

系统可持续发展的能值评价指标的新拓展

陆宏芳¹, 蓝盛芳², 彭少麟^{1*} (1. 中国科学院华南植物研究所, 广州 510650; 2. 华南农业大学生命科学院, 广州 510642)

摘要:剖析阐述了国际现行能值可持续指标(ESI)中存在的不足之处,拓展构建了新的综合指标(SDI)评价系统可持续发展,实现了能值分析与经济分析和物质分析的耦合.以我国著名的基塘农业生态工程模式——珠江三角洲瓜菜基鱼塘模式为例进行案例分析.结果表明,新拓展的SDI能更全面、更明晰地度量被评价系统的可持续发展能力,并指示其能物流及经济流各自的运营状况,为系统的进一步优化指明方向.

关键词:可持续发展能力;评价系统;能值指标;农业生态工程

中图分类号:X196 文献标识码:A 文章编号:0250-3301(2003)03-05-0150

Extending Study on Energy Indices for Sustainable Development

Lu Hongfang¹, Lan Shengfang², Peng Shaolin^{1*} (1. South China Institute of Botany, Academy of Sciences, Guangzhou 510650, China; 2. College of Life Sciences, South China Agricultural University, Guangzhou 510642, China)

Abstract:Based on the deficiency analysis of current international energy sustainable index (ESI), the new sustainable development index (SDI) was put forward to realize the integration of energy analysis, economic analysis and matter analysis. Taking three dike-pond models in Pearl Delta, which is the famous ecological engineering model of China, the case study was carried out. The results showed that the new index can evaluate the system's sustainable development ability more roundly, and showed the station of energy flow, money flow and matter flow at the same time. So it can provide some pieces of constructive optimizing advice from different sides at the same time.

Key words: sustainable development ability; evaluating system; energy indices

可持续发展的评价是完善可持续发展理论及指导发展实践的基础,它包括评价方法的完善和评价指标体系的建立^[1].能值理论突破了传统能量分析方法中存在的“能质壁垒”,是传统能量分析方法的新发展,为可持续发展理论提供了新的思路和有力工具.1997年提出的能值可持续指标(Energy Sustainable Index, ESI)^[2]填补了能值理论中系统可持续发展的评价指标的空缺,推动了可持续发展的研究,但仍有待进一步完善.本文在剖析原有ESI不足之处的基础上,从能量、物质、经济耦合分析的角度拓展构建了新的评价系统可持续发展性能的评价指标(Sustainable Development Index, SDI),并选取3种珠江三角洲典型的瓜菜基鱼塘农业生态工程模式进行了案例分析验证.

1 ESI的不足之处

能值理论是以美国著名生态学家 H. T. Odum 为首,于80年代末,在能量生态学、系统生态学、生态工程学及经济生态学的基础上发展提出的^[3].能值理论以能值(Energy)为量纲,突破了传统能量分析方法中存在的“能质壁垒”,实现了不同质能量的区别对待和统一评价;用能值产出率(Energy Yield Ratio, EYR),即系统产出能值与系统购入性输入能值之比衡量系统产出效率;用环境负载率(Environment Load

基金项目:国家自然科学基金项目(30270282, 30170147);广东省团队项目(003031);中国科学院知识创新项目(KZCX2-407);中国科学院华南植物所所长基金项目.

作者简介:陆宏芳(1976~),女,中国科学院华南植物所博士.主要从事环境生态与生态经济方向的研究.

收稿日期:2002-06-17;修订日期:2002-10-08

* 通讯联系人

Ratio, ELR),即系统不可更新能值用量与可更新能值用量之比,衡量系统过程的环境影响;用能值交换率(Energy Exchange Ratio, EER),即系统在对外交换中所获能值与换出能值的比,衡量系统的交换效益^[4]。辅之以能值转换率、能值货币价值等指标,能值分析将能量分析方法推进到了一个新的阶段,丰富发展了可持续发展的评价方法,并在全球范围内得到日益广泛地应用^[5-8]。1997年美国生态学家 Brown M. T.和意大利生态学家 Ulgiati S.^[2]首次提出了能值可持续指标 ESI,定义为系统能值产出率与环境负载率之比,即 EYR/ELR 。ESI 的提出初步填补了能值理论中系统可持续发展的能值综合评价指标的空缺,在系统可持续发展的能值评价方面迈进了一大步。但目前的 ESI 仍不能满足对系统可持续发展的评价要求,在具体分析应用中有以下 3 点尚待完善:

(1) 虽然从生态学角度出发,系统排出的废弃物和能量仍有其价值所在,但由于目前知识和工艺的有限性而不能有效利用,所以并非所有的系统产出都是有益于人类的正效益产出,有的产出甚至是极其有害的负效益产出,具有负的能值交换率,如污染物、废弃物的产出等,即 EYR 越高并不一定越符合人类利益,越有利于实现可持续发展;即使相同的能值产出,在交易过程中受市场、文化和伦理等的影响亦具不同的能值交换率,从而对系统发展产生不同的影响。

(2) ELR 表示系统能源与资源消耗中不可更新资源的比率,只能反映系统环境影响的一部分。系统环境压力不仅体现在系统生产资源(资源、能源)的消耗结构上,而且体现在系统全过程各种排放物的环境影响程度上。 ELR 仅体现了系统前一个方面的环境影响,而没有反映出系统环境影响的后一个方面。

(3) 生态经济系统的基本功能不仅体现为能量流动,还体现为系统的物质循环、货币流通和信息传递。ESI 单从能值角度进行系统可持续发展性能的评价,没有考虑到能流、物流和货币流的耦合分析。

2 新的评价系统可持续发展性能的综合指标(SDI)的构建

1992年巴西里约热内卢世界环境发展大会所给出的可持续发展定义为:既满足当代人的需求,同时又不损害后代人满足需求的能力;既要保证适度的社会经济增长与结构优化,又要保证资源的永续利用和生态环境的优化,从而达到生态环境与社会经济相协调,实现持续共进、有序发展^[9]。

鉴于系统社会效益与发展目标成正比,环境压力与可持续要求成反比,于此将系统社会效益作为分子,环境压力作为分母,构造出与系统可持续发展性能成正比的综合性评价指标,并命名为评价系统可持续发展性能的综合指标(Sustainable Development Index, SDI)。SDI 值越高,意味着单位环境压力下的社会效益越高,系统的可持续发展性能越好。其数学表达式为:

$$SDI = \frac{EB}{EI} \quad (1)$$

式中,SDI:可持续发展评价指标;EB:经济效益;EI:环境压力

EB = 经济产出 / 经济投入

$$EI = ELR + \sum_{i=1}^n \left| \frac{X_i - X_{i0}}{A_i} \right| \quad (2)$$

$$ELR = \frac{F + N}{R + R'} \quad (3)$$

式中, ELR :环境负载率^[4]; F :购入的不可更新资源投入; N :免费的不可更新资源投入; R :免费的可更新资源投入; R' :购入的可更新资源投入。 X_i 表示第 i 种污染物对环境的污染等级, X_{i0} 为系统运行前其周围环境中 i 物质污染等级, A_i 为该污染物污染等级总数。之所以用 $(X_i - X_{i0})/A_i$ 是基于 2 点考虑,一是系统运行前其周围环境中该物质污染程度不一定都为 0,且系统可能通过其排放而对环境产生负面影响,也可能通过对上游污染物的资源化而产生正面影响;二是目前各种污染物污染等级的划分并不统一,有的划为 3 级,有的划为 5 级等,因此有进行污染程度数据标准化的需要。例

如,现有 A、B 2 个系统分别排出 a、b 污染物,a 污染物污染标准共划为 5 级,现造成污染变化幅度为 3 级;b 污染物污染标准共划为 3 级,现造成污染变化幅度为 2 级.可见不对 a、b 进行数据标准化则 A、B 两系统的 SDI 不可比.

