

DOI: 10.5846/stxb202112133528

沈园, 陶玥玥, 董林林, 施林林, 陆长婴, 王海候, 金梅娟, 周新伟, 沈明星. 基于能值分析评估现代农牧循环系统的构建与优化. 生态学报, 2023, 43(8): 3057-3067.

Shen Y, Tao Y Y, Dong L L, Shi L L, Lu C Y, Wang H H, Jin M J, Zhou X W, Shen M X. Evaluation on construction and optimization of modern agro-pastoral circular system based on emergy analysis. Acta Ecologica Sinica, 2023, 43(8): 3057-3067.

## 基于能值分析评估现代农牧循环系统的构建与优化

沈 园<sup>1,2</sup>, 陶玥玥<sup>1,2</sup>, 董林林<sup>1,2</sup>, 施林林<sup>1,2</sup>, 陆长婴<sup>1,2</sup>, 王海候<sup>1,2</sup>, 金梅娟<sup>1,2</sup>, 周新伟<sup>1,2</sup>, 沈明星<sup>1,2,3,\*</sup>

1 苏州市农业科学院(江苏太湖地区农业科学研究所), 苏州 215105

2 国家土壤质量相城观测实验站, 苏州 215155

3 苏州市农村干部学院(苏州干部学院), 苏州 215011

**摘要:**发展现代循环农业有助于推动农业生产方式高质量转型,是实现农业可持续发展的重要路径之一。但生产经营者在构建循环农业系统的过程中,因缺乏精确的参数测算,常存在投入产出不明、循环效率偏低、整体评估缺乏等问题,导致现代循环农业系统的物能高效运转面临阻碍。以江苏省太仓市东林村的现代农牧循环系统为对象,在四维时空尺度上界定系统边界并绘制能流图,全面梳理了案例系统全年运转过程中的投入与产出项目。现代“草-羊-田”农牧循环全系统由粮食种植、饲料加工、湖羊养殖与羊粪堆肥 4 个亚系统构成。通过模拟亚系统逐步结合、系统循环与优化调控的演进过程,采用能值分析方法对农牧系统不同构建阶段的亚系统与全系统的能值投入产出和结构进行定量评估与对比研究。结果表明,在农牧系统产业链逐步构建直至循环生产的过程中,全系统的总能值投入随各亚系统的扩增而有明显增加,系统的物能内部流通率逐渐升高。随后,以废弃物的系统内部消纳为目标,通过强化亚系统间的耦合对现状循环进行优化调控,系统所需的总能值投入有大幅减少,且各亚系统对本地资源的利用程度有明显提升。实证研究定量评估了现代农牧循环系统构建与优化过程中的能值投入与资源利用状况,为系统的高效循环运行提供参数支持,可为循环农业系统的科学构建与模式的复制推广提供精准指导。

**关键词:**循环农业;能值分析法;资源投入;能值结构;系统优化

## Evaluation on construction and optimization of modern agro-pastoral circular system based on emergy analysis

SHEN Yuan<sup>1,2</sup>, TAO Yueyue<sup>1,2</sup>, DONG Linlin<sup>1,2</sup>, SHI Linlin<sup>1,2</sup>, LU Changying<sup>1,2</sup>, WANG Haihou<sup>1,2</sup>, JIN Meijuan<sup>1,2</sup>, ZHOU Xinwei<sup>1,2</sup>, SHEN Mingxing<sup>1,2,3,\*</sup>

1 Suzhou Academy of Agricultural Sciences (Institute of Agricultural Sciences in Taihu Lake Region of Jiangsu), Suzhou 215105, China

2 National Agricultural Experiment Station for Soil Quality, Xiangcheng, Suzhou 215155, China

3 Suzhou Country Cadre Institute (Suzhou Cadre Institute), Suzhou 215011, China

**Abstract:** Developing modern circular agriculture is helpful to promote the high-quality transformation of agricultural production mode in China, which is one of the important ways to realize agricultural sustainable development. However, when the agricultural production operators applied the circular agriculture model to the particular system construction, there often occurred problems such as unknown input and output, low circulation efficiency and lack of overall evaluation, which led to obstacles for the efficient operation and material-energy utilization of modern circular agriculture systems. In this study, the modern “straw-sheep-cropland” agro-pastoral circular system of Donglin Village in Jiangsu Province was selected

**基金项目:**江苏省自然科学基金项目(BK20190169);苏州市社会科学基金项目(决策咨询类)(J2022LX007);苏州市科技计划项目(ST202228)

**收稿日期:**2021-12-13; **网络出版日期:**2022-12-22

\* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: smxwxy@163.com

as the research object, due to its typical representativeness in the research of modern circular agriculture. The whole system consisted of 4 subsystems as cereal cropping, feed producing, sheep raising and manure composting. On the four-dimensional spatial-temporal scale, the system boundary was defined by drawing the emergy flow diagram. Hence the input and output items of the case system were comprehensively sorted out covering the entire year operation. On this basis, aiming to simulate the gradual progress of subsystems combination, system circulation and optimal regulation, 4 development stages were set as the separate cropping and raising, the connective cropping and raising (by producing or composting), the present circular, and the optimized circular. Then, the emergy input-output and structure of subsystems along with the whole system in different stages were quantitatively evaluated and comparatively studied by emergy analysis. The results showed that the gross emergy input of the feed production subsystem was the largest among 4 subsystems at the present circular stage, as its designed production scale needed a large amount of corresponding resources such as purchased straw to be invested. Meanwhile, unit emergy value of mutton from the sheep raising subsystem was the highest due to its role of consumer in the ecosystem. During the gradual process of constructing the industrial chain of the agro-pastoral system step by step until circulating production, the gross emergy input of the whole system increased obviously with the augmentation of subsystems, so did the internal circulation rate of material-energy with the development of the system construction. Subsequently, targeted at intra-system absorption of waste, the present circular system was optimally regulated by strengthening the coupling level between subsystems. At the optimized circular stage, system required lower gross emergy input and consumed less external economic resource, which demonstrated a better low emergy consumption characteristic. And the recycling of planting and breeding waste as well as self-sustaining production within the system resulted in significant enhancement of local resources utilization degree in each subsystem. In the meantime, unit emergy values of effective products and by-products produced at this stage all increased, which was mainly on account of the higher emergy level for driving the circulating operation of the system by adding extra material, energy and information. This study quantitatively evaluated emergy input and resource utilization during the construction and optimization process of modern agro-pastoral circular system based on empirical study, which could not only provide parameter support for efficient circulating operation of the system, but also supply accurate guidance for scientific system construction and replicated model promotion of circular agriculture.

