

基于能值分析的永定河流域农业生态补偿标准

付意成¹, 高 婷^{1,2*}, 闫丽娟¹, 张爱静¹, 阮本清¹

(1. 中国水利水电科学研究院 流域水循环模拟与调控国家重点实验室, 北京 100038;
2. 三峡大学 水利与环境学院, 宜昌 443002)

摘 要: 实施农业生态补偿是消除当前农业生产中的负面影响, 保证环境友好型农业生产顺利进行的前提。针对当前的农业生态补偿标准计算中, 价值受时空动态变化影响较大、投入成本难以准确计量的弊端, 借助能值与价值之间的可转化性, 给出基于农业可持续发展的生态补偿标准计算体系。选择永定河官厅水库以上流域为研究区, 从可更新资源 (R)、不可更新资源 (N)、物质投入 (M)、服务成本 (S) 的能值计算出发, 计算得出永定河流域的农业生产的总能值为 3.80×10^{16} Sej/hm², 其中可更新的能值为 1.59×10^{16} Sej/hm², 不可更新能值 2.21×10^{16} Sej/hm²。研究区农业生产的环境可持续指数 (ESI) 为 0.1056, 流域农业处于严重不可持续状态, 应实施农业生态补偿进行调整。借鉴能值与生态服务价值之间的可转化性, 为实现流域农业生产的可持续, 下游区域政府或受益部门应对上游农业水土流失防护补偿约 4 亿元。该文研究结果的应用表明, 基于能值的农业生态补偿标准计算方法具有一定的适用性。

关键词: 农业, 生态, 环境保护, 补偿标准, 能值, 环境可持续指数, 永定河流域

doi: 10.3969/j.issn.1002-6819.2013.01.028

中图分类号: TV212, X826, DF413.1

文献标志码: A

文章编号: 1002-6819(2013)-01-0209-09

付意成, 高 婷, 闫丽娟, 等. 基于能值分析的永定河流域农业生态补偿标准[J]. 农业工程学报, 2013, 29(1): 209-217.

Fu Yicheng, Gao Ting, Yan Lijuan, et al. Agro-ecological compensation standard based on emergy analysis in Yongding River basin[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2013, 29(1): 209-217. (in Chinese with English abstract)

0 引 言

农业生产不仅为区域经济社会的发展提供农副产品和食品加工的原材料, 而且还具有生态服务价值。农业的生态服务价值间接地体现在周边的生态、投资和人居环境方面。当前, 科研和社会机构已对农业的生态服务价值进行过系统研究, 如《北京市农业生态服务价值监测公报》将农业生态服务价值划分为农业经济价值、农业生态经济服务价值和农业生态环境服务价值三部分。农业生态系统作为复合生态系统, 其间接的服务功能价值利于气候调节、水源涵养、水土保持、废物处理等环境服务功能的加强或改善^[1]。因地, 因时制宜的农业活动能够对自然生态系统产生有效的保护和促进作用。如稻田生态系统对调节温度、改善空气质量具有显

著的促进作用^[2]。竞争性用水、农药和化学肥料的大量使用, 在促进农业稳产高产的同时, 却减小了作物的蛋白质含量并增加了粮食遭受污染的可能性^[3]。因此, 采用环境友好的农业生产技术, 促进农业生产并提高农产品的质量已成为各国实现农业可持续发展的关键。

农业生态补偿是以保护和可持续利用农业生态系统服务为目的, 以经济手段为主, 调节相关者利益关系的制度安排。当前对农业生态补偿主要存在农业生态的补偿、农业的生态补偿 2 种理解^[4]。两者的出发点和研究方法虽不相同, 但最终的落脚点却是实现农业的经济再生产和自然再生产过程的结合。学者依据区域农业生产的特点, 对农业生态补偿的模式和管理机制进行了相关研究。德国针对不同类型的农业生产方式, 对农业生态补偿的类型、补偿金的使用、奖惩细则进行严格的规定, 并指出补偿标准的计算基础是以以前的农业生产收入和采取农业环保措施所需要的经费^[5]。欧盟为补偿农民为保护环境而受到的损失, 借助农业环境保护补贴、环境受限制地区补偿等措施落实农业生态补偿^[6]。中国的甘肃省基于不同层面的农业节水措施和资金投入, 给出不同农业生产方式对应下的农业

收稿日期: 2012-04-23 修订日期: 2012-10-17

基金项目: 中国水科院流域水循环模拟与调控国家重点实验室开放研究基金 (IWHR-SKL-201120); 国家自然科学基金项目 (50979114)

作者简介: 付意成 (1983-), 男, 山东临朐人, 博士生, 主要从事流域水资源管理及流域生态补偿研究。北京 中国水利水电科学研究院, 100038。Email: swfyc@126.com

*通信作者: 高 婷 (1973-), 女, 湖北宜昌人, 副教授, 主要从事绿色水电、水环境学研究。宜昌 三峡大学, 443002。

Email: gaoting@ctgu.edu.cn

生态补偿标准^[7]。为实现农业生态和区域经济的协调发展，陈源泉等^[8]从生态经济学的相关理论和方法出发，依据安塞县的生态系统服务价值进行农业生态标准的计算。

已有的农业生态补偿标准，通常从农业的投入和直接经济价值层面出发，结合已有的农业面源污染数据，对农户进行污染源头的行为付出进行一定的经济补偿^[9]。实践表明，农户在提供巨大的农业经济价值和生态服务价值的同时，得到的社会补偿却难以弥补其生产过程中的成本投入和发展机会成本损失。本文针对当前以支付意愿为基础进行生态补偿标准测算过程中，难以考虑载体的变动、时间和风险因素等对补偿标准空间实施上的影响，利用能值在定性、定量评价环境支持系统服务功能上的优势，通过对农业生态服务价值、农业生态保护成本的能值计算，借助能值与经济价值之间的对应关系确定相应的农业可持续发展的补偿标准。该研究对合理判定农业生产的可持续状态、农业生态保护的成本投入量，以及从农业生产的整体层面确定农业补偿标准具有重要的理论价值和现实意义。

