

ISSN 1000-0933
CN 11-2031/Q

生态学报

Acta Ecologica Sinica



第32卷 第18期 Vol.32 No.18 **2012**

中国生态学学会
中国科学院生态环境研究中心
科学出版社

主办
出版



中国科学院科学出版基金资助出版

生态学报

(SHENGTAI XUEBAO)

第 32 卷 第 18 期

2012 年 9 月 (半月刊)

目 次

亚热带典型树种对模拟酸雨胁迫的高光谱响应.....	时启龙,江 洪,陈 健,等 (5621)
珠江三角洲地面风场的特征及其城市群风道的构建.....	孙 武,王义明,王越雷,等 (5630)
粤北山地常绿阔叶林自然干扰后冠层结构与林下光照动态.....	区余端,苏志尧 (5637)
四种猎物对南方小花蝽生长发育和繁殖的影响.....	张昌容,鄧军锐,莫利锋 (5646)
普洱季风常绿阔叶林次生演替中木本植物幼苗更新特征.....	李帅锋,刘万德,苏建荣,等 (5653)
喀斯特常绿落叶阔叶混交林物种多度与丰富度空间分布的尺度效应.....	张忠华,胡 刚,祝介东,等 (5663)
格氏栲天然林土壤养分空间异质性.....	苏松锦,刘金福,何中声,等 (5673)
种植香根草对铜尾矿废弃地基质化学和生物学性质的影响.....	徐德聪,詹 婧,陈 政,等 (5683)
灌溉对三种荒漠植物蒸腾耗水特性的影响.....	单立山,李 毅,张希明,等 (5692)
真盐生植物盐角草对不同氮形态的响应.....	聂玲玲,冯娟娟,吕素莲,等 (5703)
鹿泉沟自然保护区寒温性针叶林演替优势种格局动态分析.....	张钦弟,毕润成,张金屯,等 (5713)
不同水肥条件下 AM 真菌对丹参幼苗生长和营养成分的影响.....	贺学礼,马 丽,孟静静,等 (5721)
垄沟覆膜栽培冬小麦田的土壤呼吸.....	上官宇先,师日鹏,韩 坤,等 (5729)
不同方式处理牛粪对大豆生长和品质的影响.....	郭立月,刘雪梅,战丽杰,等 (5738)
基于大气沉降与径流的乌鲁木齐河源区氮素收支模拟.....	王圣杰,张明军,王飞腾,等 (5747)
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.....	钟珍梅,翁伯琦,黄勤楼,等 (5755)
低温暴露和恢复对棘胸蛙雌性亚成体生存力及能量物质消耗的影响.....	凌 云,邵 晨,颜志刚,等 (5763)
暗期干扰对棉铃虫两个不同地理种群滞育抑制作用的比较.....	陈元生,涂小云,陈 超,等 (5770)
水土流失治理措施对小流域土壤有机碳和全氮的影响.....	张彦军,郭胜利,南雅芳,等 (5777)
不同管理主体对泸沽湖流域生态系统影响的比较分析.....	董仁才,苟亚青,李思远,等 (5786)
连江鱼类群落多样性及其与环境因子的关系.....	李 捷,李新辉,贾晓平,等 (5795)
溶氧水平对鲫鱼代谢模式的影响.....	张 伟,曹振东,付世建 (5806)
象山港人工鱼礁区的网采浮游植物群落组成及其与环境因子的关系.....	江志兵,陈全震,寿 鹿,等 (5813)
填海造地导致海湾生态系统服务损失的能值评估——以套子湾为例.....	李睿倩,孟范平 (5825)
城市滨水景观的视觉环境质量评价——以合肥市为例.....	姚玉敏,朱晓东,徐迎碧,等 (5836)
专论与综述	
生态基因组学研究进展.....	施永彬,李钧敏,金则新 (5846)
海洋酸化生态学研究进展.....	汪思茹,殷克东,蔡卫君,等 (5859)
纺锤水蚤摄食生态学研究进展.....	胡思敏,刘 胜,李 涛,等 (5870)
河口生态系统氨氧化菌生态学研究进展.....	张秋芳,徐继荣,苏建强,等 (5878)
嗜中性微好氧铁氧化菌研究进展.....	林超峰,龚 骏 (5889)
典型低纬度海区(南海、孟加拉湾)初级生产力比较.....	刘华雪,宋星宇,黄洪辉,等 (5900)
植物叶片最大羧化速率及其对环境因子响应的研究进展.....	张彦敏,周广胜 (5907)
中国大陆鸟类栖息地选择研究十年.....	蒋爱伍,周 放,覃 玥,等 (5918)
研究简报	
孵化温度对赤链蛇胚胎代谢和幼体行为的影响.....	孙文佳,俞 霄,曹梦洁,等 (5924)
不同培肥茶园土壤微生物量碳氮及相关参数的变化与敏感性分析.....	王利民,邱珊莲,林新坚,等 (5930)
施肥对两种莧菜吸收积累镉的影响.....	李凝玉,李志安,庄 萍,等 (5937)

期刊基本参数:CN 11-2031/Q * 1981 * m * 16 * 322 * zh * P * ¥70.00 * 1510 * 36 * 2012-09



封面图说: 冬天低空飞翔的丹顶鹤——丹顶鹤是鹤类中的一种,因头顶有“红肉冠”而得名。是东亚地区特有的鸟种,因体态优雅、颜色分明,在这一地区的文化中具有吉祥、忠贞、长寿的象征,是传说中的仙鹤,国家一级保护动物。丹顶鹤具备鹤类的特征,即三长——嘴长、颈长、腿长。成鸟除颈部和飞羽后端为黑色外,全身洁白,头顶皮肤裸露,呈鲜红色。丹顶鹤每年要在繁殖地和越冬地之间进行迁徙,只有在日本北海道等地是留鸟,不进行迁徙,这可能与冬季当地人有组织地投喂食物,食物来源充足有关。

彩图提供: 陈建伟教授 北京林业大学 E-mail: cites.chenjjw@163.com

DOI: 10.5846/stxb201108101175

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.

Zhong Z M, Weng B Q, Huang Q L, Huang X S, Chen Z D, Feng D Q. Evaluating the ecosystem sustainability of circular agriculture based on the emergy theory: a case study of the Xingyuan circular agriculture demonstration site in Fuqing City, Fujian. Acta Ecologica Sinica, 2012, 32(18): 5755-5762.

