

现代种植业系统及粮食生产能量转化效率的动态分析——以山前平原河北栾城县为例

陈冬冬, 高旺盛, 隋 鹏, 吴天龙

(中国农业大学农学与生物技术学院区域农业发展研究中心, 北京 100094)

摘 要 本文在分析栾城县现代种植业结构演替基础上, 对当地 1984-2006 年种植业系统能流动态分析表明: 以秸秆直接还田为主的有机能投入从 90 年代中期占绝对优势, 能流循环指数从 1984 年 0.5 持续提高到 2000 年 0.62, 无机能后期快速增长使有机能和无机能不断扩大的趋势有所趋缓。而粮食生产的能流动态分析除表明上述趋势外, 认为总体能效从 1993 年 1.78 下降到目前 1.67 并不显著, 同时无机能增加主要是农机、灌溉等耗能引起, 有机能促进系统内生循环的同时与能源动力、化肥等无机能投入不断协调形成稳定高产的组合体系。未来优化当地农业生产结构, 节能降耗, 提高资源利用率需要加强秸秆间接还田的农牧结合制度, 节水灌溉制度及与之配套的作物配置结构。

关 键 词 种植业系统; 粮食生产; 能量转化效率; 动态分析

我国华北高产集约粮食主产区长期以来承担着国家粮食安全的重任, 高投入、高产、高资源消耗的常规集约种植模式引起的生态环境问题及可持续性受到广泛关注。能量是生态系统的基础, 从能量观点对农业生态系统加以分析可以客观地反映农业生态系统各成分之间最基本和最本质的关系^[1]。能量分析在宏观和微观尺度国内外已有大量研究, 国内用能流研究我国农业生态系统兴起于 20 世纪 80 年代^[2-3], 国际上 emergy、exergy 以及生态足迹等新兴的生态经济方法都在能量分析基础上改进或延伸^[4-8], 和其它方法一样能量分析也具有一定局限性, 但国内对能量方法折算标准的探讨更为成熟^[9, 10], 基于结构分析和动态变化的能量转化效率是衡量农业生态系统功能的重要指标。本文用生态系统能流的方法对集约高产过程中农业生态系统长期变化趋势定量评价, 揭示典型县域种植业系统和粮食生产的能流特征, 从有机能和无机能结构变化关系寻求提高能效和资源利用效率的途径, 为估算农业生态系统的资源环境代价提供可靠的依据。

1 研究区域概况

河北栾城县位于冀中平原西部, 太行山东麓山前平原的南部, 属暖温带半湿润半干旱季风气候, 年平均气温 12.8℃, 年平均降水量 474.0mm, 年平均无霜期 205 天, 年日照总时数 2521.9 小时, 年平均太阳辐射总量 5253MJ/m², 年平均风速为 2.6m/s。地势自西北向东南缓缓倾斜, 海拔 45~66m, 地势平坦, 总面积 346km², 耕地 38.9 万亩, 2006 年底人口 32.58 万, 其中农业人口 24.91 万。土壤为褐土类潮褐土, 耕层深厚。境内水资源短缺, 地表水汶河和东明渠主要承载石家庄市的工业废水和生活污水, 地下水相对丰富, 水质较好^[11]。

2 种植业结构演替

栾城县种植业结构演替是在自然环境、技术经济协同作用下, 以粮食产量为主要目标的定向调整过程, 以达到充分利用光、热、水、土资源, 实现农业

收稿日期: 2007-05; 修订日期: 2007-12。

基金项目: “十一五”国家科技支撑计划 (2006BAD02A15) 和国家自然科学基金 (30471010) 课题资助。

作者简介: 陈冬冬 (1978-), 女, 博士生, 从事生态经济与可持续发展研究。E-mail: xdongbulacdd@163.com。

通讯作者: 高旺盛, 教授、博士生导师, 主要从事宏观农业与区域农业、农业生态系统管理以及农业发展战略政策等方面的研究。E-mail: wshgao@cau.edu.cn

