



农业资源与环境学报

中文核心期刊
中国科技核心期刊

JOURNAL OF AGRICULTURAL RESOURCES AND ENVIRONMENT

欢迎投稿 <http://www.aed.org.cn>

考虑面源污染的河南省农业生态系统能值评价

郑二伟, 周海生, 吕翠美, 凌敏华, 顾长宽, 李洋

引用本文:

郑二伟, 周海生, 吕翠美, 等. 考虑面源污染的河南省农业生态系统能值评价[J]. 农业资源与环境学报, 2020, 37(5): 689–694.

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.13254/j.jare.2019.0547>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

河北北戴河区农田生态系统服务功能价值测算研究

刘小丹, 赵忠宝, 李克国

农业资源与环境学报. 2017, 34(4): 390–396 <https://doi.org/10.13254/j.jare.2017.0005>

接种功能内生细菌降低作物体内POPs污染

孙凯, 李舜尧

农业资源与环境学报. 2017, 34(5): 397–404 <https://doi.org/10.13254/j.jare.2017.0080>

南方双季稻区生物质炭还田模式生态效益评价

陈春兰, 侯海军, 秦红灵, 王聪, 沈健林, 魏文学

农业资源与环境学报. 2016, 33(1): 80–91 <https://doi.org/10.13254/j.jare.2015.0180>

乡村环境保护和管理的景观途径

张鑫, 李朋瑶, 宇振荣

农业资源与环境学报. 2015(2): 132–138 <https://doi.org/10.13254/j.jare.2015.0051>

北京市农田生态系统碳足迹及碳生态效率的年际变化研究

田志会, 马晓燕, 刘瑞涵

农业资源与环境学报. 2015(6): 603–612 <https://doi.org/10.13254/j.jare.2015.0101>



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

郑二伟, 周海生, 吕翠美, 等. 考虑面源污染的河南省农业生态系统能值评价[J]. 农业资源与环境学报, 2020, 37(5): 689–694.

ZHENG Er-wei, ZHOU Hai-sheng, LÜ Cui-mei, et al. Emergy evaluation of agricultural ecosystems in Henan Province considering non-point source pollution[J]. *Journal of Agricultural Resources and Environment*, 2020, 37(5): 689–694.



开放科学 OSID

考虑面源污染的河南省农业生态系统能值评价

郑二伟¹, 周海生², 吕翠美^{2*}, 凌敏华², 顾长宽³, 李洋³

(1. 河南省水利勘测设计研究有限公司, 郑州 450016; 2. 郑州大学水利科学与工程学院, 郑州 450001; 3. 河南省开封水文水资源勘测局, 河南 开封 475000)

摘要:采用生态经济学能值分析方法, 基于2011—2016年社会经济统计数据, 对河南省农业生态系统进行了动态评价。鉴于河南省农业化程度高、农业面源污染问题突出的特点, 在常规环境负载率、净能值产出率和可持续发展指数三个农业生态系统能值评价指标的基础上, 考虑农业面源污染的负产出, 提出内部损耗率指标, 对农业生态系统的污染状况进行定量评价。结果表明, 2011—2016年河南省农业生态系统整体可持续发展状态保持良好, 但系统发展对不可更新资源的依赖性较强, 内部损耗率指标虽呈下降趋势, 但仍超过0.40。因此, 河南省应继续实行化肥农药的减施增效措施, 保障农业生态系统的稳步可持续发展。

关键词:面源污染; 农业生态系统; 能值评价; 河南省; 内部损耗率

中图分类号: X37

文献标志码: A

文章编号: 2095-6819(2020)05-0689-06

doi: 10.13254/j.jare.2019.0547

Emergy evaluation of agricultural ecosystems in Henan Province considering non-point source pollution

ZHENG Er-wei¹, ZHOU Hai-sheng², LÜ Cui-mei^{2*}, LING Min-hua², GU Chang-kuan³, LI Yang³

(1. Henan Water & Power Engineering Consulting Co., Ltd., Zhengzhou 450016, China; 2. School of Water Conservancy Science and Engineering, Zhengzhou University, Zhengzhou 450001, China; 3. Kaifeng Hydrology and Water Resources Survey Bureau, Kaifeng 475000, China)

