构建粪便肥料化利用碳减排潜力估算法, 探讨 2008—2017 年该区种养关联碳减排潜力。结果表明: (1) 该区种养关联年均碳减排潜力为 19.42×10^4 t, 且微弱上升 (1.25%)。其中, 作物秸秆饲料化利用年均碳减排潜力 15.49×10^4 t, 上升 8.37%; 畜禽粪便肥料化利用年均碳减排潜力 3.93×10^4 t, 下降 23.09%。(2) 该区单位耕地面积种养关联碳减排潜力为 2.04 t/hm², 其中, 开江 (2.36 t/hm²) > 洪雅 (2.30 t/hm²) > 盐亭 (2.01 t/hm²) > 兴文 (1.57 t/hm²)。 (3) 该区种养关联碳减排潜力中作物秸秆饲料化利用占比 (79.75%) > 畜禽粪便肥料化利用 (20.25%); 作物秸秆饲料化利用碳减排潜力以水稻 (35.07%)、玉米 (24.99%)、小麦 (13.44%) 和油菜 (12.77%) 等作物为主 (共 86.27%); 畜禽粪便肥料化利用碳减排潜力以牛粪便为主 (占 52.94%)。本研究可以为山地丘陵区种养关联碳减排提供理论依据。

关键词: 农产品主产区; 种养关联; 碳减排潜力; 作物秸秆; 畜禽粪便

中图分类号: F205, F323.22, S210.3

文献标志码: A

人类活动导致温室气体含量增加是全球气候变化的主要原因, 农业生产产生的温室气体占全球人类活动导致温室气体排放的近 30%^[1-2]。由于缺乏区域农业碳源/汇内外关联的深刻认识, 农业碳源/汇效应研究多局限于种养内部的碳吸收与排放, 而种养关联则侧重于环境保护。要准确评估农业碳源/汇效应, 必须加强农业内部的组分细化及其关联的综合研究^[3]。

农业生产主要废弃物包括作物秸秆和畜禽粪便, 两者是农业生产碳排放和农业污染风险源。随着畜牧业规模发展, 畜禽粪便量持续增长且集中, 同

时受季节限制、施用不便等因素制约, 农业生产内部的物质能量循环流动链条中断, 畜禽粪便成为突出污染源^[4]。秸秆利用不能与农业生产完全结合, 至今缺乏有效解决方案^[5]。

农牧一体化 (种养关联) 可为缓解小规模农业系统转型过程中的环境权衡提供机会和空间^[6]。国内学者对作物秸秆和畜禽粪便量估算^[5,7-9]、利用方式与潜力^[10-15]以及种养关联的环境管理^[15-18]等进行大量研究, 但其主要关注农业废弃物资源化利用及其污染控制, 缺乏从农业种养关联碳减排的角度来开展讨论。

收稿日期 (Received date): 2023-10-31; **改回日期** (Accepted date): 2024-04-11

基金项目 (Foundation item): 国家社科基金 (17BGL137) [National Social Science Fund of China (17BGL137)]

作者简介 (Biography): 罗怀良 (1966 -), 男, 四川洪雅人, 博士, 二级教授。主要研究方向: 全球变化、自然资源利用与区域地理。[LUO Huailiang (1966 -), male, born in Hongya, Sichuan province, Ph.D., professor, research on global change, exploitation of natural resources, and regional geography] E-mail: 19980049@sicnu.edu.cn

中国农业具有明显的地域性或区域性,正从“主体功能区规划”逐步向“主体功能区战略”和“主体功能区制度”^[19]发展转变,农产品主产区是农业碳减源增汇的着力点。本文以四川盆地山地丘陵农产品主产区样本县域为研究对象,依据能量转化和营养物质循环的系统关联,构建种养关联碳减排潜力估算方法,进行种养关联碳减排潜力估算,以期种养碳减排提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

四川省有 5 个国家级农产品主产区:盆地中部平原浅丘区、川南低中山区、盆地东部丘陵低山区、盆地西缘山区和安宁河流域^[20]。安宁河流域与其余 4 区的农业生产条件、社会经济基础和农产品类型等差异较大^[20]。本文选择四川盆地山地丘陵农产品主产区农业生产条件类似的洪雅、开江、盐亭和兴文 4 县(表 1)进行种养关联碳减排潜力研究。

1.2 研究方法与数据来源

1.2.1 研究方法

本文采用草谷比法和畜禽粪便排泄系数法估算该区 4 县 2008—2017 年作物秸秆量和畜禽粪便量,再依据能量转化和营养物质循环的系统关联,构建作物秸秆饲料化利用和畜禽粪便肥料化利用碳减排潜力估算法,进行种养关联碳减排潜力估算与分析。

(1)作物秸秆量估算的草谷比法

本文所指作物秸秆为田间秸秆(即收获作物产品后田间剩余的副产品)^[7],其常用作物经济产量

通过收获指数或者草谷比进行估算^[5]。草谷比法和收获指数法估算的田间作物秸秆量相同,本文采用草谷比法估算,其公式如下^[5]:

$$W_c = \sum_{i=1}^n W_{ci} = \sum_{i=1}^n Q_i \times f_{Gi} \quad (1)$$

式中, W_c 为区域作物秸秆量; W_{ci} 为 i 种作物秸秆量; n 为区域作物种数; Q_i 为 i 种作物经济产量; f_{Gi} 为 i 种作物草谷比。

本文对该区 4 县有完整数据的 16 种作物(洪雅县 $n=11$, 开江县 $n=14$, 盐亭县 $n=15$, 兴文县 $n=13$)进行作物秸秆量估算。4 县作物种类及作物草谷比 f_{Gi} 取值见表 2。

(2)畜禽粪便量估算的畜禽粪便排泄系数法

畜禽饲养废弃物既包括畜禽粪便排放,也包括畜禽产品加工废弃有机物。本文将畜禽饲养废弃物限定为畜禽粪便,采用畜禽粪便排泄系数法估算。其公式为:

$$Q_{\text{manure}} = \sum_{k=1}^n Q_{\text{manure}-k} = \sum_{k=1}^n N_{\text{animal}-k} \times f_{\text{animal}-k} \quad (2)$$

式中, Q_{manure} 为区域畜禽粪便年排放总量; $Q_{\text{manure}-k}$ 为 k 种畜禽年粪便排放量; $N_{\text{animal}-k}$ 为 k 种畜禽年平均饲养量; $f_{\text{animal}-k}$ 为 k 种畜禽年粪便排泄系数; 畜禽粪便包括牛粪、牛尿、猪粪、猪尿、羊粪、羊尿、兔粪和家禽(鸡、鸭和鹅)粪 8 种,故 $n=8$ 。

畜禽养殖数量在年内因繁殖和屠宰而变化,畜禽存栏量不能反映畜禽数量的真实变化。进行畜禽粪便量估算,可以依据畜禽存栏量、出栏率和畜禽平均生命周期等数据对畜禽养殖数量进行调整^[22]。当畜禽出栏率大于或等于 1 时(如生猪、兔、家禽(鸡、鸭和鹅)等),平均饲养量用下式进行调整^[23]:

$$N_{\text{animal}-k} = D_k \times \frac{M_k}{365} \quad (3)$$

表 1 研究县域概况^[20]

Tab. 1 Overview of the study counties

县域	农产品主产区	地形区	面积/km ²	人口/万人	耕地/hm ²
洪雅	盆地西缘山区	盆地西南边缘山地区	1897	30.90	25 048
开江	盆地东部丘陵低山区	盆地东部平行岭谷区	1031	44.80	41 043
盐亭	盆地中部平原浅丘区	川中丘陵区	1645	45.70	61 132
兴文	川南低中山区	盆地南部边缘山地区	1380	38.80	44 423
合计	—	—	5953	160.20	171 646