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

钟珍梅, 翁伯琦*, 黄勤楼, 黄秀声, 陈钟佃, 冯德庆

(福建省农科院农业生态研究所 福建省丘陵地区循环农业工程技术研究中心, 福州 350003)

摘要: 循环农业是当前农业可持续发展理念的具体运作模式。对能值分析方法优化, 使其更适合循环复合生态系统的应用上进行优化, 并以福建省福清星源循环农业产业示范基地为例验证, 评价复合生态系统的可持续发展程度和经济效益。结果表明改进的能值分析方法对循环复合农业生态系统的可持续发展评价更科学, 复合系统的可持续发展指数比单纯的生猪养殖提高 23.44%—33.86%, 在 4 种组合的循环模式中以“生猪养殖-沼气工程-有机肥生产-种植业”循环复合生态系统整体效益最佳, 其可持续发展指数最高, 环境负载率最低, 净能值产出率略低于“生猪养殖-沼气工程-种植业”复合系统。

关键词: 循环复合生态系统; 能值分析; 发展评价; 经济效益

Evaluating the ecosystem sustainability of circular agriculture based on the emergy theory: a case study of the Xingyuan circular agriculture demonstration site in Fuqing City, Fujian

ZHONG Zhenmei, WENG Boqi*, HUANG Qinlou, HUANG Xiusheng, CHEN Zhongdian, FENG Deqing

Agricultural Ecology Institute, Fujian Academy of Agricultural Sciences, Fujian Engineering and Technology Research Center for Circular Agriculture Fuzhou, Fujian 350003, China

Abstract: Since the introduction of the Circular Economy in the 1990s, the management practice of circular agriculture has been rapid advancement. Based on the principles of sustainable agricultural development, circular agriculture has been the subject of numerous reports, which have evaluated and studied the development of this new agricultural practice at different scales. However, one of the most widely used methods of accounting for different forms of energy and resources—the emergy theory—has yet to be employed in evaluating circular agriculture. Emergy describes one kind of available energy that is used up in transformation, directly or indirectly, to make a product. It measures quality differences between forms of energy that are generated by transformation processes in nature, and that support work in natural or human dominated systems. In this study, the emergy analysis method was partly modified and specifically tailored for circular agriculture systems, and then used to evaluate the sustainability and economic benefits of ecosystem development. To validate the feasibility and quality of the improved emergy analysis method, we conducted assessments in four complex circular systems at Xingyuan circular agriculture demonstration site in the city of Fuqing, Fujian Province. We found that total production input could be substantially overestimated under the traditional emergy theory, as the systematic feedback emergy was accounted into total inputs. Further, the environmental stresses from the tremendous amount of wastes generated in the studied systems were not

基金项目: 国家科技支撑资助项目 (2012BAD14B15, 2011BAD17B00, 2012BAD14B03-05)

收稿日期: 2011-08-10; 修订日期: 2012-02-22

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: boqi.weng@yahoo.com.cn

considered in the traditional emergy theory, and as a result, the sustainability of the conventional ‘pig-only’ farm was estimated to be 2.8%—11.52% higher than that of the studied circular systems. In contrast, the improved emergy analysis method could evaluate the sustainability of the circular systems more efficiently and accurately, as the most important advantage of circular agriculture—decreasing the total inputs and reducing environmental stresses by converting the systematic wastes into renewable resources—were factored into the new analysis. Furthermore, the improved emergy theory recognized the circular system as a whole by carefully defining the boundary conditions and energy fluxes in and out of the system, which reflects the real production processes both by design and in practice. According to our evaluation using the improved emergy method, the emergy sustainable indices (*ESI*) of the circular systems were improved by 23.44%—33.86% compared to that of conventional pig farming. The circular system of ‘pig farm-biogas system-compost production-cultivation’ had the highest overall benefit among the four circular systems, as demonstrated by the highest *ESI*, lowest environment load ratio (*ELR*), and second highest emergy yield ratio (*EYR*), which was only slightly smaller than that of the circulating system of ‘pig farm-biogas system-cultivation’. The circular agricultural system is essentially an interactive combination of multiple sub-systems. Its ecological benefits should be measured by the system efficiency rather than the length of the production chain. This is supported by our evaluation using the modified emergy theory: the ‘pig farm-fire damp-compost production-mushroom farm-cultivation’ system, with the longest chain in all four studied systems, had the least ecological benefits. Further investigations into the model efficiency are required to improve flexibility and applicability of the improved emergy theory in larger areas or more complex systems.

Key Words: complex circular ecosystem; emergy analysis; sustainability evaluation; economic benefit

1966 年美国生态经济学家鲍尔丁提出“用循环使用各种资源的循环式经济代替单程式经济”的观点,循环经济的理念由此诞生^[1]。经多年的发展实践,作为可持续发展的具体运作模式,循环经济已被许多国家接受和实践应用^[2-3]。我国至 20 世纪 90 年代引入循环经济的理念,并逐步把它运用到农业生产中,形成一些有特色的循环农业经济模式。农业生态经济系统包括种植业、林业、畜牧业、渔业及其延伸的农产品加工业、贸易与服务业等子系统,这些子系统相互联系、相互交错、协同发展,各子系统之间通过物质、能量的交换、转化和循环,紧密地结合成一个有机循环整体^[4]。目前,已有学者开展循环农业生态系统评价,既有从大尺度对区域循环经济的评价^[5-8],也有对小规模循环经济模式的评价^[9],但是运用能值分析方法对小规模循环复合生态系统的评价目前尚未见报道。

“能值”理论是 20 世纪 80 年代美国著名系统生态学家 H. T. Odum 为首创立的^[10],其是以自然价值为基础,将系统中各种生态流和经济流转换为能值,对自然环境生产与人类经济活动进行统一评价,定量分析系统结构、功能与生态经济效益的一种方法^[11]。经近 20 年的发展,能值分析已广泛应用于自然生态系统、农业生态系统、工业生产系统、城市生态系统以及区域生态系统发展可持续性的分析、评价与比较^[12]。但能值分析方法在实际应用中还有一定的局限性,还存在能值转换率计算、复合系统投入能值流重复计算等问题^[13]。本文在传统能值方法基础上优化,探讨适合复合循环生态系统的能值分析方法,并以福建省福清星源循环农业产业示范基地为例验证,评价复合生态系统的可持续发展程度和经济效益,以期能为能值方法的完善和循环农业的发展提供科学依据。

