中国生态农业学报(中英文)
Chinese Journal of Eco-Agriculture
中文核心期刊
中国科技核心期刊
中国精品科技期刊
百种中国杰出学术期刊
中国科学引文数据库源刊

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

王小龙，刘星星，隋鹏，陈源泉

引用本文:
王小龙, 刘星星, 隋鹏, 等. 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[J]. 中国生态农业学报(中英文), 2020, 28(4): 503–512.

在线阅读 View online: https://doi.org/10.13930/j.cnki.cjea.190776

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

农地流转对农业生态系统的影响

Impact of farmland transfer on agro–ecosystem

中国生态农业学报. 2016(3): 335–344 https://doi.org/10.13930/j.cnki.cjea.151002

基于能值的专业化茶叶种植农业生态系统分析––以福建省安溪县为例

Emergy–based agricultural ecosystem analysis for specialized tea planting:A case study of Anxi County, Fujian Province

中国生态农业学报. 2016, 24(12): 1703–1713 https://doi.org/10.13930/j.cnki.cjea.160206

华北平原农田生态系统服务评价及灌溉效益分析

Evaluation of agro–ecosystem services and analysis of irrigation benefit in the North China Plain

中国生态农业学报. 2017, 25(9): 1360–1370 https://doi.org/10.13930/j.cnki.cjea.170203

农业生态效率研究进展分析

Review of methodology and application of agricultural eco–efficiency

中国生态农业学报. 2017, 25(9): 1371–1380 https://doi.org/10.13930/j.cnki.cjea.170163

全球变化背景下南方丘陵区农业生态系统适应性时空演变特征研究——以衡阳盆地为例

Spatio–temporal evolution characteristics of agro–ecosystem adaptability response to global change in South China hilly regions: A case study of Hengyang Basin

中国生态农业学报. 2017, 25(2): 147–156 https://doi.org/10.13930/j.cnki.cjea.160884

中国生态农业学报(中英文) 2020 年 4 月 第 28 卷 第 4 期
Chinese Journal of Eco-Agriculture, Apr. 2020, 28(4): 503−512

DOI: 10.13930/j.cnki.cjea.190776

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[J]. 中国生态农业学报(中英文), 2020, 28(4): 503−512

WANG X L, LIU X X, SUI P, CHEN Y Q. Current problems and proposed solutions of emergy evaluation in agricultural systems[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2020, 28(4): 503−512

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*

王小龙[1], 刘星星[1], 隋 鹏[2], 陈源泉[2**]

(1. 华南农业大学农学院 广州 510642; 2. 中国农业大学农学院 北京 100193)

摘 要: 能值方法是美国生态学家 H.T. Odum 在 20 世纪 80 年代创立的生态经济系统分析方法, 近年来被广泛应用于农业系统分析当中。但是, 目前已发表的大量论文中对于能值评价过程中的重要细节常会出现不同的处理方式, 造成评价结果不确定性增加、可比较性降低, 影响了能值评价方法在农业研究领域的深入应用和发展。因此, 本研究梳理了国内外农业生态系统能值研究的基本概况, 并总结了相关研究中常见的五大问题, 包括: 全球能值基准变化所引发的能值转换率选择混乱问题、农业生态系统评价边界界定的问题、农业生产过程环境资源贡献的不合理计算问题、农业生态系统投入资源的分类问题和系统能值投入与产出不守恒问题。在此基础上, 基于我们目前的认识提出了相关问题的解决思路: 第一, 规范能值评价中的能值转换率(UEV)参数的选择原则; 第二, 基于“四维时空尺度”标准界定系统边界; 第三, 构建公式合理体现土壤、农业用水在农业系统能值分析中的能量贡献; 第四, 基于农业生态系统能值常用指标设定 4 组标准规范农业生态系统投入资源的分类; 第五, 遵循能值代数规则保证能值守恒。通过以上分析, 以期引起广大学界的讨论和批评, 共同促进能值方法在全球农业系统分析中的规范化应用。

关键词: 能值评价; 农业生态系统; 能值转换率; 系统边界; 环境资源贡献; 投入资源; 投入-产出守恒

中图分类号: F062.2 开放科学码(资源服务)标识码(OSID):

Current problems and proposed solutions of emergy evaluation in agricultural systems*

WANG Xiaolong[1], LIU Xingxing[1], SUI Peng[2], CHEN Yuanquan[2**]

(1. College of Agriculture, South China Agricultural University, Guangzhou 510642, China; 2. College of Agronomy and Biotechnology, China Agricultural University, Beijing 100193, China)

Abstract: Emergy evaluation (EME) is an extensively used method for the assessment of ecological economic systems which has been applied in a diverse array of fields, with more recent application in agricultural systems. However, despite an increasing number of studies using the EME approach to assess agricultural systems, some of the evaluation principles of EME have been misunderstood by researchers applying the method resulting in unreliable assessments. Therefore, this study aimed to investigate issues identified from prior research using EME in the assessment of agricultural systems. Five common problems were identified: 1)

* 国家自然科学基金项目(31800465)和国家重点研发计划(2016YFD0300210)资助

** 通信作者: 陈源泉, 主要研究方向为循环农业与可持续农作制度。E-mail: chenyq@cau.edu.cn
王小龙, 主要研究方向为绿色农作制度。E-mail: wangxiaolong@scau.edu.cn

收稿日期: 2019-11-05 接受日期: 2020-02-03

* This study was founded by the National Natural Science Foundation of China (31800465) and the National Key Research and Development Program of China (2016YFD0300210).

** Corresponding author, E-mail: chenyq@cau.edu.cn

Received Nov. 5, 2019; accepted Feb. 3, 2020

disordered selection of unit emergy values (UEV) caused by updated global emergy baselines, 2) incomplete definition of system boundary, 3) arbitrary calculation of emergy contribution derived from environmental resources, 4) inoperable classification of system inputs, and 5) non-conservation between input and output emergy in agricultural systems. Concurrently, we proposed related solutions for resolving the identified problems which included: standardizing the selection principle of UEV in the EME; defining system boundary based on a standard of 'four-dimensional space-time scale'; constructing formulas to reasonably reflect energy contributions from soil and water for agricultural production in the EME; setting four standards to order the classification of input resources of agricultural systems; and applying the emergy accounting algebras to ensure the emergy conservation in research. We hope that our research will initiate further discussions on approaches to EME assessment in agricultural practices thus promoting a more standardized application of the emergy method in future studies.