资料来源:《四川省主体功能区规划》和《四川省统计年鉴》(2020)。

表2 山地丘陵农产品主产区作物播面占比及草谷比
Tab.2 Proportion of crop sowing area and straw/grain ratio in main producing areas of mountain farm produce

作物	洪雅		开江		盐亭		兴文		草谷比 ^[5,21] /%
	播面占比/%	排序	播面占比/%	排序	播面占比/%	排序	播面占比/%	排序	
水稻	44.41	1	23.31	1	16.32	3	31.94	1	0.90
玉米	11.10	3	13.84	4	23.50	2	17.78	2	1.20
小麦	5.41	6	9.83	5	27.39	1	8.34	5	1.10
油菜	19.93	2	16.92	3	12.61	4	2.61	8	2.00
甘薯	7.58	4	7.29	6	8.25	5	12.53	4	0.50
马铃薯	5.77	5	18.40	2	1.63	8	13.45	3	0.50
高粱	—	—	0.67	9	0.26	12	1.51	10	1.50
豆类	4.03	7	4.07	8	2.39	7	4.81	7	1.60
烟叶	0.08	11	0.63	10	—	—	5.34	6	1.50
棉花	—	—	—	—	0.36	10	—	—	2.01
甘蔗	0.08	10	0.10	12	0.03	15	0.08	11	0.10
花生	0.15	9	4.36	7	6.44	6	1.56	9	1.14
药材	1.44	8	0.49	11	0.38	9	0.05	12	1.50
大麦	—	—	—	—	0.34	11	—	—	1.10
芝麻	—	—	0.06	13	0.03	14	—	—	2.01
麻类	—	—	0.05	14	0.08	13	0.02	13	2.01
合计	100	—	100	—	100	—	100	—	—

注:作物播面占比为2008—2017年均值;豆类包括大豆、豌豆、蚕豆、绿豆和其他杂豆;洪雅和开江的烟叶为土烟,兴文为烤烟;盐亭和兴文的麻类为红黄麻,开江为苧麻;“—”表示无种植。

式中, D_k 为 k 种畜禽平均生命周期; M_k 为 k 种畜禽年出栏量。生猪、兔、家禽(鸡、鸭和鹅)等平均生命周期取 200 d、105 d、160 d^[8,16-18,23]。

当畜禽出栏率小于 1 时(如牛和羊等),按下式进行调整:

$$N_{\text{animal}-k} = \frac{C_{kt} + C_{kt-1}}{2}$$

(4)

式中, C_{kt} 、 C_{kt-1} 分别为第 k 种畜禽第 t 年年末存栏量和第 $t-1$ 年年末存栏量。

畜禽年粪便排泄系数 $f_{\text{animal}-k}$ 用畜禽粪便日排泄系数和畜禽平均生命周期计算:

$$f_{\text{animal}-k} = f_{\text{animal}-kd} \times D_k$$

(5)

式中, $f_{\text{animal}-kd}$ 为 k 种畜禽日粪便排泄系数。牛和羊的生命周期为 365 d,生猪、兔、家禽(鸡、鸭和鹅)等平均生命周期同前。

畜禽粪便日排泄系数取值差异是导致畜禽粪便量估算结果差异的主要原因^[15,24-25]。各种畜禽粪

便日排泄量与品种、体重、生理状态、饲料组成和饲喂方式等相关,目前无统一标准^[26];全国和地区研究取值均存在较大差异^[8]。综合四川^[18,27]、重庆^[9]、西南地区^[8]、长江流域^[17]和全国其他地区^[26,28]等相关研究,以参数本土化原则(选用最接近本研究区域的参数)并兼顾参数一致性(日排泄系数、生命周期和年排泄系数相协调)来确定各种畜禽粪便排泄系数和平均生命周期取值(表 3)。

(3) 作物秸秆饲料化利用碳减排潜力估算方法

由于农户缺乏足够认识;加之秸秆分散、收集困难,人工收集难以运输和存放,且机械收集花费较高,导致秸秆直接被焚烧或随意丢弃而利用率较低^[5]。作物秸秆有还田和饲料化等多种利用方式,作为种养关联主要途径,本文主要考虑作物秸秆饲料化利用的碳减排潜力。由于各种作物秸秆的成分、营养价值和饲料转化率差异较大,仅以重量研究秸秆饲料化利用具有较大局限性并影响研究精度。

表 3 山地丘陵农产品主产区畜禽粪便排泄系数和平均生命周期
Tab. 3 Excretion coefficient and average life cycle of livestock and poultry excrement in mountainous and hilly main production areas of the agricultural products

畜禽	日排泄系数/(kg·herd ⁻¹ ·d ⁻¹)				生命周期/d		年排泄系数/(kg·herd ⁻¹ ·a ⁻¹)			
	粪便		尿液				粪便		尿液	
	文献值	取值	文献值	取值	文献值	取值	文献值	取值	文献值	取值
猪	2.0 ^[18] ;0.45、 0.79、1.01 ^[27] ; 3.5、5.0 ^[9]	1.17	3.3 ^[18] ;1.65、 3.47、5.60 ^[27] ; 3.5、5.0 ^[9]	2.60	179 ^[8] ;199 ^[18] ; 200 ^[22] ;300 ^[9]	200	234 ^[17]	234	520 ^[17]	520
牛	20.0 ^[18] ;25 ^[9]	25	10.0 ^[18] ;10 ^[9]	10	365 ^[9,17,18]	365	10950 ^[17] ;10100 (役)、7700(肉)、 19400(奶) ^[10]	9125	6570 ^[17]	3650
羊	2.25 ^[8] ;2.6 ^[9,18] ; 1.09 ^[29]	2.60	1.0 ^[15]	1.0	180 ^[17] ;365 ^[18]	365	949 ^[17] ;870 ^[10]	949	244 ^[17]	244
兔	0.15 ^[9] ;0.37 ^[8,29]	0.37	—	—	90 ^[18] ;55 ^[9] ; 105 ^[16] ;147 ^[8]	105	41.4 ^[18]	38.85	—	—
家禽	0.08(肉)、0.15 (蛋) ^[9] ;0.1 ^[18]	0.15	—	—	210 ^[18] ;55 ^[9,16] ; 59(肉)、80(鹅)、 365(蛋) ^[8,17]	160	39.0 ^[10,18] ; 24 ^[17] ;	24	—	—

注:牛的“肉”为肉牛、“役”为役用牛、“奶”为奶牛;家禽的“肉”为肉禽、“蛋”为蛋禽;“—”表示无数据。

本文基于能量转换视角探讨作物秸秆畜禽饲料化利用的碳减排潜力,而不考虑作物秸秆用作畜禽饲料的具体方式和环节。

参考相关文献^[12,22],采用依据能量转化原理的系统关联构建作物秸秆饲料化利用碳减排潜力估算方法。其估算逻辑及过程为:首先,确定秸秆饲料化利用的作物种类。结合区域实际和作物秸秆可饲性评价研究^[13,30],剔除表 2 中不适合饲料利用的药材、烟叶、棉花和麻类等作物,从而确定该区 4 县秸秆饲料化利用的作物为:洪雅 9 种(水稻、玉米、小麦、油菜、甘薯、马铃薯、豆类、甘蔗、花生),开江 11 种(水稻、玉米、小麦、油菜、甘薯、马铃薯、高粱、豆类、甘蔗、花生和芝麻),盐亭 12 种(水稻、玉米、小麦、油菜、甘薯、马铃薯、高粱、豆类、甘蔗、花生、大麦和芝麻),兴文 10 种(水稻、玉米、小麦、油菜、甘薯、马铃薯、高粱、豆类、甘蔗和花生)。其次,用作物秸秆可收集系数将前述估算作物秸秆量换算为作物秸秆可收集量。第三,将作物秸秆可收集量与作物秸秆饲料化利用率相乘得到作物秸秆饲料化可利用