Abstract: The emergy analysis method of ecological economics was used to dynamically evaluate the agricultural ecosystems of Henan Province based on the socio-economic statistics of 2011–2016. Taking into account the high degree of agriculturalization in Henan Province and the prominent characteristics of agricultural non-point source pollution, on the basis of the three indicators of environmental load rate, net emergy yield rate, and sustainable development index, the internal loss rate (ILR) index was proposed to quantitatively evaluate the pollution status of agroecosystems. The results showed that the overall sustainable development status of agricultural ecosystems in Henan Province was good from 2011 to 2016, but the development was strongly dependent on non-renewable resources. Although the ILR index showed a downward trend, it still exceeded 40%. Therefore, Henan Province should continue to implement the reduction of fertilizers and pesticides to ensure the steady and sustainable development of agricultural ecosystems.

Keywords: non-point source pollution; agroecosystem; emergy evaluation; Henan Province; internal loss rate

化肥、农药、农膜等的大量使用, 在促进农业发展的同时, 也会带来严重的负面影响, 成为面源污染的主要来源。相对于点源污染而言, 面源污染具有广域

性、复杂性、间歇性、滞后性及分散性等特点, 控制难度大, 成本高, 且成效不明显^[1]。因此, 深入探讨农业面源污染与农业发展之间的关系, 对有效配置农业生

收稿日期: 2019-11-04 录用日期: 2020-02-07

作者简介: 郑二伟(1979—), 男, 河南遂平人, 硕士, 高级工程师, 主要研究方向为水利规划与管理。E-mail: 55509172@qq.com

*通信作者: 吕翠美 E-mail: lvcuimei305@163.com

基金项目: 国家自然科学基金项目(51609216); 河南省自然科学基金项目(182300410139)

Project supported: The National Natural Science Foundation of China(51609216); The Natural Science Foundation of Henan Province, China(182300410139)

产要素、转变农业经济增长方式、在追求经济效益的同时减少对农业生态环境的破坏、实现生态环境与农业经济的协调发展具有重要的现实意义^[2]。

农业生态系统是社会、经济、生态相互联系的复合系统,它不但拥有自然生态系统中的许多特征和特质,还包含社会经济系统中多种类型的能量。能值分析方法可通过太阳能值转换率将不同种类、不同类型的能量联系起来,实现对系统的科学评价,因而被广泛应用于农业生态系统的评价研究中。如张小平等^[3]、刘水琴等^[4]、徐宏^[5]、杨增玲等^[6]、王梦媛等^[7]利用能值分析方法对农业生态系统进行了评价研究。但上述研究均未考虑农业发展过程中伴随的面源污染对农业生态系统的影响,而农业面源污染不可避免地会破坏土壤结构与水生态系统,造成水体富营养化,严重影响系统的可持续性,因此在对农业生态系统进行评价时,考虑农业面源污染产生的负面影响是十分必要的。

基于此,在农业生态系统能值评价常规指标的基础上,本研究考虑农业面源污染的负产出,提出内部损耗率(ILR)指标,量化评价农业生态系统正效益产出过程中伴随的负效益产出情况。以河南省为研究对象,通过能值评价指标的量化分析,评价2011—2016年河南省农业生态系统对自然资源的依赖程度、农业迅速发展对生态环境带来的压力以及可持续发展状况,为河南省生态农业和现代农业的发展提供借鉴和参考。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

河南省地处华北平原南部,总面积16.6万km²,其中平原区面积8.5万km²,主要分布在黄淮海冲积平原及南阳盆地。河南省南北跨度大,无霜期长,气候温和,土壤肥沃,适合种植多种农作物。河南是农业大省、用肥大省,2016年粮食总产量达5 946万t,为历史上第二个高产年;化肥施用总量715万t,平均881.52 kg·hm⁻²,是全国化肥平均施用量491.24 kg·hm⁻²的1.8倍,是发达国家为防止化肥造成水污染设置225 kg·hm⁻²安全上限^[8]的3.9倍。2016年河南省农药施用量14.37万t,与2015年相比增长10%。大量、长期的化肥、农药使用导致全省农业面源污染问题日益凸显,农业生态系统可持续发展状况堪忧。