Keywords: Emergy evaluation; Agricultural ecosystem; Unit emergy value; System boundary; Environmental energy contribution; Input resources; Emergey conservation between input and output

20 世纪 80 年代，美国生态学家 H. T. Odum 基于系统生态学与热力学理论提出了能值理论及其评价方法[1]。Odum 将能值(emergy)定义为“产品或劳务形成过程中直接或间接投入应用的一种有效能(available energy)总量”[2]。该方法以太阳能值(solar emergy)作为统一度量单位，通过单位能值转换率(unit emergy value, UEV)这一重要参数将自然资源、社会经济资源、生态系统服务和人类信息服务纳入系统评价范围，克服了传统能量分析方法中不同能质的能量之间无法简单比较和计算的问题，搭建起了生态学与经济学的桥梁。该方法特别适合于分析同时涉及自然环境和人类经济活动的生态经济系统[3]。近年来，能值方法被广泛应用于农业生态经济系统分析当中，目前在种植业[4-7]、养殖业[8-9]、沼气工程[10-11]、区域农业发展[12-13]等领域已经取得许多研究成果。但是，能值方法被从自然生态系统分析引进农业生态系统研究的过程中，方法本身还存在一些适用性问题，造成目前已发表的大量论文中对于能值评价过程中的重要细节常会出现不同的处理方式，进而增加了能值评价结果的不确定性，降低了指标结果之间可比性，影响了能值评价方法在农业研究领域的深入应用和发展，同时也阻碍其被更多研究者所接受。因此，本研究梳理了国内外农业生态系统能值研究的基本概况，在此基础上总结了相关研究中常见的五大问题，并提供了相关解决思路，旨在为能值评价方法在农业生态系统分析中的应用提供规范化建议，推进农业领域能值研究的进一步发展。

1 能值方法在国内外农业研究中的应用概况

本研究在中国知网(CNKI)期刊数据库和 Web of Science(WoS)核心数据库中分别以主题关键词为“能值分析” “能值评价”和“emergy”检索 1996 年至 2019 年发表的全部相关文章，结果如图 1 所示，相关研究近 30 年间活跃度很高。从 1996 年 Odum 出版著作《Environmental Accounting: Emergy and Environmental Decision Making》[2]系统性地阐述能值理论及其评价方法以来，国内外关于能值理论和应用的研究开始逐渐增多。1996 年至 2002 年间，能值相关研究尚处于初步探索阶段。2002 年起，相关研究在国内外均表现出了“快速发展”的特点。其主要原因在于，2002 年华南农业大学蓝盛芳教授等将 Odum 著作翻译并出版《生态经济系统能值分析》[14]，在保留原著所有内容的基础上，又提供了包括“农业生态系统”在内的研究实践部分，并对能值评价程序、常用参数、评价指标都做了进一步归类整理，这些基础性工作有效地激发了众多科研工作者在能值理论及其应用方面的研究热情。

目前，CNKI 中有关农业领域的能值研究占 33.9%，WoS 核心数据库中重点关注农业的相关研究有 149 篇，占总发文量的 11.4%，而这 149 篇 SCI 文章中，60%的文章都是中国研究单位发表的(图 1)。可见，我国已经成为利用能值分析方法开展农业生态经济系统评估的最主要地区。从研究区域上看，国内研究主要集中在国[15]、省[16]、市[17]、县[18]等不同区域尺度的农业生态经济评价上。同时，能值方法也被应用于土地开发整理[19]、基塘农业[20]、东北玉米种植[21]等具体的农业生产系统的可持续性评价中。近年来，有部分研究者开始将该方法应用于有机/传统养鸡模式[22]、不同有机物料还田模式[23]、循环与非循环农业模式[24]等小尺度农业生产模式之间的比较。总体来看，能值分析方法近 20 年间被广泛应用于我国不同尺度的农业生态经济系统研究当中。

但是，自 2012 年起，国内外能值研究的活跃度开始走向两个方向(图 1)。WoS 核心数据库中收录的

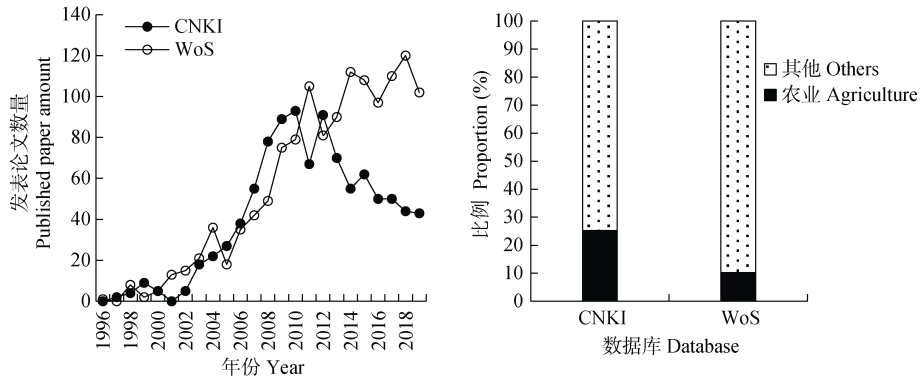

图 1　国内外能值研究论文发表量**(a)**和能值研究论文中农业领域所占比例**(b)**

Fig. 1　Number of published papers on emergy (a) and proportion of published emergy-related papers of agricultural systems (b)

能值研究截至 2019 年 10 月仍然保持增长的趋势，但 CNKI 数据库收录的相关论文发表量却从 2012 年起开始出现逐年减少的趋势。这一结果表明国内能值研究领域开始出现一定程度的障碍或阻力。事实上，能值方法在我国农业生态经济评价中被广泛应用的重要原因之一，在于该方法在实际使用过程中具有较强的“易操作性”和“可复制性”。换句话说，能值评价尽管理论基础较为抽象与复杂，但其分析步骤相对简单，评价过程对研究者来说易于掌握。

近些年，由于我国几乎所有省(直辖市、自治区)和重要城市、典型县域都已经开展过相关的能值研究，导致能值方法近些年被直接用于“简单复制性研究”的空间减少。另一方面，则在于经过 20 年来能值评价方法的初步应用之后，部分学者也开始对该方法多处存在的不确定性产生了质疑[25-26]。其中，农业生态系统能值分析相关研究在国内外已发表文章中概念、标准和原则的混淆不清是让广大其他领域研究者质疑，甚至是能值研究者本身自我质疑的主要原因之一。在近几年的能值国际研究双年会(Biennial Emergy Synthesis Research Conferences)上，相关研究人员已经多次提到应该规范化能值评价的原理、规则和参数，最大程度地避免该方法被“滥用”[27]。因此，从农业生态系统的特殊属性出发，对该领域能值评价中常见的若干理论问题展开分析，为能值评价方法在农业生态系统分析中的进一步应用提供标准化建议，是当前国内外进一步深化农业系统能值研究的关键之一。

