基于能值分析的德州市农业生态系统分析

刘富刚
（德州学院 地理系，山东 德州 253023）

摘 要：在综和分析可持续发展学科动态与相关生态学理论最新进展的基础上，运用能值分析方法，对德州市农业生态系统 1998—2007 年的能值变化及其可持续性动态进行了分析。结果表明，德州市农业生态系统总能值用量呈增加趋势，农业生态系统维持对不可更新资源的依赖性逐渐增强，环境负荷率呈逐渐增加趋势，可持续性发展压力较大。未来农业生态系统管理要大力发展节水灌溉农业；应积极引进技术，增加劳动力的智力资源能值投入，调整工业辅助能投入，提高能值受益率；并探索建立多层次、高功能的生态农业模式。

关键词：农业生态系统；能值分析；可持续性发展；德州市
文献标识码：A 文章编号：1000-288X(2010)04-0235-06 中图分类号：Q149

Agricultural System of Dezhou City Based on Energy Analysis

LIU Fu-gang
(*Department of Geography, Dezhou University, Dezhou, Shandong* 253023, *China*)

Abstract: This paper reviewed the development of the thought of sustainable development and the theory of ecology and analyzed the change of energy value in the agro-ecosystem of Dezhou City between 1998 and 2007 and the sustainability of the agro-ecosystem. Results showed that the total energy usage of agro-ecosystem of Dezhou City kept increasing during the study period, so did its dependence on non-renewable resources. Its environmental loading ratio kept growing and its sustainable development was under great pressure. The agro-ecosystem management in the future should develop water-saving irrigation, introduce advanced technology actively, increase the input of energy value of intellectual resources, adjust the input of industrial supporting energy to improve the benefit ratio of energy value, and explore the ways of establishing a multi-level and high-function ecological agriculture.

Keywords: agricultural eco-economic system; energy value analysis; sustainable development; Dezhou City

20 世纪中叶以来，随着对可持续发展的限制性因素探讨，人们开始重视科学和技术在可持续发展中的作用。2004 年，由 Palmer 等 20 名著名生态学家组成的美国生态学会生态远景委员会完成一个战略研究报告“拥挤地球的生态学”，报告认为一个可持续发展的未来将包括维持性、恢复性和创建性的综合生态系统，生态学研究重点应转移到生态系统和人类关系的可持续能力建设上，报告首次提出了“可持续性科学”概念。

可持续性科学的最基本科学问题是如何将自然与社会的动态相互作用纳入到综合地球系统、人文发展和可持续性的研究框架中，并将自然和社会相互作用导向更持续的轨道。可持续性科学的核心观点是生态、经济和社会协调一致，统筹兼顾；关键性科学问题是可持续性转变，即向着可持续性的目标/状态不断转变的过程。可持续性科学使应用生态科学从原生的、现存的、未被扰动的生态系统研究向以人类为重要组分、聚焦生态系统服务和人工生态设计的生态系统新研究的转型，将为维持地球生命的质量和多样性奠定科学基础[1]。

农业系统是一定的自然资源和环境条件作为其基本组成部分，并由人类所控制和管理的生态系统。因此，农业生态系统的能量流动和物质循环特征有别于自然生态系统。现代农业过分依赖人为调控手段，倚重对辅助能的投入，忽视对环境资源因素的价值认识，导致环境资源长期处于超负荷状态。如何合理认识和评价环境资源、各种辅助能的贡献、投入产出水平和农业系统的可持续性发展能力，成为现代农业可

收稿日期：2009-12-12 修回日期：2010-04-15
资助项目：山东省科学技术发展计划(软科学部分)研究项目(2009RKB578)；山东省德州市社会科学规划研究项目(08YD021)
作者简介：刘富刚(1964—)，男(汉族)，山东省济南市人，学士，副教授，主要从事自然地理学教学与研究工作。E-mail：dzxylfg@163.com。

持续发展的重要课题之一。本研究应用能值分析理论和方法，定量分析德州市农业系统的自然环境资源和辅助能能量的投入、产出的总体能流能值，环境资源能值，为合理开发农业环境资源，优化系统功能结构以及探讨区域农业生态系统可持续性发展提供参考。

1 研究区概况及研究方法

1.1 研究区概况

德州市位于北纬 36°24′—38°0′，东经 115°45′—117°24′之间，地处山东省西北部，黄河下游北岸，冀、鲁两省的交界处。该市属温带大陆性半湿润季风气候，受季风影响显著，四季分明，冷热干湿界限明显；光照资源丰富，年平均日照时数 2 660 h，多年平均太阳总辐射量为 5.24× 10^5 J/cm^2，年平均气温12.3 ℃～13.4 ℃，年平均降水量为 585.2 mm，其中夏季(6—8 月)降水占全年降水量的 68.5%。旱涝、干热风、冰雹是该市的主要自然灾害。

德州市辖 1 区 2 市 8 县，土地总面积 1.04× 10^6 hm^2，其中耕地面积6.24× 10^5 hm^2，占 61.21%，以地域性碱性潮土为主，土壤类型分为沙壤土、轻壤土、中壤土、重壤土、盐土、沙土和黏土。主要的作物有棉花、花生、地瓜、小麦、玉米、蔬菜等，是国家和山东省重要的粮、棉、蔬生产基地。