**Key Words:** circular agriculture; emergy analysis; resource input; emergy structure; system optimization

在我国农业生产方式的转型过程中,发展现代循环农业是实现农业高质量绿色发展的重要路径之一<sup>[1]</sup>。大规模产业化的现代循环农业要求种植、养殖、加工等农业生产环节接口精准、连接顺畅,使得物质流、能量流、信息流、价值流的利用最优,以达到有效利用资源、减少污染排放、提高综合效益等目的<sup>[2]</sup>。作为典型的自然-经济-社会复合生态系统,循环农业系统是以“水-土-气-生-人”综合体为基础的,受到自然环境与经济社会的共同驱动,因而,其整体构建是一个逐渐发展的过程<sup>[3]</sup>。

高效的现代循环农业系统可以让物能代谢产物在整个农业生态系统中循环利用,形成闭环而不流出系统之外,降低物能排放对环境造成的影响。但当循环链出现阻断、缺节或物能供需不匹配时,则会引起物能的散逸与阻滞,致使系统循环不畅、环境污染发生<sup>[4]</sup>。我国各地区凭借独特的资源禀赋和发展水平形成了多样化的循环农业模式,包括农牧循环、农渔循环、林渔循环等<sup>[5-7]</sup>。但在将这些模式应用于系统构建时多依赖于农业从业人员的经验,普遍存在投入产出不明、循环效率偏低、整体评估缺乏等问题,导致现代循环农业系统的高效循环运行面临严峻挑战。因此,系统梳理循环农业系统各环节的投入产出项目,量化地评估全产业链物质循环与能量流动,对促进现代循环农业模式的优化应用具有重要意义。

近年来,国内外学者针对循环农业模式与系统的评估研究,常因研究侧重点的不同而差异化地选用能值分析法、生态足迹法和生命周期评价法等方法<sup>[8-10]</sup>,核算与评价投入产出的综合效益与生态效率。其中,20

世纪 80 年代美国著名生态学家 Odum H T 创立的能值分析理论,以地球系统的驱动源太阳能作为基础标准参照,通过单位能值转化率核算自然生态系统和社会经济系统中的各种物质流、能量流、信息流和价值流<sup>[11]</sup>。能值评价方法对于农业生态系统表现出天然的适用性,并被逐渐应用到循环农业系统分析中<sup>[12]</sup>。Ghisellini 等<sup>[13]</sup>将能值核算与分解分析技术相结合,应用于 1985—2010 年意大利农业系统的绩效监测与评价。Wang 等<sup>[14]</sup>基于能值理论改进评价指标,计算了再生生物质对循环农业系统的能源贡献。Patrizi 等<sup>[15]</sup>将集合理论应用于能值评价,从环境角度研究了鹅饲养与有机葡萄生产的农畜系统整合。Su 等<sup>[16]</sup>采用能值与经济分析相结合的方法,评价了传统水稻单作、综合种养和非粮食生产 3 种农业生产模式的综合效益。Wang 等<sup>[17]</sup>利用能值分析法对高密市农业系统的经济效益、环境压力和可持续绩效进行评价。但目前的研究中,对循环农业系统的产业链构建过程缺少系统性评估,也鲜少从物能需求与供给角度对循环系统进行优化探索,不利于现代循环农业系统的科学构建与模式的复制推广。因此,本研究在能值分析理论的基础上,通过实证研究定量评估农牧循环系统在构建与优化的不同演进阶段的投入产出与物能循环状况,能够为现代循环农业系统的精准调控与可持续发展提供科学指导。

## 1 研究方法

### 1.1 研究对象

本研究团队创制的现代“草-羊-田”农牧循环模式集成创新了以“秸秆机械收集裹包发酵与加工技术、肉羊全价日混饲料配方技术、羊粪机械收集与堆肥技术、羊粪有机肥适量机械还田技术”为核心的技术链,形成了“生态稻米、发酵饲草、优质肉羊、羊粪有机肥”4 个循环农业产品<sup>[18]</sup>。该模式对实现种养一体、农牧结合、粮草兼顾具有重要价值,已成为江苏省秸秆综合利用技术与推广引领模式,目前在江苏苏州、南通、盐城和上海崇明等多地进行应用。

本研究选取的案例来自江苏省太仓市城厢镇东林村循环农业特色示范基地,由苏州金仓湖农业科技股份有限公司作为主要生产载体,构建了包括粮食生产、饲料加工、湖羊养殖与羊粪堆肥 4 个亚系统的现代农牧循环系统。案例系统配置了 133.33 hm<sup>2</sup>高标准农田,实行小麦和水稻周年复种连作,总投资 120 万元(包括基础设施、机械设备、流动资金等,下同),其中麦季部分休耕,稻季施用羊粪有机肥后将经温室育秧而成的毯苗机插栽种于大田,稻麦二季均配备耕、种、管、收等农机进行全程机械化生产。饲料加工厂占地 1.33 hm<sup>2</sup>,总投资 4500 万元,利用稻麦秸秆和豆渣、糖蜜等种植业与加工业废弃物,经有益微生物菌剂发酵制成草畜粗饲料。湖羊养殖场占地 3.33 hm<sup>2</sup>,设计规模为年出栏量 10000 头,目前生产水平为年出栏量 4000 头,总投资 3500 万元。有机肥厂占地 0.5 hm<sup>2</sup>,总投资 330 万元,以湖羊粪便为原料,辅以菌渣、米糠和稻麦秸秆等农业废弃物,经好氧堆肥生产羊粪有机肥。

由于东林村现代农牧循环系统案例在设计过程中采用灰箱控制法,且在实施过程中缺少精确的参数测算,导致其高效循环运行面临阻碍。一方面,因接茬时间紧,小麦秸秆因实施全量还田而未得到高值利用,且水稻秸秆的收集率也仅为 80%,使得饲料加工与羊粪堆肥需要外购大量秸秆,未能充分利用系统内部的种植废弃物资源。另一方面,受堆肥场地限制,养殖产生的羊粪便中仅有 1/3 经羊粪堆肥亚系统转化为羊粪有机肥施用于水稻种植,且另需外购有机肥补充,造成了系统内部养殖废弃物的浪费,同时增加了环境风险。

### 1.2 能值分析法

#### 1.2.1 界定系统边界

农业生态系统分析所涉及的资源项目众多,并具有较强的地域性特征。合理界定系统边界是能值分析的前提,对能值评价结果产生较为明显的影响<sup>[19]</sup>。本研究以“四维时空尺度”对案例系统边界进行界定:“二维”面积以各亚系统的生产场所为边界;“高度/深度”空间以近地表空间为主,上界为地表风 10 m 标准高度,下界为粮食作物根系 1 m 土壤深度;“第四维”时间范围为 1 个自然年。此外,通过参考 Odum<sup>[20]</sup>提供的能量语言符号绘制能流图,不仅能从宏观层面梳理研究系统与周围环境的关系,而且能从微观层面辨识研究系统

内部各生产环节的投入、产出关系及动态变化过程。

1.2.2 编制能值分析表

能值分析表的编制是系统物能投入和产出计算的基础,主要包括项目描述、能量来源、原始物能(物质、能量、价值)流、单位、能值转换率(UEV)、太阳能值(SE)和产出等项目<sup>[21]</sup>。其中,最重要的内容是采用合适的单位能值转换率将各类别的物质、能量与服务等投入都转换成具有统一标准的太阳能值,表达式为:

$$SE_i = M_i \times UEV_i \tag{1}$$

式中, $SE_i$ 代表第*i*种物质、能量或服务的太阳能值; $M_i$ 代表第*i*种物质、能量或服务的数量,其中太阳能、雨水化学能、表土层净损失等的数量参考 Odum<sup>[20]</sup>提供的计算方法; $UEV_i$ 代表第*i*种物质、能量或服务的单位能值转换率。

1.2.3 评估系统能值结构

为明确现代农牧循环系统构建过程中的能值投入产出情况并分析主要能耗原因,参考王小龙等<sup>[22]</sup>根据“性质”“来源”和“位置”等的判断,将系统投入资源划分为可更新资源与不可更新资源、自然资源与经济资源、本地资源与外部资源,通过分类统计对系统不同演进阶段的能值结构进行评估。

1.3 数据来源

本研究团队自 2019 年 5 月起对现代农牧循环系统案例进行全面的数据采集与跟踪调研。一方面,采用半结构访谈形式对各亚系统的负责人进行详细咨询,掌握系统各环节主要的资源投入与产出情况。另一方面,通过产业跟踪调研与生态监测调查等方法,准确统计进入系统的全部投入与离开系统的全部产出(排放)项目。采集调研所得的亚系统各项投入与系统各项产出,以及各投入产出项目对应的单位能值转化率来源详见表 1。与此同时,收集并整理与研究区域相关的自然环境和社会经济的统计数据<sup>[23–27]</sup>与文献资料等<sup>[28–31]</sup>。根据国际能值学会的建议,本研究采用 2016 年确定的最新能值基准  $1.20 \times 10^{25}$  sej/year 为研究基础,以保证研究结果的准确性<sup>[22]</sup>。