1 研究方法

1.1 研究区概括

本研究对象为福清市星源循环农业产业化示范基地生态系统。该基地位于福清市龙山街道先强村,距福清市区 13 km,北纬 25°42′,东经 119°27′,系统总占地面积 30.15 hm²,其中种植面积 22.78 hm²。研究区年太阳辐射 4.297×10⁹ J/km²,年平均气温 19.6℃,年平均降雨量 1697.4 mm,当地径流年平均值 200 mm。研究区系统以生猪养殖为平台,养殖场废弃物干湿分离,猪粪渣用来栽培食用菌和生产有机肥,污水经沼气工程厌

氧发酵消纳,污水厌氧发酵后的沼气用于产热和发电,沼渣、沼液用来浇灌牧草、甘蓝、玉米等,形成物质多级循环利用、废弃物资源化循环利用的循环复合生态系统。

1.2 资料收集与数据处理方法

通过实地调查与资料收集的方法获得整年度系统能值分析的原始数据,能值转化率参考相关文献^[14-17]。

1.3 研究方法

1.3.1 传统的生态系统能值分析方法

能值分析方法是以能量为核心的系统分析方法,它以能值为量纲,把系统内所有的资源、产品和劳务的价值等用其在形成过程中所需直接和间接消耗的太阳能来衡量,单位为太阳能焦耳(solar emjoules, sej)。系统能值分析主要包括投入和产出能值(Y)分析、系统能值指标分析等,能值投入主要有自然资源投入(可更新 R 和不可更新 N)、社会购买能值投入(可更新有机能 T 和不可更新工业能 F),在此基础上建立能值指标体系。农业生态系统常用的能值指标有净能值产出率(EYR)、环境负载率(ELR)、可持续发展指标(ESI)及适合于复合生态系统的指标:系统稳定性指数(s)^[14]。

(1) 能值产出率(EYR),系统能值总产出与社会经济反馈能值投入之比,表达式为:

$$EYR = Em_Y / (Em_F + Em_T) \quad (1)$$

(2) 环境负载率(ELR),系统不可更新能值投入总量与可更新能值投入总量的比值,表达式为:

$$ELR = (Em_F + Em_N) / (Em_R + Em_T) \quad (2)$$

(3) 可持续发展指标(ESI),能值产出率与环境负载率的比值,其表达式为:

$$ESI = EYR / ELR \quad (3)$$

(4) 系统稳定性指数(s)^[14,18],表示系统生产稳定性的指标,稳定性越高,则说明系统的物质流、能量流连接网络越发达,系统的自控、调节、反馈作用越强,其表达式为:

$$S = - \sum_{i=1}^n (Em_{Y_i} / Em_Y) \ln (Em_{Y_i} / Em_Y) \quad (4)$$

式中, Em_{Y_i} 表示第 i 个子系统的能值产出, Em_Y 表示系统能值总产出。

1.3.2 循环复合农业生态系统的能值分析方法

研究区系统是一个集养殖业、种植业、加工业等多产业复杂的复合生态系统,系统内资源多级利用,废弃物资源化循环利用。研究区系统能值投入除了自然资源投入和社会反馈投入外,还有一部分投入来自系统内部,其中很大部分是系统废弃物,而产出能值除了流入市场外,还有一部分反馈回系统。因此,在公式(1)——(4)的基础上进一步细化,对部分能值指标的计算完善和优化,建立一套适合复合循环农业生态系统的能值分析方法和能值指标体系。

(1) 能值产出率(Energy yield ratio, EYR)

由于废弃物对生产、环境、效益等方面的影响表现为负面效应,将其设定为负产出,其它设定为正产出。研究区各子系统能值产出可分为3部分,其一为正产出中流出系统外进入市场部分,其二为正产出中在系统内其它子系统再次循环利用部分,其三为废弃物(负产出)。由于第二部分产出未进入市场流通,仅作为生产资料在全系统内再次利用,不可将其归并入总产值中,而第三部分产出对能值产出率为负贡献,因此在公式(1)的基础上将能值产出率指标的计算优化为系统总产出能值减去反馈回系统的部分和废弃物后与社会购买能值投入之比:

$$EYR = \sum_{i=1}^n (Y_i - f_i' - W_i) / \sum_{i=1}^n (F_i + T_i - f_i) \quad (5)$$

式中, Y_i 表示复合生态系统中单一子系统 i 的能值产出(sej/a), f_i' 表示子系统 i 产出反馈回系统内某个子系统的能值, W_i 表示复合生态系统中单一子系统 i 排放到整个系统外的废弃物能值(sej/a), F_i 表示单一子系统 i 不可更新工业辅助能投入, T_i 表示单一子系统 i 可更新有机能投入, f_i 表示某个子系统反馈输入到子系统 i 的能值(sej/a)。

(2)环境负载率(ELR)

由于废弃物对环境的影响是负面的,即对环境负载率的贡献为正值,因此在公式(2)的基础上将环境负载率指标的计算优化为不可更新能值投入和排放废弃物能值之和与可更新能值投入的比值,表示系统生产过程对环境造成的压力大小:

$$ELR = \sum_{i=1}^n (Ni + Fi + Wi) / \sum_{i=1}^n (Ri + Ti') \tag{6}$$

式中, Ni 表示单一子系统 i 不可更新自然资源能值投入, Ri 表示单一子系统 i 可更新自然资源能值投入, Ti' 表示单一子系统 i 来自社会可能新能值投入。

(3)可持续发展指数(ESI)

能值产出率与环境负载率的比值,其表达式如公式(7)所示:

$$ESI = EYR/ELR \tag{7}$$

(4)系统稳定性指数(S)

本指标是衡量复合生态系统生产稳定性大小的指标,计算过程中同样把总产出分为 3 部分,在公式(4)的基础上优化:

$$S = - \sum_{i=1}^n [(Yi - fi' - Wi)/(Y - f' - W)] \ln [(Yi - fi' - Wi)/(Y - f' - W)] \tag{8}$$