量。第四,将作物秸秆饲料化可利用量通过作物秸秆的能量转化率换算成作物秸秆饲料化利用的总能量值。第五,将作物秸秆饲料化利用的总能量值通过种养关联的能量转换率估算作物秸秆饲料化利用种养关联后的能量值。第六,通过畜禽产品的能量转化率将作物秸秆饲料化利用种养关联后的能量值转换成作物秸秆饲料化利用的畜禽产品产量。最后,将作物秸秆饲料化利用的畜禽产品产量,通过基于标准畜禽肉产量的单位产量畜禽饲养碳源效率转换成作物秸秆饲料化利用碳减排潜力。其计算公式为:

$$P_{\text{straw}} = \frac{\sum_{i=1}^n W_{ci} \times H_i \times f_{ui} \times S_i \times e_f}{f_{\text{energy}}} \times r \quad (6)$$

式中, P_{straw} 为区域作物秸秆饲料化利用碳减排潜力; W_{ci} 为区域*i*种作物秸秆量; H_i 为*i*种作物秸秆可收集系数; f_{ui} 为*i*种作物秸秆饲料化利用率; S_i 为*i*种作物秸秆的能量转化率; e_f 为种养关联的能量转化率; f_{energy} 为畜禽产品的能量转化率; r 为基

于标准畜禽肉产量的单位产量畜禽饲养碳源效率; n 为区域内作物秸秆饲料化利用的作物种类数。

该区洪雅、开江、盐亭和兴文作物秸秆饲料化利用的作物种类数 n ,分别为9、11、12和10。作物秸秆可收集系数和能量转化率见表4;作物秸秆饲料化利用率随作物种类和利用技术不同而变化,本文统一取作0.7;种养关联的能量转换率根据能量流动“百分之十定律”,将其取作10%;畜禽产品的能量转化率取作 $9.21 \times 10^6 \text{ J/kg}^{[12]}$;该区4县7种畜禽(猪、牛、羊、兔、鸡、鸭和鹅)基于标准畜禽肉产量的单位产量畜禽饲养碳源效率(国家社科基金结题报告《山地丘陵农产品主产区种养关联的县域农业碳源/汇效应及调控机制》,2022年9月):洪雅、开江、盐亭和兴文分别为1.725、1.734、1.729和1.729 kg/kg。

表4 山地丘陵农产品主产区作物秸秆
饲料化利用估算参数值

Tab. 4 Estimation parameter value of the crop straw feed utilization in mountainous and hilly main agricultural product production areas

作物	作物秸秆可 收集系数/%	作物秸秆的能量转化率/ ($10^6 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1}$)
水稻	83	14.06
玉米	83	14.37
小麦	83	14.78
油菜	85	14.15
甘薯	80	14.10
马铃薯	80	14.10
高粱	80	14.53
豆类	88	15.10
甘蔗	88	2.80
花生	85	15.05
大麦	83	14.78
芝麻	85	15.09

注:参数取值参考文献[22,31];甘薯和马铃薯取薯类值,大麦取小麦值,高粱取其他粮食作物值。

(4) 畜禽粪便肥料化利用碳减排潜力估算方法

多数发达国家将农田作为畜禽粪尿的主要消纳场所^[14,32]。单独使用有机肥料或与化肥结合使用,在不影响作物产量的情况下减少化肥支出,进而减少温室气体排放^[33]。该区畜禽粪便利用方式多样,

农家肥(肥料化)利用和沼气利用是最主要的利用方式,尤以农家肥利用最为普遍。本文主要探讨种养关联的畜禽粪便肥料化利用碳减排潜力。

本文依据营养物质循环原理的系统关联,构建畜禽粪便肥料化利用碳减排潜力估算方法。其估算逻辑及过程为:首先,通过畜禽粪便N、P和K含量将前述估算的畜禽粪便量折算成相应的N、P和K肥量;其次,用农资投入碳排放估算中化肥使用的碳排放系数将畜禽粪便折算的N、P和K肥量换算为畜禽粪便肥料化利用碳减排理论值;然后,通过畜禽粪便还田利用的化肥有效成分实际利用率求取畜禽粪便肥料化利用的实际碳减排量;最后,用畜禽粪便肥料化利用的碳减排理论值减去畜禽粪便肥料化利用的实际碳减排量,得出畜禽粪便肥料化利用碳减排潜力。其估算公式如下:

$$\begin{aligned}
 P_{\text{manure}} &= P_{\text{manure-M}} - P_{\text{manure-U}} \\
 &= \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m Q_{\text{manure-i}} \times f_{\text{manure-ij}} \\
 &\quad \times f_{\text{Efert-j}} \times (1 - U_j) \quad (7)
 \end{aligned}$$

式中, P_{manure} 为区域畜禽粪便肥料化利用碳减排潜力; $P_{\text{manure-M}}$ 为区域畜禽粪便肥料化利用碳减排理论值; $P_{\text{manure-U}}$ 为区域畜禽粪便肥料化利用的实际碳减排值; n 为区域畜禽粪便种类数; $Q_{\text{manure-i}}$ 为 i 种畜禽年粪便量; $f_{\text{manure-ij}}$ 为 i 种畜禽粪便中 j 种肥料成分的百分比含量; $f_{\text{Efert-j}}$ 为 j 种化肥的碳排放系数; m 为畜禽粪便的肥料成分类型; U_j 为畜禽粪便中 j 种肥料成分实际利用率。

本文涉及猪粪、尿,牛粪、尿,羊粪、尿,兔粪和家禽(鸡、鸭和鹅)粪等8类畜禽粪便,故 $n=8$ 。由于畜禽粪便中钾含量很低,本研究只考虑畜禽粪便中氮和磷2种肥料,故 $m=2$ 。综合国内各类畜禽粪便氮、磷的百分比含量取值^[10,17,27,34-36]确定本研究 $f_{\text{manure-ij}}$ 取值(表5)。各种化肥碳排放系数 $f_{\text{Efert-j}}$ 采用中国氮磷钾肥制造温室气体排放系数均值^[38]:N肥为 $2.116 \text{ kg C/kg a. i}$ 和P肥为 $0.636 \text{ kg C/kg a. i}$;其中, kg C/kg a. i 为每千克化肥有效成分中碳的含量。

参考相关文献^[39],本文将畜禽粪便中氮和磷等化肥有效成分的实际利用率(U_j)分别取作30%和48%。

1.2.2 数据来源

2008—2017年四川盆地山地丘陵农产品主产

表 5 山地丘陵农产品主产区畜禽粪便肥料化利用估算参数值
Tab. 5 Estimated parameter values for fertilizer utilization of the livestock and poultry manure in mountainous and hilly main agricultural product production areas