2　能值方法在农业系统应用中的常见问题

农业生态系统是一种由人类参与控制的半自然生态经济系统，其特点常常介于自然生态系统和工业生产系统之间，与二者既有相似性，也有相异性。由于能值理论及其评价方法起源于对自然生态系统的分析，当该方法被直接“套用”在农业生态系统时，就会产生一些常见的问题。这些问题一方面源于传统能值理论及其评价方法在农业生态系统分析细节上的一些局限，另一方面源于研究者对能值评价方法中的一些细节问题的长期忽视或不理解。表 1 总结了这些问题发生的核心原因及其可能产生的影响，并在下文中进行了具体分析。

表 1　能值方法在农业系统应用中的常见问题

Table 1　Current problems of application of emergy evaluation in agricultural system

问题 Problem	核心原因 Key reason	影响 Influence
不断更新的全球能值基准 Updated global emergy baseline	相关学科进步 Progress in related disciplines	单位能值转换率参数选择的基础不一致 Inconsistent basis of selecting unit emergy values
系统边界不一致 Inconsistent system boundary	系统边界界定不清 Unclearly defined system boundary	相似案例中考虑的投入项目不同 Considering different input items in the similar case research
环境资源贡献的不合理计算 Unreasonable accounting of environmental resources	土壤、降雨的核心功能认识不清 Unclearly recognized key functions of soil and rain	环境资源的贡献计算错误 Miscalculation of contribution of environmental resources
系统投入资源的分类 Classification of input resources in a system	分类标准不清晰 Unclearly defined standard for classification of inputs	指标结果无可比性 Incomparable emergy-based indictors results
能值不守恒问题 Non-conservation of input and output emergy flows	能值计算基本原则不清 Misunderstanding to the basis emergy algebra rules	计算结果无意义 Unmeaning accounting results

2.1 问题一：全球能值基准更新所引发能值转换率选择混乱

全球能值基准是在能值评价中计算所有资源与产品 UEV 的基础。因此，由于全球能值基准变化而带来的能值转换率变化是能值分析结果不确定性的首要来源。1996 年，Odum[2]提出驱动地球生物圈的能量主要源于太阳辐射、潮汐能、深层地热能 3 部分，其总量为 9.44×10^{24} seJ·a^{-1}。2000 年，Odum 等[28]将能值基准更新为 1.58×10^{25} seJ·a^{-1}。美国环境保护署的 Campbell 博士[29]却于同一年在国际能值双年会的首次会议上提出略微不同的算法，核算出全球能值基准为 9.26×10^{24} sej·a^{-1}。2010 年，Brown 博士[30]采用改进后的算法，又将全球能值基准更新为 1.52×10^{25} sej·a^{-1}。此后，为解决这种多重能值基准并存的现状，在 2014 年第 8 届国际能值双年会召开之后，Brown 博士等[31]分别采用 3 种方法以宇宙间天体引力为出发点，对能值基准进行重新核算，最终 3 项研究结果表现出一致性，约为 1.20×10^{25} sej·a^{-1}。

可见，从能值评价出现开始，全球能值基准就始终发生着不断的更新，这就导致大量能值研究是以不同能值基准为基础开展的，缺少研究基础的一致性，使评价结果的可比性降低，也使后续能值相关研究工作出现参数选择的巨大困难。这一问题不仅在农业领域，在整个能值研究领域均存在。造成这一问题的核心原因在于地球物理、大气科学等相关研究领域新的计算参数和方法的更新，进而导致全球能值基准有可能会阶段性地更新。因此，全球能值基准不同所引发的同一产品能值转换率多样的问题在未来仍然会长期存在。

2.2 问题二：农业生态系统评价系统边界不一致

农业生态系统分析中所涉及的投入资源项目众多，既包括自然资源，也包括社会经济资源。同时，农业生产较强的地域性特点，也使某一特定农业生产过程中所考虑的资源投入项目和计算方法并不一定完全适用于拥有不同地域环境特点的同一个农业生产过程。以地热能为例，Castellini 等[3]在对意大利养鸡模式进行能值分析时，将其计入了该养殖系统的总能值投入；Alfaro-Arguello 等[32]分析墨西哥肉牛放牧系统时，则没有考虑地热能的贡献；Liu 等[33]对陕西省和江苏省粮食生产系统进行能值分析时，计算了地热能；而 Chen 等[34]对我国小麦(*Triticum aestivum*)、油菜(*Brassica napus*)、水稻(*Oryza sativa*)种植系统的能值评价中，则没有考虑地热能。再以降雨为例，Zhang 等[35]在对山东省南四湖 3 种养鱼模式进行分析时，直接采用系统所在地降雨量进行雨水化学能能值贡献的计算；Brandt-Williams[36]以美国佛罗里达州为代表，完成的典型农业系统能值评价手册中则通过系统田间蒸腾量进行雨水化学能的计算。可见，以上种种投入项目到底算与不算，如何计算，是能值评价方法中有待进一步标准化的重要部分，这些问题的产生，首要原因就在于研究者对于系统边界界定不清。事实上，对任何评价方法而言，系统边界的界定始终是分析前最重要的研究标准。换句话说，系统边界的划定帮助研究者取舍系统运转过程中所有投入与产出项目。当前大量研究在原始数据计算阶段的错误，大都是由于系统边界划分不清所造成的。因此，需要进一步规范化农业生态系统能值评价的系统边界界定标准，以避免相似案例研究基础不一致的问题。

2.3 问题三：农业生产过程中环境资源贡献的不合理计算

农业生态系统中自然资源投入具有极强的地域性特点，其能量贡献需要通过有关公式进行计算。Odum[2]已经对许多环境资源贡献的计算公式做了详细的整理与归纳，但在农业生态系统评价中，土壤和降雨对农业生产的贡献在相关研究中常被误解，需要具体分析。