1 研究区概况

永定河旧名无定河，海河流域七大水系之一，

位于 112°~117°45'E、39°~41°20'N 之间。永定河上游有桑干河和洋河两大支流，在河北省怀来县朱官屯汇合，以下河段称永定河，在延庆县汇入妫水河，经官厅水库流入官厅山峡。本文选择官厅水库上游流域（山西省大同市、朔州市与河北省张家口市）作为研究区，如图 1 所示。研究区位于永定河的上游，区内农业生产较为发达，化肥施用量大，农业面源污染严重。研究区自《21 世纪初期首都水资源可持续利用规划》（2001 年）实施以来，就加大市政污水处理厂的建设和改造力度，有效减少了城镇生活、工业污水的直排入河的数量。据近年来流域水质自动检测断面的资料显示，氮超标已成为制约流域水质提高的关键^[17]。本文以此为契机，借助能值理论在确定农业生态系统产品与服务价值经济核算上的优势，通过对农业生产成本和价值进行计算，确定农业生态补偿标准。笔者在“永定河流域生态补偿标准研究”^[18]一文中已对研究区耕地以外的生态服务价值及保护成本投入进行过相关研究。为进一步完善农业体系的生产成本投入、价值计算方法，本文以月为计算时间尺度，在进行年制汇总的基础上，对农业种植过程中的生态产品价值及成本投入进行能值分析，为进行生态农业补偿标准的确定提供依据。

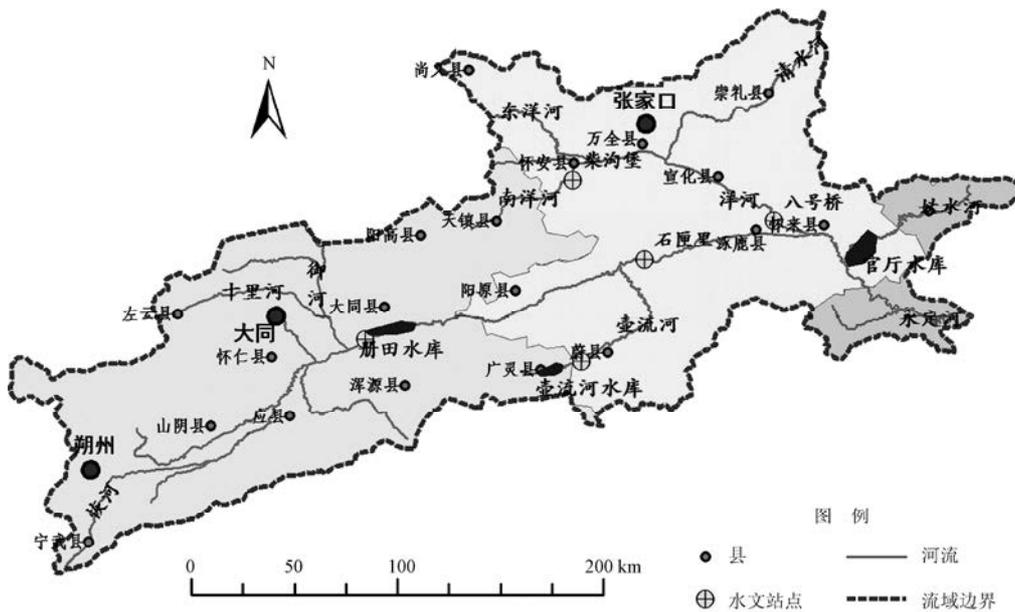


图 1 永定河流域概况
Fig.1 Location of Yongding River basin

2 研究方法及数据来源

农业生态补偿标准的核心是确定补多少，既能反映农业生态服务的价值及其成本与收益，又能被农户和政府管理部门接受，确保农业生态功能的恢

复或改善。能值分析以太阳光作为基准，把不同种类、不可比较的价值或产品通过统一标准转换后，转化为可度量的经济数据，可有效避免价值核算过程中市场波动、生态服务基础数据不确定带来的干扰。已有的研究表明，在生态服务价值确定上，

能值分析法与环境经济价值评价的结果高度一致^[10]。能值理论将农业生态系统中的各种输入、储存和输出等形式的能量转换为可比较的能值，利用单位产品能值对应的经济价值进行过渡，计算不同的投入及农业生态服务产品对应的补偿标准^[11]。

本文将自然资源、农业产品、环保型农业生产经济投入转化为能值流： R 代表可更新资源， N 代表不可更新资源， F 代表环保生产的经济输入^[12]。其中， F 由市场或经济流量提供。为计算方便，本文选择阳光的单位能值转化率作为过渡当量值，进行能量及价值的能值转换^[13]。其中，能值转化率 (EER) 表示在农业产品或其生态服务价值在交易和买卖过程中，能值与价值的转化关系。能值评价为在计算能值价格 ($Em\$$) 的基础上为进行联合生态和经济的评价提供依据。农业生态系统能值评价过程中，各因子间的动态联系，如图 2 所示。能值计算过程中用到的参数，如表 1 所示。