表 1 东林村现代农牧循环系统能值分析表

Table 1 Energy analysis of the modern agro-pastoral circular system of Donglin Village

| 投入\产出<br>Input \ Output                            | 项目<br>Item/unit | 原始数据<br>Raw data      | 太阳能值<br>SE/sej        | 单位能值转换率<br>UEV/( sej/unit ) | 参考文献<br>References |
|----------------------------------------------------|-----------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------------|--------------------|
| 粮食种植亚系统投入<br>Input of cereal cropping<br>subsystem | 雨水化学潜势/J        | $9.32 \times 10^{12}$ | $2.21 \times 10^{17}$ | $2.37 \times 10^4$          | [ 32 ]             |
|                                                    | 表土层净损失/J        | $1.17 \times 10^{11}$ | $1.10 \times 10^{16}$ | $9.40 \times 10^4$          | [ 32 ]             |
|                                                    | 地表水/J           | $3.19 \times 10^{12}$ | $6.57 \times 10^{17}$ | $2.06 \times 10^5$          | [ 32 ]             |
|                                                    | 种子/J            | $3.95 \times 10^{11}$ | $1.01 \times 10^{17}$ | $2.54 \times 10^5$          | [ 21 ]             |
|                                                    | 基质/g            | $1.08 \times 10^8$    | $3.70 \times 10^{14}$ | $3.43 \times 10^6$          | [ 21 ]             |
|                                                    | 育秧盘/ ¥          | $3.50 \times 10^4$    | $9.60 \times 10^{15}$ | $2.74 \times 10^{11}$       | [ 31 ]             |
|                                                    | 氮肥/g            | $5.21 \times 10^7$    | $2.51 \times 10^{17}$ | $4.83 \times 10^9$          | [ 20 ]             |
|                                                    | 磷肥/g            | $1.16 \times 10^7$    | $5.75 \times 10^{16}$ | $4.96 \times 10^9$          | [ 20 ]             |
|                                                    | 钾肥/g            | $1.84 \times 10^7$    | $2.57 \times 10^{16}$ | $1.40 \times 10^9$          | [ 20 ]             |
|                                                    | 羊粪有机肥(自产)/J     | $2.71 \times 10^{13}$ | $3.26 \times 10^{18}$ | —                           |                    |
|                                                    | 有机肥(外购)/g       | $9.93 \times 10^8$    | $3.41 \times 10^{15}$ | $3.43 \times 10^6$          | [ 21 ]             |
|                                                    | 农药/ ¥           | $1.53 \times 10^6$    | $3.10 \times 10^{15}$ | $2.74 \times 10^{11}$       | [ 31 ]             |
|                                                    | 柴油/J            | $1.49 \times 10^{12}$ | $1.25 \times 10^{17}$ | $8.39 \times 10^4$          | [ 32 ]             |
|                                                    | 机械/ ¥           | $4.70 \times 10^5$    | $1.29 \times 10^{17}$ | $2.74 \times 10^{11}$       | [ 31 ]             |
|                                                    | 人力/J            | $5.42 \times 10^9$    | $5.04 \times 10^{15}$ | $4.83 \times 10^5$          | [ 33 ]             |
|                                                    | 电力/J            | $5.54 \times 10^{11}$ | $1.22 \times 10^{17}$ | $2.21 \times 10^5$          | [ 32 ]             |
|                                                    | 温室(折损)/ ¥       | $1.20 \times 10^5$    | $3.29 \times 10^{16}$ | $2.74 \times 10^{11}$       | [ 28 ]             |
|                                                    | 基建维护/ ¥         | $8.00 \times 10^3$    | $2.19 \times 10^{15}$ | $2.74 \times 10^{11}$       | [ 31 ]             |