式中, Y 表示复合生态系统能值总产出, f' 表示复合生态系统中总产出能值反馈回系统的部分, W 表示复合生态系统总产出的废弃物能值部分。

1.4 复合生态系统中子系统的组合方案

研究区“生猪养殖-沼气工程-固废处理-沼液利用”复合生态农业系统包括 4 个子系统,其中固废处理子系统属增益链,包括有机肥生产和食用菌栽培,在实际生产中各子系统可通过不同的组合形成不同的循环农业模式,一种循环农业模式构成一个循环复合生态系统。本研究将 4 个子系统按不同方式组合,形成 4 种组合方案(表 1),以生猪养殖子系统为对照,比较 4 种组合方式下形成的复合生态系统的可持续性、系统稳定性和经济效益。

表 1 按不同循环方式组合子系统的方案表
Table 1 Combined projects of subsystem by different circular mode

方案序号 Treatment number	组合方案 Treatment	备注 Remarks
对照 Control	生猪养殖	生猪养殖产生的猪粪尿不在系统内处理
1	生猪养殖+沼气工程+种植业	猪粪尿经干湿分离,污水经过沼气工程,沼液作为种植业灌溉水,猪粪渣和沼渣不在系统内处理
2	生猪养殖+沼气工程+食用菌种植+种植业	猪粪尿经干湿分离,污水经过沼气工程,沼液作为种植业灌溉水,猪粪渣和沼渣全部用于食用菌栽培原料
3	生猪养殖+沼气工程+有机肥生产+种植业	猪粪尿经干湿分离,污水经过沼气工程,沼液作为种植业灌溉水,猪粪渣和沼渣全部用于生产有机肥
4	生猪养殖+沼气工程+有机肥生产+食用菌种植+种植业	猪粪尿经干湿分离,污水经过沼气工程,沼液作为种植业灌溉水,猪粪渣和沼渣全部按不同比例分别用于生产有机肥和栽培食用菌

1.5 数据统计

所有数据均通过 Excel 计算和处理。

2 结果分析

2.1 子系统投入产出能值分析

各子系统之间物质循环如下:生猪养殖每年产废弃物干湿分离后产猪粪渣、污水(尿液和冲栏水)1.79×

10^{17} sej、 1.31×10^{18} sej, 污水进入沼气工程环节, 经厌氧发酵后年产沼液和沼渣分别为 6.34×10^{17} sej 和 7.65×10^{17} sej, 其中 29.18% (1.85×10^{17} sej) 的沼液反馈到种植业, 27.40% 猪粪渣反馈到食用菌栽培系统, 72.60% 猪粪渣和所有的菌渣、沼渣反馈到有机肥系统, 仅有 0.91% (8.72×10^{15} sej) 有机肥反馈到种植业系统, 其它的流入市场(图 1)。

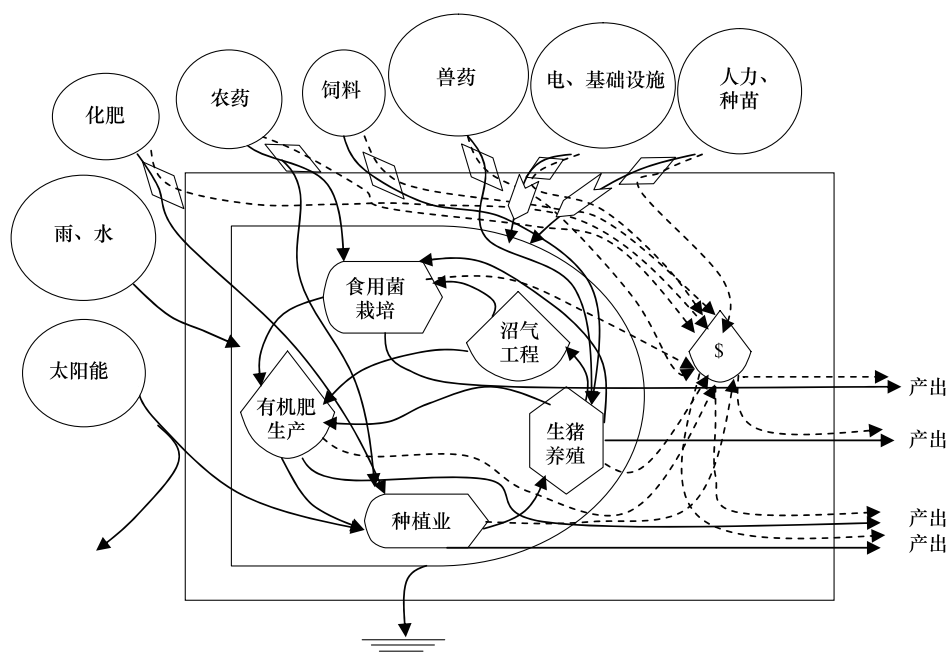


图 1 循环复合生态系统能值流图

Fig. 1 The energy flow diagram of combined ecosystems

根据实际生产中的数据计算出各子系统能值投入和产出, 进而计算出各子系统的能值流。可更新有机能分为两部分, 一部分来自系统外 (T'), 即社会购买能值, 另外一部分由其他子系统反馈投入 (f)。总产出能值 (Y) 分为三部分, 一部分反馈回系统 (f'), 一部分为系统的废弃物产出 (W), 剩余部分为系统产出能值 (Y')。然后按表 1 的 5 种组合计算, 结果如表 2 所示。

表 2 5 种组合的复合生态系统能值流汇总表/sej

Table 2 The energy flows of five kinds of combined ecosystems

项目 Items	对照 Control	1	2	3	4
可更新自然资源(R) Renewable natural source	1.79×10^{16}	1.87×10^{16}	1.87×10^{16}	1.87×10^{16}	1.87×10^{16}
不可更新自然资源(N) Nonrenewable natural source	—	4.14×10^{14}	1.31×10^{16}	4.14×10^{14}	1.31×10^{16}
不可更新工业能(F) Nonrenewable industrial energy	2.55×10^{18}	2.93×10^{18}	3.07×10^{18}	3.16×10^{18}	3.30×10^{18}
外界投入的可更新有机能(T') Renewable organic energy from the outside	6.70×10^{18}	7.23×10^{18}	7.45×10^{18}	7.37×10^{18}	7.58×10^{18}
系统反馈投入的可更新有机能(f) Feedback organic energy from the inside	3.88×10^{16}	1.53×10^{18}	1.58×10^{18}	1.98×10^{18}	2.03×10^{18}
总可更新有机能(T) The total organic energy	6.74×10^{18}	8.76×10^{18}	9.03×10^{18}	9.35×10^{18}	9.60×10^{18}
产出能值(Y') Output energy	6.38×10^{19}	6.83×10^{19}	6.88×10^{19}	6.98×10^{19}	7.04×10^{19}
产出能值反馈回系统的部分(f') Output energy fed back systems	—	2.31×10^{18}	2.31×10^{18}	2.31×10^{18}	2.31×10^{18}
废弃物能值(W) The waste energy	1.49×10^{18}	1.79×10^{17}	1.35×10^{15}	—	—