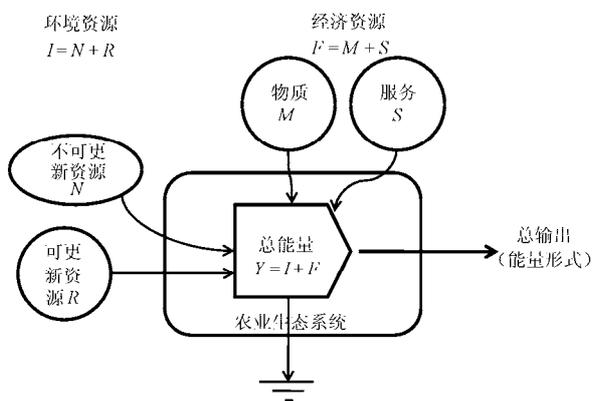


图 2 农业生态系统能值评价涵盖因子

Fig.2 Emery system diagram of agro-ecological system

表 1 能值计算参数表

Table 1 Emery calculation indices

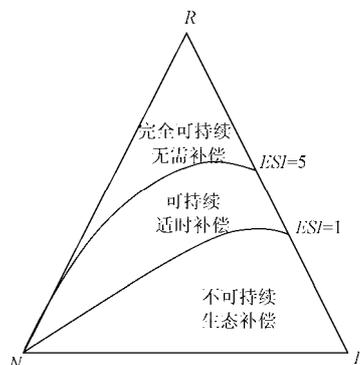
参数	性状阐述	计算公式
EYR	能值收益率，能值总输出 $Y(Y=N+R+F)$ 与输入 F 的比值	$EYR=Y/F$
ELR	环境负荷指数，不可更新资源能值与可更新资源能值的比值	$ELR=(N+F)/R$
ESI	环境可持续指数，用于对产出和环境负荷的管理，寻求在最低的环境破坏的情形下取得最大的产量	$ESI=EYR/ELR$
EMR	能值对经济增长支持率，利用不同国家/区域的能值 (Y) 进行经济的纵向比较	$EMR=Y/GDP$
EER	能值转化率，用于产品交易过程中，能值与经济转化效率的比较	$EER=Y/EMR$
$Em\$$	能值价格转化率，将能值转化为可交易产品的价格	$Em\$=Y/EMR$

注： Y 表示总能值， Sej ； N 、 F 、 R 分别表示不可更新、环保生产的经济投入、可更新资源的能值， Sej ； GDP 为地区的区域生产总值，万元。

依据农业生态系统的能值评价理论，本文在对研究区农业生态系统的产品及其服务功能进行能值计算的基础上，借助产品能值与市场价值、经济投入之间的转换关系，确定农业生态补偿的标准。

为全面起见，该文在计算过程中，对农业种植造成的水土流失、地表（地下）径流变化情况也借鉴相关的研究成果进行了分析^[14-15]。

农业生态补偿的目的是在最小的环境保护投入下，实现最大的农业生产和生态服务价值。农民对土地具有使用权，通常具有自主经营的权利。环境友好型农业生产的实施，会在一定程度上增加农民对土地的附加投入，但却增加了农业生产的正向生态效益。本文以 ESI 计算数据为依据，对生态补偿的对象做出如下界定： $ESI>5$ 时，农业生态系统具有较强的生态可持续性，因此，政府不需要对农民的投入进行补偿； $1<ESI<5$ 时，农业生态系统虽具有可持续性，但需要进行外界人为措施的正向干预，因此，政府对农民采用环境友好生产方式的投入进行补偿； $ESI<1$ 时，农业生态系统不可持续，需要政府和农户共同承担农业环保措施的投入^[16]。基于 R 、 N 、 F 之间变动关系的可持续发展指数，如图 3 所示。



注： ESI 为环境负荷指数。 N 、 F 、 R 分别表示不可更新、环保生产的经济投入、可更新资源的能值，不同可持续发展度之间的界限依托库兹涅兹曲线画出，表明在可更新的投入达到一定水平后，环境处于最优状态，并将会持续一段时间。不同区间的面积仅表示区域不同发展程度下的投入和资源的耗费比值，没有实际物理意义。

图 3 环境可持续指数与生态补偿实施关系图解

Fig.3 Relationship diagram between ESI and eco-compensation

2.1 基础数据

利用 2007 年 TM (thematic mapper)、ETM+ (enhanced thematic mapper plus) 遥感影像，同时借助野外调查，解译永定河流域下垫面土地利用类型信息，将土地利用类型划分为耕地（水浇地和旱田）、林地、草地、荒地、水体等土地利用类型。结合流域土地利用类型图，借助 GIS (geographic information system) 的统计分析功能给出研究区不同计算单元上的耕地面积，如表 2 所示（为便于研究水土流失与降雨径流的关系，本文选择流域水资源分区套行政区划的方法进行计算单元的划分）。为充分考虑作物种植给耕地营养物质流失、地表地下径流过程造成的影响，以年为时段进行农业生态补偿标准的确定。以 2007 年山西、河北省农业统计

年鉴中重点农作物的统计分类为基础,选取小麦、玉米、大豆、花生、棉花、水果、蔬菜为研究对象,进行产品及生态服务能值的确定。农作物生长过程中会对耕地营养物的流失造成一定的影响。为准确计算研究区农业生态系统的能值,在对多年平均数据进行分析的基础上,分类统计单位面积耕地的营养物质流失量,结果见表3。

表2 研究区耕地面积

水资源分区	行政区	耕地面积/hm ²
永定河册田水库以上	大同市	102 709
	山西省 朔州市	206 105
	忻州市	2 706
	合计	311 520
永定河册田水库至三家店区间	河北省 张家口	257 068
	山西省 大同市	114 881
	合计	371 949
永定河流域合计		683 469

表3 研究区耕地营养物质流失情况

作物类型	磷	钾	氮	钙	其他
小麦	20.8	20.5	115.8	1.0	9.3
玉米	12.2	16.6	83.4	0.4	9.7
大豆	8.9	28.6	96.3	9.1	3.9
棉花	5.7	13.1	30.9	1.2	2.8
花生	5.3	45.8	46.3	3.7	5.7
蔬菜	13.3	148.8	92.6	18.5	10.4
水果	2.1	30.1	30.9	1.9	2.1
合计	68.3	303.5	496.2	35.8	43.9

2.2 计算过程

单位面积能量流的计算是确定研究区生态服务价值和成本投入的基础。在对研究区投入产出成本进行归类合并的基础上,给出2007年农业生态系统能量流的计算过程。

2.2.1 可更新资源的投入 (R)