1.2 数据来源与研究方法

能值分析理论(emergy analysis)[2] 由美国著名的生态学家 Odum 于 20 世纪 80 年代提出，它以太阳能值为统一尺度，把社会、经济、自然三个亚系统有机统一起来，定量分析自然和人类社会经济的真实价值，解决了不同类别能量因能质和能级差异而无法换算的问题，这一理论和方法为生态系统和生态经济系统的定量分析研究开拓了新途径。自 20 世纪 90 年代初由留美学者蓝盛芳等[3-4] 把能值理论、方法和有关研究介绍到中国后，我国专家和学者们运用能值理论对区域生态系统能值进行分析研究，为衡量区域发展水平，制订可持续发展战略提供了一定理论依据[4-9]。

本研究以山东德州市农业系统为对象，所用数据主要来源于该市 1999—2008 年统计年鉴统计资料，部分数据来源于德州市农业、气象等部门的资料。能量折算系数和太阳能值转换率根据 Odum 等人的研究成果[10]。选取 1998—2007 年农业经济系统的物质和能量数据指标，根据各种资源(物质、能量)相应的太阳能值转换率，将不同类别能量(J)或物质(g)转换为统一度量的能值单位(sej)[11]。在此基础上，对系统各种能值指标进行计算，并进行系统投入与产出分析。

农业生态经济系统的能值投入按其来源可分为两类：一类为直接来源于自然界，包括可更新环境资源(太阳能、风能、雨水化学能、雨水势能等，以 R 表示)和不可更新环境资源(土壤表土层损失等，以 N 表示)，这类能值是从自然界中无偿得到的，称为“无偿能值”或“免费能值”，在可更新环境资源投入中，为避免重复计算，同一性质的能量投入只取其最大值一项；另一类能值来源于人类社会经济系统，包括人工工业辅助能(化肥、燃油、农药、农膜、农机具等，以 F 表示)和人工可更新有机能(劳力、种子、饲料等，以 T 表示)。根据研究的需要，选择净能值产出率(EYR)、能值投资率(EIR)、环境负载率(ELR)和可持续性发展指数(ESI)作为对德州市农业系统产生效率、经济发展程度、资源环境压力和系统可持续性的评价指标，对农业系统进行评价，作为制定区域农业持续性发展战略的依据。

2 结果与分析

2.1 农业生态系统的能值结构投入及分析

农业生态系统的维持和发展的主要资源能值来源包括可更新环境资源、不可更新环境资源、工业辅助能和可更新有机能等。德州市 1998—2007 年农业生态经济系统投入的能值总流量为 3.20E+21 sej～4.52E+21 sej 之间(表 1)，其中不可更新的工业辅助能值投入最大(占总投入量的 80.6%～90.2%)，已超过全国平均水平(62%)，呈上升趋势。工业辅助能值中最大是复合肥，占工业辅助能值的 61.4%～68.4%，其次是氮肥(占 13.7%～17.5%)。使用氮肥是该市农业生产的传统，近几年随着农业结构的调整和科技的进步农业生产复合肥的投入不断提高。可更新环境资源的能值投入(占总投入量的 9.1%～18.6%)，其中雨水化学能形成的能值量最大，占总能值的 7.9%～13.6%，占可更新环境资源投入的 61.9%～75.6%，农业用水能值投入不断增加。德州市属于农业灌溉区，自然降水与黄河水的引入对区域农业生产非常重要。可更新资源产品能值占总能值的 0.04%～0.15%之间，其中劳动力的能值量最大，占 29.4%～86.9%。

农业生态经济系统是一个社会、经济、资源和环境系统，能值的持续输入是农业生态系统发展的基础条件。上述数据表明，德州市农业经济经济系统的运行水平比较低，社会经济购买能值输入较高，农业经济系统的运行水平比较低；农业系统的产出不单纯依

赖土壤的自然肥力,还与辅助能值的投入规模相关,农业经济发展过程中对外资源依赖性较大。德州市是一个传统的农业城市,农业生产的光照资源丰富,夏季降水集中,春秋二季干旱,农业基质条件单一,土壤肥力低。随全球气候变化,研究时段该市降水量呈下降趋势,成为影响种植业发展的主要障碍因素。随着人口的增加,产业结构的调整,农业生态系统的自我维持对社会经济系统物质能量投入关系较大。化肥、农药的长期投入会使土壤板结、营养元素失衡,肥力下降,水土流失增加,也是区域生态服务功能下降的因素之一。调整农业生产结构,提高水热利用效率,加强水资源引入和水利建设,提高化肥等辅助能值的利用效率,改善农业生态环境是该市农业生态系统协调发展的的主要措施。