1.2 研究方法

1.2.1 能值理论

能值理论是由美国生态学家Odum^[9]为代表的科

学家于20世纪80年代提出的新科学理论体系,后引入我国。Odum将能值定义为一种流动或存储的能量中所包含的另一种类别能量的数量^[10]。与能量有着本质的不同,能值是一种比值定义的概念。运用能值理论,通过能值转换率将生态经济系统中不同类别、不同等级的物质流、能量流和货币流转换为统一标准的太阳能值,从而使系统各种形式的能量具有可加性、可比性,便于进行定量分析研究。计算公式如下:

$$EM = \tau \times B \quad (1)$$

式中:EM表示太阳能值,sej; τ 表示太阳能值转换率,sej·J⁻¹或sej·g⁻¹;B代表能量或质量,J或g。

1.2.2 评价指标

根据Odum^[9]提出的能值评价指标体系,选取净能值产出率、环境负载率、能值可持续指标作为评价系统可持续性的指标;同时,考虑农业面源污染造成的负产出这一情形,提出内部损耗率指标,以期较为全面地评价农业生态系统。

(1) 净能值产出率

净能值产出率^[11](Emergy yield ratio,EYR)为系统总能值产出(Y)与来自人工辅助能值(M)的比值,可衡量系统投入能值的转化率,显示开发当地资源、促进经济发展而需要的外部投入情况。净能值产出率越大说明系统的能值利用率越高,系统的生产率越高,经济效益越大,系统越有竞争力。一般来说,若EYR>2,说明农业技术和生产水平较高;EYR<2,则说明农业系统转化率较低。

$$EYR = \frac{Y}{M} = \frac{Y_1 + Y_2 + Y_3}{F + T} \quad (2)$$

式中:Y₁为农产品产出能值;Y₂为畜产品产出能值;Y₃为渔业产品产出能值;F为不可更新工业辅助能值;T为可更新有机辅助能值。

(2) 环境负载率

环境负载率^[12](Environment load ratio,ELR)为系统不可更新能源投入总量与可更新能源投入总量之比,比值越高,表明对化肥、机械等不可更新资源依赖程度越高,对环境的压力越大。一般来说,当ELR<2时,系统环境压力较小,系统发展潜力较大;当ELR>2时,系统环境压力较大。计算公式为:

$$ELR = \frac{N + F}{R + T} \quad (3)$$

式中:N为不可更新环境资源能值;R为可更新环境资源能值。

(3) 能值可持续指数

能值可持续指数^[10](Emergy sustainable indices,

ESI)为净能值产出率与环境负载率的比值,该指标反映系统可持续发展状况。从能值可持续指数定义可看出,若系统能值产出率越高,而其环境负荷率又相对较低,则它是可持续的,反之则是不可持续的。但并不是能值可持续发展指数越高,系统可持续性就越好,若 $ESI < 1$ 表明系统是高度发展的消费型导向系统;若 $1 < ESI < 10$ 表明系统富有活力和发展潜力,可持续状态较好;而 $ESI > 10$ 则是不可持续的象征^[10]。计算公式为:

$$ESI = \frac{EYR}{ELR} \quad (4)$$

(4)内部损耗率

为了定量评价农业生态系统的污染状况,提出内部损耗率指标(Internal loss rate, ILR),定义为能值总产出中的污染物能值与农产品、畜产品、渔业产品能值之和的比值。内部损耗率指标可以表征系统负产出对正产出的影响程度,内部损耗率比值越高,说明污染物负产出对正产出的影响越大,系统的清洁产出效率越低。一般认为,若 $ILR < 0.40$,系统负产出影响较小,处于清洁产出阶段;若 $ILR > 0.40$,说明系统清洁产出效率较低。计算公式为:

$$ILR = \frac{Y_4}{Y_1 + Y_2 + Y_3} \quad (5)$$

式中: Y_4 为污染物产出能值。

2 结果与讨论

根据上述方法步骤,对河南省2011—2016年农业生态系统的运行状况和趋势特点进行评价分析。河南省农业生态系统能值投入和产出计算所需原始数据来自《河南统计年鉴》(2012—2017)^[13]、《河南省水资源公报》(2011—2016)^[14]和《河南省生态环境状况公报》(2011—2016)^[15],计算过程涉及到的太阳能值转换率参考文献[10]。