续表

| 投入\产出<br>Input \ Output                              | 项目<br>Item/unit | 原始数据<br>Raw data    | 太阳能值<br>SE/sej      | 单位能值转换率<br>UEV/( sej/unit) | 参考文献<br>References |
|------------------------------------------------------|-----------------|---------------------|---------------------|----------------------------|--------------------|
| 饲料加工亚系统投入<br>Input of feed producing<br>subsystem    | 太阳能/J           | $4.62\times10^{13}$ | $4.62\times10^{13}$ | 1.00                       | [ 32]              |
|                                                      | 秸秆( 自产)/J       | $1.16\times10^{13}$ | $1.49\times10^{18}$ | —                          |                    |
|                                                      | 秸秆( 外购)/J       | $2.25\times10^{14}$ | $1.12\times10^{19}$ | $4.96\times10^4$           | [ 20]              |
|                                                      | 包膜/¥            | $1.69\times10^6$    | $4.64\times10^{17}$ | $2.74\times10^{11}$        | [ 31]              |
|                                                      | 菌剂/¥            | $9.79\times10^4$    | $2.69\times10^{16}$ | $2.74\times10^{11}$        | [ 31]              |
|                                                      | 豆腐渣/g           | $4.90\times10^9$    | $1.68\times10^{16}$ | $3.43\times10^6$           | [ 21]              |
|                                                      | 糖蜜/J            | $5.45\times10^{12}$ | $5.89\times10^{17}$ | $1.08\times10^5$           | [ 21]              |
|                                                      | 饲料厂( 折损)/¥      | $2.25\times10^6$    | $6.17\times10^{17}$ | $2.74\times10^{11}$        | [ 31]              |
|                                                      | 基建维护/¥          | $4.50\times10^5$    | $1.23\times10^{17}$ | $2.74\times10^{11}$        | [ 31]              |
|                                                      | 电力/J            | $4.40\times10^{12}$ | $9.70\times10^{17}$ | $2.21\times10^5$           | [ 32]              |
|                                                      | 柴油/J            | $9.14\times10^{11}$ | $7.67\times10^{16}$ | $8.39\times10^4$           | [ 32]              |
|                                                      | 人力/J            | $5.44\times10^{10}$ | $1.84\times10^{17}$ | $4.83\times10^5$           | [ 33]              |
| 湖羊养殖亚系统投入<br>Input of sheep raising<br>subsystem     | 太阳能/J           | $1.16\times10^{14}$ | $2.11\times10^{15}$ | 1.00                       | [ 32]              |
|                                                      | 玉米/J            | $4.16\times10^{13}$ | $4.39\times10^{18}$ | $1.06\times10^5$           | [ 20]              |
|                                                      | 豆粕/J            | $2.40\times10^{13}$ | $1.72\times10^{12}$ | $9.17\times10^4$           | [ 12]              |
|                                                      | 豆渣/g            | $3.19\times10^9$    | $1.10\times10^{16}$ | $3.43\times10^6$           | [ 31]              |
|                                                      | 粗饲料( 自产)/J      | $1.02\times10^{13}$ | $3.98\times10^{17}$ | —                          |                    |
|                                                      | 精补/g            | $3.15\times10^4$    | $2.72\times10^{18}$ | $8.64\times10^{13}$        | [ 34]              |
|                                                      | 兽药/疫苗/¥         | $2.07\times10^4$    | $5.67\times10^{15}$ | $2.74\times10^{11}$        | [ 31]              |
|                                                      | 消毒/药浴/g         | $1.28\times10^7$    | $1.64\times10^{16}$ | $1.27\times10^9$           | [ 12]              |
|                                                      | 自来水/J           | $1.74\times10^{11}$ | $1.46\times10^{17}$ | $8.39\times10^5$           | [ 21]              |
|                                                      | 养殖场( 折损)/¥      | $1.75\times10^6$    | $4.80\times10^{17}$ | $2.74\times10^{11}$        | [ 31]              |
|                                                      | 基建维护/¥          | $3.50\times10^5$    | $9.60\times10^{16}$ | $2.74\times10^{11}$        | [ 31]              |
|                                                      | 电力/J            | $1.29\times10^{12}$ | $1.89\times10^{17}$ | $2.21\times10^5$           | [ 32]              |
|                                                      | 柴油/J            | $2.16\times10^{11}$ | $1.81\times10^{16}$ | $8.39\times10^4$           | [ 32]              |
|                                                      | 人力/J            | $3.14\times10^{10}$ | $1.06\times10^{17}$ | $4.83\times10^5$           | [ 33]              |
| 羊粪堆肥亚系统投入<br>Input of manure composting<br>subsystem | 太阳能/J           | $1.74\times10^{13}$ | $1.74\times10^{13}$ | 1.00                       | [ 32]              |
|                                                      | 粪便( 自产)/J       | $1.71\times10^{13}$ | $2.54\times10^{18}$ | —                          |                    |
|                                                      | 秸秆( 外购)/J       | $2.65\times10^{12}$ | $1.31\times10^{17}$ | $4.96\times10^4$           | [ 20]              |
|                                                      | 菌渣/J            | $2.51\times10^9$    | $1.76\times10^{11}$ | $4.83\times10^5$           | [ 34]              |
|                                                      | 米糠/J            | $4.76\times10^{12}$ | $3.02\times10^{17}$ | $6.35\times10^4$           | [ 12]              |
|                                                      | 烟丝灰/J           | $6.08\times10^9$    | $3.91\times10^{14}$ | $6.44\times10^4$           | [ 35]              |
|                                                      | 有机肥厂( 折损)/¥     | $1.65\times10^5$    | $4.53\times10^{16}$ | $2.74\times10^{11}$        | [ 31]              |
|                                                      | 基建维护/¥          | $3.30\times10^4$    | $9.05\times10^{15}$ | $2.74\times10^{11}$        | [ 31]              |
|                                                      | 电力/J            | $8.34\times10^{11}$ | $1.84\times10^{17}$ | $2.21\times10^5$           | [ 32]              |
|                                                      | 柴油/J            | $1.69\times10^{11}$ | $1.42\times10^{16}$ | $8.39\times10^4$           | [ 32]              |
|                                                      | 人力/J            | $1.05\times10^{10}$ | $3.53\times10^{16}$ | $4.83\times10^5$           | [ 33]              |
| 亚系统产出<br>Output of subsystems                        | 稻麦/J            | $2.63\times10^{13}$ | $2.63\times10^{18}$ | —                          |                    |
|                                                      | 秸秆/J            | $2.22\times10^{13}$ | $2.39\times10^{18}$ | —                          |                    |
|                                                      | 粗饲料/J           | $4.03\times10^{14}$ | $1.57\times10^{19}$ | —                          |                    |
|                                                      | 肉羊/J            | $3.97\times10^{12}$ | $1.63\times10^{18}$ | —                          |                    |
|                                                      | 粪便/J            | $4.67\times10^{13}$ | $6.95\times10^{18}$ | —                          |                    |
|                                                      | 羊粪有机肥/J         | $2.71\times10^{13}$ | $3.26\times10^{18}$ | —                          |                    |

通过对所采集数据的统计分析,案例系统在现状循环阶段全年运转过程中投入项目的原始数据如表 1 所

示,主要包括4个亚系统的自然资源、农用物资、农作管理与运输过程的投入。对外产出的有效产品为小麦  $5.48 \times 10^5$  kg、水稻  $1.15 \times 10^6$  kg、粗饲料  $2.46 \times 10^7$  kg 和肉羊  $1.90 \times 10^5$  kg,参与系统内部循环的有效产品为羊粪有机肥  $2.01 \times 10^6$  kg 和粗饲料  $6.39 \times 10^5$  kg,同时参与的副产品为水稻秸秆  $8.00 \times 10^5$  kg 和粪便  $2.10 \times 10^6$  kg,此外另有副产品粪便  $3.65 \times 10^6$  kg 作为养殖废弃物排出系统。

#### 1.4 系统演进模拟

农牧循环系统的演进是在种养结合的基础上,延长生态产业链,并使之循环运行的过程。本研究将农牧系统的演进过程分为农牧分离、农牧结合、现状循环与优化循环4个阶段(图1)。粮食种植与湖羊养殖是东林村现代农牧循环系统构建的基础亚系统,为对比分析亚系统逐步构建过程中的投入产出与物能循环状况,本研究模拟运转与现状循环阶段同等规模和同样生产方式的相互独立的粮食种植与湖羊养殖亚系统,此时为农牧分离阶段。随后模拟运转增加了同等规模和同样生产方式的饲料加工(“种-养-加”)或羊粪堆肥(“养-堆-种”)亚系统并对分离环节进行线性链接,此时为农牧结合阶段。以上系统模拟全年运转过程中对外产出的有效产品小麦、水稻和肉羊的产量保持不变,但参与系统内部流通的有效产品或副产品未形成循环。

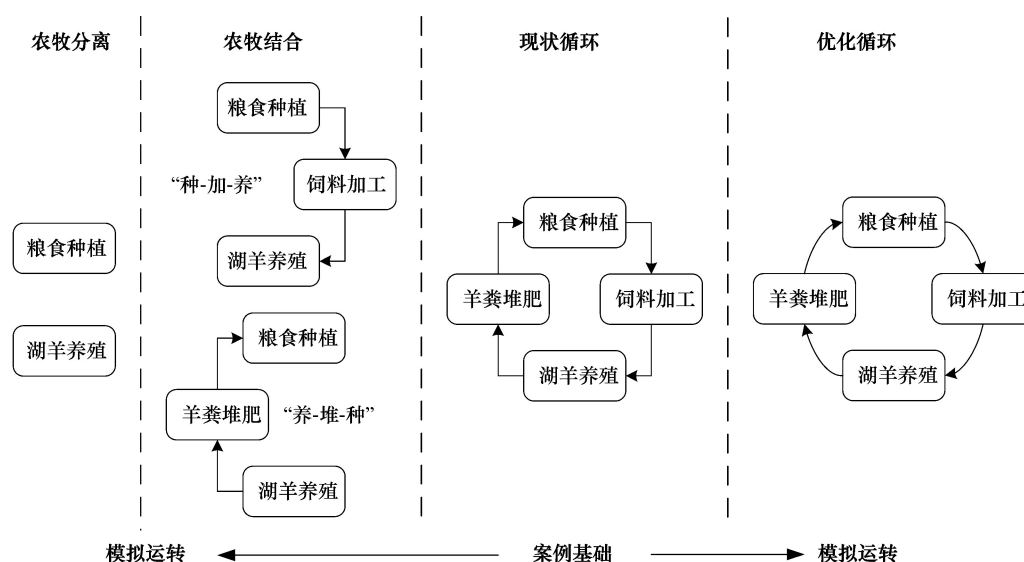


图1 农牧系统演进阶段示意图

Fig.1 Schematic diagram of the agro-pastoral systems in gradual progress

针对案例系统在现状循环阶段的运转中存在的种植与养殖废弃物利用不充分等问题,本研究以废弃物的系统内部消纳为目标,在维持粮食种植与湖羊养殖规模的前提下,通过基于各亚系统的产出与其接续投入之间的耦合配置,对研究案例施行优化调控。优化循环阶段系统模拟全年运转过程中对外产出的有效产品小麦、水稻和肉羊的产量依旧保持不变,但参与系统内部循环的有效产品羊粪有机肥增加到  $5.50 \times 10^6$  kg、粗饲料增加到  $1.15 \times 10^6$  kg,同时参与的副产品稻麦秸秆增加到  $1.25 \times 10^6$  kg、粪便增加到  $5.75 \times 10^6$  kg,且无副产品作为废弃物排出系统。