在传统能值评价中，农业生产过程中的土壤贡献通常是通过土壤流失而导致的耕层有机质能量损耗而体现的，但是，有些地区的土壤流失程度并不是非常严重，耕层有机质流失也往往并不是土壤能值库对农业系统的主要贡献，因为流失掉的耕层有机质和养分事实上并没有被作物所利用。而且，土壤有机质只是土壤库对农业生态系统体现能值贡献的一个组分，氮、磷、钾、腐殖质等其他土壤组分的变化也会对农业系统产生能值贡献，应该被囊括进来从而表征土壤肥力的真实价值[35]。不同农作措施对土壤能值库的影响可以是正向的，也可以是负向的，例如禾豆轮作模式能帮助农田生态系统固氮，长期翻耕就可能加速土壤有机质和养分的流失。这些特点都应该在农业生态系统能值分析过程中被合理考虑。对于农业发展宏观评价来说，研究者通常无法得到研究区土壤状态的实际测量数据。因此，基于土壤侵蚀程度对土壤在农业系统中的贡献予以估算在一定程度上是可行的。但是，对于微观尺度的农业生态系统能值评价，对土壤能值库的真实贡献予以合理计算是非常必要的。因为不同农作措施下，土壤库对作物生产的能值贡献会产生差异，若在农业生态系统能值分析中仅仅计算土壤流失所引发的能量消耗，将会导致土壤库能值贡献计算不全面。

此外, 在能值评价的大量研究当中, 农业生态系统中的水资源贡献通常是通过计算该系统全部降雨的势能和潜在化学能(为避免重复计算, 二者取最大值)来体现的。但是, 农业用水对作物生长的主要能量贡献在于为作物蒸腾过程提供所需水分。某一地区的总用水量并不是全部被作物利用, 而只有其中蒸腾部分对作物生长有能量贡献。因此, 需要根据当地实际条件, 核算不同来源农业用水的实际蒸腾量, 以提高农业生态系统能值评估结果的准确性。

2.4 问题四: 农业生态系统投入资源的分类标准不一致

在能值评价中, 投入资源的分类对评价结果的影响巨大, 因为现有各种能值评价指标最终是通过各类别能值流相互间的比值来体现的。在能值评价方法应用的早期, 投入系统的能量根据其来源通常被划分为本地可更新环境资源、本地不可更新环境资源、经济系统反馈能 3 类。其中, 经济系统反馈能与本地不可更新环境资源在计算能值指标时皆被作为不可更新能值流。例如, Chen 等[34]对我国水稻、油菜、小麦系统的评价、Cuadra 等[37]对尼加拉瓜咖啡(*Coffea arabica* L.)生产系统的分析、Lefroy 等[5]对澳大利亚 3 种典型农作系统评价等的研究就采用了上述系统投入资源分类标准。这种分类方式合理的前提是对研究目标进行"完全程度"的系统化分析。换句话说, 从系统生态学的角度, 研究目标是被放在其"背景大系统"中进行分析的, 与目标系统产生物能流动关系的所有部分都被包含于该"背景大系统"当中。对于自然生态系统而言, 几乎完全不存在外部来源的经济系统反馈能; 而对于农业生态系统而言, 经济系统反馈能必然是来源于外部的化肥、农药、燃油等传统意义上的不可更新资源。因此, 这种投入资源的分类在一定分析基础上是合理的。

但是, 如果研究者的分析目标在于特定的单一农业生产过程, 那么这种分类方法则并不一定合理。例如, 目标研究系统为"生猪养殖"系统, 那么对于该系统而言, 必然存在玉米(*Zea mays*)、豆粕等外部饲料源, 由于这些饲料组分通常是完全来源于养殖场外部, 那么, 这是否意味着它们都属于"不可更新能量源"呢？答案显然是否定的。再比如, 种植业系统中使用的有机肥, 通常从周围养殖场(户)购买获得, 同样作为一种外来经济系统反馈能, 是否也意味着种植业系统中的有机肥也属于"不可更新能量源"呢？答案同样应该是否定的。由于类似问题的存在, 我国许多学者在开展农业生态系统能值评价时, 基于过去对农业生态系统能量分析的研究经验, 将系统投入资源分成本地可更新环境资源、本地不可更新环境资源、工业辅助能、可更新有机能 4 类。例如, 在 Liu 等[33]、李飞等[24]、马凤娇等[38]、孙卫民等[39]的研究就采用了上述的系统投入资源分类标准。其中, 本地不可更新环境资源和工业辅助能在计算能值指标时被视作不可更新能值流, 本地可更新环境资源和可更新有机能被视作可更新能值流。这是能值研究中一种具有"中国特色"的资源分类方法, 在其他国家相关研究中很少见到。但是, 这事实上反映出这些研究者同样认识到传统的资源分类方法, 在特定条件下的农业生态系统能值分析中并不一定适用。

近些年, 一些研究者建议在能值评价中引入可更新比例系数(renewability factor, RNF), 将经济反馈能分为可更新和不可更新部分, 从而提高系统评价的科学性[7,40-41]。虽然 RNF 值的计算是基于产品生产链可更新资源与不可更新资源投入比例来定量计算的, 但该方法事实上与国内研究者"自发地"将经济系统反馈能划分为不可更新工业辅助能和可更新有机辅助能是相似的。这种资源分类方法被认为是能值评价方法论上的一个重要进步[7]。但与此同时, 又出现另外一个问题: 同一种资源或产品, 在不同的能值评价案例中, 却往往出现不同的可更新比例系数。以玉米为例, Castellini 等[3]在对养鸡模式评价时, 灌溉玉米作为饲料其 RNF 为 0.22; 而 Cavalett 等[9]的研究中, 作为猪饲料成分的玉米 RNF 则为 0.17。Vigne 等[42]在对法国 3 种养牛模式进行分析时, 玉米饲料的 RNF 则出现两个值(0.41 和 0.20)。Ciotola 等[10]在分析农场小型沼气系统时, 将本地畜禽粪便归入了可更新部分, 而将购买性粪便归入不可更新部分; 而 Ghaley 等[43]将丹麦小麦种植过程中的粪便投入则完全归入经济系统反馈能, 作为不可更新资源进行计算。可见, 同一种资源或产品在不同案例中的分类、RNF 数值都是多变的, 这种变化固然是同一种资源或产品在不同地区、不同生产条件下的必然结果, 但也是因为在这种多变的研究背景下, 资源分类原则、RNF 计算原则长期以来没有被进一步阐述清楚而造成的。在目前能值方法的应用中, 大量研究都通过参数"相互引用"的方式来进行能值计算。在缺少相关计算原则的情况下, 这种较为随意地引用一方面造成能值研究中引用已发表研究时的障碍, 另一方面则造成评价结果的不准确性, 使研究者对于能值评价方法总体上的接受度降低。

事实上, 当前能值评价中所存在的资源分类不清问题主要来源于不同分类标准间的混淆。对于以

环境资源价值核算为目标的研究来说，资源分类实际上并不重要，因为这和最终系统总能值产出并无关系，而对于以系统可持续性评价和比较为目标的研究来说，对资源分类标准进行规范化，则关系着能值评价指标最后结果的可靠性，是目前能值研究需要尽快明确的关键性问题。

