

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

刘 振¹, 华则科², 宁堂原^{1*}, 李增嘉¹

1. 山东农业大学 农学院, 作物生物学国家重点实验室, 山东 泰安 271018

2. 莱阳市农业技术推广中心, 山东 莱阳 265200

摘要: 本研究利用能值方法分析了不同秸秆还田处理方式对小麦玉米两熟农田生态系统能值效率的影响。以小麦玉米两熟农田为研究系统, 以常规施肥为对照(CK), 设置了秸秆粉碎还田、沼液还田和有机肥(牛粪)还田 3 种有机物还田方式, 运用能值分析方法对农田生态系统的能值产出率(EYR)、能值投资率(EIS)、环境负载率(ELR)、可持续发展指数(ESI)和基于能值的产品安全性指标(EIPS)进行了比较。结果显示: 4 种有机物还田方式沼液还田的能值产出率(EYR)是常规施肥的 1.13 倍(最大), 而有机肥(牛粪)还田的农田系统的能值投资率(EIR)是对照的 24.58 倍, 常规施肥方式的农田系统的环境负载率(ELR)是有机肥还田方式的 19.5 倍, 对环境的压力是最大的, 秸秆粉碎还田和沼液还田的可持续发展指数(ESI)基本相同, 沼液还田的最高, 是常规施肥的 1.43 倍, 有机肥(牛粪)还田的农田系统产出的产品基于能值的产品安全性指标为-0.008, 其安全性最高, 常规施肥的农田系统产品存在一定的安全隐患。综上所述, 在等氮量条件下, 对于农田生态系统, 沼液还田方式的能值效益和可持续发展能力要高于其他处理, 应值得推广。

关键词: 有机物还田; 农田生态系统; 土壤肥力; 能值

中图分类号: S345

文献标识码: A

文章编号: 1000-2324(2017)03-0321-06

Effects of Organic Matter Returning Methods on Emery Efficiency of Wheat-Corn Double Cropping

LIU Zhen¹, HUA Ze-ke², NING Tang-yuan^{1*}, LI Zeng-jia¹

1. State Laboratory of Crop Biology, College of Agronomy/Shandong Agricultural University, Tai'an 271018, China

2. Agricultural Technology Extension Center, Laiyang 265200, China

Abstract: In this study, emery method was used to analyze the effects of different straw application on the emery efficiency of wheat-corn double cropping farmland ecosystem. Wheat-corn double cropping fields were used as the research system, the conventional fertilization as the control (CK), three kinds of organic matter returning methods were adopted, including straw crushing and returning to field, biogas slurry returning and organic fertilizer (cow dung) returning to field, emery analysis was used to compare the emery yield ration(EYR), emery investment rate (EIR), environmental load rate (ELR), sustainable development index (ESI) and emery based product safety index (EIPS). The results showed among the four kinds of organic matter returning methods, EYR of biogas slurry returning was 1.13 times that of conventional fertilization, which was the the highest one. EIR of the organic fertilizer (cow dung) returning system was 24.58 times that of the the control group. ELR of the farmland system with conventional fertilization was 19.5 times that of the organic fertilizer returning system, this way had the greatest pressure on the environment. ESI of straw crushing-returning to field and biogas slurry returning was basically the same, biogas slurry returning had the highest, about 1.43 times that of the conventional fertilization. Organic fertilizer (cow dung) returning system had the highest security with the highest EIPS among the four systems, -0.008. The products of the conventional fertilization system had a certain hidden trouble, in conclusion, under the condition of equal nitrogen content, emery benefit and sustainable development ability of biogas slurry returning method were superior to the others and worth of spreading.

Keywords: Organic matter returning; field ecosystem; soil fertility; emery

当前中国种植业持续高产过程中形成的废弃物种类繁多, 数量巨大, 其中秸秆资源总量达 7×10^{11} kg 以上, 经过综合技术处理后利用的约为 1.6×10^{10} kg, 仅占总量的 2.7%^[1]; 而且随着粮食单产水平的提高, 使秸秆的剩余量越来越多^[2]。秸秆是循环农业生态系统中不可缺少的环节, 作为物质、能量和养分的载体, 是一种宝贵的自然资源^[3]。但人们对秸秆的再循环利用方式如秸秆直接还田还是过腹还田仍看法不一^[4,5]。因此, 为秸秆寻找合理的还田方式是关系到土壤肥力保持进而影响农业可持续发展的大问题。目前, 中国循环农业的研究无论是理论还是技术还处于初级阶段^[6], 尹昌斌等^[7-9]认为循环农业是循环经济理念在农业生产中的具体应用, 目的是提高资源和环境承载能力, 实现经