表 1　1998—2007 年德州市农业系统投入能值结构

项目		转换率/(sej·J^{-1})	能值/sej									
			1998 年	1999 年	2000 年	2001 年	2002 年	2003 年	2004 年	2005 年	2006 年	2007 年
可更新环境资源 R	太阳能	1	5.43E+19	5.43E+19	5.43E+19	5.43E+19	5.43E+19	5.43E+19	5.43E+19	5.43E+19	5.43E+19	5.43E+19
	风能	1 496	5.58E+19	5.58E+19	5.58E+19	5.58E+19	5.58E+19	5.58E+19	5.58E+19	5.58E+19	5.58E+19	5.58E+19
	雨水势能	8 890	3.96E+19	7.27E+19	4.29E+19	6.22E+19	4.29E+19	3.17E+19	8.09E+19	6.77E+19	5.11E+19	5.11E+19
	雨水化学能	18 000	2.88E+20	5.29E+20	3.12E+20	4.52E+20	3.12E+20	2.31E+20	5.89E+20	4.93E+20	3.72E+20	3.72E+20
	农业用水	15 000	2.12E+13	2.13E+13	2.28E+13	2.31E+13	2.26E+13	2.46E+13	2.76E+13	3.06E+13	2.46E+13	2.73E+13
	小计		4.38E+20	7.12E+20	4.65E+20	6.25E+20	4.65E+20	3.73E+20	7.80E+20	6.70E+20	5.33E+20	5.33E+20
不可更新 N	表土层净损失	74 000	2.15E+19	2.15E+19	2.15E+19	2.15E+19	2.15E+19	2.15E+19	2.15E+19	2.15E+19	2.15E+19	2.15E+19
	小计		2.15E+19	2.15E+19	2.15E+19	2.15E+19	2.15E+19	2.15E+19	2.15E+19	2.15E+19	2.15E+19	2.15E+19
工业辅助能 F	柴油	66 000	1.55E+14	1.56E+14	1.64E+14	1.66E+14	1.64E+14	2.19E+14	2.25E+14	1.93E+14	2.13E+14	2.17E+14
	农药	1.6E+09	3.12E+20	3.24E+20	3.17E+20	3.42E+20	3.22E+20	5.16E+20	4.0E+20	3.51E+20	3.30E+20	5.68E+20
	农膜	3.8E+08	2.03E+19	2.02E+19	4.97E+18	4.21E+18	4.97E+18	7.38E+18	1.27E+19	8.09E+18	1.06E+19	7.65E+18
	氮肥	3.8E+09	5.30E+20	5.37E+20	5.72E+20	5.62E+20	5.72E+20	5.74E+20	5.43E+20	5.67E+20	6.05E+20	6.18E+20
	磷肥	1.8E+09	1.19E+20	1.38E+20	1.38E+20	1.33E+20	1.25E+20	1.33E+20	1.33E+20	1.39E+20	1.42E+20	1.61E+20
	钾肥	2.9E+09	3.76E+19	4.18E+19	4.14E+19	5.36E+19	4.69E+19	4.70E+19	4.64E+19	4.95E+19	5.95E+19	1.14E+19
	复合肥	2.8E+09	2.17E+21	1.99E+21	2.17E+21	2.18E+21	2.17E+21	2.37E+21	2.31E+21	2.42E+21	2.62E+21	3.08E+21
	农机具	6.7E+09	2.97E+18	3.15E+19	3.15E+19	4.70E+19	3.15E+19	5.70E+19	6.07E+19	6.30E+19	6.70E+19	6.70E+19
	小计		3.19E+21	3.08E+21	3.27E+21	3.32E+21	3.27E+21	3.70E+21	3.51E+21	3.60E+21	3.83E+21	4.51E+21
可更新有机能 T	蓄力	146 000	7.04E+17	6.68E+17	7.44E+17	6.73E+17	7.44E+17	8.29E+17	7.98E+17	7.92E+17	3.07E+17	3.05E+17
	有机肥	2 700 000	1.01E+17	1.11E+17	1.31E+17	1.19E+17	1.31E+17	1.20E+17	1.20E+17	1.19E+17	1.16E+17	1.16E+17
	种子	200 000	3.02E+17	3.02E+17	3.02E+17	3.02E+17	3.02E+17	3.00E+17	3.02E+17	3.02E+17	3.00E+17	2.8E+17
	劳动力	3 800 000	4.49E+18	4.50E+17	4.50E+18	4.50E+18	4.50E+18	4.51E+18	4.52E+18	4.52E+18	4.60E+18	4.64E+18
	小计		5.60E+18	1.53E+18	5.68E+18	5.59E+18	5.68E+18	5.76E+18	5.74E+18	5.73E+18	5.32E+18	5.34E+18
总计			3.66E+21	3.82E+21	3.76E+21	3.97E+21	3.76E+21	4.10E+21	4.32E+21	4.30E+21	4.39E+21	5.07E+21

2.2　农业生态系统的能值产出及分析

依据能值转换率计算的系统产品能值组成(表 2)可知德州市农业生态系统能值产出总能值产出2.14E+22 ~1.02E+23 sej 之间,农牧渔业产出能值依次为5.57+21 ~1.45E+22 sej,1.02E+22 sej ~8.94E+22 sej,6.95E+17 ~1.09E+21 sej。研究时段,畜牧业平均占 62.4%,种植业占 35.8%,渔业占 1.8%,畜牧业能值比例已超过作物种植业。种植业中以小麦、玉米、棉花、花生、蔬菜为主,占种植能值的 90%以上。牧业以猪肉、禽肉、禽蛋为主。渔业所占能值比例较小。