2.1 能值投入

能值投入主要包括可更新环境资源、不可更新环境资源、不可更新工业辅助能以及可更新有机辅助能四类。2011—2016年河南省能值投入情况如表1所示。

2011—2016年,河南省农业能值总投入从 127.55×10^{21} sej增加至 133.82×10^{21} sej,增长了4.9%。其中可更新环境资源年均投入 25.41×10^{21} sej,研究期内可更新环境资源能值投入占能值总投入的百分比在20.0%上下浮动,说明6年来河南省的可更新环境资源投入比较稳定。不可更新工业辅助能值年均投

入为 77.70×10^{21} sej,研究期内不可更新工业辅助能值投入占平均能值总投入的59.2%,说明河南省农业生产很大程度上依赖不可更新资源的投入;其中化肥、机械、电力的能值使用量占总不可更新工业辅助能总投入的比例分别为38.0%、39.1%、22.5%。可更新有机辅助能值由2011年的 28.66×10^{21} sej逐年减少至 27.51×10^{21} sej,减少了4.0%,主要表现为有机肥施用量以及役畜减少;研究期内人力能值投入占可更新有机辅助能值的比例为47.2%,说明人力在保障农业生产中具有重要作用。

2.2 能值产出

能值产出包括农产品产出、畜产品产出、渔业产品产出以及污染物的排放四类。2011—2016年河南省能值产出情况如表2所示。

河南省农业能值净产出从2011年的 226.82×10^{21} sej增加到2016年的 291.70×10^{21} sej,增长了28.6%。其中农产品的能值产出由2011年的 297.79×10^{21} sej增加至2016年的 322.69×10^{21} sej,增长了8.4%,主要表现为粮食与油料作物的增产。多年平均农产品产出能值占农畜渔产品产出的65%。畜产品的能值产出从 149.97×10^{21} sej增加至 158.87×10^{21} sej,增长了5.9%,畜产品产出占多年农畜渔产品产出的32.4%。

农业生产过程会产生多种污染物,导致COD、氨氮、总氮及总磷等超标,是面源污染的主要原因^[16]。根据《河南省生态环境状况公报》^[15],COD、氨氮、总磷及BOD₅是河南省农业面源污染的主要来源,根据资料的获取情况,选择COD和氨氮两项指标进行河南省农业面源污染负产出的计算。计算结果表明,河南省农业面源污染负产出从2011年的 232.26×10^{21} sej逐渐减少至2016年的 203.99×10^{21} sej,减少了12.2%,多年平均 217.46×10^{21} sej,其中COD排放量占农业污染负产出的71.9%,氨氮排放量占28.1%。研究期内农业COD排放量减少了10.6%,氨氮排放量减少了16.0%,表明河南省农业“高效减肥技术”实施效果明显。

2011—2016年河南省农业能值投入增长了4.9%,而能值净产出增长了28.6%,说明系统生产效率显著提高。究其原因,一是经济社会的快速发展,劳动力价格升高,农业种植结构调整^[14],农民愿意种植省工省力的农作物,增加了小麦、玉米等主粮的种植面积,减少了豆类、薯类、棉花、烟叶的种植面积;二是农业COD和氨氮排放量逐年减少,农业面源污染防治初见成效,但污染物排放能值占能值总产出的比例仍然较大,说明面源污染拉低了整个农业生态系统

表1 2011—2016年河南省农业生态系统能值投入情况(10^{21} sej)

Table 1 The input emery of agricultural ecosystems in Henan Province from 2011 to 2016(10^{21} sej)