具体的标准化过程为减小误差,在污染等级标准值(a_{ij} 为第 i 种污染物的第 j 级污染标准浓度)间用插值法计算实际污染等级.排放指标可分为正向指标(指标值越大越好,此时表示该物质对环境有正效益)和负向指标(指标值越小越好,表示该指标对环境有负效益)2 种,它们的具体环境影响等级计算公式有所不同.对正向指标而言,其计算公式如(4)式(以 X_i 为例, x_i 为系统生产后第 i 种污染物的浓度; X_{i0} 与 X_i 算法相同, x_{i0} 为系统生产前第 i 种污染物的浓度):

(1) x_i 大于该种污染物的 1 级污染浓度(a_{i1})时:

$$X_i = 1$$

(2) x_i 介于该种污染物的 j 级和 $(j+1)$ 级污染浓度之间时:

$$X_i = j + \frac{x_i - a_{ij}}{a_{i,j+1} - a_{ij}} \quad (4)$$

(3) x_i 小于该种污染物的 A_i 级污染浓度时:

$$X_i = A_i$$

相应的,对负向指标环境影响等级的计算方法与此类似,其计算公式如(5)式:

(1) 第 i 项指标 x_i 的实际值小于其所对应的第 1 级标准值(a_{i1})时:

$$X_i = 1$$

(2) 当第 i 项指标 x_i 的实际值介于其对应的第 j 级和第 $(j+1)$ 级标准值之间时:

$$X_i = j + \frac{a_{ij} - x_i}{a_{i,j+1} - a_{ij}} \quad (5)$$

(3) 当第 i 项指标 x_i 的实际值大于其所对应的第 A_i 级标准值时:

$$X_i = A_i$$

在相邻环境影响等级间采用环境影响与排放量间的线性关系假设,仅能部分地降低直接全程插值法的误差,且是单独进行各种排放物的环境影响,没有考虑各种排放物间的交互作

用.针对复杂巨系统,可考虑在数据标准化前将各种排放物按环境影响分类后统一转化为某种最具代表性的排放物量,然后进行标准化,以部分地减少交互作用误差.

3 案例分析

珠江三角洲基塘生态农业是新兴的典型农业生态工程,也是我国农业生态工程目前领先于国际水平的典型代表^[10],对它们进行系统地分析研究具有重要的理论意义和实践意义.

本研究运用以上新推出的评价指标 SDI,以珠江三角洲新兴的塘鱼生产基地——三水市^[11]为研究基地,选取其具代表性的 3 种基塘农业生态工程模式(黑皮冬瓜-黑皮冬瓜-结球甘蓝-四大家鱼(模式 I),黑皮冬瓜-黑皮冬瓜-结球甘蓝-猪-四大家鱼(模式 II),黑皮冬瓜-黑皮冬瓜-结球甘蓝-猪-翘嘴鳊与四大家鱼混养(模式 III)),进行系统可持续发展性能的能值比较研究.

所选模式的基/塘面积比为 3:7.耕作管理流程为:2 月初~6 月初种植,收获第一季黑皮冬瓜(*Benincasa hispida* Cong.),种植密度为 7500 棵/hm²;5 月下旬进行第二季黑皮冬瓜的 20 天育苗,6 月初第一季冬瓜收获后移植,定植,移植密度为 7500 棵/hm²,9 月初收获;8 月下旬进行结球甘蓝(*Brassica oleracea* L. Var. *Capitata* L.)育苗,9 月初第二季冬瓜收获后移植,定植,11 月底收获;鱼塘水深 1.5 m,四大家鱼鱼苗于 1999 年 12 月放入,放养密度为鲢鱼(*Ctenopharyngodon idella*) 3000 尾/hm²、鳙鱼(*Hypophthalmichthys molitrix*) 450 尾/hm²、鳊鱼(*Aristichthys nobilis*) 750 尾/hm²、鲤鱼(*Cirrhina milotorella*) 45000 尾/hm²、鲫鱼(*Cyprinus carpio*) 300 尾/hm²、鳊鱼(*Carassius auratus*) 1500 尾/hm²,其中鳊鱼在 7 月底刮出,同期放入鳊鱼苗 750 尾/hm²,其余鱼种及第二批鳊鱼于 12 月初干塘收获.塘基种植冬瓜-冬瓜-甘蓝产出的副产品瓜藤、残菜全部入塘养鱼;塘泥 80%返基,20%留塘.

在模式 I 的基础上,模式 II 在塘基引入养猪环节,猪肉可直接作为商品出售而取得直接效益,

同时猪粪尿全部入塘养鱼,节约鱼饲料的同时提高鱼塘产出,又可创造间接效益.从12.5kg/头的猪仔购入到100kg/头的成猪出栏,存栏时间为120d,养殖密度为50头/hm²鱼塘.