稳产高产^[12]。

从耕作制度演替来看,栾城县 20 世纪 50 年代前农业耕作制度以一年一熟为主,作物以棉花、谷子、小麦、薯豆为主体。50 年代后减少了谷子春播面积,增加冬小麦面积,种植夏播粮食作物,扩大甘薯种植面积,熟制逐渐改为二年三熟,但农田水利设施较差,化肥投入量仅 $7.3\text{kg}/\text{hm}^2$ 。60 年代中期栾城县作物结构出现重大变化,形成小麦-谷子或玉米一年两熟,水利设施改善使灌溉面积迅速扩大,施肥量提高到 $39.9\text{kg}/\text{hm}^2$ 。自 70 年代以后随着水肥条件改善基本实现水利化,以玉米为主的高产耐水肥作物迅速发展,奠定了栾城县小麦-玉米主体种植结构^[13,14]。从 1982 年土地承包到户以后常年进行小麦-玉米种植,粮食生产的机械化、良种化、栽培及管理技术水平提高,化肥农药投入加大,促进农田生产力水平迅速提高,成为华北平原典型的集约高产和井灌农业生态区域。

从粮棉油作物的结构上看(图 1),1949 年以来栾城县粮食作物种植面积持续上升,经济作物种植面积呈下降趋势。1979 年后调整了作物布局,扩大小麦、玉米播种面积,压缩棉花和小杂粮等作物播种面积,80 年代中期棉花种植南移,种植面积多为粮食作物代替。1980~1985 年小麦玉米占粮食播面比例在 85%以上,而 1986 年后已上升到 90%以上。栾城县 2005 年小麦单产 $7\,211\text{kg}/\text{hm}^2$,玉米 $8\,730\text{kg}/\text{hm}^2$,光热生产潜力的综合效率分别达到 0.68 和 0.83。因此,小麦玉米种植结构是一种较好的种植模式,80 年代以来重点发展以小麦玉米为主的粮食作物是栾城县种植业的主要特征之一。从种植业结构来看,80 年代中期以来粮食作物在作物总播面的比例先上升后下降,而蔬菜瓜类种植面积从 2000 年以来大幅增加,尽管棉花油料等经济作物面积不断下降,但是药材及其它经济作物面积的发展使经济作物面积先下降后有所上升(图 2)。因此本文计算

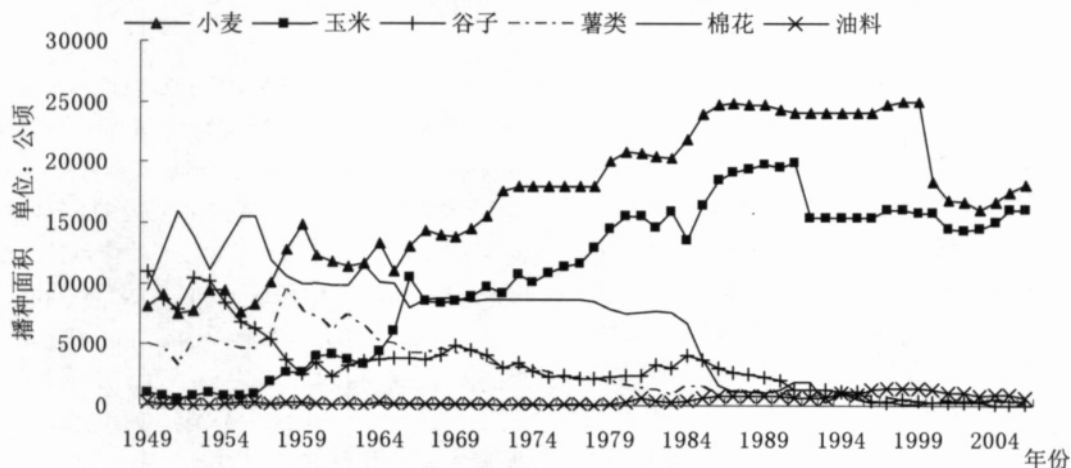


图 1 栾城县 1949~2006 年粮棉油播种面积变化

Fig.1 Changes of Grain, Cotton and Oil planting acreage in Luancheng county from 1949 to 2006