1) 光能

阳光的照射效率取为 5.29 kW/m²,地面反射率为 20%^[9]。经计算,地面获得的能量效率为 4.23 kW/m²。地面太阳光的能量转化率为 3.6×10⁶ J/KW,单位面积上阳光的照射面积为 1.0×10⁴m²/hm²。经过能量转换运算得到阳光的能量:

$$E_s = 4.23 \times (3.6 \times 10^6) \times (1.0 \times 10^4) = 1.52 \times 10^{11} \text{ (J/hm}^2\text{)} \quad (1)$$

2) 降雨

2007年,永定河流域的平均降水量为 483.5 mm^[17]。单位质量的水的能量、密度取为 5 000 J/kg、1 000 kg/m³。地面单位面积上降水的获得量为 1.0×10⁴m²/hm²。由此计算降雨的能量为:

$$E_r = 0.4835 \times 10^3 \times (5 \times 10^3) \times (1.0 \times 10^4) = 2.42 \times 10^{10} \text{ (J/hm}^2\text{)} \quad (2)$$

3) 风能

空气的密度为 1.3 kg/m³。参考海河流域近 50 年来的气象变化资料,研究区多年平均风速为 2.5 m/s,近地风速为平均风速的 60%,即为 1.5 m/s,阻力系数为 0.001。计算时间段暂取为 1 a,即为 3.15×10⁷s。由此,风能的能量为:

$$E_w = (683469 \times 10^4 / 683469) \times 1.3 \times (1.5)^3 \times 0.001 \times (3.15 \times 10^7) = 1.39 \times 10^9 \text{ (J/hm}^2\text{)} \quad (3)$$

4) 地表径流

2007年,依据降雨径流转换关系,根据研究区的耕地面积计算地表径流量为 1.48×10⁸ m³。依据文献[17]计算,农业用水量为 8.58×10⁷ m³(农业用水约占 60%)。研究区耕地面积为 683469 hm²。单位质量的水的能量、密度取为 5 000 J/kg、1 000 kg/m³。耕地造成的地表径流的能量为:

$$E_g = (8.58 \times 10^7) \times (1/683469) \times (1.0 \times 10^3) \times (5.0 \times 10^3) = 6.26 \times 10^8 \text{ (J/hm}^2\text{)} \quad (4)$$

5) 水利工程

2007年,研究区农业生产过程中,水利工程取水量为 2.87×10⁷ m³。由此计算能量为:

$$E_i = (2.87 \times 10^7) \times (1/683469) \times (1.0 \times 10^3) \times (5.0 \times 10^3) = 2.10 \times 10^8 \text{ (J/hm}^2\text{)} \quad (5)$$

6) 营养元素

结合表3中的数据,根据物质与能量的对应关系,在进行单位换算的基础上,研究区氮、磷、钾、钙营养元素的能量流为:

$$E_N = 496.3 \text{ J/hm}^2 \quad E_P = 68.3 \text{ J/hm}^2$$

$$E_K = 303.5 \text{ J/hm}^2 \quad E_{Ca} = 35.8 \text{ J/hm}^2$$

7) 生物量

依据 Aber 等^[20]、Ponce-Hernandez 等^[21]的研究成果,计算得到研究区的生物量为 4.21×10⁹ kg。研究区生物的分布面积为 683 469 hm²。1kg 生物量中的有效生物量为 1.0×10³g。在取单位生物量的能量为 16 728 J/g 的前提下,研究区的生物量能量为

$$E_b = (4.21 \times 10^9) \times 16728 \times 0.25 \times (1/683469) \times (1.0 \times 10^3) = 1.03 \times 10^{11} \text{ (J/hm}^2\text{)} \quad (6)$$

2.2.2 不可更新资源的投入 (N)

在查阅文献[22]的基础上,永定河流域的土壤损失量为 15 000 kg/hm²。借鉴黄银晓等^[23]的研究成果,永定河流域的土壤以褐土为主,土壤中有机的含量为 0.022 kg/hm²。单位质量土壤中含有的能量为 2.26×10⁷ J/kg。土壤流失造成的能量损失为:

$$E_s = (1.5 \times 10^4) \times 0.022 \times 5400 \times 4186 = 7.46 \times 10^9 \text{ (J/hm}^2\text{)} \quad (7)$$

2.2.3 物质 (M)

1) 材料折旧

随着生产工具的长期使用, 实物本身的价值便会逐渐的被折旧。鉴于农业生态系统中, 生产工具的多样化及使用年限的差异, 借鉴 Coelho 等^[24]的研究成果, 将研究区农业生产材料折旧费的能量取为 925 元/hm²。

2) 燃油

研究区用于农业生产和作物管理、收获过程的燃油和其他动力能源为 1.15×10⁷ L, 燃油的密度取为 0.75 kg/L, 其完全燃烧产生的能量为 4184 kJ/kg。单位质量燃油的密度取 4.186×10⁶J/kg。燃油产生的能量为:

$$E_o=(1.15 \times 10^7) \times (1/683469) \times 0.75 \times (1.0 \times 10^3) \times 4186 = 5.28 \times 10^7 \text{ (J/hm}^2\text{)} \quad (8)$$

3) 电力

当前永定河流域农业生产中, 农业灌溉用水主要用柴油机抽取, 即便有少量的电机取水, 但相对于柴油机的取水量而言, 可忽略不计。因此, 在农业现代化水平不高的永定河流域, 暂不考虑电力在农业物质生产过程中的能量。

4) 物质

物质的能量主要指在农业生产和管理过程中, 种子、地膜、地面辅助设施的成本折现。以流域农业统计年鉴的数据为基础, 折算得出研究区物质的能量为 4 300 元/hm²。

2.2.4 服务 (S)