收稿日期: 2015-06-01

修回日期: 2015-09-08

基金项目: “十二五”国家科技支撑项目(2012BAD14B07);公益性行业(农业)科研专项经费项目(201503121-05)

作者简介: 刘 振(1986-),男,硕士研究生.研究方向:生态循环农业. E-mail:zliu18@126.com

***通讯作者:** Author for correspondence. E-mail:ningty@163.com

济和环境协调发展。“能值”理论是 20 世纪 80 年代美国著名系统生态学家 Odum H.T.为首创立的^[10]，经过 30 多年的发展，已成为成熟的生态经济评价方法，并被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、评价与比较研究^[11]。由于化肥的大量施用，有机肥的用量越来越少，不利于土壤肥力的保持和提高。玉米秸秆既可直接还田，又可发酵后产生废液还田，也可过腹还田。因此，分析秸秆不同利用还田方式对农田生态系统能值效率的影响，对秸秆合理利用有重要理论和实践意义。本研引入能值理论探讨了其对农田生态系统能值效率和可持续发展能力的影响及其作用机制，以期对秸秆资源化高效利用提供支撑。

1 材料与方法

1.1 研究区域概况

本研究试验点设在山东省德州市平原县胡庄村，位于东经 116°26′，北纬 37°09′，地处黄淮海平原，属东亚暖温带亚湿润大陆性季风气候，年均气温 12.1~13.1℃，年均降水量 578.2~623.3 mm。耕层土壤类型为轻盐化草甸土，含有机质 1.18%、全氮 0.138%、碱解氮 77.5 mg/kg、速效磷 26.9 mg/kg、速效钾 145.2 mg/kg，pH 为 7.7。种植制度为冬小麦夏玉米一年两熟。

1.2 试验设计

选择当地小麦-玉米一年两熟标准农田，设置 4 个处理，每个处理 3 次重复，完全随机区组布置，小区面积 980 m²。在小麦(济麦 22)季，按照同等施氮量原则，以常规施肥为对照(CK)，分别设置玉米秸秆粉碎还田、沼液还田、有机肥(牛粪)还田 3 种有机物还田方式。