2.2 两种能值分析方法的比较

将表 2 所得的数据根据表 1 的 5 种方式组合后再根据公式(1)—(8)计算, 结果如表 3 所示。用两种方法计算所得的复合生态系统净能值产出率 (EYR) 和环境负载率 (ELR) 均低于生猪养殖系统, 而用传统的能值

分析方法计算可持续发展指数最高的为生猪养殖系统,其次为“生猪养殖-沼气工程-种植业”复合生态系统,最低的为“生猪养殖-沼气工程-有机肥生产-食用菌栽培-种植业”复合系统,说明传统的能值分析方法将来自系统内部能值归入购买能值投入计算净能值产出率,导致系统投入成本增加,生产效益和净能值产出率降低,而在计算环境负载率未将系统排放的废弃物考虑在内,导致生猪养殖的环境负载率偏低,可持续发展指数最高,不能反应真实生产状况。在实际生产中生猪养殖是面源污染的重要源头,且单一系统稳定性差,其可持续发展指数不可能高于复合生态系统。用优化的复合生态系统能值分析方法计算所得的可持续发展指数高于生猪养殖系统,这与实际生产相符,表明优化后的复合生态系统的能值分析方法更科学。

2.3 不同子系统组合后的复合生态系统能值指标分析

用优化的复合生态系统能值分析方法计算 5 种组合的复合生态系统能值指标,结果如表 3 所示。4 种复合生态系统净能值产出率(EYR)比单纯的生猪养殖系统低 1.9%—5.8%,由于种植业产出低值能产品,而养殖业产出高值能产品,两者组合形成的循环复合生态系统的净能值产出率可能反而低于单纯的生猪养殖。单纯的生猪养殖环境负载率(ELR)最高,将产生 1.49×10^{18} sej 的废弃物(表 2),其它 4 种组合形成的复合生态系统 ELR 比单纯的生猪养殖低 26.67%—30%,其中“生猪养殖-沼气工程-有机肥生产-种植业”复合生态系统 ELR 最低,其次为“生猪养殖-沼气工程-食用菌栽培-种植业”和“生猪养殖-沼气工程-种植业”复合系统,而“生猪养殖-沼气工程-有机肥生产-食用菌栽培-种植业”复合生态系的 ELR 略高于其它 3 种组合。4 种复合生态系统的可持续发展指数(ESI)比单纯的生猪养殖高出 23.44%—33.86%,其中“生猪养殖-沼气工程-有机肥生产-种植业”复合生态系统 ESI 最高,“生猪养殖-沼气工程-有机肥生产-食用菌栽培-种植业”复合生态系统的 ESI 最低,表明循环链的长短与系统的可持续发展指数并不成正比。

从复合系统的稳定性指数(s)分析可知,4 种组合复合生态系统的稳定性指数均高于生猪养殖,其中“生猪养殖-沼气工程-有机肥生产-食用菌栽培-种植业”复合系统的稳定性最高,说明多子系统组合对提高复合生态系统的稳定性有明显的作用,而同样为固废处理系统的“生猪养殖-沼气工程-有机肥生产-种植业”复合系统高于“生猪养殖-沼气工程-食用菌栽培-种植业”。

表 3 5 种组合的复合生态系统能值指标分析表

Table 3 The emergy indices of five kinds of combined ecosystems

指标 Index	传统的生态系统能值分析方法 The traditional emergy analysis method				复合生态系统能值分析方法 The improved emergy analysis method			
	EYR_1	ELR_1	ESI_1	S_1	EYR	ELR	ESI	s
对照 CK	6.87	0.38	18.20	0	6.87	0.60	11.99	0
1	5.91	0.33	17.70	0.30	6.72	0.43	15.65	0.26
2	5.72	0.35	16.32	0.34	6.49	0.43	15.25	0.31
3	5.69	0.33	17.36	0.39	6.69	0.42	16.05	0.36
4	5.51	0.34	16.03	0.44	6.47	0.44	14.80	0.41

EYR_1 、 ELR_1 、 ESI_1 、 S_1 分别根据公式(1)、(2)、(3)、(4)计算, EYR 、 ELR 、 ESI 、 S 分别根据公式(5)、(6)、(7)、(8)计算

2.4 不同子系统组合后的复合生态系统经济效益分析

按优化的复合生态系统能值分析方法将各组合子系统购买能值投入和产出能值相加得出复合系统的投入和产出,进而得到系统的能值产投比、现金产投比及系统的净收益,结果如表 4 所示。从能值货币价值分析,4 种复合生态系统的能值货币价值产投比均低于单纯的生猪养殖,降低幅度为 2.18%—5.82%,而能值净收益则增加 6.62%—9.16%,表明经过组合后复合系统的总生产效率略降低,但总体收益增加,这与实际生产中种植业的生产效益低于养殖业相符。从现金价值分析,4 种复合生态系统的产投比和单纯的生猪养殖相比略有升高,而净收益比单纯的生猪养殖高出 5.42%—19.10%,表明受到市场因素的干扰,一些农产品虽然是低值能产品,但其在现金流通过程中有较高的附加经济价值,因此导致能值净产出率与现金产出率的值存在一定的差异。

系统能值总产出是影响产投比的关键因素之一,养殖子系统产出能值占全系统能值总产出的 90.25% (表 2),由于畜牧产品是高质能产品,其能值转换率高,因此养殖子系统的产出能值高,进而全系统的能值总产出也高,导致能值货币价值的产投比远高于现金价值产投比(表 4)。

表 4 5 种组合的复合生态系统经济价值分析表

Table 4 The economic value of five kinds of combined ecosystems

组合方案 Combination project	能值货币价值 \$ Em \$				现金价值 ¥ Cash Value			
	投入×10 ⁶ Input	产出×10 ⁶ Output	产投比 Yield/input	净收益 ×10 ⁶ Net yield	投入×10 ⁶ Input	产出×10 ⁶ Output	产投比 Yield/input	净收益 ×10 ⁶ Net yield
CK	1.88	12.91	6.87	11.03	22.85	31.34	1.37	8.48
1	2.06	13.82	6.72	11.76	23.16	32.09	1.39	8.94
2	2.15	13.93	6.49	11.79	23.74	32.75	1.38	9.01
3	2.11	14.13	6.69	12.01	24.20	34.19	1.41	9.99
4	2.20	14.24	6.47	12.04	24.78	34.85	1.41	10.10