2.5 问题五：农业生产系统能值投入与产出不守恒

由于能值的定义主要基于“能量记忆(energy memory)”的逻辑，因此，为了避免系统能值评价过程中的重复计算问题，Odum[2]提出了能值评价过程中要遵循的 4 条基本代数规则，这些规则被用来决定如何向系统内物质、能量和信息合理地分配能值。其中，能值代数规则一指出，对于单产品系统而言，该系统所有独立来源的能值投入总和应该被分配至系统的产出[44]。以玉米种植系统为例(图 2)，当系统产出 1 t 玉米时，产品的能值等于该系统运转所需全部能值投入之和。一个产品或系统的能值是该系统运转或产品生产过程中“有用能(available energy)”的累积，所以，在物质、能量、信息不断聚集产生更高能量等级产品的过程中，能值不会耗散，这是能值分析和能量分析的明显区别。能值代数规则一事实上相当于能值定义的另一种表述，反映了能值概念中所提到的“能量记忆”特点。系统产出的能值“体现着”其生产过程中直接和间接的能值投入总量。

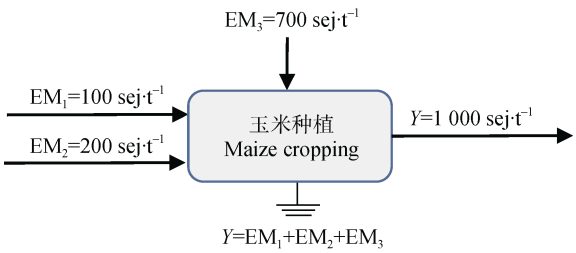

图 2 能值代数规则一在农业生产系统中的体现——以玉米种植系统为例

Fig. 2 Presentation of the emergy algebra rule one in agricultural production system of maize production

目前国内大量研究，在一定程度上混淆了能量分析和能值分析的不同，将能量分析的思路带入到能值分析中。其表现出的计算特点就是，能值投入(U)等于各种投入的原始量与各投入 UEV 的乘积之和，能值产出(Y)常常等于各种产出的原始量与各产出 UEV 的乘积之和，净能值产出率(EYR)则等于 U 与 Y 的比值。由于在这些研究中，系统产出的 UEV 常常引用自其他已发表文献，因此，计算所得系统的能值投入就不等于系统能值产出。对于非平衡态的农业生态系统而言，由于系统存量的变化，系统能值投入与能值产出可能不相等。但是，当一个系统处于平衡态时，系统的投入、产出和存量达到稳定状态，此时，系统的能值投入必然等于能值的产出，这是能值分析的逻辑基础，也是能值分析代数规则一的具体体现。目前很多研究案例当中，目标系统实际上已经是处于平衡态的农业生态系统，例如，从播种到完全收割的种植业系统，每年稳定经营的农场，存栏量和出栏量稳定的养殖业系统等，但在其能值计算过程中仍然没有遵守能值计算代数规则一，其原因在于部分研究仅仅是在模仿能值方法的分析框架，其核心实际上仍然是能量分析的思路，造成了系统能值投入与产出不守恒的问题。

3 能值方法在农业系统应用问题的纠正思路

3.1 策略一：五条原则规范能值评价中的 UEV 选择

针对问题一，本研究提供了以下原则去尽可能规范能值评价中 UEV 的选择。

第一，根据国际能值学会的建议，能值研究应该采用 2016 年确定的最新能值基准(1.20×10^{25} sej·a^{-1})作为研究基础，这是相关研究结果准确的保证。

第二，对于太阳光能、风能、雨水化学能等环境资源的贡献，建议采用 Odum 研究团队所提供的 UEV 参数，因为该团队在此方面已做了大量基础性工作，目前已发表的相关研究中绝大部分都是基于 Odum 团队的相关参数开展的，而且初级自然资源的 UEV 在不同地区变化不大，近乎一致。

第三，对于化肥、农药等经济系统资源的贡献，建议根据最近、最新、最权威等原则进行选择。换句话说，如果有研究系统具体所投入资源特定的 UEV 参数则选择该参数；如果没有，则采用地区性参数，如无地区性参数则采用国内相关研究参数，最后再选择国外相关参数，尽可能保证评价结果可以选择目标系统的实际情况。

第四，若研究所用的 UEV 参数来源于采用不同能值基准的参考文献，则应根据该参考文献能值基准与最新能值基准的比值，来换算所用 UEV 在最新能值基准下的数据。例如，若系统投入的某种资源的 UEV 在 1.58×10^{25} sej·a^{-1} 的能值基准下为 3.80×10^{5} sej·J^{-1}，则其在 1.20×10^{25} sej·a^{-1} 能值基准下的 UEV 值应该换算为 2.88×10^{5} sej·J^{-1}。只有一项研究中所用的全部 UEV 参数的能值基准一致，能值计算结果及其指标结果才有意义。

第五，如果研究目标在于估计某些系统的理论

性潜力, 那么建议选用系统投入资源的最小 UEV。例如, 研究目标是评价某种生产模式或技术的最佳可持续性指数和最佳资源利用效率。因为这个最小 UEV 一定程度上反映着目前条件下该产品生产过程所能达到的最高效率[26]。

3.2　策略二: "四维时空尺度"下界定系统边界

针对问题二, 本研究认为系统边界的设定要在"四维时空尺度"内考虑。"二维"面积是大多数研究对系统划分的第一尺度, 如国家生态经济评价中的国土面积、农业生态系统评价中的种植面积、工业加工过程中的厂区占地等, 这一维度的系统边界通常较易界定。

"高度、深度"作为系统评价中"第三维"纵向空间维度, 则常常被研究者所忽略。如 Castellini 等[3]在对意大利养鸡系统进行分析时, 将地热作为可更新环境资源投入的一部分纳入到研究中。这事实上造成了系统评价中的多余计算, 因为家禽生活在地表, 地热温度不会对家禽饲养过程产生较大的影响, 而这一错误的产生, 就来源于养殖业系统评价时"地下边界"界定错误。同样地, 大气冷热不均所引发"风"的现象, 对于农业生态系统中作物蒸腾有重要作用。但是, 现有研究中通常默认 1 000 m 高空的风速作为风能计算的数据基础, 这事实上也夸大了风能对于农业生态系统中的实际贡献。因为通常情况下, 作物高度远远低于海拔 1 000 m, 由于地表表面阻力, 随着高度的下降, 风速会逐渐降低。因此, 若要对农业生态系统中风能的直接贡献进行科学评价, 必须根据系统包含对象的实际高度进行合理估算, 这就要求研究者对系统"上界"也进行合理界定。