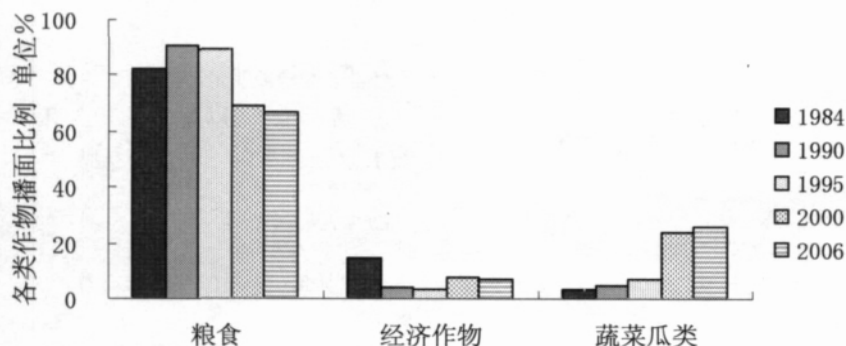


图 2 栾城县种植业作物结构变化

Fig.2 Changes of the crop structure of planting system in Luancheng county in recent 20 years

栾城县 1984 以来农业集约化进程中种植系统能量投入和产出情况,对种植系统及粮食生产能量转化效率、能量投入结构等进行动态分析,折能系数参照刘巽浩、骆世明^[9,15]的方法和标准。

3 种植业系统能量效率动态分析

以栾城县 1984 年、1990 年、1995 年、2000 年、2006 年统计资料^[16]和调查访谈数据为基础,对该县的能流进行分析(表 1)。20 多年来有机能中畜力、劳力不断下降,无机能中化肥、农膜、农机具、燃油持续增加,两者总量都不断增长,而比值从相近到差距不断扩大,尽管 2000 年达到 1.62 后有所下降,仍体现出该地作为集约高产农业生态区有机能投入在能量投入中始终占有很大优势的重要特征。

3.1 秸秆还田与能流循环指数

由表 1 可以看出,从 1984~2006 年种植业系统投能逐渐增加,投入能总量从 81.78GJ/hm² 增加到

2006 年 287.94GJ/hm²,增加了 3.5 倍,年均增加 6%。尤其是 1990~1995 年间增长最快,无机能和有机能投入增加幅度分别达 44%和 69%。这一时期有机能投入从 63.06 GJ/hm² 增加到 106.68 GJ/hm²,其中有机肥占比从 90.8%提高到 93.8%。从有机肥构成可以看出 1995 年秸秆堆肥比重明显下降,据查因 1993 年以后小麦直接还田面积增加大大减少了垫圈粪和堆肥比例,1990 年栾城小麦秸秆 20%还田,玉米 40%还田,1990~1995 年间秸秆归还量已达 60%~70%。1996 年后小麦秸秆基本全部还田,玉米秸秆还田也可达到 80~90%,有机能进一步增加到 139.78 GJ/hm²。有机能投入占总能量投入的比例称能流循环指数^[17],该指数从 0.5 持续增到 2000 年 0.62 也表明这一趋势。

3.2 无机能投入趋势及阶段构成

1984~2000 年十几年间无机能投入占总投能的比重从 50%持续下降到 2000 年 38%,2000~2006 年无机能投入比重又有所上升。从不同阶段工业能投入构成来看,1984~1990 年间农药、农机具、燃油增加幅度分别为 84%、78%和 51%,成为这一时期工业能增加的重要因素。1990~1995 年间农药、燃油仍保持大幅增长,其他无机能投入均有不同程度增加。从 1995~2000 年各项工业投能增加趋缓,农膜和农机推广是无机能增加的最重要部分,农药投能有所下降。2000~2006 年间由于地下水严重超采,其直接代价是增加灌溉耗能,农田用电成为最重要的无机能投入部分,80 年代中期耗电耗能率分别为 0.15 度/m³,比 70 年代上升了一倍,80 年代末 90 年代初,耗电耗能率分别为 0.22 度/m³,比 80 年代中期上升了 50%,而目前已高达 0.45~0.5 度/m³,比 80 年代中期上升了 2 倍;与此同时农民对化肥、农药等投入较前期增幅明显,无机能占总投能比重开始上升。

3.3 种植业能量转化效率分析

从光能利用率来看,1984 年栾城县农田生态系统的光能利用率为 0.43%,随着产量持续提高,2005 年光能利用率达到 0.96%,高于 1991 年我国农田光能利用率的平均水平 0.35%,低于高产地区典型农田 2%^[18],仍有一定潜力,但进一步增加单产水资源短缺成为其限制性因素。从农田能量产出来看(表 2),1984~1995 年种植业以小麦玉米为主的粮