1) 劳动力

考虑到当前劳动力成本较高, 在创造等量价值的前提下, 农业生产投入的人力、时间较多, 在对年鉴数据依据区域效益权重进行批分的基础上, 通过与国外相近管理水平条件下的农业生产中人力成本投入进行比较, 以研究区劳动力外出务工的机会成本为基础, 借鉴外部成本内部化的计算方法, 给出永定河流域的人力能量折现为 3 900 元/hm²。

2) 管护

永定河流域农业生产过程中, 农业的管理维护费用较低, 主要用于田间道路、管网的维护。此类设施的使用年限较长, 并且需要管理维护的费用较低。因此, 在借鉴前人^[3]研究成果的基础上, 计算得出研究区的管护能量为 76 元/hm²。

3) 服务

永定河流域的农业作为旅游景观对外开放的面积较小, 因此, 研究区的服务能量较低, 本文取为 10 元/hm²。

3 计算结果分析

以计算出的农业生态系统的投入、输出的能量为基础, 结合能值与能量之间的转换关系, 在确定计算明细中可利用量所占比例的前提下, 计算研究区能值流^[25]。永定河流域农业系统能值流的具体计算结果, 如表 4 所示。

表 4 永定河流域农业生态系统能值流的评价

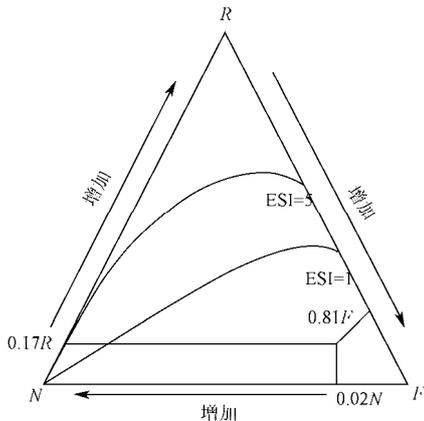
Table 4 Energy flows evaluation of farmland in Yongding River basin

性质	明细	可更新率	单位	能量流	能值	可利用能值/ (Sej hm ⁻²)	不可利用能值/ (Sej hm ⁻²)	总能值/ (Sej hm ⁻²)
可更新 (R)	光能	1	J	1.52×10 ¹¹ (J hm ⁻²)	1.00(Sej J ⁻²)	1.52×10 ¹¹	0	1.52×10 ¹¹
	降雨	1	J	2.42×10 ¹⁰ (J hm ⁻²)	3.10×10 ⁴ (Sej J ⁻²)	1.94×10 ¹⁵	0	1.94×10 ¹⁵
	风能	1	J	1.39×10 ⁹ (J hm ⁻²)	2.45×10 ³ (Sej J ⁻²)	3.41×10 ¹²	0	3.41×10 ¹²
	地表径流	1	J	6.26×10 ⁸ (J hm ⁻²)	4.85×10 ⁴ (Sej J ⁻²)	3.04×10 ¹³	0	3.04×10 ¹³
	水利工程	1	J	2.10×10 ⁸ (J hm ⁻²)	2.55×10 ⁵ (Sej J ⁻²)	5.36×10 ¹³	0	5.36×10 ¹³
	营养元素 N	1	kg	496.3(kg hm ⁻²)	6.38×10 ¹² (Sej kg ⁻²)	2.98×10 ¹⁵	0	2.98×10 ¹⁵
	营养元素 P	1	kg	68.3(kg hm ⁻²)	3.90×10 ⁹ (Sej kg ⁻²)	2.66×10 ¹¹	0	2.66×10 ¹¹
	营养元素 K	1	kg	303.5(kg hm ⁻²)	1.74×10 ¹² (Sej kg ⁻²)	5.28×10 ¹⁴	0	5.28×10 ¹⁴
	营养元素 Ca	1	kg	35.8(kg hm ⁻²)	1.00×10 ¹² (Sej kg ⁻²)	3.58×10 ¹³	0	3.58×10 ¹³
不可更新 (N)	生物量	1	J	1.03×10 ¹¹ (J hm ⁻²)	1.00×10 ⁴ (Sej J ⁻²)	1.03×10 ¹⁵	0	1.03×10 ¹⁵
	土壤流失	0	J	7.46×10 ⁹ (J hm ⁻²)	1.24×10 ⁵ (Sej J ⁻²)	0	9.25×10 ¹⁴	9.25×10 ¹⁴
	物质 (M)							
物质 (M)	材料折旧	0.05	元	925(元 hm ⁻²)	3.30×10 ¹² (Sej 元 ⁻¹)	0.15×10 ¹⁵	2.90×10 ¹⁵	3.05×10 ¹⁵
	燃油	0	J	5.28×10 ⁷ (J hm ⁻²)	5.50×10 ⁵ (Sej J ⁻¹)	0	2.90×10 ¹³	2.90×10 ¹³
	物质	0.1	元	4 300(元 hm ⁻²)	3.30×10 ¹² (Sej 元 ⁻¹)	0.14×10 ¹⁶	1.28×10 ¹⁶	1.42×10 ¹⁶
服务 (S)	劳动力	0.6	元	3 900(元 hm ⁻²)	3.30×10 ¹² (Sej 元 ⁻¹)	0.77×10 ¹⁶	0.52×10 ¹⁶	1.29×10 ¹⁶
	管护	0.1	元	76(元 hm ⁻²)	3.30×10 ¹² (Sej 元 ⁻¹)	0.25×10 ¹⁴	2.26×10 ¹⁴	2.51×10 ¹⁴
	服务	0.05	元	10(元 hm ⁻²)	3.30×10 ¹² (Sej 元 ⁻¹)	0.17×10 ¹³	3.14×10 ¹³	3.30×10 ¹³
合计 (Y)						1.59×10 ¹⁶	2.21×10 ¹⁶	3.80×10 ¹⁶

注: 1. 能值转换的参考值在借鉴 Odum 等^[13]、Bastianoni, S.等^[26]、Brown, M.T.等^[27]、Brandt-Williams^[28]、Coelho, O.等^[24]研究成果的基础上整理而成。