模式Ⅲ在模式Ⅱ的基础上,于7月份在鱼塘内加放入翘嘴鲌,部分地改变了鱼塘的饲料投入结构和成鱼产出结构.翘嘴鲌可作为商品出售,可创造直接效益.同时增加塘泥养分的淤积量,塘泥返基又可作为种植业子系统的有机肥,取得间接效益.翘嘴鲌放养密度为4500尾/hm²,12月初与四大家鱼同时干塘收获.3种模式具环境影响的排放项均为年末清塘时排出的塘水.

本研究在当地农技站和具体基塘农户的协助下,采用具体追踪记录的方法获取系统能流、货币流资料.用碘量法测定水中的溶解氧;20℃5天培养法(BOD₅法)测定BOD值(不包括硝化阶段,只包括含碳物质氧化阶段);重铬酸钾法测定水体COD;蒸馏滴定法测定鱼塘水体NH₄⁺-N;镉柱还原法测定鱼塘水体NO₃⁻-N.^[12]3个模式的能值流图解见图1,具体能值流、货币流数据见表1,水样测定数据及污染标准见表2.

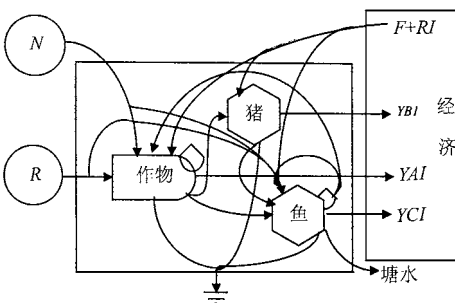


图1 3种基塘农业生态工程模式的能值流

Fig.1 The energy flow of the three dike-pond agricultural engineering modes

表1 3种基塘模式系统的太阳能值投入产出对比*/sej.a⁻¹

项目	模式Ⅰ	模式Ⅱ	模式Ⅲ
可更新自然资源能值投入	8.6×10 ¹⁴	9.8×10 ¹⁴	1.2×10 ¹⁵
购入的可更新资源能值投入	3.3×10 ¹⁶	2.8×10 ¹⁷	3.7×10 ¹⁷
不可更新自然资源能值投入	5.0×10 ¹³	5.6×10 ¹³	7.1×10 ¹³
购入的不可更新资源能值投入	1.2×10 ¹⁷	1.4×10 ¹⁷	1.7×10 ¹⁷
产出能值	1.5×10 ¹⁷	4.2×10 ¹⁷	5.4×10 ¹⁷
系统经济投入(元/a)	50135	96701	129144
系统经济产出(元/a)	50947	100016	164470

表2 3种基塘模式系统塘水的污染状况/mg·L⁻¹

Table 2 Pollution condition of the three dike-pond modes / mg·L⁻¹

项目	模式Ⅰ		模式Ⅱ		模式Ⅲ		环境质量标准(GBZB 1-1999) [12]
	系统用前	系统用后	系统用前	系统用后	系统用前	系统用后	
DO	9.10	5.62	11.46	6.21	12.64	7.02	1级6;2级5;3级3;4级2
BOD ₅	6.74	7.25	4.85	8.06	6.71	5.63	1级3;2级4;3级6;4级10
COD	37.91	70.36	10.83	60.30	10.75	33.50	1级15;2级20;3级30;4级40
NH ₄ ⁺ -N	2.00	0.48	0.21	1.27	0.12	0.79	1级0.04;2级0.24;3级0.5;4级2.50;5级2.5
NO ₃ ⁻ -N	1.05	1.60	1.08	2.72	0.90	1.05	1级10;2级20;3级25

由表1,2各项数据和上述指标计算方法推算出的指标值可知(表3),由于资源消耗结构中不可更新资源所占比率过高,模式Ⅰ具有最高的环境压力,其可持续发展性能最低.模式Ⅱ资源消耗结构中不可更新资源所占比率虽然大幅降低,但其塘水污染程度大幅上升,可持续发展性能中等,其SDI值为模式Ⅰ的2.19倍.模式Ⅲ有效降低了塘水污染程度,环境压力最低,且经济效益最高,可持续发展性能最强,其SDI值高达模式Ⅰ的3.73倍.