表 1 栾城县种植业系统能量投入表 单位 GJ/hm²
Tab.1 Table of energy input in plant system in Luancheng county Unit: GJ/hm²

项目	年份	1984	1990	1995	2000	2006
1.化肥		18.18	24.81	31.11	31.81	37.17
2.农膜		0.00	0.00	0.01	0.12	0.16
3.农药		0.12	0.22	1.27	1.03	1.22
4.农田电		14.63	14.31	22.06	26.44	45.23
5.农机具		3.19	5.66	8.80	12.27	12.55
6.燃油		4.76	7.17	12.00	14.47	17.38
一)无机能合计		40.87	52.18	75.25	86.13	113.71
1. 畜力		0.54	0.31	0.12	0.05	0.00
2. 劳力		3.90	3.42	2.70	1.67	1.61
3. 种子		2.08	2.07	3.79	3.20	2.60
4. 有机肥		34.39	57.25	100.07	134.86	170.02
其中: 厩肥		6.60	10.71	21.36	22.27	26.56
秸秆堆沤肥		8.43	9.05	1.61	0.30	0.00
秸秆还田		19.35	37.49	77.11	112.29	143.46
二)有机能合计		40.91	63.06	106.68	139.78	174.23
投入能总量		81.78	115.24	181.93	225.90	287.94
投入	有机能/无机能	0.98	1.42	1.48	1.62	1.53
结构	能流循环指数	0.50	0.59	0.60	0.62	0.61

表 2 栾城县 1984~2006 年农田能量投入产出量与产投比 单位: GJ/hm²Tab.2 The value of energy input and output and the energy output/ input ratio of agro-ecosystem in Luancheng county from 1984 to 2006 Unit: GJ/hm²

年份	光能利用率%	有机能投入	无机能投入	总投入能	总产出能	其中粮食产出能	能产投比	产出能/无机能	粮食产出能/总投能	粮食产出能/无机能
1984	0.43	40.91	41.66	82.57	232.81	104.44	2.82	5.59	1.26	2.51
1990	0.56	63.06	52.18	115.24	292.73	134.01	2.54	5.61	1.16	2.57
1995	0.65	106.68	75.25	181.93	340.93	154.09	1.87	4.53	0.85	2.05
2000	0.94	139.78	86.13	225.90	394.07	144.56	1.74	4.58	0.64	1.68
2006	0.96	174.23	113.71	287.94	484.69	169.90	1.68	4.26	0.59	1.49

食产出能占总产出能 45%左右,之后粮食播面下降,蔬菜瓜类等面积迅速增加使粮食产出能占比已下降到 35%。

从能量产投比来看,1984~2006 年人工辅助能量效率从 2.82 下降到 1.68,粮食产出能的投能效率也呈现出一致的趋势。无机能投入效率从 1984 年 5.59 到 2006 年的 4.26 呈现波动下降的趋势,1984~1990 年粮食无机能投入效率与前者趋势一致,从 1995 年以后持续下降,尽管 1995~2000 年无机能投入效率从 4.53 上升到 4.58,而粮食无机能投入效率从 2.05 下降到 1.68。由此可以看出粮食产出能量的边际报酬下降明显,但是由于同期粮食产出能占总产出能的比例也从 45%下降到 37%,无机能投入包括了粮食以外作物的能量投入,粮食生产的能效是否明显下降仍需对粮食生产的能量效率进行动态分析。

4 粮食生产的能量效率动态分析

2007 年 8 月我们通过调查问卷对栾城县粮食生产投入进行了调查,包括冬小麦夏玉米的化肥、农药等农用化学品投入、秸秆还田、有机肥投入以及种子、用工等情况,调查表明 2007 年小麦平均单产 7245 kg/hm²,玉米平均单产 8790 kg/hm²,粮食产出能 259.25 GJ/hm²,总产出能为 534.58 GJ/hm²,小麦和玉米秸秆还田率分别达 97%和 70%。通过对比王宏广 1983~1984 年对黄淮海平原,吕富保 1991~1993 年对栾城县粮食生产能量分析^[19-20](表 3),可看出该区粮食生产从 80 年代中期至 2007 年 20 多年来能量总投入增加了 5.6 倍,无机能和有机能呈阶段性增长,能量效率呈下降趋势。