投入和产出均针对系统外,系统内部循环的不包括在内,产出除以投入得到产投比,净收益为产出与投入之差

3 结论与讨论

循环农业经济是具有高效资源代谢过程、完整的系统耦合结构及整体、协调、循环、自生功能的网络型、进化型的复合生态系统。研究复合生态系统结构和功能的前提在于摸清多级结构单元(子系统)内部及其与外部系统的联结,通过结构的优化组合发挥系统的最大功能^[18-19]。本研究区的复合生态系统通过系统内部资源、废弃物的循环利用减少系统外购买能值的投入,优化系统结构,发挥系统的最大功能,获得最佳经济效益。传统能值方法分析循环农业系统时没有考虑产出的废弃物循环利用后社会购买能值投入的减少及其不利用对整个系统和环境的负效应,不能真实反应废弃物资源化利用的循环农业系统优越性。本研究涉及的养殖子系统产出大量废弃物,其能值为 1.49×10^{18} sej(表 2),经循环利用这部分能值作为生产原料反馈到沼气工程子系统和有机肥生产,降低了生产成本,减少了社会购买能值的投入,另一方面废弃物循环利用减少了环境污染,降低环境压力,因此在计算能值环境负载率时应将其考虑在内。张小洪等应用能值理论分析城市污水处理系统,结果表明由于没有考虑废物处理处置和排放的影响,传统的能值分析方法得出的结果与污水处理系统的实际生产存在差异^[20]。本研究结果也表明优化后的复合生态系统能值分析方法将复合生态系统作为一个整体,确定系统边界后分析系统内、外的物质与能量交流状况,更能反应循环复合生态系统的真实生产状况。因此笔者以为,应用能值分析方法应从系统的整体性出发进行系统可持续发展评价。

循环经济是多系统的耦合,但循环农业系统的链越长并不表示生态效益一定越好^[2],丹麦卡伦堡生态产业园是一个以废弃物循环利用的生态园,其在运行过程中受到市场某些产品滞销、原材料价格波动或某一工艺环节出现事故时,整个循环系统运行的效率和效益可能比单个系统运行时要低^[21]。本研究的结果表明循环链最长的“生猪养殖-沼气工程-有机肥生产-食用菌栽培-种植业”复合生态系统的可持续发展指数、环境负载率和净能值产出率在 4 种组合中均是最低的,可见循环链的延长并不能带来最好的效益,系统功能的有效性在于结构的合理性。“生猪养殖-沼气工程-种植业”复合系统的经济效益在 4 种组合中的生产效率最高,由于沼气厌氧发酵后将产生大量的沼液和沼渣,在利用过程中必须考虑废弃物循环利用的环境承载能力,即必须有足够大面积的种植业才能完全吸纳,但这在实际生产中有一定的难度,因此研究区引进有机肥生产和食用菌栽培处理过多的沼肥和养殖场的猪粪渣。通过研究对比表明,在所有循环模式中“生猪养殖-沼气工程-有机肥生产-种植业”循环复合生态系统整体效益最佳,其可持续发展指数最高,环境负载率最低,净能值产出率仅略低于“生猪养殖-沼气工程-种植业”复合系统。

References:

- [1] Cheng X. Effects of eco-agriculture and biomass engineering on circular economy in China. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2007, 15(2):

1-4.

- [2] Wang R S. Ecological misunderstanding, integrative approach, and potential industries in circular economy transition. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2005, 16(12): 2439-2446.
- [3] Yin C B, Zhou Y. Theory and development trend of recycle agriculture. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2008, 16(6): 1552-1556.
- [4] Zhang J E, Luo S M. Reconstructing and upgrading of Chinese eco-agriculture oriented to circular economy. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2006, 14(4): 1-4.
- [5] Jia S J, Liu Y C, Wang H J. Evaluation of the development of agro-recycling economy in Hebei Province using integrated index system. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2008, 16(5): 1230-1233.
- [6] Wang B H, Li D M. Comprehensive appraisal and empirical analysis on cycle agriculture in Shandong Province. *Journal of Qingdao Agricultural University: Social Science*, 2008, 20(3): 42-46.
- [7] Li B, Zhang J B, Xu W T. Analysis on spatial and temporal differences and constraints of circular agriculture development in China. *Journal of Huazhong Agricultural University: Social Sciences Edition*, 2010, (4): 21-26.
- [8] Lu Y, Wang J, Lu S. Empirical research on emergy evaluation of regional agricultural recycling economy. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2008, 16(2): 482-487.
- [9] Chen Y, Yang G H, Feng Y Z, Ren G X, Li T B. Comprehensive evaluation of biogas ecosystem modes. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2010, 26(2): 274-279.
- [10] Odum H T. Self-organization, transformity, and information. *Science*, 1988, 242(4882): 1132-1139.
- [11] Hau J L, Bakshi B R. Promise and problems of emergy analysis. *Ecological Modelling*, 2004, 178(1/2): 215-225.
- [12] Zhong Z M, Weng B Q, Wang Y X, Huang Q L. Advances in Ecosystem Emergy theory and thoughts on some related issues. *Fujian Journal of Agricultural Sciences*, 2010, 25(4): 520-525.
- [13] Yao C S, Zhu H J, Liu Y B. Discussing on some problems of emergy theory and analysis. *Ecology and Environment*, 2008, 17(5): 2117-2122.
- [14] Lan S F, Qin P, Lu H F. Emergy Synthesis of Ecological Economic Systems. Beijing: Chemical Industry Press, 2002: 91-94, 366-386.
- [15] Xi Y G, Qin P. Emergy value evaluation on rice-duck organic farming mode. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2006, 17(2): 237-242.
- [16] Bastianoni S, Marcherrini N. The problem of co-production in environmental accounting by emergy analysis. *Ecological Modelling*, 2000, 129(2/3): 187-193.
- [17] Geber U, Björklund J. The relationship between ecosystem services and purchased input in Swedish wastewater treatment systems-a case study. *Ecological Engineering*, 2001, 19(1): 97-117.
- [18] Zhou J L. Research of analysis complex methods on agro-ecological systems (No. 1). *Rural Eco-Environment*, 1986, (3): 53-58.
- [19] Zhou J L. Research of analysis complex methods on agro-ecological systems (No. 2). *Rural Eco-Environment*, 1986, (4): 44-48, 58.
- [20] Zhang X H, Jiang W J. The emergy analysis of municipal sewage treatment ecological systems. *Acta Ecologica Sinica*, 2008, 28(5): 2300-2308.
- [21] Graedel T E, Allenby B R. *Industrial Ecology*. Englewood Cliffs: Prentice Hall, 1995: 325-338.