2. 表中可更新率表示该项属于可更新能源的可能性。

结合以上计算结果，通过对研究区的基础数据进行整理，表征农业生态系统环境、经济投入产出的基本量 ESI 为 0.1056，远远低于农业可持续发展的表征值 5。经计算，研究区的 EYR 为 1.11，ELR 为 10.51，因此，流域农业生产中不可持续的投入或产值占较大比例，这也是造成永定河流域农业生产低效、环境成本代价高的主要原因。认为研究区政府部门应加大对可持续农业生产的投入力度，并加强环境管理，通过实施农业生态补偿，有效的实现永定河流域农业的可持续发展。为进一步表明不同资源、投入类型在区域总能值所占的比例，参考文献[3]进行能值三角的绘制，如图 4 所示。



注：R、N、F 代表不可更新资源、代表可更新资源、环保生产的经济输入，构成物质的不同形式的能值处于不断变化和循环过程中；ESI 为环境负荷指数；图中参数借助表 4 计算而来。

图 4 研究区能值三角表征
Fig.4 Ternary energy assessment diagram

永定河流域的农业生产处于不可持续的状态。本文利用生态系统能值与经济值之间的转换关系，计算研究区由于环境保护投入、受益生态服务价值能值对应下的经济补偿额。永定河流域农业生产投入和环境受益的能值定价，如表 5 所示。

表 5 永定河流域农业生产中能值定价
Table 5 Energy price of annual driving energies and environmental benefits

性质	明细	能值/ (Sej hm ⁻²)	能值定价/ (元 hm ⁻²)	价值总量/ 亿元
可更新 (R)	光能	1.52×10 ¹¹	0.1	0
	降雨	1.94×10 ¹⁵	1 246.9	8.52
	风能	3.41×10 ¹²	2.19	0.01
	地表径流	3.04×10 ¹³	19.54	0.13
	水利工程	5.36×10 ¹³	34.45	0.24
	营养元素 N	2.98×10 ¹⁵	1 915.35	13.09
	营养元素 P	2.66×10 ¹¹	0.17	0
	营养元素 K	5.28×10 ¹⁴	339.36	2.32
	营养元素 Ca	3.58×10 ¹³	23.01	0.16
	生物量	1.03×10 ¹⁵	662.02	4.52
不可更新 (N)	土壤流失	9.25×10 ¹⁴	594.53	4.06

续表

性质	明细	能值/ (Sej hm ⁻²)	能值定价/ (元 hm ⁻²)	价值总量/ 亿元
物质 (M)	材料折旧	3.05×10 ¹⁵	1 960.34	13.40
	燃油	2.90×10 ¹³	18.64	0.13
	物质	1.42×10 ¹⁶	9 126.83	62.38
服务 (S)	劳动力	1.29×10 ¹⁶	8 291.28	56.67
	管护	2.51×10 ¹⁴	161.33	1.10
	服务	3.30×10 ¹³	21.21	0.14

注：表中的数据在一定的保留精度下可能会出现零值的情况，但并不影响计算结果的精度。能值定价一列中的数据参考文献[29-30]计算得出。

从农业生产中的物质、服务的投入考虑，永定河流域农业生产中的投入补偿所占的比例较大，总量为 134 亿（物质 M、服务 S 对应的价值和）。流域农户在得到政府的等量补偿额后才能放弃高耗能的低效农业生产，并将土地的生态服务价值最大程度的表现出来。但此值不宜作为农业生态补偿的标准，原因如下：1) 农业生产投入的受益主体以上游的农民为主，在正向生态效益外溢的情况下（农业生产的生态服务价值及农产品本身的价值能够跨越地域限制，被流域内外区域共享），下游得到的收效甚微。按照“谁受益，谁补偿”的原则，下游不愿补偿上游的农业生产投入；2) 研究区农业生产处于严重的不可持续状态，并未说明下游需对上游生产的外部不经济性负责。造成农业生产低效、高污染的原因是多方面，上游的化学肥料的大量使用也是其中的一个重要原因；3) 该值不能反映农业退化生态的现状，只是造成农业生态不可持续的原因。水土流失的原因和其所造成的农田生态系统的失衡，正是造成当前研究区农业不可持续的原因。因此，从遏制农业生态退化的角度考虑，流域当前的水土流失的能值为 9.25×10¹⁴ Sej/hm²，由此造成的经济损失为 4 亿元（土壤流失价值）。因此，为实现永定河流域农业生产对环境破坏程度最小化，当地政府和下游受益部门应对农户的治理投入和田间管理措施进行一定的补偿，补偿标准约为 4 亿元。

4 讨论

当前对生态补偿标准的研究主要侧重于森林、资源、流域等层面，并且针对性强、定量测算方法较少。农业生态补偿标准的量化研究还处于探索阶段，缺乏成熟完备的计算体系，理论和实践方面均有待完善。

本文虽提出了一种针对农业生产实际，利用能值的经济转换指标确定生态补偿标准的新方法。但当前对该方法的研究许多理论尚不成熟，并且区域的能值流计算基础也不尽相同，在以后的研究中，将针对该计算方法的适应性及区域的应用案例进

一步展开研究。

5 结 论

流域生态补偿标准研究由于涉及因素众多, 并且计算方法因人、因时、因地而异, 且当前主要以定性的判定或现状问卷调查为主, 量化程度较低。针对农业生态体系在流域生态健康可持续发展中的重要性, 借鉴能值在处理不可度量因素间关系的优势, 本文给出基于能值分析的流域农业生态补偿标准研究体系。针对永定河流域在北京城市水资源供给中的重要性, 选择官厅水库以上永定河流域为研究区, 从可更新资源 (R)、不可更新资源 (N)、物质投入 (M)、服务成本 (S) 的能值计算出发, 给出表征流域农业生态可持续性的判定指标 ESI 为 0.1056, 流域的农业生产处于不可持续状态。结合能值与经济指标之间的对应关系, 给出流域农业生产中环境保护投入与农业生产附加功能的生态价值衡量标准。为实现永定河流域农业生产的可持续发展, 流域下游政府和收益部门应向上游农户补偿 4 亿元。