德州市农业生态系统能值产出,一是与区域地势平坦,农业人口密集,及与农业种植传统有关;二是与区域长期形成的家庭养殖传统及随着人民生活水平需求提高,对肉、蛋、奶需求的增加有关;三是与经济利益驱动和政策的引导有明显的关系。德州市是一个传统种植业发达地区,优越区位条件和政策的引导,该市的蔬菜和家庭饲养业发展较快,已成为德州市农业产值的重要组成部分,也是农民经济收入的重要来源,也是今后重点扶持的产业。

2.3　农业生态系统能值相关指标分析

1998—2007 年,德州市农业生态系统年总能值使用量基本上呈现不断增长的趋势(表 3—4),工业辅助能值占总辅助能的比例较高。随着经济的发展和人口的持续增长,人们对农业提供的生态服务要求在提高。高质量的生态服务功能的实现,需要协调好自然、社会、经济和环境的工作,也需要物质能量做保障。

表 2 1998—2007 年德州市农业系统产出能值结构

项目		转换率/(sej·J⁻¹)	能值/sej									
			1998 年	1999 年	2000 年	2001 年	2002 年	2003 年	2004 年	2005 年	2006 年	2007 年
农产品 Y_1	小麦	68 000	2.48E+21	2.32E+21	2.44E+21	1.88E+21	5.75E+21	1.65E+21	1.74E+21	1.67E+21	2.32E+21	2.93E+21
	稻谷	83 000	6.51E+18	6.26E+18	8.17E+18	8.21E+18	4.08E+18	6.67E+18	6.28E+18	6.05E+18	4.86E+19	2.02E+18
	玉米	27 000	6.55E+20	8.13E+20	8.28E+20	6.74E+20	6.80E+20	6.39E+20	6.58E+20	8.47E+20	8.70E+20	1.11E+21
	谷子	27 000	1.61E+19	2.02E+19	1.53E+19	7.27E+18	3.26E+18	8.82E+18	7.7E+18	6.26E+18	1.25E+19	5.79E+18
	高粱	27 000	7.01E+18	1.05E+19	8.92E+18	5.59E+18	7.33E+18	6.16E+18	4.98E+18	3.65E+18	3.99E+18	3.69E+18
	其它谷物	27 000	1.22E+18	1.50E+18	8.80E+17	3.25E+17	1.83E+17	1.02E+17	2.57E+17	3.69E+16	1.74E+17	1.14E+17
	大豆	83 000	1.50E+20	1.58E+20	1.40E+20	1.08E+20	2.38E+19	7.71E+19	8.15E+19	7.26E+19	6.46E+19	5.49E+19
	杂豆	83 000	5.41E+18	4.77E+18	1.68E+18	3.25E+18	2.58E+18	2.82E+18	2.78E+18	2.38E+18	1.91E+18	2.26E+18
	薯类	83 000	2.03E+18	3.21E+18	3.67E+19	2.41E+19	6.52E+19	2.17E+19	1.87E+19	1.63E+19	1.05E+19	1.46E+19
	花生	1 900 000	9.02E+20	1.23E+21	2.62E+21	2.90E+21	1.11E+21	2.77E+21	2.29E+21	2.07E+21	1.52E+21	1.26E+21
	油菜籽	86 000	4.93E+18	7.60E+18	9.87E+18	2.69E+19	3.75E+19	2.66E+19	2.75E+19	1.12E+19	1.30E+19	1.15E+19
	芝麻	86 000	1.07E+18	1.33E+18	6.58E+18	1.19E+19	1.41E+18	1.69E+18	1.02E+18	6.45E+17	2.15E+17	4.05E+17
	向日葵	86 000	0.00E+00	2.28E+14	3.44E+14	4.88E+15	5.04E+13	6.24E+14	4.48E+14	1.35E+15	5.00E+14	3.94E+14
	棉花	1 900 000	1.35E+19	1.81E+21	1.81E+21	5.20E+21	2.45E+21	5.68E+21	7.22E+21	8.28E+21	6.41E+21	6.8E+21
	麻类	83 000	4.02E+18	2.92E+18	1.90E+18	5.82E+17	1.17E+18	1.53E+18	1.51E+18	7.31E+17	5.93E+17	5.91E+17
	蔬菜	27 000	2.36E+20	2.72E+20	2.72E+20	4.22E+20	6.41E+20	4.94E+20	4.5E+20	4.39E+20	3.68E+20	3.68E+20
	水果	530 000	1.09E+21	1.12E+21	1.12E+21	1.27E+21	1.22E+21	1.10E+21	1.22E+21	1.04E+21	1.15E+21	1.15E+21
	小计		5.57E+21	7.78E+21	9.32E+21	1.25E+22	1.20E+22	1.25E+22	1.37E+22	1.45E+22	1.28E+22	1.37E+22
畜产品 Y_2	猪肉	2 000 000	5.29E+21	4.36E+21	4.37E+21	4.80E+21	2.31E+21	6.11E+21	6.48E+21	8.23E+21	8.87E+21	9.83E+21
	牛肉	4 000 000	2.07E+21	1.86E+21	1.95E+21	2.17E+21	3.85E+21	2.01E+21	2.13E+21	2.64E+20	3.36E+20	3E+21
	羊肉	2 000 000	2.64E+20	2.24E+20	2.27E+20	2.83E+20	5.92E+20	3.18E+20	3.71E+20	3.9E+20	4.59E+20	3.26E+21
	驴肉	4 000 000	3.45E+18	7.84E+17	8.87E+17	8.94E+17	2.71E+18	2.44E+18	1.62E+18	1.19E+18	1.08E+18	4.52E+19
	禽肉	2 000 000	6.39E+20	4.48E+20	5.43E+20	5.63E+20	2.87E+20	6.31E+20	7.49E+20	1.09E+20	1.50E+20	1.04E+21
	禽蛋	4 000 000	7.55E+21	8.23E+21	8.16E+21	8.17E+21	6.21E+21	8.47E+21	9.74E+21	1.11E+21	1.12E+22	1.12E+22
	牛奶	1 710 000	1.21E+19	1.31E+19	1.36E+19	1.18E+19	1.58E+20	1.23E+20	1.59E+20	5.09E+19	6.33E+19	6.36E+19
	小计		1.58E+22	1.51E+22	1.53E+22	1.60E+22	8.94E+22	1.77E+22	1.96E+22	1.02E+22	2.10E+22	2.84E+22
水产品 Y_3		2 000 000	5.81E+19	6.29E+20	6.29E+20	6.95E+17	3.66E+20	7.95E+18	8.66E+20	1.04E+21	1.09E+21	1.09E+21
产出总量			2.14E+22	2.35E+22	2.52E+22	2.85E+22	1.02E+23	3.02E+22	3.42E+22	2.57E+22	3.49E+22	4.32E+22