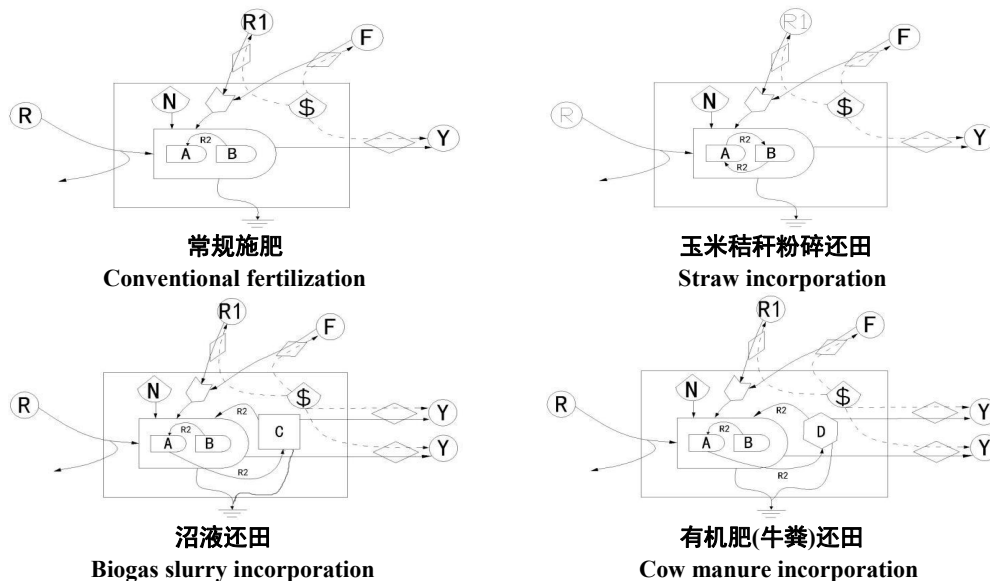


图 1 不同有机物料还田方式的能量流程图

Fig.1 Diagram of energy flow of different organic materials incorporation

A: 玉米生产 Corn growing; B: 小麦生产 Wheat growing; C: 沼气发酵系统 Biogas fermentation system; D: 奶牛饲养系统 Dairy feeding system; R: 可更新资源能 Renewable resources energy; N: 不可更新资源能 Non-renewable resources energy; R₁: 可更新有机能 Renewable organic energy; R₂: 系统反馈能量 Feedback energy in the system; F: 不可更新工业辅助能 Non-renewable industrial energy; Y: 能值输出 Product energy

图 1 为本文所要研究的农田生态系统能量流程图，其中 4 种有机物还田处理方式中，其能值输入主要为太阳能、雨水能、N、P、K 肥、种子、劳动力、机械、沼液、有机肥等，能值输出为小麦、玉米、玉米秸秆等，因小麦秸秆作为反馈能值回到大田中，不属于能值输出。4 种处理中，玉米根茬全部还田，且在玉米季(郑单 958)的施肥情况均为小麦秸秆全部还田。

(1) 常规施肥：在玉米收获后，玉米秸秆全部运出，然后进行常规施肥，将化肥均匀撒施于试验小区中，该试验处理记为 CK；

(2) 秸秆粉碎还田：本试验小区产玉米秸秆 4000 kg，在播种前翻地，深度为 20 cm，将玉米秸秆 2000 kg 粉碎后进行翻压还田，剩余秸秆作为饲料出售至附近奶牛场。该试验处理记为 SR；

(3) 沼液还田: 在玉米收获后, 将试验小区中的玉米秸秆全部运至沼气池进行厌氧发酵, 往沼气池内投入菌种、尿素等, 产生的沼气作为能源用于居民做饭、照明、取暖等日常生活, 剩余的残渣进入到试验小区中, 该试验处理记为 BR;

(4) 有机肥还田: 在玉米收获后, 将试验小区中的玉米秸秆运送至牛场青贮处理做成青贮饲料, 20 d 之后, 在牛场中选择年龄、品种、体型、健康状况一致的奶牛 20 头, 每天每头奶牛饲喂 20 kg 青贮饲料, 产生的牛奶出售, 牛粪等废弃物重新回到该试验小区中, 该试验处理记为 OR。

全年施肥量如表 1 所示。

表 1 不同有机物还田方式的全年施肥量

Table 1 The annual application rates of organic manure and mineral fertilizer in different organic matter returning modes

处理 Treatments	小麦季施肥 Fertilizer added to wheat						玉米季施肥 Fertilizer added to maize		
	玉米秸秆 Maize straw	沼液 Biogas slurry	有机肥 Cow manure	氮肥 N	磷肥 P	钾肥 K	氮肥 N	磷肥 P	钾肥 K
	常规施肥(CK)	0	0	0	120	60	75	120	60
秸秆粉碎还田(SR)	21050*	0	0	0	15.79	0	120	60	0
沼液还田(BR)	0	38340	0	0	46.2	17.87	120	60	75
有机肥还田(OR)	0	0	20730*	0	17.99	12.60	120	60	75

玉米秸秆 N、P、K 含量分别为 0.57%、0.20%、0.73%, 含水量为 65.01%; 沼液 N、P、K 含量分别为 0.3%、0.03%、0.15%; 牛粪 N、P、K 含量分别为 0.58%、0.2%、0.31%, 含水量为 28.23%。

以上数据单位为 kg/ha。

The nitrogen, phosphorus and potassium is respectively 0.57%, 0.20% and 0.73%, the water content is 65.01% in the maize straw. The nitrogen, phosphorus and potassium is respectively 0.3%, 0.03% and 0.15%. The nitrogen, phosphorus and potassium is respectively 0.58%, 0.2% and 0.31%, the water content is 28.23% in the cow manure.

The data unit is kg/hm².