参考文献:

- [1] 程序. 中国生态农业与生物质工程对循环经济的作用. *中国生态农业学报*, 2007, 15(2): 1-4.
- [2] 王如松. 循环经济建设的生态误区、整合途径和潜势产业辨析. *应用生态学报*, 2005, 16(12): 2439-2446.
- [3] 尹昌斌, 周颖. 循环农业发展的基本理论及展望. *中国生态农业学报*, 2008, 16(6): 1552-1556.
- [4] 章家恩, 骆世明. 面向循环经济的生态农业现代化转型. *中国生态农业学报*, 2006, 14(4): 1-4.
- [5] 贾士靖, 刘银仓, 王慧军. 基于指标体系的河北省农业循环经济发展评价. *中国生态农业学报*, 2008, 16(5): 1230-1233.
- [6] 王宝海, 李冬梅. 山东省循环农业的综合评价及实证分析. *青岛农业大学学报: 社会科学版*, 2008, 20(3): 42-46.
- [7] 李波, 张俊飏, 徐卫涛. 我国循环农业发展时空差异及制约因素分析. *华中农业大学学报: 社会科学版*, 2010, (4): 21-26.
- [8] 卢远, 王娟, 陆赛. 区域农业循环经济能值评价的实证研究. *中国生态农业学报*, 2008, 16(2): 482-487.
- [9] 陈豫, 杨改河, 冯永忠, 任广鑫, 李轶冰. 沼气生态农业模式综合评价. *农业工程学报*, 2010, 26(2): 274-279.
- [12] 钟珍梅, 翁伯琦, 王义祥, 黄勤楼. 生态系统能值理论研究进展及若干问题思考. *福建农业学报*, 2010, 25(4): 520-525.
- [13] 姚成胜, 朱鹤健, 刘耀彬. 能值理论研究中存在的几个问题探讨. *生态环境*, 2008, 17(5): 2117-2122.
- [14] 兰盛芳, 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: 91-94, 366-386.
- [15] 席运官, 钦佩. 稻鸭共作有机农业模式的能值评估. *应用生态学报*, 2006, 17(2): 237-242.
- [18] 周纪纶. 复合农业生态系统分析综合方法研究(一). *农村生态环境*, 1986, (3): 53-58.
- [19] 周纪纶. 复合农业生态系统分析综合方法研究(二). *农村生态环境*, 1986, (4): 44-48, 58-58.
- [20] 张小洪, 蒋文举. 城市污水处理生态系统能值分析. *生态学报*, 2008, 28(5): 2300-2308.

CONTENTS

Hyperspectral characteristics of typical subtropical trees at different levels of simulated acid rain	SHI Qilong, JIANG Hong, CHEN Jian, et al (5621)
Wind fields and the development of wind corridors in the urban metropolis of the Pearl River Delta	SUN Wu, WANG Yiming, WANG Yuelei, et al (5630)
Dynamics of canopy structure and understory light in montane evergreen broadleaved forest following a natural disturbance in North Guangdong	OU Yudian, SU Zhiyao (5637)
The influence of 4 species of preys on the development and fecundity of <i>Orius similis</i> Zheng	ZHANG Changrong, ZHI Junrui, MO Lifeng (5646)
Woody seedling regeneration in secondary succession of monsoon broad-leaved evergreen forest in Puer, Yunnan, Southwest China	LI Shuaifeng, LIU Wande, SU Jianrong, et al (5653)
Scale-dependent spatial variation of species abundance and richness in two mixed evergreen-deciduous broad-leaved karst forests, Southwest China	ZHANG Zhonghua, HU Gang, ZHU Jiedong, et al (5663)
The spatial heterogeneity of soil nutrients in a mid-subtropical <i>Castanopsis kawakamii</i> natural forest	SU Songjin, LIU Jinfu, HE Zhongsheng, et al (5673)
Effects of <i>Vetiveria zizanioides</i> L. growth on chemical and biological properties of copper mine tailing wastelands	XU Decong, ZHAN Jing, CHEN Zheng, et al (5683)
Effects of different irrigation regimes on characteristics of transpiring water-consumption of three desert species	SHAN Lishan, LI Yi, ZHANG Ximing, et al (5692)
The response of euhalophyte <i>Salicornia europaea</i> L. to different nitrogen forms	NIE Lingling, FENG Juanjuan, LÜ Sulian, et al (5703)
Dynamic analysis on spatial pattern of dominant tree species of cold-temperate coniferous forest in the succession process in the Pangquangou Nature Reserve	ZHANG Qindi, BI Runcheng, ZHANG Jintun, et al (5713)
Effects of AM fungi on the growth and nutrients of <i>Salvia miltiorrhiza</i> Bge. under different soil water and fertilizer conditions	HE Xueli, MA Li, MENG Jingjing, et al (5721)
The dynamics of soil respiration in a winter wheat field with plastic mulched-ridges and unmulched furrows	SHANGGUAN Yuxian, SHI Ripeng, HAN Kun, et al (5729)
Cattle dung composted by different methods had different effects on the growth and quality of soybean	GUO Liyue, LIU XueMei, ZHAN Lijie, et al (5738)
Nitrogen budget modelling at the headwaters of Urumqi River Based on the atmospheric deposition and runoff	WANG Shengjie, ZHANG Mingjun, WANG Feiteng, et al (5747)
Evaluating the ecosystem sustainability of circular agriculture based on the energy theory: a case study of the Xingyuan circular agriculture demonstration site in Fuqing City, Fujian	ZHONG Zhenmei, WENG Boqi, HUANG Qinlou, et al (5755)
Effects of cold exposure and recovery on viability and energy consumption in the sub-adult female giant spiny frogs (<i>Paa spinosa</i>)	LING Yun, SHAO Chen, XIE Zhigang, et al (5763)
A comparison of night-interruption on diapause-averting among two populations of the cotton bollworm, <i>Helicoverpa armigera</i>	CHEN Yuansheng, TU Xiaoyun, CHEN Chao, et al (5770)
Effects of soil erosion control measures on soil organic carbon and total nitrogen in a small watershed	ZHANG Yanjun, GUO Shengli, NAN Yafang, et al (5777)
Comparative analysis of Lugu Lake watershed ecosystem function under different management authorities	DONG Rencai, GOU Yaqing, LI Siyuan, et al (5786)
Relationship between fish community diversity and environmental factors in the Lianjiang River, Guangdong, China	LI Jie, LI Xinhui, JIA Xiaoping, et al (5795)
Effect of dissolved oxygen level on metabolic mode in juvenile crucian carp	ZHANG Wei, CAO Zhendong, FU Shijian (5806)
Community composition of net-phytoplankton and its relationship with the environmental factors at artificial reef area in Xiangshan Bay	JIANG Zhibing, CHEN Quanzhen, SHOU Lu, et al (5813)
Emergency appraisal on the loss of ecosystem service caused by marine reclamation: a case study in the Taozi Bay	LI Ruiqian, MENG Fanping (5825)
Assessing the visual quality of urban waterfront landscapes: the case of Hefei, China	YAO Yumin, ZHU Xiaodong, XU Yingbi, et al (5836)
Review and Monograph	
Advances in ecological genomics	SHI Yongbin, LI Junmin, JIN Zexin (5846)
Advances in studies of ecological effects of ocean acidification	WANG Siru, YIN Kedong, CAI Weijun, et al (5859)
Advances in feeding ecology of <i>Acartia</i>	HU Simin, LIU Sheng, LI Tao, et al (5870)
Research progress on ammonia-oxidizing microorganisms in estuarine ecosystem	ZHANG Qiufang, XU Jirong, SU Jianqiang, et al (5878)
Recent progress in research on neutrophilic, microaerophilic iron(II)-oxidizing bacteria	LIN Chaofeng, GONG Jun (5889)
A comparison study on primary production in typical low-latitude seas (South China Sea and Bay of Bengal)	LIU Huaxue, SONG Xingyu, HUANG Honghui, et al (5900)
Advances in leaf maximum carboxylation rate and its response to environmental factors	ZHANG Yanmin, ZHOU Guangsheng (5907)
10-years of bird habitat selection studies in mainland China: a review	JIANG Aiwu, ZHOU Fang, QIN Yue, et al (5918)
Scientific Note	
The effects of incubation temperature on embryonic metabolism and hatchling behavior in the Red-banded Snake, <i>Dinodon rufonotatum</i>	SUN Wenjia, YU Xiao, CAO Mengjie, et al (5924)
Sensitivity analysis and dynamics of soil microbial biomass carbon, nitrogen and related parameters in red-yellow soil of tea garden with different fertilization practices	WANG Limin, QIU Shanlian, LIN Xinjian, et al (5930)
Effect of fertilizers on Cd uptake of two edible amaranthus herbs	LI Ningyu, LI Zhian, ZHUANG Ping, et al (5937)