表 3 1998—2007 年德州市农业系统能值流

项目		表达式	能值/sej									
			1998 年	1999 年	2000 年	2001 年	2002 年	2003 年	2004 年	2005 年	2006 年	2007 年
能值投入	可更新环境资源	R	4.38E+20	7.12E+20	4.65E+20	6.25E+20	4.65E+20	3.73E+20	7.80E+20	6.70E+20	5.33E+20	5.33E+20
	不可更新环境资源	N	2.15E+19	2.15E+19	2.15E+19	2.15E+19	2.15E+19	2.15E+19	2.15E+19	2.15E+19	2.15E+19	2.15E+19
	环境总能值	$I=R+N$	4.60E+20	7.34E+20	4.87E+20	6.47E+20	4.87E+20	3.95E+20	8.02E+20	6.92E+20	5.55E+20	5.55E+20
	工业辅助能	F	3.19E+21	3.08E+21	3.27E+21	3.32E+21	3.27E+21	3.70E+21	3.51E+21	3.60E+21	3.83E+21	4.51E+21
	可更新有机能	T	5.60E+18	1.53E+18	5.68E+18	5.59E+18	5.68E+18	5.76E+18	5.74E+18	5.73E+18	5.32E+18	5.34E+18
	总辅助能投入	$U=F+T$	3.20E+21	3.08E+21	3.28E+21	3.33E+21	3.28E+21	3.71E+21	3.52E+21	3.61E+21	3.84E+21	4.52E+21
	总能值投入	$E=I+U$	3.66E+21	3.82E+21	3.76E+21	3.97E+21	3.76E+21	4.10E+21	4.32E+21	4.30E+21	4.39E+21	5.07E+21
能值投入	农产品	Y_1	5.57E+21	7.78E+21	9.32E+21	1.25E+22	1.20E+22	1.25E+22	1.37E+22	1.45E+22	1.28E+22	1.37E+22
	畜产品	Y_2	1.58E+22	1.51E+22	1.53E+22	1.60E+22	8.94E+22	1.77E+22	1.96E+22	1.02E+22	2.10E+22	2.84E+22
	水产品	Y_3	5.81E+19	6.29E+20	6.29E+20	6.95E+17	3.66E+20	7.95E+18	8.66E+20	1.04E+21	1.09E+21	1.09E+21
	总辅助能产出	$Y=Y_1+Y_2+Y_3$	2.14E+22	2.35E+22	2.52E+22	2.85E+22	1.02E+23	3.02E+22	3.42E+22	2.57E+22	3.49E+22	4.32E+22

2.3.1 净能值产出率 净能值产出率为经济过程产生的能值量与来自经济过程的反馈输入能值的比值(反馈输入能值由燃料、劳务、货物等部分构成),表达式为:

$$NE_{YR}=(R+N+F+T)/(F+T)$$

式中:NE_{YR}——净能值产出率;R——可更新环境资源;N——不可更新环境资源;F——工业辅助能;T——可更新有机能。

通过比较净能值产出率,可更好地了解某一种资源是否具有竞争力和经济效益的大小。如果 NE_{YR} 小,说明该种资源的竞争力较弱,开发时产生的回报效益较低;反之,则竞争力较强,开发效益较高。