## 2 结果与分析

### 2.1 能值投入产出分析

#### 2.1.1 现状循环阶段

东林村现代农牧循环系统能流图反映了现有生产状态下,该系统内部的能流特征与系统外部的投入产出动态变化(图2)。能流图左侧环境支撑系统的投入来源主要为自然资源(太阳能、降雨蒸腾、土壤有机质等),顺着能量等级方向流向右侧人类控制系统,伴随经济资源的投入  $F$  (肥料、农药、辅料、机械、电力、人力

等),经粮食生产、饲料加工、湖羊养殖与羊粪堆肥亚系统的运转,由低能质材料生产高能质产品,最后以各类有效产出  $Y$ (小麦、水稻、粗饲料、肉羊)的形式离开系统,并有部分能流(羊粪有机肥)通过系统内部反馈重新成为生产原材料参与循环利用,另有部分能流以逸散反馈形式排出系统。

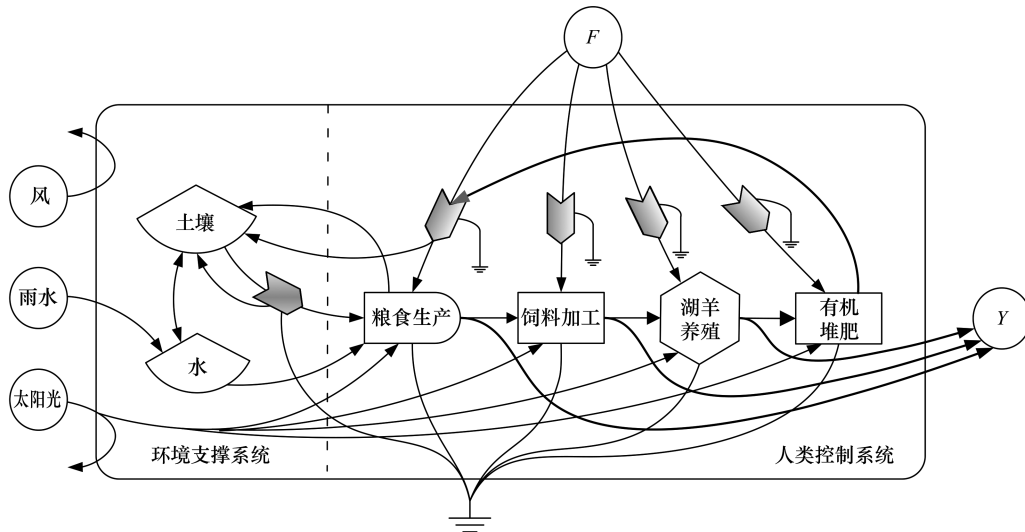


图2 东林村现代农牧循环系统能流图

Fig.2 Emery flow diagram of the modern agro-pastoral circular system of Donglin Village

通过编制的能值分析表计算(表1),在案例系统的现状循环运转过程中,粮食种植、饲料加工、湖羊养殖与羊粪堆肥亚系统的全年总能值投入分别为  $5.02 \times 10^{18}$  sej、 $1.57 \times 10^{19}$  sej、 $8.59 \times 10^{18}$  sej 和  $3.26 \times 10^{18}$  sej。可以明显看出,饲料加工亚系统的能值投入大于其他3个亚系统,是能值投入最少的羊粪堆肥亚系统的4.8倍。相应地,各亚系统产出的各类有效产品的UEV(sej/J)分别为稻麦  $1.00 \times 10^5$ 、粗饲料  $3.90 \times 10^4$ 、肉羊  $4.11 \times 10^5$  和羊粪有机肥  $1.20 \times 10^5$ ,同时产出的各类副产品的UEV(sej/J)分别为秸秆  $1.08 \times 10^5$  和粪便  $1.49 \times 10^5$ 。对比发现,饲料加工亚系统虽然需要较多的能值投入,但因生产规模较大使得产出的有效产品粗饲料的UEV较小,而湖羊作为生态系统的消费者,其有效产品肉羊的UEV则较大。现状循环阶段系统全年总能值投入为  $2.49 \times 10^{19}$  sej,低于4个亚系统的能值投入总和  $3.26 \times 10^{19}$  sej,这是因为各亚系统在接续运转后有  $7.69 \times 10^{18}$  sej的物质能量在系统内部循环流动,因此,现状循环阶段系统的物能内部流通率为23.59%。

### 2.1.2 亚系统结合阶段

由图3可以看出,农牧分离阶段系统只包含粮食种植与湖羊养殖2个独立的亚系统,前者的全年总能值投入为  $1.80 \times 10^{18}$  sej,后者的全年总能值投入为  $8.71 \times 10^{18}$  sej,两者求和得到全系统的总能值投入为  $10.5 \times 10^{19}$  sej,因而,系统的物能内部流通率为0。相应地,系统产出的有效产品的UEV(sej/J)分别为稻麦  $3.75 \times 10^4$  和肉羊  $4.16 \times 10^5$ ,同时产出的副产品的UEV(sej/J)分别为秸秆  $3.65 \times 10^4$  和粪便  $1.51 \times 10^5$ 。

农牧结合阶段中,通过饲料加工和羊粪堆肥亚系统分别对粮食种植与湖羊养殖亚系统进行链接,从而形成了“种-加-养”与“养-堆-种”2种线性产业链。“种-加-养”产业链中,粮食种植、湖羊养殖与所增加的饲料加工亚系统的全年总能值投入分别为  $1.80 \times 10^{18}$  sej、 $8.56 \times 10^{18}$  sej 和  $1.46 \times 10^{19}$  sej;“养-堆-种”产业链中,粮食种植、湖羊养殖与所增加的羊粪堆肥亚系统的全年总能值投入分别为  $5.05 \times 10^{18}$  sej、 $8.71 \times 10^{18}$  sej 和  $3.30 \times 10^{18}$  sej。由于亚系统间的线性链接促使了部分产品的接续利用,农牧结合全系统总能值投入低于3个亚系统的能值投入总和,分别为  $2.42 \times 10^{19}$  sej(“种-加-养”)和  $1.45 \times 10^{19}$  sej(“养-堆-种”)。因此,计算可得“种-加-养”产业链的物能内部流通率为3.05%,而“养-堆-种”产业链的则为15.10%。与此同时,农牧结合阶段系统所产出的各类产品的UEV也随各亚系统的总能值投入的变化而改变。