"第四维"时间是几乎所有系统分析必须考虑的另一个维度, 该维度限制了所研究系统或过程的时间范围, 如农业生产中的 1 年、作物种植的 1 季或生产 1 件产品的全生命周期等。对于"线性"传统农业生产方式而言, "时间边界"通常不会界定错误。但是, 当系统涉及产品和投入循环再利用问题时, 时间边界则容易被设定不清, 这需要进一步详细地判断与审视。因此, 农业生态系统的科学评价必须建立在"四维边界"的合理界定上予以开展, 以提高研究结果的科学性。

3.3　策略三: 构建公式合理体现土壤、农业用水在农业系统能值分析中的能量贡献

针对问题三, Wang 等[45]基于农田投入产出平衡的基本逻辑, 详细分析了当有机物料被还田后土壤有机质在农田土壤库中的变化情况, 并在此基础上提出了土壤有机质分解所提供的作物生长所需的能量投入计算公式。基于这样的思路, 农田生态系统中土壤养分对作物生长的能值贡献也可以基于养分平衡的基本关系进行估算, 这也是未来农业系统能值分析方法所需要进一步突破的关键点之一。

对于农业用水而言, 当无法获取田间实际数据时, 建议通过该地区微观试验测定的蒸腾系数进行估算。当能值评价方法被应用于小尺度的田间试验评价时, 建议采用农田水量平衡公式(公式 1)计算农业用水对作物生长的直接能量贡献:

$$ET_a+D=W_S-W_P+P+I \tag{1}$$

式中: ET_a 为实际蒸腾量, 即作物耗水量; D 为深层渗漏量; I 为灌溉量; P 为降水量; W_S 和 W_P 分别为某一时段起始、末尾的土壤贮水量。由于在实际农业生产当中, 灌溉用水(I)可能来源于雨水、河水、地下水等不同来源, 因此, 如果相关数据可以获得, 不同来源的农业用水在蒸腾量中的比率需要分开考虑, 以便对应不同水源的能值转换率进行能值核算, 提高评价结果的准确性。

3.4　策略四: 设定 4 组标准规范农业生态系统投入资源的分类

针对问题四, 本研究基于农业生态系统能值研究中常用指标(如净能值产出率、环境负载率、能值投资率、能值自给率、能值可持续性指数等)的内涵, 界定了农业生态系统能值评价时系统投入资源 4 组相互对应的分类标准:

1)本地资源与外部资源: 本地资源与外部资源的分类是根据资源所处的"位置"而言的。换句话说, 如果某种系统投入资源来源于研究目标的系统边界之内, 应该被归类为本地资源; 反之, 则应该被归类为外部资源。这一分类主要是与能值评价指标中的净能值产出率(EYR)相关。

2)可更新资源与不可更新资源: 系统投入资源是否可更新是对其"性质"的判断。可更新资源是指能够通过生物再生过程或其他自然的再现过程而使其再生速率大于其利用和消耗速率的有机的、自然性的资源;反之, 则应该被归类为不可更新资源。因此, 研究者不能通过某一资源是来源于系统边界内还是系统边界外而判断其可更新程度, 而应该根据该项投入资源本身的性质而进行分类。这一分类主要是与能值评价指标中的环境负载率(ELR)相关。

3)环境资源与经济系统资源: 顾名思义, 环境资源和经济系统资源分别是来源于自然环境和人类主导的社会经济系统的资源。环境资源常与本地资源相混淆。例如, 来源于农场外用来灌溉作物的地下水不属于本地资源, 但必然属于环境资源。这一

分类根据系统投入资源的“来源”而判断，它主要与系统能值投入结构的分析有关。

4)免费资源与购买性资源：系统投入资源的免费与否，是以其在市场中的“经济价值”为标准判断的。该分类常常被研究者与“环境资源与经济系统资源”分类相混淆，因为环境资源通常是可免费获得的，而经济系统资源通常是需要生产者付费获得的。但对于农业生态系统而言，一些常见的经济系统资源，却是不需要购买的。例如动物粪尿等有机肥来源于养殖业，属于经济系统资源，但却通常属于免费资源，因为农户可以免费从其他养殖场获得。这一分类与判断系统能值投入结构中对购买性资源的依赖度有关。

总体而言，资源分类的混乱是当前能值评价方法应用于农业生态系统分析时的一个常见问题。本研究基于不同判断标准所提出的资源分类原则，事实上也反映出一个问题：资源分类不是固定不变的，在不同视角下，研究目的不一样，某一种投入资源可以同时属于几种不同的分类。但与此同时，研究者也必须认识到，在这种变化当中，分类的“原则本身”是始终保持不变的，而这种“变化中的不变性”关系着系统评价中常见能值指标的计算结果，对其进行规范化，才可使能值评价的指标结果间具有可比性。

3.5 策略五：遵循能值代数规则保证能值守恒

针对问题五，当一个系统处于平衡状态时，其能值投入(U)等于各种投入的原始量与各投入 UEV 的乘积之和，能值产出(Y)则等于能值投入(U)，净能值产出率(EYR)等于能值投入(U)与经济系统反馈能(F)的比值。因为，能值分析中的净能值产出率指标，事实上反映的是系统在获得一定量的经济系统反馈能投入时，对系统本地资源(如光、水、土等)的开发利用程度[2]。只有指标计算的逻辑基础一致，指标结果间才具有可比性。解决这一问题的关键，就在于深入理解能值计算中的代数规则，以保证计算过程能值守恒。关于系统能值流计算规则，目前已有大量系统而深入的介绍与研究[2,44,46-48]，需要研究者在开展农业系统能值分析过程中深入理解和应用。但是，值得进一步说明的是，对于平衡态系统而言，引用其他系统 UEV 计算目标系统能值产出导致目标系统能值投入与产出不相等的原因在于，目标系统产品的 UEV 与引用源系统的 UEV 由于生产过程差异而不相等，而这种差异可用来度量系统的生产效率。例如，Lu 等[49]就基于这一差异，设计了能值生产力比率(EPR)和本地支撑率(LSR)指数，分析了广东顺德的农业生产效率。可见，能值守恒是农业生态系统能值评价过程中需要关注的重点，但根据研究目标的不同，也需要深入理解系统投入、产出和存量三者之间的关系，选择适合的综合评价指标，在保证系统能值流计算合理的基础上，有意义地反映目标系统的生态经济特点。