德州市农业系统的净能值产出率为 1.12~1.24(表 4),高于我国农业系统 1998 年的平均水平(0.27),略高于 1989 年日本(1.08)和意大利(1.12)数值,低于 2003 年广东(1.25)和 2004 年福建(1.88)的数值[13-14]。这表明,德州市的农业自然条件较优越,农业系统充分利用光照优势,增加复种指数,获得较高的资源利用率;但农业经营粗放,生产的集约化程度还不高;通过农业产业结构调整,加强科技投入,改进生产管理模式,降低生产成本,可进一步提高产品市场竞争力。

表 **4**　德州市农业系统能值指标体系(**1998—2007**)

能值指标	表达式	能值/sej									
		1998 年	1999 年	2000 年	2001 年	2002 年	2003 年	2004 年	2005 年	2006 年	2007 年
环境资源总能值/总能值	I/E	1.26E−01	1.92E−01	1.30E−01	1.63E−01	1.30E−01	9.63E−02	1.86E−01	1.61E−01	1.26E−01	1.09E−01
总辅助能/总能值	U/E	8.74E−01	8.06E−01	8.72E−01	8.39E−01	8.72E−01	9.05E−01	8.15E−01	8.40E−01	8.75E−01	8.92E−01
可更新环境能值/环境总能值	R/I	9.52E−01	9.70E−01	9.55E−01	9.66E−01	9.55E−01	9.44E−01	9.73E−01	9.68E−01	9.60E−01	9.60E−01
不可更新环境能值/总能值	N/E	5.87E−03	5.63E−03	5.72E−03	5.42E−03	5.72E−03	5.24E−03	4.98E−03	5.00E−03	4.90E−03	4.24E−03
工业辅助能值/总能值	F/E	8.72E−01	8.06E−01	8.70E−01	8.36E−01	8.70E−01	9.02E−01	8.13E−01	8.37E−01	8.72E−01	8.90E−01
可更新有机能/总能值	T/E	1.53E−03	4.01E−04	1.51E−03	1.41E−03	1.51E−03	1.40E−03	1.33E−03	1.33E−03	1.21E−03	1.05E−03
工业辅助能值/总辅助能值	F/U	9.97E−01	1.00E+00	9.97E−01	9.97E−01	9.97E−01	9.97E−01	9.97E−01	9.97E−01	9.97E−01	9.98E−01
可更新有机能/总辅助能值	T/U	1.75E−03	4.97E−04	1.73E−03	1.68E−03	1.73E−03	1.55E−03	1.63E−03	1.59E−03	1.39E−03	1.18E−03
净能值产出率	$(I+U)/U$	1.14E+00	1.24E+00	1.15E+00	1.19E+00	1.15E+00	1.11E+00	1.23E+00	1.19E+00	1.14E+00	1.12E+00
能值投资率	F/I	6.93E+00	4.20E+00	6.71E+00	5.13E+00	6.71E+00	9.37E+00	4.38E+00	5.20E+00	6.90E+00	8.13E+00
环境负载率	$(F+N)/(R+T)$	7.24E+00	4.35E+00	6.99E+00	5.30E+00	6.99E+00	9.83E+00	4.49E+00	5.36E+00	7.15E+00	8.42E+00
Y 与 E 的比值	Y/E	5.85E+00	6.15E+00	6.70E+00	7.18E+00	2.71E+01	7.37E+00	7.92E+00	5.98E+00	7.95E+00	8.52E+00
环境承载力	$(U+N)/R$	7.36E+00	4.36E+00	7.10E+00	5.36E+00	7.10E+00	1.00E+01	4.54E+00	5.42E+00	7.24E+00	8.52E+00
可持续发展指数	E_{YR}/E_{LR}	1.96E−01	2.01E−01	1.71E−01	1.66E−01	4.23E−02	1.50E−01	1.55E−01	1.99E−01	1.44E−01	1.32E−01

2.3.2　能值投资率　能值投资率为来自经济活动的反馈能与本区域能值输入的比值,表达式为:

$$E_{IR}=F/(R+N)$$

式中:E_{IR}——能值投资率;R——可更新环境资源;N——不可更新环境资源;F——工业辅助能。

E_{IR} 指标是衡量开发单位资源而需要的能值投入。如果经济系统的运行主要依赖于本地资源,则比率较小。当比其它竞争者无偿从环境中获取较多能量时,这一比值也会较低。但太低的能值投资率将不利于吸引域外资金,进而影响本地资源的开发。当这一比值较大时,几乎所有的投入都是有偿的,价格上涨,系统的竞争力较低。E_{IR} 指数大小常受到政治或社会经济因素制约。

德州市农业系统能值投资率为 4.20~9.37(表 4),低于意大利(8.52)和日本(14.03),高于国内平均水平(4.93)[13-14]。说明德州市农业生态系统的维持、持续性发展对社会经济系统投入的依赖程度逐步增加,特别是对工业辅助能值(机械、电力、化肥等)和科技的投入的需求在增加。

