

叶小梅,王 莉,张曼秋. 种养循环模式的评价方法及优缺点分析[J]. 江苏农业科学,2022,50(16):1-5.

doi:10.15889/j.issn.1002-1302.2022.16.001

种养循环模式的评价方法及优缺点分析

叶小梅¹,王 莉¹,张曼秋²

(1. 江苏省农业科学院畜牧研究所/农业农村部种养结合重点实验室,江苏南京 210014; 2. 南京农业大学资源与环境学院,江苏南京 210095)

摘要: 种养循环模式作为循环农业发展的热点,实践远超前于理论,构建合理的评价体系可以促进种养循环模式的发展。目前对于种养循环模式宏观尺度的评价较多,但微观尺度的评价较少。本研究系统梳理循环农业与种养循环模式的相关概念,以及种养循环模式的主要评价方法,如生命周期评价法、能值分析法、数据包络分析法等,并对其优点、缺点进行分析。生命周期评价法应用较为广泛,技术较为成熟,该方法可以量化分析生态经济系统在整个生命周期的潜在环境影响,但目前较常用的生命周期评价法无法分析自然环境资源、人力等方面对农业生产过程的贡献,且不太重视种养循环系统有效能的产出效率。能值可以对各子系统进行系统分析,更全面地体现种养循环模式的独特性,但通常将系统内部循环作为“黑箱”处理,无法推断影响整体体系的具体环节。因此,可将生命周期评价和能值评价结合起来,对系统进行更加全面的评价;数据包络分析方法相较于前面 2 种无需主观赋权和设定既定函数关系,更为简单灵活,可用于我国、各省(市)等范围较大的宏观评价,但该方法是对系统进行整体分析,无法明确各亚系统的效率。

关键词: 种养循环; 能值分析; 生命周期评价法; 数据包络分析法

中图分类号: S181.5 **文献标志码:** A **文章编号:** 1002-1302(2022)16-0001-05

近年来,由于人口迅速增长,人们对资源的过度开采破坏了环境的动态平衡^[1]。针对农业环境中出现的问题,提出了循环农业的概念,即将循环经济的理念融入到农业生产中,不再是单一的种植养殖模式,而是种养一体化的循环模式,从而减少资源的消耗以及废弃物的排放。循环农业可以概括为“4R”农业,即实现废弃物的减量化、再循环、再利用、可控化^[2]。

循环农业具有多种模式,其中,种养循环模式在部分地区的生态经济效益较高,即通过种植业与畜牧业的结合,充分利用种植业的主副产品,减少农业废弃物的产生,实现资源的循环利用^[3]。这种模式主要有“粮食(草)-猪-沼”“粮食-猪-鱼”“玉米-养殖”等多种具体形式。

关于种养循环模式的评估主要有以随机前沿分析(SFA)为代表的参数估计法^[4]、以数据包络分析(DEA)为代表的非参数估计法^[5]、生命周期评价

法(LCA)、能值分析法(EME)、EME-LCA 综合评价法等。

生命周期评价法是对一个体系生产工序中产生的资源消耗和产出以及对潜在环境的影响进行全面分析与评价的方法,使决策者依据该体系对环境排放的标准化核算结果,更加了解该体系的优劣,从而提出改进措施,目前已广泛应用于污水处理、固废管理及资源化等^[6]。能值分析法是将生态系统中不断交换的各种不同类型的能量和物质,按照实践得出的同一标准进行转化从而进行定量分析,通过能值转换效率来评价系统的可持续性^[7]。数据包络分析(DEA)是一种对比评估样本间相对效率的工具,与随机前沿分析(SFA)等所谓的“参数法”形成了鲜明对比。本研究拟从以上几种角度对种养循环展开评价方法探究。

1 LCA 与种养循环模式

1.1 LCA 是一种成熟评价方法

LCA 是对生态经济系统整个生命周期的过程进行评价,包括对原材料的提取、产品的设计和生

收稿日期: 2021-07-30

基金项目: 江苏现代农业产业技术体系建设专项[编号: JATS(2020)391]; 国家重点研发计划(编号: 2017YFD0800802-02)。

作者简介: 叶小梅(1976—),女,福建长汀人,博士,研究员,研究方向为循环农业和农业废弃物的资源化利用。E-mail: yexiaomei610@126.com。