1.3 研究方法

1.3.1 能值方法 本研究为探讨农田生态系统能值效率和可持续发展能力, 引入了“能值方法”进行分析。能值方法是以产生某一资源或劳务的过程中直接或间接消耗的另一种能量的多少进行评价, 此分析方法综合考虑了自然因素和经济因素, 可对各类生态经济系统进行有效评估。由于太阳能是最原始的能源形式, 应用中常以太阳光为度量, 单位为太阳能焦耳(Solar emjoules, 缩写为 sej)^[12]。本研究中能值转换率的全球能值基准为 15.83×10^{24} sej/a^[13,14]。通过绘制能值分析表, 列出能值的投入和产出, 计算能值指标。

本研究中主要计算以下能值指标:

(1) 能值产出率(EYR): 能值产出率是衡量系统产出对经济贡献大小和系统生产效率的指标, 它是系统产出能值与总辅助能值投入的比率。农业生态系统 EYR 值越高, 系统的生产效率越高, 越具有区域竞争力。表达式为: $EYR = \text{系统产出能值 } Y / \text{经济反馈能值}(F+R_2)$ ^[15]

(2) 能值投资率(EIR): 能值投资率是指生态系统的反馈能值与环境无偿能值比。它是计量经济发展程度和环境负载程度的指标。其值越大表明系统经济发展程度越高, 而对环境的依赖越弱。表达式为: $EIR = \text{经济反馈能值}(F+R_2) / \text{环境的无偿能值}(R_1+N)$ ^[15]

(3) 环境负载率(ELR): 通常来自系统的购买能值与系统不可更新环境资源能值之和除以系统可更新环境资源能值。一般来说, 环境负载率越小, 表明农业生态系统的环境承载压力越小, 发展潜力越大。表达式为: $ELR = \text{系统不可更新能值总量}(F+N) / \text{系统可更新能值总量}(R_1+R_2)$ ^[15]

(4) 基于能值的产品安全性指标(EIPS): 此指标用于评估系统的产品安全性, 定义为农业生产系统施用化肥、农药的能值(C)和经济反馈能值之比的负值, 0 值为最安全, 负值越大, 说明产品的安全性越差, -1 为最不安全。表达式为: $EIPS = -[\text{化肥、农药能值}(C) / \text{经济反馈能值}(F+R_2)]$ ^[16]

(5) 可持续发展指数(ESI): 能值可持续发展指标是系统净能值产出率与环境负载率的比值。表达式为: $ESI = \text{净能值产出率 } EYR / \text{环境负载率 } ELR$ ^[15]

1.3.2 数据处理 能量换算指数等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^[13-17]。

2 结果与分析

2.1 能值输入与输出

从表 2 中可以看出, 常规施肥(CK)、玉米秸秆粉碎还田(SR)、沼液还田(BR)、有机肥还田(OR)4 种不同的农田生态系统的能值分别为 1.78E+15Sej/a、1.77E+15Sej/a、1.74E+15Sej/a、1.97E+16Sej/a, 秸秆粉碎还田农田系统能值投入比对照略少, 差异不显著; 沼液还田农田系统的能值投入最少, 有机肥还田农田系统能值的输入最多, 是常规施肥的 11 倍, 这是因为牛粪中的能值远远大于化肥、秸秆和沼液的能值。其中可更新自然资源、不可更新自然资源、不可更新工业辅助能、可更新有机能占总输入能值的比例, 常规施肥农田系统分别占到了总能值投入的 55.96%、0.28%、27.81%、16.01%, 秸秆粉碎还田系统分别占到了 56.27%、0.28%、22.82%、20.73%, 沼液还田农田系统分别占到了 57.24%、0.29%、23.51%、18.91%, 而有机肥还田农田系统可更新自然资源、不可更新工业辅助能和可更新有机能占到了总能值输入的 5.06%、2.03%、92.89%, 常规施肥、秸秆粉碎还田和沼液还田农田系统中可更新自然资源所占比例最高, 说明这 3 种处理对环境的依赖性比较大, 而且 3 种处理对不可更新工业辅助能和可更新有机能的依赖程度相差不大。有机肥还田中可更新有机能所占比例最高, 几乎全部依赖可更新有机能的投入, 这是因为牛粪的太阳能值转化率非常高。4 种有机物还田处理的输出产品为玉米、小麦和玉米秸秆, 常规施肥、秸秆粉碎还田、沼液还田和有机肥还田能值输出量分别为 2.14E+15Sej/a、2.38E+15Sej/a、2.36E+15Sej/a、2.52E+15Sej/a, 其中有机肥还田处理的输出能值最大, 常规施肥的输出能值最小。