2.3.3　环境负载率　环境负载率为购买的和非更新的本地能值与无偿的环境能值(可更新资源能值)之间的比值,其表达式为:

$$E_{LR}=(F+T+N)/R$$

式中:E_{LR}——环境负载率;F——工业辅助能;T——可更新有机能;N——不可更新环境资源;R——可更新环境资源。

环境承载是以水、土、能、生物、地球化学循环为主体的自然生态过程,与以生产、流通、消费、还原、调控为主流的经济生态过程和以人的科技、体制、文化为主线的社会生态过程在时、空、量、构、序范畴的生态耦合关系和推进以整体、协同、循环、自生为基础的生态规划、生态工程与生态管理的总体表现。E_{LR} 较大表明在经济系统中存在高强度的能值利用,同时对环境系统保持着较大压力。若系统长期处于较高的环境负载率,将产生不可逆转的功能退化或丧失。从能值分析角度来看,外界大量的能值输入以及过度开发本地非更新资源是引起环境系统恶化的主要原因。

德州市农业系统的环境负载率为 4.36~8.52(表

4),低于发达国家日本 1989 年的数值(14.49),比国内 1998 年的平均值(2.80)[12] 和广东 2003 年(1.70)高,研究时段为增加的趋势。表明德州市农业系统对环境和资源的压力较大,反映了德州市自然、社会、经济系统还不够协调,农业整体发展水平还不高,环境资源系统效益不高,应通过加快生态农业建设和资源环境管理,提高资源的利用效率。今后农业发展要注意水土保持,加大有机肥还田和新科技的应用,以提高系统生产效率。

2.3.4 可持续发展性指数 可持续发展指数是净能值产出率与环境负载率的比值,表达式为:

$$E_{SI} = NE_{YR} / E_{LR}$$

式中:E_{SI} ——为系统可持续发展性指数;NE_{YR} ——为净能值产出率;E_{LR} ——为环境负载率。

一个国家或地区的农业生态经济系统能值产出率高而环境负载率又相对较低,则它是可持续的;反之是不可持续的。E_{SI} 值在 1 和 10 之间表明系统富有活力和发展潜力,$E_{SI}>10$ 则是持续性不强;当 $E_{SI}<1$ 时,为消费型经济系统。

1998—2007 年,德州市可持续发展能值指数在 0.042~0.21 上下震荡(表 4)。说明德州市德州市农业生态系统为消费型经济系统,生产和管理过程的科技含量较低,需要购买的能值较大,农业经济有一定的脆弱性,未来农业经济系统对环境的压力较大。近几年德州市化肥施用量为 526.87 kg/hm^2,已大大高出全国平均水平(417.91 kg/hm^2),存在过量施肥、单一施肥、欠量施肥的现象。

大量增加化肥施用量和施肥的不均衡性,加速土壤有机质损耗,降低农业生态系统服务功能,也污染了农田土壤环境。农业灌溉用水占 80%以上,年缺水达 1.64×10^9 m^3,年引黄河 1.8×10^9 m^3,仍面临水资源不足的局面。同时该市农业生产灌溉面临来自境内河流上游的污水、城镇工业污水和城镇生活废水的影响,农业生态系统持续性发展面临着人类需求和生态系统需求间的矛盾。

3 结 论

(1) 1998—2007 年德州市农业生态系统年总能值投入量为 3.20E+21~4.52E+21 sej 之间,并呈现不断增长的趋势,工业辅助能值占总投入量的 80.6%~90.2%,也呈上升趋势。可更新环境资源的能值投入占总投入量的 9.1%~18.6%,其中雨水化学能形成的能值量最大。可更新资源产品能值投入中劳动力的能值量最大。德州市属于农业灌溉区,自然降水与黄河水的引入对区域农业生产非常重要。随着经济的发展,人们对农业提供的生态服务要求不断提高,高质量的生态服务功能的实现,需要协调好自然、社会、经济和环境的工作。

(2) 德州市农业生态系统能值产出总量在 2.14E+22~1.02E+23 sej 之间,研究时段,畜牧业平均占 62.4%、种植业占 35.8%、渔业占 1.8%,畜牧业能值比例已超过作物种植业,渔业所占能值比例较小。农业经济的结构已发生明显变化,蔬菜和家庭饲养业已成为该市农业产值的重要组成部分。

(3) 从农业生态系统能值相关指标分析看,德州市农业系统的净能值产出率为 1.12~1.24,农业系统能值投资率为 4.20~9.37,可持续发展能值指数在 0.042~0.21 之间。表明德州市的农业自然条件较为优越,农业系统充分利用光照优势,资源利用率较高;但该市农业经营粗放,生产的集约化程度还不高,农业系统对环境和资源的压力较大,农业生态系统的维持、持续性发展对社会经济系统投入的依赖程度逐步增加。通过农业产业结构调整,加强科技投入,改进生产管理模式,降低生产成本,提高系统生产效率,可进一步提高产品市场竞争力。

(4) 通过对德州市农业生态系统能值动态变化分析,农业生态系统维持发展的驱动力因素可分为自然和社会经济两个方面。自然驱动包括气候、土壤、水文等自然要素的变化;社会经济驱动包括人口变化、技术改革、经济发展水平与政策等。社会行为驱动主要是人类通过农业产业结构调整,改变农业生产模式,来改变农业生态环境;同时为保证一定的基本的食物供给,需要保持一定数量耕地、并进行传统粮食生产。现代农业生态系统是为满足人类的生态、社会和经济目标而刻意创造的综合型系统,农业生态系统持续性发展取决于我们如何充分的理解和有效地管理农业生态体系中的社会及生态因素,提高资源环境的承载力。