分组成,即评价目标和范围、清单分析、影响评价(分类化、特征化、标准化、加权^[9])、结果解释。LCA 的基本流程见图 1。

基于普遍的种养循环模式,基本流程见图 2^[10]。

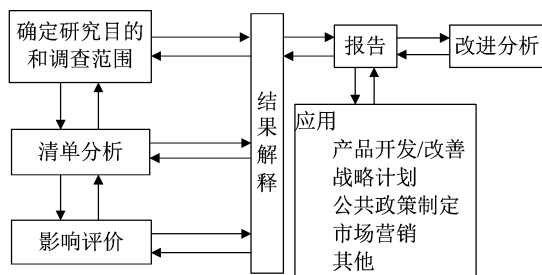


图1 LCA 流程

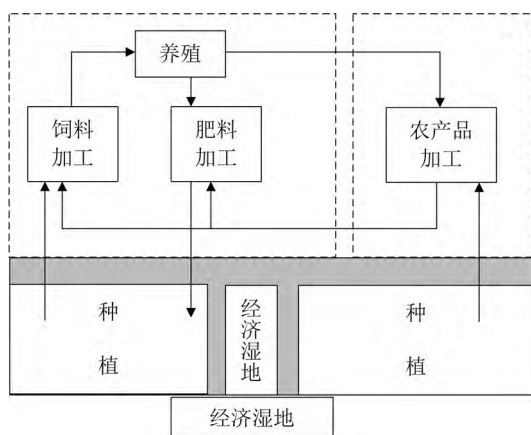


图2 种养循环模式

以种养循环模式进行 LCA 评价的目标,就是通过种养循环系统进行全面的评价,分析系统对环境的潜在影响,从而采取相应的改进方法,促进种养循环模式的发展,范围可以根据具体的研究对象(农资生产、农作生产、原料资源等)来确定^[11]。清单分析的一般范围见图 3^[12]。

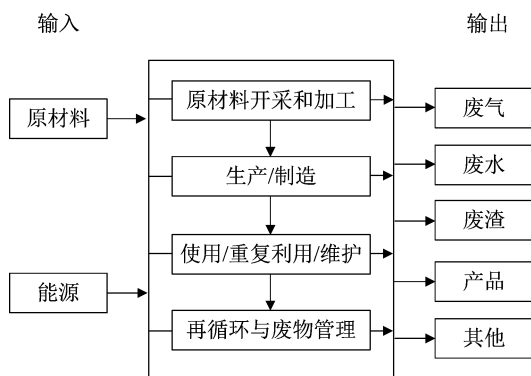


图3 LCA 分析的一般范围

种养循环模式影响评价包括对环境负荷(富营养化、环境酸化、全球变暖、人体健康损害等)、不可再生资源、可再生资源 3 个方面进行评价^[13]。

特征化是以某影响因素中某一种生态影响因子为基准,得出各因素的特征值^[14]。各环境影响潜值可根据以下公式进行计算:

$$E_{p(x)} = \sum E_{p(x)i} = \sum [Q_{(x)i} E_{F(x)i}]$$

式中: $Q_{(x)i}$ 代表第 i 种生态影响因子的排放量; $E_{F(x)i}$ 为第 i 种生态影响因子对第 x 种因素的环境影响当量系数; $E_{p(x)i}$ 为第 i 种生态影响因子对第 x 种因素的影响; $E_{p(x)}$ 是指第 x 种因素对环境的影响^[15]。

标准化是将特征化的结果一般化的过程,可用以下公式表示:

$$R_x = E_{p(x)} / S_{2000}$$

式中: $E_{p(x)}$ 是指第 x 种因素对环境的影响; S_{2000} 为世界 2000 年人均标准化基准值; R_x 代表第 x 种因素的标准化结果^[11]。

加权评估是利用权重来确定各因素对系统的影响程度,常采用层次分析法、专家组评议等确定权重。

结果解释即通过分析处理后的数据,对种养循环模式整个生命周期的资源消耗、废弃物的排放进行评价^[14]。通过评估从而提出定量或定性的改善方法,例如改变种养模式、重新选择原材料等。