从有机能和无机能变化阶段来看:1984~1993 年有机能增长显著是期初的 6.6 倍,同期无机能也增长了 1.6 倍,秸秆有机肥占有机能比例从 62%上升到 98%,种子、人力、畜力被农机、化肥等无机能所替代,占比降低。从 1994 年到 2007 年无机能增长很快,比上期增长了 2.2 倍,而有机能该阶段仅增长 6.8%。因此 90 年代以来能量产投比的下降主要是无机能增加引起的,其中农业机械、灌溉等能量比 90 年代初就增加了 4.2 倍,由 1984 年占总无机能投入的 13.7%增加到 2007 年占 49.4%。但总体能

表 3 粮食(小麦-玉米)生产的能量投入产出变化

单位: GJ/hm²Tab.3 Changes of energy input and output in grain (wheat-corn) production Unit: GJ/hm²

项目	1983~1984*	1991~1993**	2007
无机能合计	23.54	37.59	83.74
农药化肥	20.31	27.74	42.36
农业机械等	3.23	9.84	41.37
有机能合计	33.38	220.67	235.70
秸秆有机肥	20.71	215.96	231.21
种子、劳力等	12.67	4.72	4.49
投入能合计	56.93	258.26	319.44
有机能/无机能	1.42	5.87	2.81
能流循环指数	0.59	0.85	0.74
产出能合计	238.68	460.11	534.58
产出能/投入能	4.19	1.78	1.67
产出能/无机能	10.14	12.24	6.38

注: * 根据王宏广 1986 硕士论文黄淮海平原农田生态系统能量转化物质循环研究资料整理。

** 根据吕富保资料整理,为保证三者分析一致性有机能和产出能均不计根茬量。

效从 1993 年 1.78 下降到 1.67 并不显著,说明该地 90 年代中期以来有机能和无机能投入不断协调处于比较稳定的高产状态。

栾城县 1980 年代初开始推广农作物秸秆直接还田,但大部分秸秆还是堆沤和垫圈肥,直接还田面积仅有 10%,有机能与无机能之比为 1.42,能流循环指数 0.59,1990 年代以来秸秆还田率逐步增加使有机能与无机能之比增长到 5.87,能流循环指数增加到 0.85,对配套机械等无机能投入需求增加。而目前随着农药化肥、农机等无机能的增长使有机能和无机能的比例下降到 2.81,能流循环指数 0.74,因此有机能在该地区粮食投入始终占明显优势,并与该地能源动力、化肥等形成复合优势体系。

5 结论

随着栾城县辅助能投入总量不断增加,90 年代以来栾城县现代种植业和粮食生产的投入以秸秆有机能及农机、燃油等无机能投入为主,畜力、人力、种子的作用趋于减少,该县种植业的现代化水平逐步提高。

1) 种植业尤其是粮食生产中小麦玉米两熟免耕种植体系不断成熟,随着粮食产量的提高秸秆直接还田比例等有机能的投入稳步增加,能流循环指数不断提高,系统的内生循环也通过无机能的投入得到加强逐步形成稳定高产的优势结构。因此粮食生产的能效 10 多年来下降并不显著与当地这一重要的能流特征相关。

2) 无论从栾城县种植业能效变动还是粮食生产的能效变化来看,无机能的增加是 90 年代后期到目前能量投入增加的最关键部分,从而使有机能和无机能的比例从 80 年代中期以来不断扩大的趋势开始缓解。

3) 粮食生产的能效和投入能量结构的长期变化说明 90 年代以来能量增加主要是无机能的增加尤其是农机、灌溉等耗能增加引起的,与秸秆还田相配套的农机耗能尚能改进,但是地下水资源耗竭造成灌溉耗能增加的形势更令人担忧。因此该地区节能降耗和节水灌溉制度是降低能效,提高资源利用率的关键。

因此从长期来看,秸秆直接还田和农牧结合的形式促进秸秆的间接还田都能增强系统物质循环,

通过协调两者比例改变农田能耗不断增加、克服长期单一耕作方式的弊端,并寻求最能与节水灌溉相结合的作物配置结构是该地区未来改善投入结构,节能降耗和提高农业资源利用效率的迫切任务。