[参 考 文 献]

- [1] 袁伟玲, 曹凑贵. 农田生态系统服务功能及可持续发展对策初探[J]. 湖南农业科学, 2007(1): 1—3.
Yuan Weiling, Cao Cougui. Farmland ecosystem services and sustainable development strategy[J]. Hunan Agricultural Sciences, 2007(1): 1—3. (in Chinese with English abstract)
- [2] 李慧, 陈冠雄, 杨涛, 等. 沈抚灌区含油污水灌溉对稻田土壤微生物种群及土壤酶活性的影响[J]. 应用生态学报, 2005, 16(7): 1356—1359.
Li Hui, Chen Guanxiong, Yang Tao, et al. Impacts of petroleum-containing wastewater irrigation on microbial population and enzyme activities in paddy soil of Shenfu irrigation area[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2005, 16(7): 1356—1359. (in Chinese with English abstract)
- [3] Giannetti B F, Ogura Y, Bonilla S H, et al. Emergy assessment of a coffee farm in Brazilian Cerrado considering in a broad form the environmental services, negative externalities and fair price[J]. Agricultural Systems, 2011, 104 (9): 679—688.
- [4] Benayas J M R, Bullock J M. Restoration of biodiversity and ecosystem services on agricultural land[J]. Ecosystems, 2012, 15(6): 883—899.
- [5] 尹红. 美国与欧盟的农业环保计划[J]. 中国环保产业, 2005(3): 42—45.
Yin Hong. Agricultural environmental programs of U.S.A. and EU[J]. China Environmental Protection Industry, 2005(3): 42—45. (in Chinese with English abstract)
- [6] Laterra P, Orue M E, Booman G C. Spatial complexity and ecosystem services in rural landscapes[J]. Agriculture Ecosystems and Environment, 2012, 54(Supp.1): 56—67.
- [7] 车宗贤, 张立勤. 甘肃河西走廊节水农业生态补偿机制探索[J]. 农业环境与发展, 2011(4): 47—47, 77.
Che Zongxian, Zhang Liqin. Exploration on ecological compensation mechanism of water-saving agriculture in hexi corridor of gansu[J]. Agro-Environment and Development, 2011(4): 47—47, 77. (in Chinese with English abstract)
- [8] 陈源泉, 董孝斌, 高旺盛. 黄土高原农业生态补偿的探讨[J]. 农业系统科学与综合研究, 2006, 22(2): 109—111.
Chen Yuanquan, Dong Xiaobin, Gao Wangsheng. Ecological compensation for agriculture in Loess Plateau[J]. System Sciences and Comprehensive Studies in Agriculture, 2006, 22(2): 109—111. (in Chinese with English abstract)
- [9] Schleyer Christian, Plieninger Tobias. Obstacles and options for the design and implementation of payment schemes for ecosystem services provided through farm trees in Saxony, Germany[J]. Environmental Conservation, 2011, 38(4): 454—463.
- [10] 陆宏芳, 陈烈, 林永标, 等. 基于能值的顺德市农业系统生态经济动态[J]. 农业工程学报, 2005, 21(12): 20—24.
Lu Hongfang, Chen Lie, Lin Yongbiao, et al. Emergy based ecological economic dynamics of Shunde agriculture system[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2005, 21(12): 20—24. (in Chinese with English abstract)
- [11] 易定宏, 文礼章, 肖强, 等. 基于能值理论的贵州省生态经济系统分析[J]. 生态学报, 2010, 30(20): 5635—5645.
Yi Dinghong, Wen Lizhang, Xiao Qiang, et al. Emergy-based ecological economic characteristics in Guizhou Province. Acta Ecologica Sinica, 2010, 30(20): 5635—5645. (in Chinese with English abstract)
- [12] Ortega E, Anami M, Diniz G. Certification of food products using emergy analysis[C]//In: Proceedings of III International Workshop Advances in Emergy Studies, Porto Venere, Italy, 2002: 227—237.
- [13] Odum H T, Odum E C. Modeling for All Scales[M]. Academic Press, San Diego, CA, 2000.
- [14] Wischmeier W H, Smith D D. Predicting rainfall erosion losses—a guide to conservation planning[M]. U.S. Department of Agriculture, Agriculture Handbook, 1978.
- [15] Adekalu K O, Olorunfemi I A, Osunbitan J A. Grass mulching effect on infiltration, surface runoff and soil loss of three agricultural soils in Nigeria[J]. Bioresour. Technol., 2007, 98 (4): 912—917.
- [16] Lefroy E, Rydberg T. Emergy evaluation of three cropping systems in southwestern Australia[J]. Ecological Modeling, 2003, 161(3): 195—211.