1.2 LCA 在种养循环模式中的应用

目前,我国应用生命周期评价对种养循环模式进行系统分析的研究较少。梁龙等采用改进的 LCA 模型,以湖南省某循环鸭产业为例进行研究,结果表明,循环农业不宜过度循环,在实践操作中不应该盲目追求低碳发展,过长的循环链虽然降低了碳排放,但会影响土壤和生物的固碳能力^[15]。Nhu 等对比了以沼气为纽带的“猪-沼-鱼”循环农业模式和集约化养鱼模式,结果表明,该循环模式在占地面积和对资源的消耗方面高于集约化养鱼系统^[16]。Kluts 等运用生命周期法,对集约化和农业-水产养殖条纹鲇鱼生产进行了比较评价,结果显示,在集约化系统中,条纹鲇鱼生产对 9 种已评估的影响类别(全球变暖、臭氧耗竭、酸化、富营养化、光化学氧化、人类毒性、淡水生态毒性、海洋水生生态毒性、化石耗竭)中的 7 种贡献较大,而农业-水产养殖模式对水体富营养化和淡水生态毒性的贡献率高于集约化体系。但在这 2 个系统中,养鱼对富营养化和淡水生态毒性的贡献率均最大,而饲料生产对所有其他影响类别的贡献率最大,在大多数影响类别中,农业-水产养殖的可持续性更好^[17]。

2 EME 与种养循环模式

2.1 EME 能值分析法

能值分析是以太阳能为基准,将生态经济系统中状态不一、不可直接换算比较的能量根据对应的太阳能转换成统一的能值来分析和比较,从而评价系统的经济效益和可持续性的方法。通过综合分析系统中各种生态流(能物流、货币流、人口流、信息流),得出关于系统的能值综合指标,从而定量分析系统的各个子系统的结构特征与经济效益^[18]。

首先绘制系统能值图^[19],其中循环模式能值投入包括:可更新自然资源(R ,太阳能、风能、雨水化学能等)、不可更新的自然资源(N ,表土层净损失)、可更新有机能(T ,种子、人工等)以及不可更新工业

辅助能(F ,机械、煤、化肥和电力等),部分自然资源能值可以根据以下公式计算^[1]:

太阳光能能值 = 面积 $\times$ 太阳光平均辐射量 $\times$ 太阳能值转换率;

雨水化学能能值 = 面积 $\times$ 平均降水量 $\times$ 吉布斯自由能 $\times$ 太阳能值转换率;

风能能值 = 面积 $\times$ 高度 $\times$ 密度 $\times$ 风速梯度 $\times$ 涡流扩散系数 $\times$ 太阳能值转换率^[20];

雨水势能能值 = 面积 $\times$ 平均降水量 $\times$ 平均海拔高度 $\times$ 密度 $\times$ 重力加速度 $\times$ 太阳能值转换率;

表土层净损失能值 = (表土侵蚀速率 $\times$ 面积 - 表土形成速率 $\times$ 植被演替面积) $\times$ 太阳能值转换率;

主要能值指标具体的计算公式见表 1^[21]。

表 1 能值指标计算公式

指标	表达式	符号含义
净能值产出率(EYR)	$EYR = Y/F + T$	Y 表示产出能值; F 表示不可更新工业辅助能; T 表示可更新有机能
能值投资率(EIR)	$EIR = F + T/R + N$	F 表示不可更新工业辅助能; T 表示可更新有机能; R 表示可更新自然资源; N 表示不可更新的自然资源 ^[22]
环境负载率(ELR)	$ELR = N + F/R + T$	N 表示不可更新的自然资源; F 表示不可更新工业辅助能; R 表示可更新自然资源; T 表示可更新有机能
可持续性指数(ESI)	$ESI = NEYR/ELR$	$NEYR$ 表示净能值产出率; ELR 表示环境负载率 ^[23]
能值转换率(UEV)	$UEV = U/E$	U 表示总能值; E 表示产品的有效能

通过比较分析能值指标,对生态经济系统各子系统的能值进行评价,根据结构的不同及对整体系统的贡献差异,为后续对整体系统的改进提供科学依据,进一步优化其生态经济系统及增加其可持续性。

2.2 EME 能值分析法在种养循环模式中的运用

近年来,能值评价方法开始逐渐被应用于种养循环模式分析当中,应用较广泛。李艳春等对“奶牛-沼气-牧草”种养循环模式进行能值分析,结果表明,该模式的纯经济效益是传统奶牛养殖模式的 1.13 倍,且可持续性较好,但在净能值产出方面较弱,还需对系统内部进行改进^[24]。Cavalett 等采用新的能值参数,对巴西南部小农场的粮食、猪和鱼综合生产系统的环境方面进行评价,利用各输入部分可再生系数来改进能值核算,结果表明,与分离生产子系统相比,集成生产子系统具有较高的能量效率、较强的可持续性和较低的环境压力^[25]。Xi 等研究了我国“稻-鸭”循环模式,结果表明,该循环模式在节能减排方面有较好的发展潜力^[26]。孟祥海等以武汉市银河养猪场为例,将该养猪场的生态养殖系统与传统养猪场进行了比较,并采用能值