《生态学报》2013 年征订启事

《生态学报》是中国生态学学会主办的生态学专业性高级学术期刊,创刊于 1981 年。主要报道生态学研究原始创新性科研成果,特别欢迎能反映现代生态学发展方向的优秀综述性文章;研究简报;生态学新理论、新方法、新技术介绍;新书评介和学术、科研动态及开放实验室介绍等。

《生态学报》为半月刊,大 16 开本,300 页,国内定价 90 元/册,全年定价 2160 元。

国内邮发代号:82-7,国外邮发代号:M670

标准刊号:ISSN 1000-0933 CN 11-2031/Q

全国各地邮局均可订阅,也可直接与编辑部联系购买。欢迎广大科技工作者、科研单位、高等院校、图书馆等订阅。

通讯地址:100085 北京海淀区双清路 18 号 电 话:(010)62941099; 62843362

E-mail: shengtaixuebao@rcees.ac.cn 网 址: www.ecologica.cn

编辑部主任 孔红梅 执行编辑 刘天星 段 靖

生 态 学 报

(SHENGTAI XUEBAO)

(半月刊 1981 年 3 月创刊)

第 32 卷 第 18 期 (2012 年 9 月)

ACTA ECOLOGICA SINICA

(Semimonthly, Started in 1981)

Vol. 32 No. 18 (September, 2012)

编 辑	《生态学报》编辑部 地址:北京海淀区双清路 18 号 邮政编码:100085 电话:(010)62941099 www.ecologica.cn shengtaixuebao@rcees.ac.cn	Edited by	Editorial board of ACTA ECOLOGICA SINICA Add:18, Shuangqing Street, Haidian, Beijing 100085, China Tel:(010)62941099 www.ecologica.cn Shengtaixuebao@rcees.ac.cn
主 编	冯宗炜	Editor-in-chief	FENG Zong-Wei
主 管	中国科学技术协会	Supervised by	China Association for Science and Technology
主 办	中国生态学学会 中国科学院生态环境研究中心 地址:北京海淀区双清路 18 号 邮政编码:100085	Sponsored by	Ecological Society of China Research Center for Eco-environmental Sciences, CAS Add:18, Shuangqing Street, Haidian, Beijing 100085, China
出 版	科 学 出 版 社 地址:北京东黄城根北街 16 号 邮政编码:1000717	Published by	Science Press Add:16 Donghuangchenggen North Street, Beijing 100717, China
印 刷	北京北林印刷厂	Printed by	Beijing Bei Lin Printing House, Beijing 100083, China
发 行	科 学 出 版 社 地址:东黄城根北街 16 号 邮政编码:100717 电话:(010)64034563 E-mail:journal@cspg.net	Distributed by	Science Press Add:16 Donghuangchenggen North Street, Beijing 100717, China Tel:(010)64034563 E-mail:journal@cspg.net
订 购	全国各地邮局	Domestic	All Local Post Offices in China
国外发行	中国国际图书贸易总公司 地址:北京 399 信箱 邮政编码:100044	Foreign	China International Book Trading Corporation Add:P. O. Box 399 Beijing 100044, China
广告经营 许 可 证	京海工商广字第 8013 号		



ISSN 1000-0933
CN 11-2031/Q

国内外公开发行

国内邮发代号 82-7

国外发行代号 M670

定价 70.00 元