表 2 4 种有机物还田方式的农田生态系统能值流汇比较

Table 2 Comparison of the emergy flows under different organic matter returning modes

资源 Resource	原始数据 Raw data				能值转换率 Transformity	太阳能值 (Sej/a) Solar emergy			
	CK	SR	BR	OR		CK	SR	BR	OR
能值输入 Energy input									
可更新自然资源(R ₁) Renewable resources									
太阳辐射能	1.71E+10J	1.71E+10J	1.71E+10J	1.71E+10J	1	1.71E+10	1.71E+10	1.71E+10	1.71E+10
风能	1.33E+8J	1.33E+8J	1.33E+8J	1.33E+8J	1496 sdej/J	1.99E+11	1.99E+11	1.99E+11	1.99E+11
雨水化学能	2.33E+9J	2.33E+9J	2.33E+9J	2.33E+9J	4.28E+5Sej/J	9.96E+14	9.96E+14	9.96E+14	9.96E+14
雨水势能	1.22E+8J	1.22E+8J	1.22E+8J	1.22E+8J	1.69E+4Sej/J	2.06E+12	2.06E+12	2.06E+12	2.06E+12
小计						9.96E+14	9.96E+14	9.96E+14	9.96E+14
不可更新自然资源(N) Non-renewable resources									
表土层流失	8E+7J	8E+7J	8E+7J	8E+7J	6.25E+4Sej/J	5.0E+12	5.0E+12	5.0E+12	5.0E+12
不可更新工业辅助能(F) Non-renewable industrial energy									
氮肥	23.52 kg	11.76 kg	11.76 kg	11.76 kg	6.38E+12Sej/kg	1.5E+14	7.5E+13	7.5E+13	7.5E+13
磷肥	11.76 kg	7.43 kg	10.41 kg	7.64 kg	6.55E+12Sej/kg	7.7E+13	4.87E+13	6.82E+13	5E+13
钾肥	14.7 kg	0	9.10 kg	8.58 kg	2.92E+12Sej/kg	4.29E+13	0	2.66E+13	2.51E+13
机械	19.21 \$	24.01 \$	20.45 \$	21.29 \$	1.16E+13Sej/\$	2.23E+14	2.78E+14	2.37E+14	2.47E+14
农药	100 kg	100 kg	100 kg	100 kg	2.52E+10Sej/kg	2.52E+12	2.52E+12	2.52E+12	2.52E+12
小计						4.95E+14	4.04E+14	4.09E+14	4E+14
可更新有机能(R ₂) Renewable organic energy									
玉米秸秆	0	2.1E+9J	0	0	5.13E+4Sej/J	0	1.08E+14	0	0
沼液	0	0	2.1E+9J	0	2.7E+4 Sej/J	0	0	5.67E+13	0
牛粪	0	0	0	2000 kg	9.01E+12 Sej/kg	0	0	0	1.8E+16
种子	18.01\$	18.01\$	18.01\$	18.01\$	1.16E+13Sej/\$	2.09E+14	2.09E+14	2.09E+14	2.09E+14
劳动力	4.2E+7J	2.10E+7J	3.15E+7J	5.25E+7J	1.24E+6Sej/J	5.21E+13	2.6E+13	3.91E+13	6.51E+13
小麦秸秆	1.21E+9J	1.21E+9J	1.21E+9J	1.21E+9J	2E+4Sej/J	2.42E+13	2.42E+13	2.42E+13	2.42E+13
小计						2.85E+14	3.67E+14	3.29E+14	1.83E+16
合计						1.78E+15	1.77E+15	1.74E+15	1.97E+16
能值输出 Product emergy(Y)									
小麦	8.49E+9J	9.09E+9J	9.23E+9J	9.85E+9J	9.23E+4Sej/J	7.84E+14	8.39E+14	8.52E+14	9.09E+14
玉米	1.49E+10J	1.56E+10J	1.53E+10J	1.60E+10J	8.52E+4Sej/J	1.27E+15	1.33E+15	1.3E+15	1.36E+15
玉米秸秆	3.09E+9J	4.13E+9J	4.02E+9J	4.95E+9J	5.13E+4Sej/J	1.59E+14	2.12E+14	2.06E+14	2.54E+14
合计						2.21E+15	2.38E+15	2.36E+15	2.52E+15