分析法对其进行了评价,结果表明,前者在减少资源消耗和减轻环境负荷以及生产效率方面明显优于后者。在资源消耗最小化方面,前者能值自给率为 1.77%,略高于后者(0.27%),前者购买能值率为 98.09%,略低于后者(99.74%),前者的能值反馈率为 5.69%,高于后者(0.00%),前者垃圾回收率为 5.80%,高于后者(0.00%);在环境负荷方面,生态养殖系统的环境负荷率为 85.72%,低于传统养猪系统(116.04%),而前者的系统输入更新率为 56.93%,高于后者(50.09%);就生产效率而言,前者的净能值产出率为 2.07,略高于后者(1.93)。综上所述,生态养殖体系的经济效益显著高于传统养猪体系^[27]。Zhang 等对内蒙古农牧结合的农业生产系统进行能值分析,结果表明,该模式相较于其他农业系统,具有较强的竞争力,但是该模式也面临着严重的水土流失问题^[28]。

3 DEA 与种养循环模式

3.1 DEA 数据包络分析法

数据包络分析是通过对比评估样本间的相对

效率来判断优劣,主要方法是利用数学规划来评价收集到的有效数据,研究其有效性。

在研究某一具体系统时,通常将同一类的样本某一时间同一地点或某一时间不同地点的生产作为研究对象,这类研究对象具有相同的输入和输出指标,通过计算得出规模效率、经济效率、投入产出效率的数值,可得该样本的数据包络有效性^[29]。

若将某一循环农业模式作为对象,可以选定一个样本的相同指标不同年份数据来计算得出该样本的效率,也可以是不同样本的相同指标同一时间段的数据来计算得出这些样本的效率。农业的输入指标包括种子、化肥、机械动力、农药等,产出包括牲畜产出等,计算得出的数据可以衡量这些样本的投入产出相对效率,得出样本之间的相对优劣,并可查找出相对劣势的样本具体指标的差异。

数据包络分析方法的目标函数与约束方程如下^[30]:

$$\begin{aligned} \min \quad & \theta \\ \text{s. t.} \quad & \begin{cases} \sum \lambda_i X_i + S^- = \theta X_0 \\ \sum \lambda_i Y_i - S^+ = Y_0 \\ \lambda_i \geq 0, i = 1, 2, \dots, n \\ S^- \geq 0, S^+ \geq 0 \end{cases} \end{aligned}$$

其中: θ 表示被评价样本的有效值; λ_i 为重新构造一个有效样本组合中第 i 个样本的组合比例; S^- 、 S^+ 为松弛变量; X_i 为第 i 个决策单元的输入量; X_0 、 Y_0 分别表示定义决策单元的输入向量和输出向量。

当 $\theta = 1$ 且 $S^- = S^+ = 0$ 时,则称样本为 DEA 相对有效(样本的经济运行效率指数为 1,最优);

当 $\theta = 1$ 且 $S^- \neq 0$ 或 $S^+ \neq 0$ 时,则称样本为 DEA 弱有效;

当 $\theta < 1$,则称样本为 DEA 无效。

改进 DEA-EBM 模型的线性规划表达式为^[31]:

$$\gamma^* = \min \theta - \varepsilon \sum_{i=1}^m \frac{\omega_i^- s_i^-}{x_0} \quad \text{s. t.} \quad \begin{cases} X\lambda - \theta x_k + s^- = 0 \\ Y\lambda \geq y_k \\ \lambda \geq 0, s^- \geq 0 \end{cases}$$

式中: γ^* 表示待测算的产出效率值; θ 为径向效率值; ω_i^- 表示各项投入指标的相对重要程度; X 、 λ 、 s^- 、 Y 分别代表投入、权重系数、投入松弛向量、产出; s_i^- 表示第 i 个产出松弛变量; m 表示决策单元的个数; x_0 表示定义决策单元的输入量; x_k 、 y_k 分别为第 k 个输入、输出指标; ε 是决定 γ^* 效率值计算中非径向部分重要程度的关键参数,取值范围为