畜禽 粪便	相关研究取值/%		本文取值/%	
	折纯 N	折纯 P	折纯 N	折纯 P
猪粪	0.65 ^[34] , 0.59 ^[37] , 2.68(干基) ^[27] , 0.352(粪污) ^[35]	0.34 ^[37] , 2.38(干基) ^[27] , 0.051(粪污) ^[35]	0.59	0.34
猪尿	0.33 ^[34,37] , 0.352(粪污) ^[35]	0.05 ^[37] , 0.051(粪污) ^[35]	0.33	0.05
牛粪	0.45 ^[34] , 0.44 ^[37] , 0.351 ^[10] , 0.253(粪污) ^[35]	0.082 ^[10] , 0.039(奶牛), 0.033(肉牛) (粪污) ^[35] , 0.12 ^[37]	0.44	0.12
牛尿	0.80 ^[34,37] , 0.253(粪污) ^[35]	0.04 ^[37] , 0.039(奶牛), 0.033(肉牛) (粪污) ^[35]	0.80	0.04
羊粪	0.80 ^[34] , 0.75 ^[37] , 1.014 ^[10]	0.26 ^[37] , 0.216 ^[10]	0.75	0.26
羊尿	0.655 ^[17] , 1.40 ^[37]	0.20 ^[37]	1.40	0.20
兔粪	0.874 ^[10] , 1.94 ^[34] , 1.79 ^[36]	0.297 ^[10] , 0.59 ^[36]	1.53	0.44
家禽粪	1.63(鸡)、1.10(鸭) ^[34] , 0.98(鸡)、1.10 (鸭、鹅) ^[37] , 1.032(鸡)、0.625(鸭、鹅) ^[10] , 0.780(蛋鸡)、0.792(肉鸡) ^[35]	0.54(鸡)、0.62(鸭、鹅) ^[37] , 0.413(鸡)、0.290 (鸭、鹅) ^[10] , 0.193(蛋鸡)、0.202(肉鸡) ^[35]	1.04	0.58

注:综合参数的完整性和系统性,本文采用国家环境保护总局生态保护司(2002 年)参数取值^[37]。

区洪雅、开江、盐亭和兴文 4 县作物产量、耕地面积、
畜禽存栏量和出栏量等数据均来自 4 县统计年鉴和
年度国民经济发展公报等。

2 结果与分析

2.1 四川盆地山地丘陵农产品主产区作物秸秆饲料化利用碳减排潜力

将该区洪雅 9 种、开江 11 种、盐亭 12 种和兴文 10 种作物经济产量和作物草谷比代入公式(1),得到各县历年作物秸秆量。再将作物秸秆量、作物秸秆可收集系数 H_i 、作物秸秆的能量转化率 S_i 、作物秸秆饲料化利用率 f_{wi} 、种养关联的能量转换率 e_f 、畜禽产品的能量转化率 f_{energy} 和该区 4 县基于标准畜禽肉产量的单位产量畜禽饲养碳源效率 r 等参数代入公式(6),估算作物秸秆饲料化利用碳减排潜力(图 1、表 6)。

从图 1 和表 6 可知,作物秸秆饲料化利用碳减排潜力有以下特征:

(1)作物秸秆饲料化利用碳减排潜力呈上升趋势,且县区变动差异明显。

作物秸秆饲料化利用碳减排潜力年均 $15.49 \times$

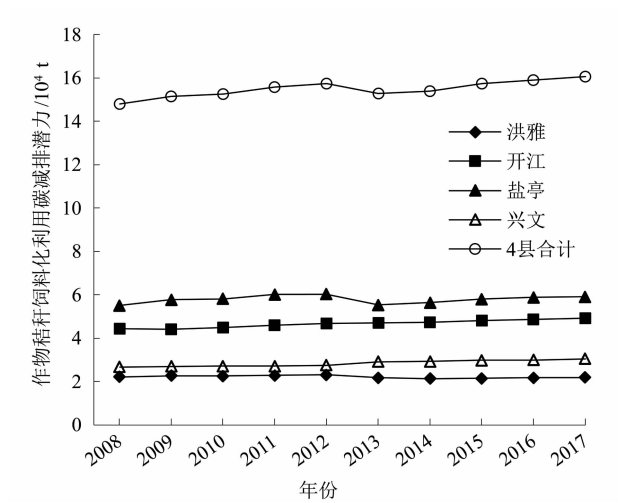


图 1 四川盆地山地丘陵农产品主产区
作物秸秆饲料化利用碳减排潜力
Fig. 1 Carbon emission reduction potential of the crop straw feed utilization in mountainous and hilly main agricultural product production areas of the Sichuan Basin

10^4 t,其中,洪雅 2.21×10^4 t、开江 4.66×10^4 t、盐亭 5.78×10^4 t 和兴文 2.84×10^4 t。整体呈上升趋势(由 14.81×10^4 t 到 16.05×10^4 t,上升 8.37%),但县区之间存在较大差异。洪雅略有下降(由 2.21×10^4 t 降至 2.19×10^4 t, -0.90%);其余 3 县呈上升

表6 四川盆地山地丘陵农产品主产区
作物秸秆饲料化利用碳减排潜力构成

Tab.6 Carbon emission reduction potential composition of
crop straw feed utilization in mountainous and hilly main
agricultural product production areas of Sichuan Basin

作物	作物秸秆饲料化利用碳减排潜力构成/%				
	洪雅	开江	盐亭	兴文	4县平均
水稻	56.23	31.03	23.65	48.51	35.07
玉米	17.34	25.26	26.99	26.44	24.99
小麦	3.77	6.78	26.98	4.29	13.44
油菜	13.91	21.09	10.77	2.28	12.77
甘薯	2.91	3.64	3.39	8.39	4.31
马铃薯	1.81	6.27	0.47	4.54	3.15
高粱	—	0.89	0.51	1.85	0.79
豆类	3.91	2.83	2.58	2.84	2.89
甘蔗	0.01	0.01	0.00	0.00	0.01
花生	0.11	2.15	4.33	0.87	2.44
大麦	—	—	0.31	—	0.12
芝麻	—	0.03	0.02	—	0.02
合计	100	100	100	100	100

注:—表示无作物种植。

趋势:兴文(由 2.67×10^4 t 上升至 3.04×10^4 t, +13.86%) > 开江(由 4.42×10^4 t 上升至 4.91×10^4 t, +11.09%) > 盐亭(由 5.50×10^4 t 上升至 5.91×10^4 t, +7.45%)。

(2)作物秸秆饲料化利用碳减排潜力以水稻、玉米、小麦和油菜等作物为主,但县区作物构成差异明显。

作物秸秆饲料化利用碳减排潜力以种植规模较大的4种作物为主(共86.27%):水稻(35.07%) > 玉米(24.99%) > 小麦(13.44%) > 油菜(12.77%);而甘薯(4.31%)、马铃薯(3.15%)、豆类(2.89%)和花生(2.44%)等作物占比较少,其他作物占比更少。作物秸秆饲料化利用碳减排潜力构成存在明显县区差异:洪雅县占比前4位作物为(占91.39%):水稻(56.23%) > 玉米(17.34%) > 油菜(13.91%) > 豆类(3.91%);开江县为(占84.16%):水稻(31.03%) > 玉米(25.26%) > 油菜(21.09%) > 小麦(6.78%);盐亭县为(占88.39%):玉米(26.99%) > 小麦(26.98%) > 水稻(23.65%) > 油菜(10.77%);兴文占县为(占

87.88%):水稻(48.51%) > 玉米(26.44%) > 甘薯(8.39%) > 马铃薯(4.54%)。该区作物秸秆饲料化利用碳减排潜力的作物构成与县区差异主要受作物种植结构的制约,但也有作物经济产量和草谷比等因素的影响。

2.2 四川盆地山地丘陵农产品主产区畜禽粪便肥料化利用碳减排潜力

将畜禽年出栏量、存栏量和各类畜禽年粪便排放系数分别代入公式(2)~(5),估算出猪粪、猪尿、牛粪、牛尿、羊粪、羊尿、兔粪和家禽粪共8类畜禽粪便量 $Q_{\text{manure-}i}$ 。再将各种畜禽粪便年排放量、畜禽粪氮和磷等肥料成分的百分比含量 $f_{\text{manure-}ij}$ 、各种化肥的碳排放系数 $f_{\text{Efert-}j}$ 和畜禽粪便中各种肥料成分的实际利用率 U_j 等分别代入公式(7),可估算出畜禽粪便肥料化利用碳减排潜力(图2、表7)。