参考文献

- [1] 闻大中. 我国东北地区农业生态系统的力能学研究. 生态学杂志, 1986,5(4):1~25.
- [2] 刘巽浩. 我国不同地区农田生态系统能量转换效率的初步研究. 北京农业大学学报, 1982,8(1):47~53.
- [3] 韩纯儒. 农业生态系统的能流结构及效率. 农村生态环境, 1985, 3:6~8.
- [4] Odum H T. Environmental Accounting: Energy and Environmental Decision Making, John Wiley, N.Y, 1996.
- [5] Rosen M A. Evaluation of energy utilization efficiency in Canada using energy and energy analyses. Energy, 1992, 17 (4): 339~350.
- [6] Chen G Q, Chen B. Resource analysis of the Chinese society 1980~2002 based on energy—Part 5: Resource structure and intensity, Energy Policy, 2007, (35):2087~2095.
- [7] Herendeen R. Energy analysis and EMERGY analysis—a comparison, 2004, (178):227~237.
- [8] 陈冬冬, 高旺盛, 陈源泉. 生态足迹分析方法研究进展. 应用生态学报, 2006, 17(10):1983~1988.
- [9] 刘巽浩. 能量投入产出研究在农业上的应用. 农业现代化研究, 1984, 4:15~19.
- [10] 李连禄, 黄育珠, 韩纯儒. 农业生态系统工业能投的折能系数探讨. 农村生态环境, 1989, (4):32~36.
- [11] 栾城县地方志编纂委员会. 栾城年鉴. 北京: 方志出版社, 2006, 54~55.
- [12] 胡春胜, 曾江海. 栾城县种植业结构演替的功能效应分析. 生态农业研究, 1998, 6(2): 51~54.
- [13] 栾城县地方志编纂委员会. 栾城县志. 北京: 新华出版社 1994.
- [14] 封志明, 刘爱民. 现代种植业系统能流转化效率分析及评价. 地理科学进展, 1998,17(4): 33~38.
- [15] 骆世明. 农业生态学. 北京: 中国农业出版社, 2001, 3: 448~453.
- [16] 河北省栾城县统计局. 栾城县国民经济统计资料, 1984, 1995, 2000~2006.
- [17] 高德明, 陈丽娟, 胡芬, 梅旭荣. 晋东豫西旱农试验区农业生态系统能流特征. 生态学报, 1997, 17(5):529~536.
- [18] 王宏广. 中国农业(问题. 潜力. 道路. 效益). 北京: 农业出版社, 1991, 123.
- [19] 王宏广. 黄淮海平原农田生态系统能量转化物质循环研究(硕士学位论文). 北京: 北京农业大学, 1986, 107.
- [20] 吕富保. 一个农牧果系统的能流分析. 生态农业研究, 1994, 2(3): 40~46.

Dynamic Analysis on Energy Efficiency of Modern Planting System and Grain Production ——A Case Study of Luancheng, Hebei

CHEN Dongdong, GAO Wangsheng, SUI Peng, WU Tianlong

(College of Agronomy and Biotechnology, Centre of Regional Farming System Research,
China Agricultural University, Beijing 100094, China)

Abstract Based on analysis on structure change of modern planting in Luancheng county, the paper discussed the local dynamic efficiency of energy input in planting system from 1984 to 2006 and draw some conclusions as follows: the organic energy input with the majority of straw directly returned to field has been the leading part of energy input since the middle of 1990s, and the tendency of enlarged gap between organic energy and industrial energy input began to have a little turn because the industrial energy subsidies increased rapidly in the later period. We further analyzed the energy flow structure of grain production, finding that the general energy efficiency was not down dramatically from 1.78 in 1993 to 1.67 now, which indicates that increasing organic energy input required more energy engineering and chemical fertilizer input, and they coordinated to form a steady and high-productivity system. But a problem which has been raised at the same time is that the most part of industrial energy is machine fuels and electricity consumed by irrigation. That indicates the farming system of combination of agriculture and animal husbandry, the water-saving irrigation and the corresponding crop structure distribution are three important tasks to improve the agricultural production construction and energy and resource efficiency.

Key words: planting system; grain production; energy efficiency; dynamic analysis