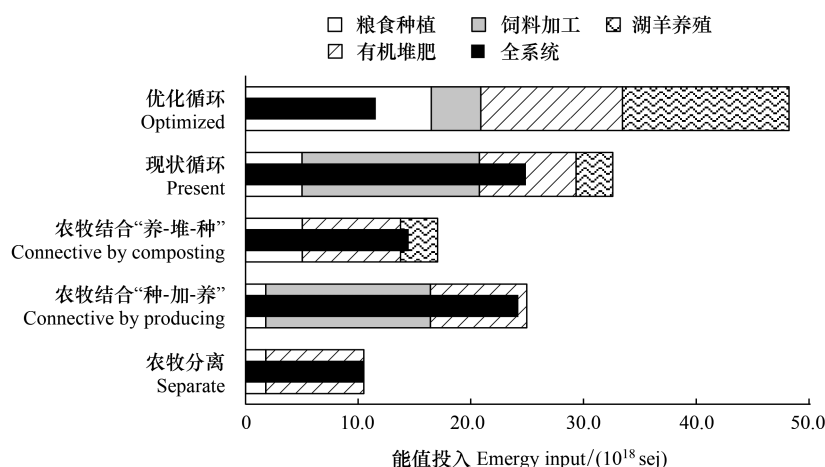


图3 不同演进阶段的农牧系统能值投入对比图

Fig.3 Comparison diagram of energy input of agro-pastoral system in gradual progress

通过对比农牧分离、农牧结合与现状循环阶段的能值投入发现,在现代农牧循环系统产业链逐步构建直至循环生产的演进过程中,全系统的总能值投入随各亚系统的扩增而有明显增加,且系统的物能内部流通率也随系统演进阶段的推进而逐渐升高。

### 2.1.3 优化循环阶段

对案例系统施行优化调控后进行模拟运转,粮食种植、饲料加工、湖羊养殖、羊粪堆肥4个亚系统的全年总能值投入分别为  $1.65 \times 10^{19}$  sej、 $4.38 \times 10^{18}$  sej、 $1.26 \times 10^{19}$  sej 和  $1.48 \times 10^{19}$  sej (图3),而全系统的总能值投入仅为  $1.16 \times 10^{19}$  sej,因此,优化循环阶段系统的物能内部流通率高达76.01%。相应地,各亚系统产出的各类有效产品的UEV(sej/J)分别为稻麦  $3.23 \times 10^4$ 、粗饲料  $2.38 \times 10^4$ 、肉羊  $4.88 \times 10^5$  和羊粪有机肥  $1.99 \times 10^5$ ,同时产出的各类副产品的UEV(sej/J)分别为秸秆  $3.61 \times 10^4$  和粪便  $2.27 \times 10^5$ 。

与现状循环阶段对比可知,优化循环阶段粮食种植、湖羊养殖与羊粪堆肥亚系统的总能值投入均有所增加,主要是因为前两者提高了参与内部流通的物能投入,后者则是扩大了生产规模;饲料加工亚系统的总能值投入有所减少,主要是由于缩减了生产规模以匹配全系统的物能需求;全系统总能值投入有大幅减少,主要是因为参与系统内部流通的物能替代了所需的外部投入。且由于优化循环阶段将各亚系统产生的副产品在系统内部进行完全利用,大幅提高了系统的物能内部流通率,使得全系统总能值投入也低于农牧结合阶段的。与此同时,优化循环阶段系统产出的各类产品的UEV均有所增加,这主要是因为系统的高效循环运转需要系统内部大量的物能流动进行驱动,而投入与产出的动态平衡使得各亚系统所产出的产品都处于较高的能值等级。

## 2.2 能值结构对比分析

### 2.2.1 亚系统对比

为探究亚系统能值结构并明确主要能耗环节,本研究对不同演进阶段各亚系统中不同资源类别的能值流进行对比分析。其中,来源于外部的经济资源一般需要购买获得,可在一定程度上反映出亚系统的能耗水平。农牧分离、农牧结合、现状循环与优化循环阶段中各亚系统的外部经济资源能值消耗情况如图4所示。总体而言,饲料加工亚系统的外部经济资源消耗最为明显,其次为湖羊养殖亚系统,这主要是因为以上两个亚系统的设计生产规模较大,相应需要从外部获取的经济资源(如外购的秸秆与饲料等)也较多;相反地,粮食种植亚系统除必要的机械化农作管理外,所需要的外部经济资源投入较少。对比不同演进阶段农牧系统的能耗变化,在亚系统逐步构建直至循环生产的过程中,各亚系统所消耗的外部经济资源呈小幅下降趋势;现状循环阶段系统经优化调整后,饲料加工亚系统对外部经济资源的消耗大幅降低,而羊粪堆肥亚系统的则有所增加,这



主要是因为亚系统对内部经济资源的利用程度发生改变,也与其本身的生产设计规模有关。

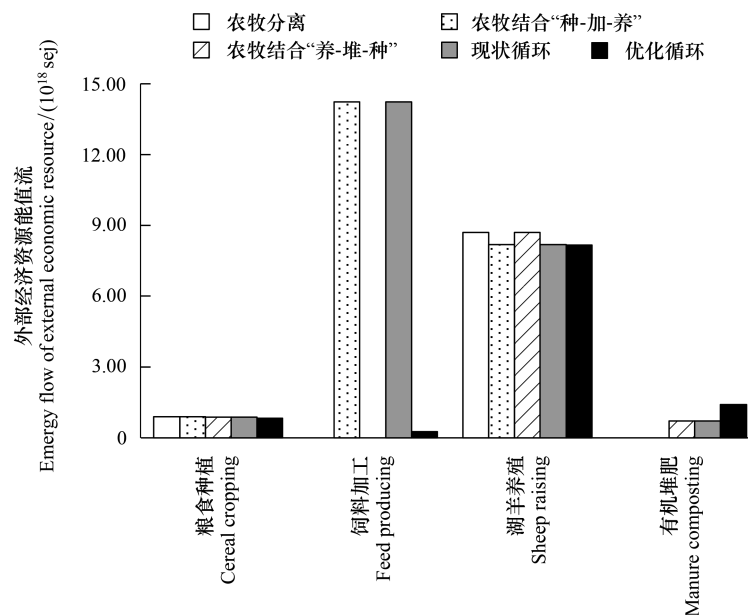


图4 不同演进阶段各亚系统外部经济资源能值流对比图

Fig.4 Comparison diagram of energy flow of external economic resource of each subsystem in gradual progress

当投入的资源来源于研究目标的系统边界之内时被归类为本地资源,对本地资源的利用情况可以体现出亚系统的资源自给程度。不同演进阶段各亚系统的本地资源能值流占该亚系统总能值流的比重如图5所示。在亚系统逐步结合的过程中,粮食种植与羊粪堆肥亚系统的本地资源能值流占比较高,而饲料加工与湖羊养殖亚系统的则较低;在现状循环阶段,粮食种植与羊粪堆肥亚系统的本地资源能值流占比为70%左右,而饲料加工与湖羊养殖亚系统的不到10%;在优化循环阶段,饲料加工、粮食种植与羊粪堆肥亚系统的本地资源能值流占比均超过90%,湖羊养殖亚系统的也提升到34.88%。由此可以对比看出,随着农牧系统演进阶段的

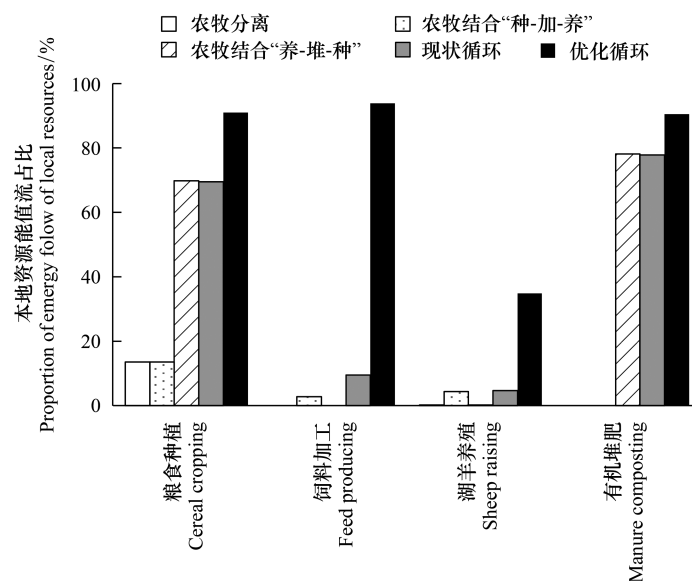


图5 不同演进阶段各亚系统本地资源能值流占比图

Fig.5 Comparison diagram of energy flow proportion of local resource of each subsystem in gradual progress