- [17] Fu Yicheng, Ruan Benqing, Zhang Chunling, et al. Yongding River Basin water environmental restoration cost[J]. *Journal of Food Agriculture and Environment*, 2012, 10(2): 876–883.
- [18] 付意成, 阮本清, 张春玲. 永定河流域生态补偿标准研究[J]. *中国水利水电科学研究院学报*, 2011, 9(4): 283–291.
Fu Yicheng, Ruan Benqing, Zhang Chunling. Research on the ecological compensation standard of Yongding River Basin[J]. *Journal of China Institute of Water Resources and Hydropower Research*, 2011, 9(4): 283–291. (in Chinese with English abstract)
- [19] Ulgiati S, Brown MT, Bastianoni S, et al. Emergy-based indices and ratios to evaluate the sustainable use of resources[J]. *Ecological Engineering*, 1995, 5(4): 519–531.
- [20] Aber J D, Melillo J M. *Terrestrial Ecosystems*[M]. Harcourt Science and Technology Company, Harcourt Academic Press. 2001.
- [21] Ponce-Hernandez R, Koochafkan P, Antoine J. Assessing carbon stocks and modelling win-win scenarios of carbon sequestration through land-use changes[M]. *Food and Agriculture Organization of the United Nations*, Rome, 2004.
- [22] 胡春宏, 王延贵. 官厅水库流域水沙优化配置与综合治理措施研究[J]. *泥沙研究*, 2004(2): 19–26.
Hu Chunhong, Wang Yanguai. Study on water-sediment optimum allocation in upstream basin and comprehensive measures of sediment control in Guanting reservoir[J]. *Journal of Sediment Research*, 2004(2): 19–26. (in Chinese with English abstract)
- [23] 黄银晓, 林舜华, 蒋高明, 等. 海河流域植物土壤中氮碳的含量特征[J]. *生态学报*, 1994, 14(3): 225–234.
Huang Yinxiao, Lin Shunhua, Jiang Gaoming, et al. Characteristics of nitrogen and carbon contents in plants and soils in the Haihe river basin[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 1994, 14(3): 225–234. (in Chinese with English abstract)
- [24] Coelho O, Ortega E, Comar V. *Balanco de Emergia do Brasil*[C]//*Engenharia Ecológica e Agricultura Sustentável (Ecological Engineering and Sustainable Agriculture)*. Enrique Ortega, 2003.
- [25] Feni Agostinho, Guaraci Diniz, Raul Siche, et al. The use of emergy assessment and the Geographical Information System in the diagnosis of small family farms in Brazil[J]. *Ecological Modeling*, 2008, 210(1/2): 37–57.
- [26] Bastianoni S, Marchettini N. The problem of co-production in environmental accounting by emergy analysis[J]. *Ecol Model*, 2000(129): 187–193.
- [27] Brown M T, Odum H T, Jorgensen S E. Energy hierarchy and transformity in the universe[J]. *Ecol. Model*, 2004, 178 (1/2): 17–28.
- [28] Brandt-Williams S L. *Handbook of Emergy Evaluation: A Compendium of Data for Emergy Computation Issued in a Series of Folios*[C]//2002.
- [29] Feni Agostinho, Lucas Pereira. Support area as an indicator of environmental load: Comparison between Embodied Energy, Ecological Footprint, and Emergy Accounting methods[J]. *Ecological Indicators*, 2013, 24: 494–503.
- [30] Franzese P P, Rydberg T, Russo G F, et al. Sustainable biomass production: a comparison between gross energy requirement and emergy synthesis methods[J]. *Ecol. Indic*, 2009, 9(5): 959–970.

Agro-ecological compensation standard based on emergy analysis in Yongding River basin

Fu Yicheng¹, Gao Ting^{1,2*}, Yan Lijuan¹, Zhang Aijing¹, Ruan Benqing¹

(1. *State Key Laboratory of Simulation and Regulation of River Basin Water Cycle, China Institute of Water Resources and Hydropower Research, Beijing 100038, China*; 2. *Water conservancy and Environmental Sciences, China Three Gorges University, Yichang 443002, China*)

Abstract: The aim of agro-ecological compensation is to eliminate the negative effects during agricultural production, and promote the strategy implementation of environment-friendly agriculture. At present, agro-ecological compensation standard is greatly affected by the temporal and spatial variation of value, and the inaccuracy of input cost calculation result. Emergy is an important advanced technology in calculation of material inputs and efficiency of agricultural ecological protection quality. The paper gave the study method of agro-ecological compensation standard based on the conversion between emergy and value, as well as the process to calculate agro-ecological protection cost and benefit. On the basis of defining the components within the system, and allowing the identification of inputs and output of agricultural production, the annual emergy flows

were calculated. Then the emergy indicators were determined to evaluate the performance of the agriculture environmental system. Taking the upstream of Guanting Reservoir in Yongding River basin as study area, on the basis of calculating the emergy of renewable natural resources (R), non-renewable natural resources (N), materials (M) and services (S), the total emergy, renewable emergy and non-renewable emergy of Yongding River basin agro-ecological system were 3.80×10^{16} , 1.59×10^{16} and 2.21×10^{16} Sej/hm² respectively. According to the calculating data of ESI (Environmental Sustainability Index for the management of agricultural output and environmental load, assumed to obtain the largest production with the minimum of environmental damage), the sustainable development degree of basin agricultural production was determined. The index of ESI was calculated by transforming natural resources, agricultural products, and environment-friendly agricultural production economic input into emergy flow. Combining the calculation results of emergy, fundamental quantity ESI is 0.1056, which is far below 5. Therefore, unsustainable input or output accounts for a large proportion during basin agricultural production, which indicates that agro-ecological system of study area is not sustainable, and to adopt agro-ecological compensation measures is necessary. The respective emprice of the environmental benefits (R, N, M, S) supplied by the reserve was evaluated corresponding to the biomass production. By combining high productivity and good market prices, the emergy exchange ratio reveals that the payment for the environmental services is realized. Considering the environmental flows that the farmers take from protecting nature without payment, a value balance based on the beneficiary-pays rather than the producer-pays principle, agro-ecological compensation was calculated as commercial transactions where the environmental service is acquired from the watershed farmers. The option proposed in the paper indicates that by the adoption of the emergy accounting method, the government and producers would be responsible for a portion of the PES, and the emprice calculated for the environmental support and the environmental benefits of farmland should be used to decide who will bear the responsibility for making payments for environmental services. To realize the sustainable development of basin agriculture, the government and beneficiary sectors will compensate farmers soil loss preventive costs 400 million Yuan. The compensation standard calculation method of agro-ecological system in the light of emergy is feasible. Further studies are necessary on agricultural production environmental services, such as the maintenance of the biodiversity and natural biocenosis, and hydrological services.

Key words: agriculture, ecology, environmental protection, compensation standard, emergy, emergy sustainability index, Yongding River basin