(5) 基于以上研究和思考,德州市维持未来农业生态系统的可持续性发展具体措施为:① 转变经济增长方式,变要素投入增长为效率提高增长,大力提高作物秸秆等有机肥的还田率,提高产品的品质;② 积极增加劳动力的智力资源能值投入,调整工业辅助能投入,提高能值受益率;③ 发展节水灌溉农业,加强生态建设,在传统农业技术的基础上,结合现代农业的特点,推广成熟的生态农业技术模式,发展农业生态工程技术,探索建立多层次、高功能的生态农业模式,处理好经济发展和环境保护之间的关系,增强农业生态系统的服务功能。

(下转第 246 页)

[10] 曹顺爱, 吴次芳, 余万军. 土地生态服务价值评价及其在土地利用布局中的应用: 以杭州市萧山区为例[J]. 水土保持学报, 2006, 20(2): 197-200.
[11] 陈士银, 刘耀林, 周飞. 湛江市土地利用结构及生态服务价值研究[J]. 地理与地理信息科学, 2007, 23(3): 83-86.
[12] 王秀兰, 包玉海. 土地利用动态变化研究方法探讨[J]. 地理科学进展, 1998, 10(5): 51-54.
[13] 刘纪远. 西藏自治区土地利用[M]. 北京: 科学出版社, 1992.
[14] 刘坚, 黄贤金, 赵彩艳, 等. 江苏省城市化发展与土地利用程度变化相关性研究[J]. 水土保持研究, 2006, 13(2): 198-201.
[15] 陈仲新, 张新时. 中国生态系统效益的价值[J]. 科学通报, 2000, 45(1): 17-19.
[16] 谢高地, 张镱锂, 鲁春霞, 等. 中国自然草地生态系统服务价值[J]. 自然资源学报, 2001, 16(1): 49-51.
[17] Per B, Sven H. Ecosystem services in urban areas[J]. Ecological Economics, 1999, 29: 293-301.
[18] Howarth R B, Farber S. Accounting for the value of ecosystem services[J]. Ecological Economics, 2002, 41: 421-429.
[19] Amitrajeet A, Batabyal, James R, et al. On the scarcity value of ecosystem services[J]. Journal of Environmental Economics and Management, 2003, 46: 334-352.
[20] 于兴修, 高华中. 城市及边缘区土地利用变化研究: 以临沂市为例[J]. 地域研究与开发, 2003, 22(2): 47-51.
[21] 曹银贵, 王静, 刘正军, 等. 三峡库区近 30 年土地利用时空变化特征分析[J]. 测绘科学, 2007, 20(6): 58-62.
[22] 谢高地, 肖玉, 鲁春霞. 生态系统服务研究: 进展、局限和基本范式[J]. 植物生态学报, 2006, 30(2): 191-199.
[23] 杨光梅, 李文华, 闵庆文. 生态系统服务价值评估研究进展: 国外学者观点[J]. 生态学报, 2006, 26(1): 205-212.

(上接第 240 页)

[参 考 文 献]

[1] Palmer M, Morse J, Bernhardt E, et al. Ecological science and sustainability for a crowded planet[J]. Science, 2004, 304: 1251-1252.
[2] Lu H F, Ye Z, Zhao X F, et al. A new emergy index for urban sustainable development[J]. Acta Ecological Sinica, 2003, 23(7): 1363-1368.
[3] Odum H T. Environmental accounting: Emergy and environmental decision making[M]. New York: John Wiley, 1996: 1-5.
[4] 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.
[5] 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.
[6] 严茂超, 李海涛, 程鸿. 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.
[7] 严茂超, 奥德姆 H T. 西藏生态经济系统的能值分析与可持续发展研究[J]. 自然资源学报, 1998, 13(2): 116-125.
[8] 刘新茂, 蓝盛芳, 陈飞鹏. 广东省种植业系统能值分析[J]. 华南农业大学学报, 1999, 20(4): 111-115.
[9] 董孝斌, 高旺盛. 黄土高原丘陵沟壑区典型县域的能值分析[J]. 水土保持学报, 2003, 17(1): 89-92.
[10] Lu H F, Campbell D E. Ecological economic dynamics of the agricultural system under China's small city development policy: A case study of the Shunde agricultural system[J]. Journal of Environmental Management. 2009, 90: 2589-2600.
[11] 陆宏芳, 沈善瑞, 陈洁, 等. 生态经济系统的一种整合评价方法: 能值理论与分析方法[J]. 生态环境, 2005, 14(1): 121-126.
[12] 张耀辉, 蓝盛芳. 海南省资源环境与可持续发展的能值分析[J]. 生态科学, 1998, 17(2): 121-122.
[13] 张耀辉, 蓝盛芳, 陈飞鹏. 海南省农业能值分析[J]. 农村生态环境, 1999, 15(1): 5-9.
[14] 刘新茂, 蓝盛芳, 陈飞鹏. 广东省种植业系统能值分析[J]. 华南农业大学学报, 1999, 20(4): 111-115.