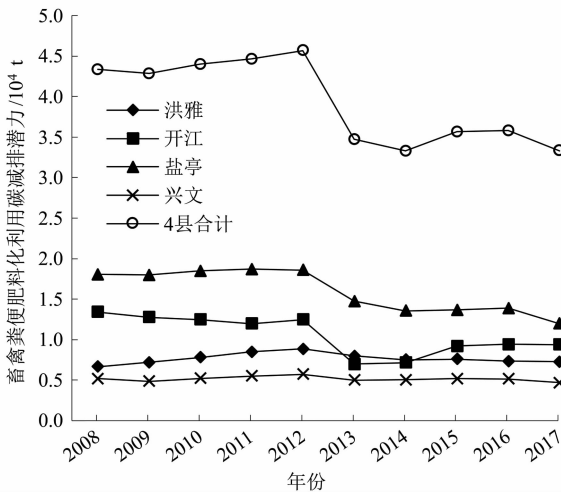


图2 四川盆地山地丘陵农产品主产区
畜禽粪便肥料化利用碳减排潜力

Fig.2 Carbon emission reduction potential of the livestock manure
fertilizer utilization in mountainous and hilly main agricultural
product production areas of the Sichuan Basin

从图2和表7可知,畜禽粪便肥料化利用碳减排潜力具有以下特征:

(1)畜禽粪便肥料化利用碳减排潜力明显下降,但县区波动差异较大。

畜禽粪便肥料化利用碳减排潜力均值为 3.93×10^4 t,整体明显下降(从 4.33×10^4 t 到 3.33×10^4 t,下降23.09%)。但4县区动态变化差异明显,其中,盐亭和开江下降比较明显(分别从 1.81×10^4 t、 1.34×10^4 t 到 1.20×10^4 t 和 0.94×10^4 t),下降

33.69%和30.08%;兴文县则微弱下降(从 0.52×10^4 t到 0.47×10^4 t,下降0.09%);而洪雅县则略有上升(从 0.67×10^4 t到 0.73×10^4 t,上升9.03%)。这与各县畜禽饲养量变动有关。

表 7 四川盆地山地丘陵农产品主产区
畜禽粪便肥料化利用碳减排潜力构成

Tab. 7 Composition of the carbon emission reduction potential
of the livestock manure fertilizer utilization in mountainous and
hilly main agricultural product production areas of the Sichuan Basin

畜禽	畜禽粪便肥料化利用碳减排潜力构成/%				
	洪雅	开江	盐亭	兴文	4 县平均
猪	11.58	13.86	10.92	24.58	13.63
牛	73.29	37.41	51.48	58.84	52.94
羊	6.26	19.52	23.95	2.67	16.52
兔	4.18	0.94	1.54	0.35	1.74
家禽	4.70	28.28	12.11	13.57	15.18
合计	100	100	100	100	100

(2)该区4县畜禽粪便肥料化利用碳减排潜力以牛粪为主,但县域畜禽构成差异明显。

该区4县畜禽粪便肥料化利用碳减排潜力以牛粪为主(52.94%),且各县区差异明显:洪雅(73.29%)>兴文(58.84%)>盐亭(51.48%)>开江(37.41%)。受畜禽养殖结构影响,各县域畜禽粪便肥料化利用碳减排潜力的构成差异明显。其中,洪雅和兴文均以牛和猪粪便为主(分别占84.87%和83.42%,其余畜禽占比较小);而开江以牛和家禽粪便为主(65.69%)、兔占比很小(仅0.94%),猪和羊占比相当(13%~20%);盐亭以牛和羊粪便为主(75.43%),猪和家禽占比较小(23.03%),而兔占比很小(1.54%)。

2.3 四川盆地山地丘陵农产品主产区种养关联碳减排潜力

综合作物秸秆饲料化利用和畜禽粪便肥料化利用碳减排潜力,得到种养关联碳减排潜力(图3、表8),结合耕地面积计算各县单位耕地面积的种养关联碳减排潜力(图4)。

由图3、4和表8可知,种养关联碳减排潜力具有以下特征:

(1)种养关联碳减排潜力略有上升,但县区变

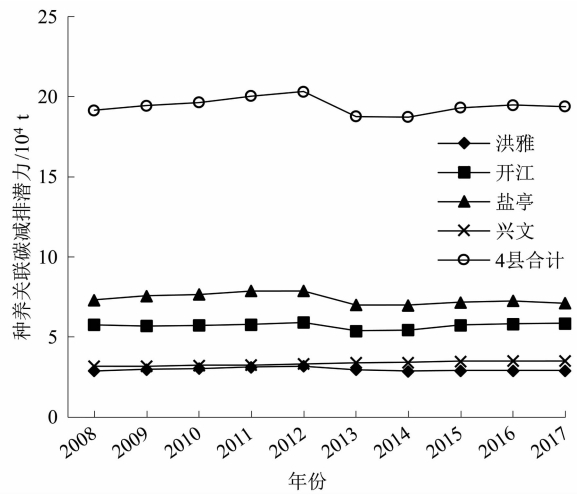


图 3 四川盆地山地丘陵农产品主产区
种养关联碳减排潜力

Fig. 3 Carbon emission reduction potential of the planting and
breeding integration in mountainous and hilly main agricultural
product production areas of the Sichuan Basin

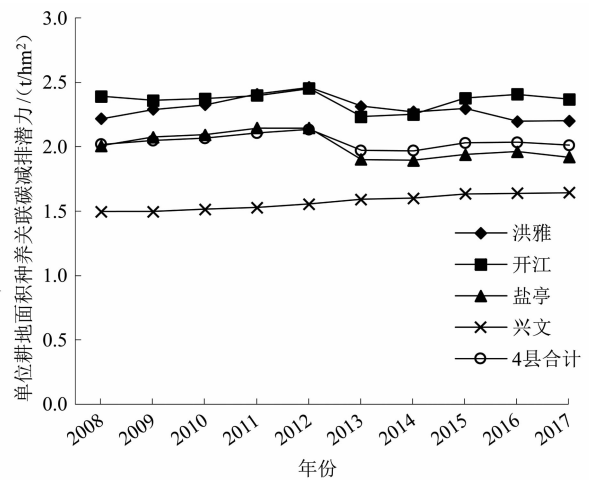


图 4 近 10 年来四川盆地山地丘陵农产品主产区
单位耕地面积种养关联碳减排潜力

Fig. 4 Carbon emission reduction potential of the planting and
breeding integration per unit cultivated area in mountainous and
hilly main agricultural product production areas of the Sichuan
Basin over the last 10 years

动差异明显。

从图3可知,种养关联碳减排潜力年均 19.42×10^4 t,并略有上升(由 19.14×10^4 t到 19.38×10^4 t,上升1.25%)。4县变动差异明显,盐亭略有下降(年均 7.38×10^4 t;由 7.31×10^4 t到 7.11×10^4 t,下降2.74%);其余3县均呈上升趋势:兴文(年均 3.35×10^4 t;由 3.18×10^4 t到 3.51×10^4 t,上升

表 8 四川盆地山地丘陵农产品主产区种养关联碳减排潜力构成

Tab. 8 Composition of the carbon emission reduction potential of the planting and breeding integration in mountainous and hilly main agricultural product production areas of the Sichuan Basin

县域	碳减排潜力/ 10^4 t			构成/%	
	作物秸秆饲料化利用	作物秸秆饲料化利用	种养关联	作物秸秆饲料化利用	畜禽粪便肥料化利用
洪雅	2.21	0.77	2.98	74.23	25.77
开江	4.66	1.05	5.71	81.56	18.44
盐亭	5.78	1.60	7.38	78.37	21.63
兴文	2.84	0.52	3.35	84.60	15.40
4 县合计	15.49	3.93	19.42	79.75	20.25