推进,各亚系统对本地资源的利用程度逐渐上升,反映了系统的资源自给能力在不断提高。

2.2.2 全系统对比

本研究按照亚系统逐步结合、循环现状与优化调控的演进过程,将农牧系统的各类能值流按照资源类别进行统计与分析(表2)。农牧系统运转全年的总能值投入随亚系统逐步构建而升高,并随系统的优化循环运行而降低,这体现了内部耦合的循环农业系统的低耗能优势。分类别来看,不可更新资源、经济资源与外部资源能值流都随亚系统逐步构建而升高,并随系统的优化循环运行而降低,其占比的变化趋势亦是如此,且经济资源与外部资源的能值流占比都超过90%,这反映出系统在演进的不同阶段都主要依靠外部经济资源来驱动,因为规模化、机械化的现代农牧循环产业链构建必然会提高生产方式对外部经济资源的需求程度。值得注意的是,农牧结合阶段不同线性产业链系统对资源的依赖程度有所不同,这主要和系统内部对种植与养殖废弃物的利用与自给性生产能力有关。

表2 不同演进阶段的农牧系统能值流综合表  
Table 2 Aggregated energy flows of agro-pastoral system in gradual progress

| 资源类别<br>Category of resources | 农牧分离<br>Separate      |                 | 农牧结合“种-加-养”<br>Connective by producing |                 | 农牧结合“养-堆-种”<br>Connective by composting |                 | 现状循环<br>Present       |                 | 优化循环<br>Optimized     |                 |
|-------------------------------|-----------------------|-----------------|----------------------------------------|-----------------|-----------------------------------------|-----------------|-----------------------|-----------------|-----------------------|-----------------|
|                               | 数值/sej<br>Amount      | 比例/%<br>Percent | 数值/sej<br>Amount                       | 比例/%<br>Percent | 数值/sej<br>Amount                        | 比例/%<br>Percent | 数值/sej<br>Amount      | 比例/%<br>Percent | 数值/sej<br>Amount      | 比例/%<br>Percent |
|                               |                       |                 |                                        |                 |                                         |                 |                       |                 |                       |                 |
| 总投入 Total                     | 1.05×10 <sup>19</sup> | 100.00          | 2.42×10 <sup>19</sup>                  | 100.00          | 1.45×10 <sup>19</sup>                   | 100.00          | 2.49×10 <sup>19</sup> | 100.00          | 1.16×10 <sup>19</sup> | 100.00          |
| 可更新资源 Renewable               | 1.42×10 <sup>18</sup> | 13.55           | 2.80×10 <sup>18</sup>                  | 11.56           | 4.15×10 <sup>18</sup>                   | 28.67           | 2.88×10 <sup>18</sup> | 11.56           | 1.53×10 <sup>18</sup> | 13.22           |
| 不可更新资源 Nonrenewable           | 9.08×10 <sup>18</sup> | 86.45           | 2.14×10 <sup>19</sup>                  | 88.44           | 1.03×10 <sup>19</sup>                   | 71.33           | 2.20×10 <sup>19</sup> | 88.44           | 1.00×10 <sup>19</sup> | 86.78           |
| 自然资源 Natural                  | 9.02×10 <sup>17</sup> | 8.58            | 9.02×10 <sup>17</sup>                  | 3.72            | 8.91×10 <sup>17</sup>                   | 6.15            | 8.91×10 <sup>17</sup> | 3.58            | 8.91×10 <sup>17</sup> | 7.70            |
| 经济资源 Economic                 | 9.60×10 <sup>18</sup> | 91.42           | 2.33×10 <sup>19</sup>                  | 96.28           | 1.36×10 <sup>19</sup>                   | 93.85           | 2.40×10 <sup>19</sup> | 96.42           | 1.07×10 <sup>19</sup> | 92.30           |
| 本地资源 Local                    | 2.45×10 <sup>17</sup> | 2.33            | 2.45×10 <sup>17</sup>                  | 1.01            | 2.34×10 <sup>17</sup>                   | 1.61            | 2.34×10 <sup>17</sup> | 0.94            | 2.34×10 <sup>17</sup> | 2.02            |
| 外部资源 Nonlocal                 | 1.03×10 <sup>19</sup> | 97.67           | 2.40×10 <sup>19</sup>                  | 98.99           | 1.42×10 <sup>19</sup>                   | 98.39           | 2.47×10 <sup>19</sup> | 99.06           | 1.13×10 <sup>19</sup> | 97.98           |

3 讨论与结论

本研究采用能值分析方法,以东林村现代农牧循环系统为研究对象,通过“四维时空尺度”对系统边界进行界定后,全面梳理了系统全年运转过程中的投入与产出项目,并对农牧系统不同演进阶段各亚系统与全系统的能值进行对比研究。结果表明,全系统的总能值投入随各亚系统的扩增而有明显增加,但优化循环阶段系统所需的总能值投入较低,系统的物能内部流通率较高,能够表现出较好的低耗能特征。

现状循环阶段案例系统在设计过程因缺少精确的参数测算而存在优化提升空间,本研究针对其种植与养殖废弃物的资源利用不佳问题,通过优化调控将亚系统的产出与其接续亚系统的投入进行匹配。具体地,在粮食种植过程中对品种布局、茬口管理与收获配套环节进行优化以增加秸秆的收获量,并适当扩大羊粪堆肥生产规模将羊粪充分转化为有机肥以提高本地有机肥替代率,同时缩小饲料加工的投产规模以匹配本地秸秆所需的消纳能力。循环系统经过一系列的优化调控措施,能够强化亚系统间的耦合水平,并且明显提高了对本地资源的利用程度。

在集约化生产地区,开展适度规模的循环农业实践对提高农业废弃物的利用效率、降低农业生产的环境影响都十分有益<sup>[36]</sup>。根据本研究的结果,在循环农业系统的构建过程中,应根据本地区的资源禀赋,设计科学合理的种养环节,以促进物质能量的循环流通;在循环农业系统的运行过程中,应注意协调各亚系统间的耦合参数,同时优化关键环节的技术参数。未来随着机械化水平的进一步提高以及技术手段的不断革新,各地区应针对不同循环系统根据不同的目标需求,因势利导地对优化措施进行适时的调整以保障系统的高效可持续运行<sup>[37]</sup>。

参考文献 (References):

[1] 骆世明主编,蔡昆争[等]编写. 农业生态学. 3版. 北京: 中国农业出版社, 2017.