4 结语

能值评价方法作为众多生态经济系统分析方法之一，出现时间较晚，但无论在国内或国外学术界，其应用都相当广泛。一方面，这是因为能值评价在环境资源核算、区域(产业)发展状态评价、系统生态效率分析等研究领域具有鲜明的特点；另一方面，则因为该方法在一定程度上表现出了较强的“易操作性”和“可复制性”。但是，经过近些年能值评价方法的初步应用之后，部分学者开始对该方法多处存在的不确定性产生了质疑。但与此同时，大部分研究者也认为能值理论所包含的整套思想体系及其分析生态系统的角度确实是科学的、有价值的。本研究根据农业生态系统的特点，对部分相关理论问题进行了初步梳理和阐述，并对其有关细节做了一定程度的规范化。一方面，希望通过此项工作推进能值评价方法的标准化工作，使该方法在农业生态系统分析中有更好的适用性；另一方面，则是希望抛砖引玉，引起广大学界的讨论和批评，共同促进能值方法在全球农业系统分析中得到规范化应用。

参考文献 References

[1] ODUM H T. Self-organization, transformity, and information[J]. Science, 1988, 242(4882): 1132–1139

[2] ODUM H T. Environmental Accounting: Emergy and Environmental Decision Making[M]. New York: Wiley, 1996

[3] CASTELLINI C, BASTIANONI S, GRANAI C, et al. Sustainability of poultry production using the emergy approach: Comparison of conventional and organic rearing systems[J]. Agriculture, Ecosystems & Environment, 2006, 114(2/4): 343–350

[4] WANG X L, CHEN Y Q, SUI P, et al. Emergy analysis of grain production systems on large-scale farms in the North China Plain based on LCA[J]. Agricultural Systems, 2014, 128: 66–78

[5] LEFROY E, RYDBERG T. Emergy evaluation of three cropping systems in southwestern Australia[J]. Ecological Modelling, 2003, 161(3): 195–211

[6] 罗旭辉，卢新坤，刘岑薇，等. 基于能值分析的蜜柚园生草模式生态经济效益评价[J]. 中国生态农业学报，2019, 27(12): 1916 1924
LUO X H, LU X K, LIU C W, et al. Evaluation of ecological and economic benefits of pomelo orchards with different grass growing systems based on emergy analysis[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2019, 27(12): 1916–1924

[7] 高承芳, 黄颖, 张晓佩, 等. 基于能值分析的马尾松低效林林下种草养鸡耦合模式评价[J]. 中国生态农业学报, 2018, 26(12): 1919–1928
GAO C F, HUANG Y, ZHANG X P, et al. Emergy analysis of chicken breeding modes under low-efficient *Pinus massoniana* forests[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2018, 26(12): 1919–1928

[8] WANG X L, WU X, YAN P, et al. Integrated analysis on economic and environmental consequences of livestock husbandry on different scale in China[J]. Journal of Cleaner Production, 2016, 119: 1–12

[9] 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

[10] CIOTOLA R J, LANSING S, MARTIN J F. Emergy analysis of biogas production and electricity generation from small-scale agricultural digesters[J]. Ecological Engineering, 2011, 37(11): 1681–1691

[11] WANG X L, CHEN Y Q, SUI P, et al. Efficiency and sustainability analysis of biogas and electricity production from a large-scale biogas project in China: An emergy evaluation based on LCA[J]. Journal of Cleaner Production, 2014, 65: 234–245

[12] LIU Z X, WANG Y Y, GENG Y, et al. Toward sustainable crop production in China: An emergy-based evaluation[J]. Journal of Cleaner Production, 2019, 206: 11–26

[13] DONG X B, YU B H, BROWN M T, et al. Environmental and economic consequences of the overexploitation of natural capital and ecosystem services in Xilinguole League, China[J]. Energy Policy, 2014, 67: 767–780

[14] 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
LAN S F, QIN P, LU H F. Emergy Analysis of Eco-economic System[M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2002

[15] 严茂超, 李海涛, 程鸿, 等. 中国农林牧渔业主要产品的能值分析与评估[J]. 北京林业大学学报, 2001, 23(6): 66–69
YAN M C, LI H T, CHENG H, et al. Emergy analysis and assessment of main products of agriculture, forestry, animal husbandry and fishery in China[J]. Journal of Beijing Forestry University, 2001, 23(6): 66–69

[16] 白瑜, 陆宏芳, 何江华, 等. 基于能值方法的广东省农业系统分析[J]. 生态环境, 2006, 15(1): 103–108
BAI Y, LU H F, HE J H, et al. Based-on emergy analysis for agricultural system of Guangdong Province[J]. Ecology and Environment, 2006, 15(1): 103–108

[17] 周连第, 胡艳霞, 严茂超, 等. 生态经济系统能值分析——以北京密云县为例[J]. 地理科学进展, 2006, 25(5): 94–104
ZHOU L D, HU Y X, YAN M C, et al. Emergy evaluation of Miyun County as the area of watershed conservation for Beijing[J]. Progress in Geography, 2006, 25(5): 94–104

[18] 董孝斌, 高旺盛. 农牧交错带农业生态系统生产力的能值分析——以武川县为例[J]. 干旱区资源与环境, 2005, 19(7): 33–37
DONG X B, GAO W S. Energy analysis of agro-ecosystem productivity in the ecotone between agriculture and pasture in North China — A case study of Wuchuan [J]. Journal of Arid Land Resources and Environment, 2005, 19(7): 33–37

[19] 赵俊锐, 朱道林. 基于能值分析的土地开发整理后效益评价[J]. 农业工程学报, 2010, 26(10): 337–344
ZHAO J R, ZHU D L. Emergy-based analysis of expost benefits of land exploitation and consolidation[J]. Transactions of the CSAE, 2010, 26(10): 337–344

[20] 陆宏芳, 彭少麟, 蓝盛芳, 等. 基塘农业生态工程模式的能值评估[J]. 应用生态学报, 2003, 14(10): 1622–1626
LU H F, PENG S L, LAN S F, et al. Energy value evaluation of dike-pond agro-ecological engineering modes[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2003, 14(10): 1622–1626

[21] 张大瑜, 凌凤楼, 张立馥, 等. 东北平原粮食主产区公主岭市种植业系统的能值分析[J]. 农业工程学报, 2005, 21(6): 12–17
ZHANG D Y, LING F L, ZHANG L F, et al. Emergy analysis of planting system at Gongzhuling County in the main grain production region in Northeast China Plain[J]. Transactions of the CSAE, 2005, 21(6): 12–17