10.38%) > 开江(年均 5.76×10^4 t; 由 5.85×10^4 t 到 7.05×10^4 t, 上升 2.45%) > 洪雅(年均 2.98×10^4 t; 由 2.88×10^4 t 到 2.91×10^4 t, 上升 1.04%)。该区 4 县种养关联碳减排潜力既有作物秸秆饲料化利用碳减排潜力变动的原因, 也有畜禽粪便肥料化利用碳减排潜力变动的原因, 同时还受两种关联碳减排潜力占比的影响。但总体上讲, 种养关联碳减排潜力与种养规模大小之间存在复杂的关系, 尚需深入研究。

(2) 种养关联碳减排潜力以作物秸秆饲料化利用为主, 且县区差异明显。

从表 8 可知, 种养关联碳减排潜力以作物秸秆饲料化利用为主(79.75%), 而畜禽粪便肥料化利用仅 20.25%。受种养结构差异影响, 种养关联碳减排潜力构成的县区差异较大: 作物秸秆饲料化利用碳减排潜力占比排序为: 兴文(84.60%) > 开江(81.56%) > 盐亭(78.37%) > 洪雅(74.23%); 而畜禽粪便肥料化利用碳减排潜力占比则相反。

(3) 单位耕地面积种养关联碳减排潜力整体较稳定, 但县区差异明显。

从图 4 可知, 年均单位耕地面积种养关联碳减排潜力为 2.04 t/hm^2 , 且比较稳定(由 2.02 t/hm^2 到 2.01 t/hm^2 , 降 0.50%)。该区单位耕地面积种养关联碳减排潜力的县区差异明显: 开江(2.36 t/hm^2) > 洪雅(2.30 t/hm^2) > 盐亭(2.01 t/hm^2) > 兴文(1.57 t/hm^2)。除兴文县持续上升外(由 1.50 t/hm^2 到 1.64 t/hm^2 , 上升 9.33%), 其余 3 县整体微弱下降(先升后降): 盐亭(由 2.01 t/hm^2 到 1.92 t/hm^2 , 下降 4.48%) > 洪雅(由 2.22 t/hm^2 到 2.20 t/hm^2 , 下降 0.91%) > 开江(由 2.39 t/hm^2 到

2.37 t/hm^2 , 下降 0.84%)。

3 讨论

已有有关种养关联的探讨主要聚焦废物利用与环境保护^[4,6], 以及农业可持续发展^[40]等方面, 而有关农业种养碳源/汇研究多有割裂^[3]。本文尝试从碳减排潜力视角, 从作物秸秆饲料化利用和畜禽粪便肥料化利用双向关联来探讨种养关联碳减排潜力。在种养关联碳减排潜力估算和潜力发挥中, 下列问题值得重视。

(1) 种养关联模式、估算参数与估算精度。种养关联涉及众多作物和畜禽(本文涉及 16 种作物和 8 种畜禽)、关联方式与环节。种养关联模式与估算参数选取均会影响种养关联碳减排潜力估算精度。本文仅讨论作物秸秆饲料化利用和畜禽粪便肥料化利用理论情景下的种养关联碳减排潜力, 而对具体关联方式与环节多有忽略。未来应加强多种种养关联的物质循环与能量流动研究, 并推进估算参数本土化, 进而提高种养关联碳减排潜力估算精度。

(2) 种养关联碳减排潜力的区域差异。农业受自然条件影响深刻, 区域异质性明显。本研究表明, 同处四川盆地山地丘陵的 4 县种养关联潜力差异突出。因此, 不同区域尺度、多种地域类型的种养关联碳减排潜力差异需要深入探讨。

(3) 因地制宜发挥碳减排潜力。该区种养关联碳减排潜力为 19.42×10^4 t, 单位耕地面积种养关联碳减排潜力(2.04 t/hm^2)占川中丘陵地区农田植被碳密度(5.93 t/hm^2 ^[41])的 34.40%, 潜力发挥对农业碳减排具有重要意义。山地丘陵地区种养结构复杂、分布破碎且经济基础相对滞后, 是种养关联碳

减排潜力发挥的主要障碍。随着现代农业逐步取代传统小农户种养关联,注重种养关联的关键主体培育、种养关联方式转变和产业化推进,才能有效发挥种养关联的碳减排潜力。

4 结论

作物秸秆饲料化利用可以减少焚烧或丢弃导致的碳排放,畜禽粪便肥料化利用可以减少化肥投入,进而减少农资投入碳排放。本文采用能量转化和营养物质循环的系统关联构建作物秸秆饲料化利用和畜禽粪便肥料化利用碳减排潜力估算方法,探讨种养关联碳减排潜力。研究表明,2008—2017 年该区种养关联碳减排潜力(19.42×10^4 t,单位耕地面积种养关联碳减排潜力为 2.04 t/hm^2)发挥对农业碳减排具有重要意义。未来应加强关联模式研究与估算参数本土化,并重视种养关联的区域差异。同时,注重种养关联的关键主体培育、种养关联方式转变和产业化推进,才能有效发挥种养关联的碳减排潜力。

参考文献 (References)