- [ 2 ] Donner M, Verniquet A, Broeze J, Kayser K, de Vries H. Critical success and risk factors for circular business models valorising agricultural waste and by-products. *Resources, Conservation and Recycling*, 2021, 165: 105236.
- [ 3 ] Altieri M A. *Agroecology: The Science of Sustainable Agriculture*. 2nd ed. Boca Raton: CRC Press, 2018.
- [ 4 ] Adegbeye M J, Ravi Kanth Reddy P, Obaisi A I, Elghandour M M M Y, Oyebamiji K J, Salem A Z M, Morakinyo-Fasipe O T, Cipriano-Salazar M, Camacho-Díaz L M. Sustainable agriculture options for production, greenhouse gasses and pollution alleviation, and nutrient recycling in emerging and transitional nations-An overview. *Journal of Cleaner Production*, 2020, 242: 118319.
- [ 5 ] 沈园, 王海候, 陶玥玥, 陆长婴, 董林林, 施林林, 金梅娟, 周新伟, 沈明星. 基于生命周期评价的现代“草-羊-田”农牧循环系统调控. *农业工程学报*, 2021, 37(24): 266-274.
- [ 6 ] Ren W Z, Hu L L, Guo L, Zhang J, Tang L, Zhang E T, Zhang J E, Luo S M, Tang J J, Chen X. Preservation of the genetic diversity of a local common carp in the agricultural heritage rice-fish system. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2018, 115(3): E546-E554.
- [ 7 ] Liu S H, Min Q W, Jiao W J, Liu C J, Yin J Z. Integrated emergy and economic evaluation of Huzhou mulberry-dyke and fish-pond systems. *Sustainability*, 2018, 10(11): 3860.
- [ 8 ] 钟珍梅, 翁伯琦, 黄勤楼, 黄秀声, 陈钟佃, 冯德庆. 基于能值理论的循环复合农业生态系统发展评价——以福建省福清星源循环农业产业示范基地为例. *生态学报*, 2012, 32(18): 5755-5762.
- [ 9 ] Liu Z, Wang D Y, Ning T Y, Zhang S M, Yang Y, He Z K, Li Z J. Sustainability assessment of straw utilization circulation modes based on the emergy ecological footprint. *Ecological Indicators*, 2017, 75: 1-7.
- [ 10 ] 贾小乐, 周源, 延建林, 魏亿钢. 基于能值分析的环太湖城市群生态经济系统可持续发展研究. *生态学报*, 2019, 39(17): 6487-6499.
- [ 11 ] Fan W G, Zhang P, Xu Z H, Wei H J, Lu N C, Wang X C, Weng B Q, Chen Z D, Wu F L, Dong X B. Life cycle environmental impact assessment of circular agriculture: a case study in Fuqing, China. *Sustainability*, 2018, 10(6): 1810.
- [ 12 ] 王小龙. 基于生命周期评价与能值分析的循环农业评价理论、方法与实证研究[D]. 北京: 中国农业大学, 2016.
- [ 13 ] Ghisellini P, Zucaro A, Viglia S, Ulgiati S. Monitoring and evaluating the sustainability of Italian agricultural system. An emergy decomposition analysis. *Ecological Modelling*, 2014, 271: 132-148.
- [ 14 ] Wang X L, Li Z J, Long P, Yan L L, Gao W S, Chen Y Q, Sui P. Sustainability evaluation of recycling in agricultural systems by emergy accounting. *Resources, Conservation and Recycling*, 2017, 117: 114-124.
- [ 15 ] Patrizi N, Niccolucci V, Castellini C, Pulselli F M, Bastianoni S. Sustainability of agro-livestock integration: implications and results of Emergy evaluation. *Science of the Total Environment*, 2018, 622/623: 1543-1552.
- [ 16 ] Su Y, He S, Wang K, Shahtahmassebi A R, Zhang L P, Zhang J, Zhang M, Gan M Y. Quantifying the sustainability of three types of agricultural production in China: an emergy analysis with the integration of environmental pollution. *Journal of Cleaner Production*, 2020, 252: 119650.
- [ 17 ] Wang Q S, Ma Z, Ma Q, Liu M Q, Yuan X L, Mu R M, Zuo J, Zhang J, Wang S G. Comprehensive evaluation and optimization of agricultural system: an emergy approach. *Ecological Indicators*, 2019, 107: 105650.
- [ 18 ] 现代“草-羊-田”农牧循环生产技术——江苏太湖地区农业科学研究所最新科研成果篇. *江苏农业科学*, 2017, 45(24): 6.
- [ 19 ] Vigne M, Peyraud J, Lecomte P, Corson M S, Wilfart A. Emergy evaluation of contrasting dairy systems at multiple levels. *Journal of Environmental Management*, 2013, 129: 44-53.
- [ 20 ] Odum H T. *Environmental Accounting: EMERGY and Environmental Decision Making*. New York: John Wiley & Sons, 1996.
- [ 21 ] 蓝盛芳, 钦佩, 陆宏芳. 生态经济系统能值分析. 北京: 化学工业出版社, 2002.
- [ 22 ] 王小龙, 刘星星, 隋鹏, 陈源泉. 能值方法在农业系统应用中的常见问题及其纠正思路探讨. *中国生态农业学报: 中英文*, 2020, 28(4): 503-512.
- [ 23 ] 苏州市统计局, 国家统计局苏州调查队编. *苏州统计年鉴(2016)*. 北京: 中国统计出版社, 2016.
- [ 24 ] 苏州市统计局, 国家统计局苏州调查队编. *苏州统计年鉴(2017)*. 北京: 中国统计出版社, 2017.
- [ 25 ] 苏州市统计局, 国家统计局苏州调查队编. *苏州统计年鉴(2018)*. 北京: 中国统计出版社, 2018.
- [ 26 ] 苏州市统计局, 国家统计局苏州调查队编. *苏州统计年鉴(2019)*. 北京: 中国统计出版社, 2019.
- [ 27 ] 苏州市统计局, 国家统计局苏州调查队编. *苏州统计年鉴(2020)*. 北京: 中国统计出版社, 2020.
- [ 28 ] 曾燕, 王珂清, 谢志清, 苗茜. 江苏省太阳能资源评估. *大气科学学报*, 2012, 35(6): 658-663.
- [ 29 ] 薛华柱, 张国东, 周红敏, 王锦地, 万华伟. 几种典型地表类型反照率时序变化特征及其参数化研究. *北京师范大学学报: 自然科学版*, 2019, 55(2): 272-283.
- [ 30 ] 包维卿, 刘继军, 安捷, 谢光辉. 中国畜禽粪便资源量评估的排泄系数取值. *中国农业大学学报*, 2018, 23(5): 1-14.
- [ 31 ] Yang Z F, Jiang M M, Chen B, Zhou J B, Chen G Q, Li S C. Solar emergy evaluation for Chinese economy. *Energy Policy*, 2010, 38(2): 875-886.
- [ 32 ] Campbell D E, Brandt-Williams S L, Meisch M E A. Environmental accounting using emergy: Evaluation of the state of West Virginia. US Environmental Protection Agency, Office of Research and Development, National Health and Environmental Effects Research Laboratory, Atlantic Ecology Division, 2005.
- [ 33 ] Brandt-Williams S L. Handbook of emergy evaluation folio 4: emergy of Florida agriculture. Systems Ecology Center, University of Florida, Gainesville, FL, available at <http://www.ees.ufl.edu/cep/downloads/Folio>, 2002, 204: 20.
- [ 34 ] 陆萍. 循环农业发展: 模式、影响因素与效率评价——基于浙江平湖市实践的研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2016.
- [ 35 ] 林文雄, 陈雨海主编, 曹林奎[等]编写. *农业生态学*. 北京: 高等教育出版社, 2015.
- [ 36 ] Fan W G, Dong X B, Wei H J, Weng B Q, Liang L, Xu Z H, Wang X C, Wu F L, Chen Z D, Jin Y, Song C Q. Is it true that the longer the extended industrial chain, the better the circular agriculture? A case study of circular agriculture industry company in Fuqing, Fujian. *Journal of Cleaner Production*, 2018, 189: 718-728.
- [ 37 ] Shen Y, Shi L L, Tao Y Y, Wang H H, Lu C Y, Li S Y, Shen M X. Sustainability evaluation and optimization on the modern agro-pastoral circular system integrating emergy analysis and life cycle assessment. *Sustainability*, 2022, 14(9): 4890.