[22] 胡秋红, 张力小, 王长波. 两种典型养鸡模式的能值分析[J]. 生态学报, 2011, 31(23): 7227–7234
HU Q H, ZHANG L X, WANG C B. Emergy-based analysis of two chicken farming systems: A perspective of organic production model in China[J]. Acta Ecologica Sinica, 2011, 31(23): 7227–7234

[23] 刘振, 华则科, 宁堂原, 等. 有机物还田方式对小麦玉米两熟种植系统能值效率的影响[J]. 山东农业大学学报: 自然科学版, 2017, 48(3): 321–326
LIU Z, HUA Z K, NING T Y, et al. Effects of organic matter returning methods on emergy efficiency of wheat-corn double cropping[J]. Journal of Shandong Agricultural University: Natural Science Edition, 2017, 48(3): 321–326

[24] 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
LI F, LIN H L, CHANG S H. Emergy evaluation on the cropping mode and the cropping-breeding coupled mode in the ecotone between farming and pasturing areas[J]. Acta Agrestia Sinica, 2007, 15(4): 322–326

[25] HAU J L, BAKSHI B R. Promise and problems of emergy analysis[J]. Ecological Modelling, 2004, 178(1/2): 215–225

[26] INGWERSEN W W. Uncertainty characterization for emergy values[J]. Ecological Modelling, 2010, 221(3): 445–452

[27] CHRISTOPHER D V, BROWN M T, MA C, et al. Emergy research support for supply chains[J]. Journal of Environmental Accounting and Management, 2015, 3(4): 308–338

[28] ODUM H T, BROWN M T, BRANDT-WILLIAMS S. Introduction and Global Budget. Folio #1. Handbook of Emergy Evaluation[M]. Gainesville, USA: University of Florida Center for Environmental Policy, 2000

[29] CAMPBELL D E. A revised solar transformity for tidal energy received by the earth and dissipated globally: Implications for emergy analysis[C]//Proceedings of the First Biennial Emergy Analysis Research Conference. Gainesville, FL, USA: The Center for Environmental Policy, Department of

Environmental Engineering Sciences, 2000: 255–263

[30] BROWN M T. Updated evaluation of exergy and emergy driving the geobiosphere: A review and refinement of the emergy baseline[J]. Ecological Modelling, 2010, 221(20): 2501–2508

[31] BROWN M T, CAMPBELL D E, DE VILBISS C, et al. The geobiosphere emergy baseline: A synthesis[J]. Ecological Modelling, 2016, 339: 92–95

[32] ALFARO-ARGUELLO R, DIEMONT S A W, FERGUSON B G, et al. Steps toward sustainable ranching: An emergy evaluation of conventional and holistic management in Chiapas, Mexico[J]. Agricultural Systems, 2010, 103(9): 639–646

[33] LIU X W, CHEN B M. Efficiency and sustainability analysis of grain production in Jiangsu and Shaanxi Provinces of China[J]. Journal of Cleaner Production, 2007, 15(4): 313–322

[34] CHEN D, LUO Z H, WEBBER M, et al. Emergy evaluation of the contribution of irrigation water, and its utilization, in three agricultural systems in China[J]. Frontiers of Earth Science, 2014, 8(3): 325–337

[35] ZHANG L X, ULGIATI S, YANG Z F, et al. Emergy evaluation and economic analysis of three wetland fish farming systems in Nansi Lake area, China[J]. Journal of Environmental Management, 2011, 92(3): 683–694

[36] BRANDT-WILLIAMS S L. Emergy of Florida Agriculture. Folio #4. Handbook of Emergy Evaluation[M]. Gainesville, USA: University of Florida Center for Environmental Policy, 2002

[37] CUADRA M, RYDBERG T. Emergy evaluation on the production, processing and export of coffee in Nicaragua[J]. Ecological Modelling, 2006, 196(3/4): 421–433

[38] 马凤娇, 刘金铜. 基于能值分析的农田生态系统服务评估——以河北省栾城县为例[J]. 资源科学, 2014, 36(9): 1949–1957
MA F J, LIU J T. Agricultural ecosystem services assessment based on emergy analysis in Luancheng County[J]. Resources Science, 2014, 36(9): 1949–1957

[39] 孙卫民, 欧一智, 黄国勤. 江西省主要作物(稻、棉、油)生态经济系统综合分析评价[J]. 生态学报, 2013, 33(18): 5467–5476
SUN W M, OU Y Z, HUANG G Q. Analysis and evaluation of the eco-economic systems of the main crops (rice, cotton and rapeseed) in Jiangxi Province, China[J]. Acta Ecologica Sinica, 2013, 33(18): 5467–5476

[40] AGOSTINHO F, DINIZ G, SICHE R, et al. The use of emergy assessment and the Geographical Information System in the diagnosis of small family farms in Brazil[J]. Ecological Modelling, 2008, 210(1/2): 37–57

[41] ZHANG L X, HU Q H, WANG C B. Emergy evaluation of environmental sustainability of poultry farming that produces products with organic claims on the outskirts of mega-cities in China[J]. Ecological Engineering, 2013, 54: 128–135

[42] VIGNE M, PEYRAUD J L, LECOMTE P, et al. Emergy evaluation of contrasting dairy systems at multiple levels[J]. Journal of Environmental Management, 2013, 129: 44–53

[43] GHALEY B B, PORTER J R. Emergy synthesis of a combined food and energy production system compared to a conventional wheat (*Triticum aestivum*) production system[J]. Ecological Indicators, 2013, 24: 534–542

[44] BROWN M T, HERENDEEN R A. Embodied energy analysis and EMERGY analysis: A comparative view[J]. Ecological Economics, 1996, 19(3): 219–235

[45] WANG X L, LI Z J, LONG P, et al. Sustainability evaluation of recycling in agricultural systems by emergy accounting[J]. Resources, Conservation and Recycling, 2017, 117: 114–124

[46] 陆宏芳, 蓝盛芳, 陈飞鹏, 等. 农业生态系统能量分析[J]. 应用生态学报, 2004, 15(1): 159–162
LU H F, LAN S F, CHEN F P, et al. Advances in energy analysis of agro-ecosystems[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2004, 15(1): 159–162

[47] LI L J, LU H F, CAMPBELL D E, et al. Emergy algebra: Improving matrix methods for calculating transformities[J]. Ecological Modelling, 2010, 221(3): 411–422

[48] KAMP A, ØSTERGÅRD H. How to manage co-product inputs in emergy accounting exemplified by willow production for bioenergy[J]. Ecological Modelling, 2013, 253: 70–78

[49] LU H F, CAMPBELL D E. Ecological and economic dynamics of the Shunde agricultural system under China's small city development strategy[J]. Journal of Environmental Management, 2009, 90(8): 2589–2600