$[0, 1]$, 当取值为 0 时等同于径向模型,取值为 1 时等同于 SBM 模型^[31]。

3.2 种养循环模式中的应用

近年来,DEA 模型因其投入、产出的评价优势而被学者们广泛应用。马巧云等采用 DEA 法对河南省 28 个地区的农业循环模式进行经济效率评价,结果表明,2006—2015 年河南省循环农业的经济发展稳步提升,其中经济社会发展子系统对农业循环经济发展的作用最大,但循环利用子系统和生态环境子系统的作用微乎其微。对 2015 年河南省 28 个地区进行 DEA 测算,其中 10 个地区非 DEA 有效,导致这种情况的原因是农药、农膜过度使用等^[32]。杨琰等运用 DEA 对陕西省 11 个市(区)的农业循环经济效率进行测算,结果显示,陕西省有近一半的地区有投入过剩和产出较少的问题^[33]。Almeida 等利用能值分析法对一家生产玉米、鸡蛋、猪肉和牛奶的农业综合企业进行了评估,采用 7 种方案对生产过程中的系统效率和环境可持续性的影响进行了评估,结果表明,增加一体化本身并不能确保在环境可持续性方面取得进展,将家禽和生猪生产中的残留作为有机肥进行综合管理在 7 种方案中均具有优势,因此,所提出的方案应有助于评价组织革新和确定可能影响农业综合系统环境绩效的折中办法^[34]。

4 总结

综合现有关于种养循环的定量分析和评价方法发现,各种评价方法各有利弊:(1) 生命周期评价方法的优点主要体现在 2 个方面。一方面,该方法使用较为广泛,技术较为成熟;另一方面,该方法作为现行认可度较高的环境影响评价方法,可以量化分析整个生命周期的潜在环境影响。但目前常用的生命周期评价方法无法分析自然环境资源、人力等方面对农业生产过程的贡献,并且不太重视种养循环系统有效能的产出效率。因此,可以将生命周期评价和能值评价结合起来,从而对系统的评价更加全面。(2) 能值分析可以对系统的各子系统进行系统分析,更全面体现种养循环模式的独特性,但通常将系统内部循环作为“黑箱”处理,无法推断出某一具体环节影响了整体体系,从而找不到关键点去优化该种养循环系统,也无法判断某项引入的农业技术是否对系统产生正向作用。(3) DEA 分析方法相较于前面 2 种不需要主观赋权和设定既定函数关系,更为简单灵活,可以避免一部分由于函数形

式错误导致的问题,还可以解决非有效技术和中性技术的问题,从而在结果得出时表现出优势^[35]。但 DEA 是对系统的整体分析,只能简单地对投入和产出进行比较,而无法明确亚系统的效率。

参考文献:

- [1] 孙路,田国成,吴发启. 关中“猪-沼-粮”循环农业的能值评价[J]. 干旱地区农业研究,2015,33(2):246-252.
- [2] 高旺盛,陈源泉,董文. 发展循环农业是低碳经济的重要途径[J]. 中国生态农业学报,2010,18(5):1106-1109.
- [3] 赵金龙,何玲,王军. 谈循环农业的模式及其评价方法[J]. 安徽农业科学,2007,35(6):1766-1767.
- [4] Tzouvelekas V, Pantzios C J, Fotopoulos C. Technical efficiency of alternative farming systems: the case of Greek organic and conventional olive-growing farms [J]. Food Policy, 2001, 26(6): 549-569.
- [5] Deng G Y, Li L, Song Y N. Provincial water use efficiency measurement and factor analysis in China: based on SBM-DEA model [J]. Ecological Indicators, 2016, 69: 12-18.
- [6] 樊庆铎,敖红光,孟超. 生命周期评价[J]. 环境科学与管理, 2007, 32(6): 177-180.
- [7] Odum H T. Environment, power and society [M]. New York: Wiley-Interscience, 1971.
- [8] 郑秀君,胡彬. 我国生命周期评价(LCA)文献综述及国外最新研究进展[J]. 科技进步与对策, 2013, 30(6): 155-160.
- [9] Brentrup F, Küsters J, Lammel J, et al. Environmental impact assessment of agricultural production systems using the life cycle assessment (LCA) methodology II. The application to N fertilizer use in winter wheat production systems [J]. European Journal of Agronomy, 2004, 20(3): 265-279.
- [10] 谷雨,刘琼峰,吴海勇,等. “水稻/牧草-肉牛-有机肥-蔬菜/茶叶”循环农业模式能值分析[J]. 中国农学通报, 2017, 33(32): 81-86.
- [11] Sleeswijk A W, van Oers L F C M, Guinée J B, et al. Normalisation in product life cycle assessment: an LCA of the global and European economic systems in the year 2000 [J]. Science of the Total Environment, 2008, 390(1): 227-240.
- [12] 孙赵华. 循环农业 LCA 技术体系研究——以吉林省为例[D]. 长春: 吉林大学, 2009.
- [13] Huijbregts M A J, Thissen U, Guinée J B, et al. Priority assessment of toxic substances in life cycle assessment. Part I: calculation of toxicity potentials for 181 substances with the nested multi-media fate, exposure and effects model USES-LCA [J]. Chemosphere, 2000, 41(4): 541-573.
- [14] 吴喜慧. 关中平原典型循环农业生产模式评价研究[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2015.
- [15] 梁龙,陈源泉,高旺盛. 基于生命周期的循环农业系统评价[J]. 环境科学, 2010, 31(11): 2795-2803.
- [16] Nhu T T, Dewulf J, Serruys P, et al. Resource usage of integrated pig-biogas-fish system: partitioning and substitution within attributional life cycle assessment [J]. Resources, Conservation and Recycling, 2015, 102: 27-38.
- [17] Kluts I N, Potting J, Bosma R H, et al. Environmental comparison of intensive and integrated agriculture-aquaculture systems for striped catfish production in the Mekong Delta, Vietnam, based on two existing case studies using life cycle assessment [J]. Reviews in Aquaculture, 2012, 4(4): 195-208.
- [18] 蓝盛芳,钦佩. 生态系统的能值分析[J]. 应用生态学报, 2001, 12(1): 129-131.
- [19] Odum H T. Systems ecology [M]. New York: John Wiley & Sons, 1983.
- [20] 蓝盛芳. 生态经济系统能值分析[M]. 北京: 化学工业出版社, 2002.
- [21] 钟珍梅,翁伯琦,黄勤楼,等. 以牧草为纽带的循环农业能值分析[J]. 福建农业学报, 2013, 28(9): 925-930.
- [22] 李飞,林慧龙,常生华. 农牧交错带种植模式与种养模式的能值评价[J]. 草地学报, 2007, 15(4): 322-326.
- [23] Ulgiati S, Brown M T. Monitoring patterns of sustainability in natural and man-made ecosystems [J]. Ecological Modelling, 1998, 108(1/2/3): 23-36.
- [24] 李艳春,黄秀声,潘勇,等. “奶牛-沼气-牧草”循环型农业系统的能值分析[J]. 生态与农村环境学报, 2010, 26(2): 120-125.
- [25] Cavalett O, de Queiroz J F, Ortega E. Emergy assessment of integrated production systems of grains, pig and fish in small farms in the South Brazil [J]. Ecological Modelling, 2006, 193(3/4): 205-224.
- [26] Xi Y G, Qin P. Emergy evaluation of organic rice-duck mutualism system [J]. Ecological Engineering, 2009, 35(11): 1677-1683.
- [27] 孟祥海,周海川,张郁,等. 农牧渔复合生态养殖系统能值分析[J]. 生态与农村环境学报, 2016, 32(1): 133-142.
- [28] Zhang L X, Yang Z F, Chen G Q. Emergy analysis of cropping-grazing system in Inner Mongolia Autonomous Region, China [J]. Energy Policy, 2007, 35(7): 3843-3855.
- [29] Cook W D, Tone K, Zhu J. Data envelopment analysis: prior to choosing a model [J]. Omega, 2014, 44: 1-4.
- [30] 张立超. 中国循环农业发展评价研究[D]. 沈阳: 沈阳农业大学, 2011.
- [31] 彭艳玲,晏国耀,马昕娅,等. 基于能值与改进 DEA-EBM 模型的“青贮玉米+养殖”种养结合模式产出效率评估研究: 以四川省“粮改饲”青贮玉米示范区为例[J]. 干旱区资源与环境, 2019, 33(12): 68-76.
- [32] 马巧云,邓灿辉,范小杰. 河南省农业循环经济评价研究[J]. 河南科学, 2018, 36(2): 264-269.
- [33] 杨琰,孟全省. 陕西省农业循环经济效率评价[J]. 广东农业科学, 2011, 38(17): 204-206.
- [34] Almeida C M V B, Frugoli A D, Agostinho F, et al. Integrating or dis-integrating agribusiness systems: outcomes of emergy evaluation [J]. Science of the Total Environment, 2020, 729: 138733.