2.2 能值评价比较与分析

从表3中看出,4种有机物还田方式中沼液还田的能值产出率(EYR)是常规施肥的1.13倍,是最大的,说明沼液还田处理的能源生产与利用效率最高,显示更强的经济活动竞争力,有机肥(牛粪)还田的能值产出率仅为0.13,这是因为在农田试验中,牛粪的能值投入太高,远远高于产出能值,而有机肥还田的农田系统的能值投资率(EIR)是对照的24.58倍,这也是因为牛粪的能值转换率非常高,投入到农田系统的能量远远高于秸秆和沼液等能值转换率较低的肥料。常规施肥处理的农田系统的环境负载率(ELR)是有机肥还田处理的19.5倍,对环境的压力是最大的,这是因为常规施肥处理更多的依赖环境和不可更新工业辅助能,而有机肥还田方式几乎全部依赖可更新有机能中有机肥的能量投入,因此对环境的压力的最小的,充分显示出了以可再生资源投入为主的生产特征。秸秆粉碎还田和沼液还田的可持续发展指数(ESI)基本相同,沼液还田的可持续发展指数最高,是常规施肥的1.43倍,ESI越大,表示系统可持续发展能力越强^[18,19]。说明沼液还田方式的农田生态系统可持续发展能力是最强的。基于能值的产品安全性指标(EIPS)检验了系统产出产品的安全性,在数轴上负值越接近0,产品安全性越高,越远离0,产品安全性越低。由表3可以看出,有机肥(牛粪)还田的农田系统产出的产品基于能值的产品安全性指标为-0.008,其安全性最高,常规施肥的农田系统产品存在一定的安全隐患。

表3 4种有机物方式的农田生态系统能值评价指标比较

指标项 Indicators	表达式 Expression	常规施肥 CK	秸秆粉碎还田 SR	沼液还田 BR	有机肥还田 OR
能值产出率(EYR)	$Y/(F+R_2)$	2.92	3.19	3.31	0.13
能值投资率(EIR)	$(F+R_2)/(R_1+N)$	0.76	0.75	0.71	18.68
环境负载率(ELR)	$(F+N)/(R_1+R_2)$	0.39	0.3	0.31	0.02
可持续发展指数(ESI)	EYR/ELR	7.49	10.63	10.68	6.5
基于能值的产品安全性指标(EIPS)	$-C/(F+R_2)$	-0.36	-0.17	-0.24	-0.008

3 讨论

本研究为探讨农田生态系统的能值效应及作用机制,引入了“能值”理论,计算了农田生态系统中主要的能值指标。蓝盛芳认为,开发能值产出率高的资源将更具有竞争力和经济效益,而低能值产出率的能源开发将会消耗更多的能量和资源,因此只有在较高能值产出率高的资源使用完了,才有可能开发低能值产出率的能源^[20]。本研究分析表明,沼液还田的农田系统的能值产出率是最高的,且能值投资率是最低的,说明沼液还田处理的生态系统在经济上可行性更强。从生态学角度看,在一个生态系统中,系统排出的废弃物质及其能量仍具有价值,但由于技术等限制,并不是所有废弃物质及其能量都能被有效利用,而这些不能被有效利用的废弃物质就是极其有害的负效益产出,将对生态环境造成严重的破坏。即能值产出率可能较高,但因为既包括有益产出,也包括有害产出,所以产出对人类不一定是有益的,因此引入可持续发展指数,为能值产出率与环境负荷率之比,其值越高,表明系统可持续发展指数越高^[18,19]。从结果来看,4种施肥处理中生态系统的可持续发展指数均高于中国农业可持续发展指数的平均值0.27,秸秆粉碎还田和沼液还田的生态循环系统的可持续发展指数较高,且两农田生态系统对环境的压力相对也是较低的,进一步说明该秸秆利用方式的农田系统的可持续发展能力更强。所以从这个角度讲,应该发展秸秆发酵产生沼液还田的利用方式。而有机肥还田(牛粪)的农田生态系统的能值产出率是极低的,可持续发展指数也比其他还田方式要低,这是因为牛粪是能值转换率极高的有机肥料,对于农田生态系统来说,像牛粪这类高能值的有机肥中,大部分能量都没有得到有效利用,农田生态系统并不能完全接纳这些能量,而且作物的产量在一定范围内不能实现大的提高,系统产品有限,这样极大影响了农田生态系统的能值效益和可持续发展能力,但是其对环境压力是最小的,而且产品的安全性是最高的,因此,我们可以考虑延伸种植业产业链,把初级生产和次级生产结合起来,在物质循环利用过程中,把“土壤-动物-植物”结合起来,使物质循环能量利用更趋向合理。