表3 3种基塘模式系统的能值指标比较

Table 3 Comparing among the three dike-pond modes on energy indices

指标项	模式Ⅰ	模式Ⅱ	模式Ⅲ
系统经济效益(EB)	1.02	1.03	1.27
环境负载率(ELR)	3.51	0.477	0.470
$\sum_{i=1}^n \left \frac{X_i - X_{i0}}{A_i} \right $	0.404	1.330	0.846
能值可持续指标(ESI)	0.29	2.10	2.13
系统可持续发展的评价指标(SDI)	0.26	0.57	0.97

* sej为(solar emjoules)太阳能焦耳

模式 II、III 在模式 I 的基础上加入养猪环节,所产生的 SDI 边际效益为 0.31. 模式 III 在模式 II 的基础上加入翘嘴鲌所产生的 SDI 边际效益为 0.40. 与畜牧业子系统相比,翘嘴鲌的引入对于母系统可持续发展性能提高的正面影响作用更为显著.

模式 I 仍大面积存在的原因是其操作管理相对简单粗放,且与模式 II 经济效益相当;而引入翘嘴鲌的模式 III 能有效降低其塘水的污染程度,同时大大提高系统对社会经济发展的贡献,提高系统的可持续发展能力.

4 讨论

本文以系统能量、经济和物质的耦合评价为出发点,在能值分析理论的基础上引入经典经济效益评价指标(产/投比)和具体排放物的污染指标,协同构建出评价系统可持续发展性能的综合指标 SDI,为能值分析与经济分析、物质分析的耦合跨出开拓性的一步. 由于同时考虑了环境影响和市场经济因素,SDI 的评价能更好的评价同等环境压力下不同的产品生产结构对社会经济发展贡献的不同,即系统可持续发展性能的不同;同时能更明确的反映系统能物流、货币流运营状况,揭示各种系统发展状况的成因和进一步的优化方向.

在系统排放物环境影响评价中采用环境影响与排放量间的线性关系假设,虽部分地降低了直接全程插值法的误差,但因对具体污染机理的不甚明了而仍存误差,且是单独进行各种排放物的环境影响,没有考虑各种排放物间的交互作用. 针对复杂巨系统,可考虑在数据标准化前将各种排放物按环境影响分类后统一转化为某种最具代表性的排放物量,然后进行标准化,以部分地减少交互作用误差,但最终的解决仍有赖于对典型污染物污染机理和污染程度量

化研究的进一步深化.

致谢 对三水市农业局在本研究案例调查中给予的大力支持深表谢意.

参考文献:

- 1 闵庆文,李文华. 区域可持续发展能力评价及其在山东五莲的应用. 生态学报, 2002, 22(1): 1~9.
- 2 Brown MT, Ulgiati S. Energy-based indices and ratios to evaluate sustainability: monitoring economies and technology toward environmentally sound innovation [J]. Ecological Engineering, 1997, (9): 51~69.
- 3 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.
- 4 Odum H T. ENVIRONMENTAL ACCOUNTING: Energy and Decision Making. New York: John Wiley & sons, 1996. 57~58, 85~86.
- 5 Bastianoni S, Marchettini N. The problem of coproduction in environmental accounting by energy analysis. Ecological Modelling, 2000, 129: 187~19.
- 6 Brown MT, Herendeen RA. Embodied energy analysis and energy analysis: a comparative view. Ecol Econ., 1996, 19: 219~235.
- 7 Ulgiati S. Energy, Energy and Embodied Energy: diverging or converging approaches?. In: Brown MT ed. Energy Synthesis: Theory and Application of the Energy Methodology. Gainesville: Department of Environmental Engineering Sciences. 2000, 15~32.
- 8 Ulgiati S, Brown MT. Quantifying the environmental support for dilution and abatement of process emissions—the case of electricity production. Journal of Cleaner Production, 2002, 10: 335~348.
- 9 彭少麟,任海. 恢复生态学导论. 北京: 科学出版社, 2001. 105~107.
- 10 国家环保局. 中国生态农业适用模式与技术. 北京: 中国环境科学出版社, 1995. 81~85, 197~200.
- 11 肖立见,林志平. 珠江三角洲经济区整体开发的基本构想. 广东青年经济研究会, 广东青年社会科学工作者协会主办, 迈向 21 世纪的珠江三角洲经济区. 1995. 26~28, 75~76.
- 12 何增耀主编. 环境监测. 北京: 农业出版社, 1994. 32~45, 292~297.