- [1] BENNETZEN E H, SMITH P, PORTER J R. Decoupling of greenhouse gas emissions from global agricultural production: 1970–2050 [J]. *Global Change Biology*, 2016, **22**(2): 763–781. DOI: 10.1111/gcb.13120
- [2] WANG Xiuhong. Changes in CO₂ emissions induced by agricultural inputs in China over 1991–2014 [J]. *Sustainability*, 2016, **8**(5): 414–426. DOI: 10.3390/su8050414
- [3] 罗怀良. 国内农业碳源/汇效应研究: 视角、进展与改进[J]. *生态学报*, 2022, **42**(9): 3832–3841. [LUO Huailiang. Research on domestic agricultural carbon source/sink effect: Perspectives, advances and improvements [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2022, **42**(9): 3832–3841] DOI: 10.5846/stxb202012012093135
- [4] HERRERO M, THORNTON P K. Livestock and global change: Emerging issues for sustainable food systems [J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America (PNAS)*, 2013, **110**(52): 20878–20881. DOI: 10.1073/pnas.1321844111
- [5] 彭春艳, 罗怀良, 孔静. 中国作物秸秆资源量估算与利用状况研究进展[J]. *中国农业资源与区划*, 2014, **35**(3): 14–20. [PENG Chunyan, LUO Huailiang, KONG Jing. Advance in estimation and utilization of crop residues resources in China [J]. *Chinese Journal of Agricultural Resources and Regional Planning*, 2014, **35**(3): 14–20] DOI: 10.7621/cjarrp.1005–9121.20140303
- [6] PAUL B K, EPPER C A, TSCHOPP D J, et al. Crop-livestock integration provides opportunities to mitigate environmental trade-offs in transitioning smallholder agricultural systems of the Greater Mekong Subregion [J]. *Agricultural Systems*, 2022, **195**: 103285. DOI: 10.1016/j.agsy.2021.103285.
- [7] 谢光辉, 王晓玉, 任兰天. 中国作物秸秆资源评估研究现状[J]. *生物工程学报*, 2010, **26**(7): 855–863. [XIE Guanghui, WANG Xiaoyu, REN Lantian. China's crop residues resources evaluation [J]. *Chinese Journal of Biotechnology*, 2010, **26**(7): 855–863] DOI: 10.13345/j. cjb. 2010.07.023
- [8] 包维卿, 刘继军, 安捷, 等. 中国畜禽粪便资源量评估的排泄系数取值[J]. *中国农业大学学报*, 2018, **23**(5): 1–14. [BAO Weiqing, LIU Jijun, AN Jie, et al. Value-taking of livestock and poultry excreta factor in China [J]. *Journal of China Agricultural University*, 2018, **23**(5): 1–14] DOI: 10.11841/j. issn. 1007–4333.2018.05.01
- [9] 彭里, 王定勇. 重庆市畜禽粪便年排放量的估算研究[J]. *农业工程学报*, 2004, **20**(1): 288–292. [PENG Li, WANG Dingyong. Estimation of annual quantity of total excretion from livestock and poultry in Chongqing Municipality [J]. *Transactions of the CSAE*, 2004, **20**(1): 288–292]
- [10] 王方浩, 马文奇, 窦争霞, 等. 中国畜禽粪便产生量估算及环境效应[J]. *中国环境科学*, 2006, **26**(5): 614–617. [WANG Fanghao, MA Wenqi, DOU Zhengxia, et al. The estimation of the production amount of animal manure and its environmental effect in China [J]. *China Environmental Science*, 2006, **26**(5): 614–617]
- [11] 闫丽珍, 成升魁, 闵庆文. 典型农区秸秆资源利用及其影响因素探析[J]. *中国生态农业学报*, 2006, **14**(3): 196–198. [YAN Lizhen, CHENG Shengkui, MIN Qingwen. Utilization of crop straws and its driving forces in typical rural areas [J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2006, **14**(3): 196–198]
- [12] 曹志宏. 基于谷物当量的中国作物秸秆养畜及其节粮潜力估算[J]. *干旱区资源与环境*, 2015, **29**(6): 51–56. [CAO Zhihong. The livestock and grain-saving potential estimation of crop straw in China based on cereal equivalent [J]. *Journal of Arid Land Resources and Environment*, 2015, **29**(6): 51–56] DOI: 10.13448/j. cnki. jalre. 2015. 186
- [13] 王亚静, 毕于运, 高春雨. 中国秸秆资源可收集利用量及其适宜性评价[J]. *中国农业科学*, 2010, **43**(9): 1852–1859. [WANG Yajing, BI Yuyun, GAO Chunyu. Collectable amounts and suitability evaluation of straw resource in China [J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2010, **43**(9): 1852–1859] DOI: 10.3864/j. issn. 0578–1752.2010.09.011
- [14] 贾伟, 朱志平, 陈永杏, 等. 典型种养结合奶牛场粪便养分管理模式[J]. *农业工程学报*, 2017, **33**(12): 209–217. [JIA Wei, ZHU Zhiping, CHEN Yongxing, et al. Manure nutrient management mode in typical mixed crop-dairy farm [J].

- Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2017, **33**(12): 209–217] DOI: 10.11975/j.issn.1002-6819.2017.12.027
- [15] 张田, 卜美东, 耿维. 中国畜禽粪便污染现状及产沼气潜力[J]. 生态学杂志, 2012, **31**(5): 1241–1249. [ZHANG Tian, BU Meidong, GENG Wei. Pollution status and biogas-producing potential of livestock and poultry excrements in China [J]. Chinese Journal of Ecology, 2012, **31**(5): 1241–1249] DOI: 10.13292/j.1000-4890.2012.0175
- [16] 刘培芳, 陈振楼, 许世远, 等. 长江三角洲城郊畜禽粪便的污染负荷及其防治对策[J]. 长江流域资源与环境, 2002, **11**(5): 456–460. [LIU Peifang, CHEN Zhenlou, XU Shiyuan, et al. Waste loading and treatment strategies on the excreta of domestic animals in the Yangtze Delta [J]. Resources and Environment in the Yangtze Basin, 2002, **11**(5): 456–460]
- [17] 彭瑛, 李丽立, 吴信, 等. 洞庭湖区畜禽排泄物的环境效应[J]. 长江流域资源与环境, 2011, **20**(1): 73–78. [PENG Ying, LI Lili, WU Xin, et al. Analysis of the environmental threats from livestock and poultry excrements in Dongting Lake [J]. Resources and Environment in the Yangtze Basin, 2011, **20**(1): 73–78]
- [18] 黄凤霞, 田红, 邓也. 成都市畜禽粪便年排放量估算及耕地负荷量分析[J]. 现代农业科技, 2016(24): 183–184. [HUANG Fengxia, TIAN Hong, DENG Ye. Analysis on total amount of domestic animal excrement and farmland load capacity in Chengdu city [J]. Modern Agricultural Science and Technology, 2016(24): 183–184]
- [19] 樊杰. 中国主体功能区划方案[J]. 地理学报, 2015, **70**(2): 186–201. [FAN Jie. Draft of major function oriented zoning of China [J]. Acta Geographica Sinica, 2015, **70**(2): 186–201] DOI: 10.11821/dlxb201502002
- [20] 罗怀良. 山地丘陵农产品主产区主要作物碳足迹及碳排放研究——以四川省洪雅、开江、盐亭和兴文4县为例[J]. 作物研究, 2023, **37**(6): 634–641. [LUO Huailiang. Carbon print and carbon emission of main agricultural products in mountainous and hilly main production areas of agricultural products—taking Hongya, Kaijiang, Yanting and Xingwen counties in Sichuan province as examples [J]. Crop Research, 2023, **37**(6): 634–641]
- [21] 袁葵洲, 官春云. 作物收获指数的研究概况[J]. 作物研究, 1994, **8**(4): 45–48. [YUAN Wuzhou, GUAN Chunyun. A survey of crop harvest index [J]. Crop Research, 1994, **8**(4): 45–48] DOI: 10.16848/j.cnki.issn.1001-5280.1994.04.017
- [22] 曹志宏. 基于能量转化的河南省作物秸秆养畜潜力研究[J]. 地域研究与开发, 2014, **33**(4): 163–167. [CAO Zhihong. The livestock potential estimation of crop straw in Henan province from the perspective of energy conversion [J]. Areal Research and Development, 2014, **33**(4): 163–167]
- [23] 胡向东, 王济民. 中国畜禽温室气体排放量估算[J]. 农业工程学报, 2010, **26**(10): 247–252. [HU Xiangdong, WANG Jimin. Estimation of livestock greenhouse gases discharge in China [J]. Transactions of the CSAE, 2010, **26**(10): 247–252] DOI: 10.3969/j.issn.1002-6819.2010.10.042
- [24] IPCC. 2006 IPCC Guidelines for national greenhouse gas inventories [EB/OL]. (2017-09-20) [2023-08-16]. <http://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/public/2006gl/index.html>.
- [25] 谢光辉, 包维卿, 刘继军, 等. 中国畜禽粪便资源研究现状述评[J]. 中国农业大学学报, 2018, **23**(4): 75–87. [XIE Guanghui, BAO Weiqing, LIU Jijun, et al. An overview of researches on livestock and poultry excreta resource in China [J]. Journal of China Agricultural University, 2018, **23**(4): 75–87] DOI: 10.11841/j.issn.1007-4333.2018.04.10
- [26] 林源, 马骥, 秦富. 中国畜禽粪便资源结构分布及发展展望[J]. 中国农学通报, 2012, **28**(32): 1–5. [LIN Yuan, MA Ji, QIN Fu. The structure distribution and prospect of China manure resource [J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2012, **28**(32): 1–5]
- [27] 何志平, 曾凯, 李正确, 等. 四川规模猪场产排污系数测定[J]. 中国沼气, 2010, **28**(4): 10–14. [HE Zhiping, ZENG Kai, LI Zhengque, et al. Measurement of pollutants producing and discharging coefficient on large scale pig farms in Sichuan [J]. China Biogas, 2010, **28**(4): 10–14]
- [28] 韩枫, 朱立志. 牛羊粪便资源化利用研究——基于全国和临夏县两个层面的分析[J]. 中国人口·资源与环境, 2015, **25**(6): 167–173. [HAN Feng, ZHU Lizhi. Potential utilization of sheep and cattle manure: From the perspectives of nationwide and Linxia region [J]. China Population, Resources and Environment, 2015, **25**(6): 167–173] DOI: 10.3969/j.issn.1002-2104.2015.06.023
- [29] 郭德杰, 吴华山, 马艳, 等. 集约化养殖场羊与兔粪尿产生量的监测[J]. 生态与农村环境学报, 2011, **27**(1): 44–48. [GUO Dejie, WU Huashan, MA Yan, et al. Study on the amount of manure and urine excreted by sheep and rabbits in intensive pasture [J]. Journal of Ecology and Rural Environment, 2011, **27**(1): 44–48]
- [30] 蔡亚庆, 仇焕广, 徐志刚. 中国各区域秸秆资源可能源化利用的潜力分析[J]. 自然资源学报, 2011, **26**(10): 1637–1646. [CAI Yaqing, QIU Huangang, XU Zhigang. Evaluation on potentials of energy utilization of crop residual resources in different regions of China [J]. Journal of Natural Resources, 2011, **26**(10): 1637–1646]
- [31] WANG Yajing, BI Yuyun, GAO Chunyu. The assessment and utilization of straw resources in China [J]. Agricultural Sciences in China, 2010, **9**(12): 1807–1815. DOI: 10.1016/S1671-2927(09)60279-0
- [32] KARMAKAR S, LAGUE C, AGNEW J, et al. Integrated decision support system (DSS) for manure management: A review and perspective [J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2007,