4 结 论

本研究引入了“能值”分析方法,对小麦玉米两熟农田生态系统进行了分析,结果表明:同等施氮量条件下,4种不同有机物还田方式相比较其能值效率和可持续发展能力大小顺序均为:沼液还田>秸秆粉碎还田>常规施肥>有机肥还田,可以看出在本地区沼液还田是4种有机物还田方式中最优的,玉米秸秆粉碎还田比沼液还田能值效率和可持续发展能力略低,而有机肥(牛粪)能值很高,但是不能完全被土地所容纳,且系统产品有限,因此高能值有机物料投入到农田生态系统中,并不一定能实现能值效益的最大化和可持续发展能力的增强。

参考文献

- [1] 尹昌斌,周颖.发展循环农业、拓展农业空间和功能[J].中国农业资源与区划,2008,29(1):70-75
- [2] 杨文平,单长卷,王春虎.秸秆还田量对冬小麦根际土壤微生物及产量的影响[J].广东农业科学,2012(5):59-61
- [3] 杨连玉,张国梁,赵颖彩,等.农业生态系统中玉米秸秆的综合利用[J].饲料工业,2005,26(23):42-45
- [4] 赵兰坡.施用作物秸秆对土壤的培肥作用[J].土壤通报,1996,27(2):76-78
- [5] 鲁如坤,刘鸿翔,闻大中,等.我国典型地区农业生态系统养分循环和平衡研究.III.全国和典型地区养分循环和平衡现状[J].土壤通报,1996,27(5):193-196
- [6] 韩玉,龙攀,陈源泉,等.中国循环农业评价体系研究进展[J].中国生态农业学报,2013,21(9):1039-1048
- [7] 尹昌斌,周颖.循环农业发展的基本理论及展望[J].中国农业生态学报,2008,16(6):1552-1556
- [8] 尹昌斌,唐华俊,周颖.循环农业内涵、发展途径及政策建议[J].中国农业资源与区划,2006,27(1):4-8
- [9] 尹昌斌,周颖,刘利花.我国循环农业发展理论与实践[J].中国生态农业学报,2013,21(1):47-53
- [10] Odum HT. Self-organization,transformity,and information[J]. Science, 1988,242(4882):1132-1139
- [11] 钟珍梅,翁伯琦,王义祥,等.生态系统能值理论研究进展及若干问题思考[J].福建农业学报,2010,25(4):520-525
- [12] 陆宏芳,蓝胜芳,李牟召,等.农业生态系统能值分析方法研究[J].韶关大学学报:自然科学版,2000,21(4):74-75
- [13] Odum HT. Handbook of Emergy Evaluation, a compendium of data emergy Computation issued in a series of Folios#2 emergy of global processes[M]. Gainesville:University of Florida, 2000:32611-6450
- [14] Brown MT, Bardi E. Handbook of Emergy Evaluation,a compendium of data emergy Computation issued in a series of Folios#3 emergy of ecosystems[M]. Gainesville:University of Florida, 2001:32611-6450
- [15] Odum HT. Environmental accounting: emergy and environmental decision making[M]. USA: Wiley,1995
- [16] 席运官,钦佩.稻鸭共作有机农业模式的能值评估[J].应用生态学报,2006,17(2):237-242
- [17] 兰盛芳,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,2002:91-94,366-386
- [18] Brown MT, Ulgiati S.Emergy analysis and environmental accounting[M]. Encyllopedia Energy, 2004:329-354
- [19] 严茂超.生态经济学新论-理论、方法与应用[M].北京:中国致公出版社,2001
- [20] 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