- 57(2): 190–201.
- [33] GHOLKAR M, THOMBARE P, KOLI U, et al. Techno-economic assessment of agricultural land remediation measures through nutrient management practices to achieve sustainable agricultural production [J]. *Environmental Challenges*, 2022 (7): 100492. DOI: 10.1016/j.envc.2022.100492
- [34] 沈根祥, 汪雅谷, 袁大伟. 上海市郊农田畜禽粪便负荷量及其警报与分级[J]. *上海农业学报*, 1994, 10 (S1): 6–11. [SHEN Genxiang, WANG Yagu, YUAN Dawei. Loading amounts of animal feces and their alarming values and classification grades in Shanghai suburbs [J]. *Acta Agriculture Shanghai*, 1994, 10 (S1): 6–11]
- [35] 董红敏, 左玲玲, 魏莎, 等. 建立畜禽废弃物养分管理制度促进种养结合绿色发展[J]. *中国科学院院刊*, 2019, 34(2): 180–189. [DONG Hongmin, ZUO Lingling, WEI Sha, et al. Establish manure nutrient management plan to promote green development of integrated crop-livestock production system [J]. *Bulletin of Chinese Academy of Sciences*, 2019, 34(2): 180–189] DOI: 10.16418/j.issn.1000–3045.2019.02.007
- [36] 文斌, 傅祥超, 范康, 等. 兔粪堆肥技术初步研究[J]. *畜牧与兽医*, 2010, 42(10): 15–19. [WEN Bin, FU Xiangchao, FAN Kang, et al. Preliminary study on the rabbit manure composting process [J]. *Animal Husbandry and Veterinary Medicine*, 2010, 42(10): 15–19]
- [37] 国家环境保护总局自然生态保护司. 全国规模化畜禽养殖业污染情况调查及防治对策[M]. 北京: 中国环境科学出版社, 2002: 1–182. [Department of Natural Ecological Protection of the State Environmental Protection Administration. Survey on pollution of livestock and poultry farming industry in China and countermeasures [M]. Beijing: China Environmental Science Press, 2002: 1–182]
- [38] 陈舜, 逯非, 王效科. 中国氮磷钾肥制造温室气体排放系数的估算[J]. *生态学报*, 2015, 35(19): 6371–6383. [CHEN Shun, LU Fei, WANG Xiaoke. Estimation of greenhouse gases emission factors for China's nitrogen, phosphate, and potash fertilizers [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2015, 35(19): 6371–6383] DOI: 10.5846/stxb201405271084
- [39] BAI Zhaohai, MA Lin, JIN Shuqin, et al. Nitrogen, phosphorus, and potassium flows through the manure management chain in China [J]. *Environmental Science and Technology*, 2016, 50(24): 13409–13418. DOI: 10.1021/acs.est.6b03348
- [40] RAMANKUTTY N, MEHRABI Z, WAHA K, et al. Trends in global agricultural land use: Implications for environmental health and food security [J]. *Annual Review of Plant Biology*, 2018, 69(1): 789–815. DOI: 10.1146/annurev-arplant-042817040256
- [41] 罗怀良. 川中丘陵地区近 55 年来农田生态系统植被碳储量动态研究——以四川省盐亭县为例[J]. *自然资源学报*, 2009, 24(2): 251–258. [LUO Huailiang. Dynamic of vegetation carbon storage of farmland ecosystem in hilly area of central Sichuan basin during last 55 years: A case study of Yanting county, Sichuan province [J]. *Journal of Natural Resources*, 2009, 24(2): 251–258]

Potential of Carbon Emission Reduction by Crop-Livestock Integration in Main Producing Areas of Mountain Farm-Produces —Taking Four Counties in Sichuan Province, China as Examples

LUO Huailiang

(College of Geography and Resource Science, Sichuan Normal University, Chengdu 610101, China)

Abstract: Crop-livestock integration in agriculture can not only effectively recycled agricultural wastes but has remarkable effects on carbon emission reduction. Previous research on a sustainable green mountain agriculture paid more attentions to the resource utilization of agricultural wastes with pollution control, but hardly concerned about the effect of carbon emission reduction by crop-livestock integration on farm-produces.

In this study, the performances of carbon emission reduction by crop-livestock integration in mountain agriculture over past 10 years (2008 to 2017) on a county basis was exemplified by four counties, Hongya, Kaijiang, Yanting and Xingwen, which are main producing regions of mountain farm-produces in Sichuan Basin, China. It used the method of straw-to-grain ratio to estimate the amount of crop straw and further estimated the

potential of carbon emission reduction by utilization of straw fodder based on energy conversion; it used the method of excretion coefficient to estimate the amount of livestock manure, and further estimated the potential of carbon emission reduction by utilization of livestock manure in terms of nutrient cycle.

(1) In the past 10 years, the potential of annual carbon emission reduction by crop-livestock integration in the four counties was 19.42×10^4 t, with a slight increase of 1.25%, in which straw fodder individually was 15.49×10^4 t, an increase of 8.37%; the left livestock manure was 3.93×10^4 t, down 23.09%.

(2) The potential of annual carbon emission reduction by crop-livestock integration was 2.04 t/hm² per unit area of cultivated land for the four counties, in a descending order of Kaijiang (2.36 t/hm²) > Hongya (2.30 t/hm²) > Yanting (2.01 t/hm²) > Xingwen (1.57 t/hm²).

(3) The proportion of the straw fodder utilization to the livestock manure utilization in the potential of annual carbon emission reduction by crop-livestock integration was 79.75% to 20.25% in the four regions; among them, straw fodder accounted for 86.27% of the potential, with a descending order of rice at 35.07%, corn at 24.99%, wheat at 13.44% and rapeseed at 12.77%; livestock manure was primarily composed of cattle manure at 52.94%.

This study can provide a theoretical basis for guideline of carbon emission reduction by crop-livestock integration in mountain agriculture.

Key words: main producing area of farm-produce; crop-livestock integration; potential of carbon emission reduction; crop straw; livestock manure

(责任编辑 李嵘)