能值投入 Energy input	2011	2012	2013	2014	2015	2016
总投入	127.55	129.81	132.41	130.31	133.16	133.82
可更新环境资源(<i>R</i>)	25.58	26.15	27.07	23.41	24.66	25.57
太阳能	0.24	0.24	0.24	0.24	0.24	0.24
风能	0.44	0.46	0.46	0.46	0.45	0.45
农业用水量	24.90	25.45	26.37	22.71	23.97	24.88
不可更新环境资源(<i>N</i>)	0.002 49	0.002 48	0.002 48	0.002 47	0.002 47	0.002 47
表层土损失	0.002 49	0.002 48	0.002 48	0.002 47	0.002 47	0.002 47
不可更新工业辅助能(<i>F</i>)	73.31	75.19	77.34	79.06	80.57	80.74
农业用电	16.13	16.60	17.48	17.93	18.37	18.16
农业机械	28.39	29.36	30.11	30.99	31.62	32.05
农药	0.21	0.21	0.21	0.21	0.21	0.21
农膜	0.06	0.06	0.06	0.06	0.06	0.06
氮肥	8.72	8.85	9.01	9.13	9.26	9.25
磷肥	17.99	18.27	18.59	18.84	19.12	19.09
钾肥	1.81	1.84	1.87	1.90	1.93	1.92
可更新有机辅助能(<i>T</i>)	28.66	28.47	28.00	27.84	27.93	27.51
人力	13.44	13.42	13.27	13.15	13.13	13.14
畜力	1.40	1.18	1.11	1.02	1.00	0.91
有机肥	10.30	10.29	9.99	10.00	9.94	9.68
种子	3.52	3.58	3.63	3.67	3.85	3.78

注:表中能值计算参考公式(1),其中太阳能、风能及表层土损失能值的计算参考文献[10]。

Notes: The emery value in the table is calculated by Formula (1); The calculation of the energy of solar, wind and topsoil loss can be found in reference [10].

的生产水平,需进一步加强面源污染防治工作。

2.3 能值指标量化结果

根据能值投入、产出数据计算河南省 2011—2016年农业生态系统的净能值产出率、环境负载率、可持续发展指数和内部损耗率指标,量化评价河南省农业生态系统的发展状况,结果如图1所示。

(1)净能值产出率(EYR)

计算结果(图1)显示,河南省农业生态系统净能值产出率从2011年的4.50上升至2016年的4.58,多年平均值为4.54,2011—2016年变化不大,趋势稳定。其中,2014年净能值产出率较2013年略有下降,原因主要是由于豆类、棉花、油料产量的下降,减少了净能值产出量。总体来看,河南省净能值产出率大于邻近的河北省(2.40)及山东省(3.37)^[17],说明河南省农业富有发展潜力,是资源输出型的区域。

(2)环境负载率(ELR)

河南省农业生态系统环境负载率从2011年的1.35增加至2014年的1.54,又减少到2016年的1.52,总体增幅12.5%,其中,2015、2016年的环境负载率分

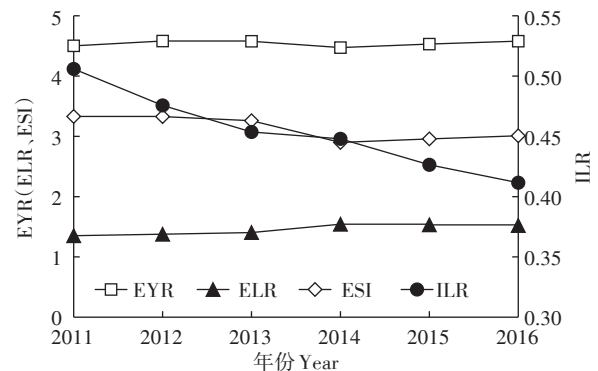


图1 2011—2016年河南省农业生态系统能值指标变化趋势
Figure 1 Trend of the emery index of agricultural ecosystems in Henan Province from 2011 to 2016

别为1.53、1.52(图1),下降的原因是不可更新资源投入增速放缓,可更新资源中从事农业的人数以及有机肥施用量减少,导致环境负载率一定程度下降。一般来说,环境负载率小于2意味着比较低的环境压力^[18]。与邻近省份比较,河南省农业生态系统环境负载率小于河北省(2.04),与山东省(1.53)水平相近,但大于江苏省(1.06)、浙江省(1.13)等经济发达省份^[17],

表2 2011—2016年河南省农业生态系统能值产出情况(10^{21} sej)Table 2 The emery yield of agricultural ecosystems in Henan Province from 2011 to 2016(10^{21} sej)

能值产出 Energy output	2011	2012	2013	2014	2015	2016
净产出	226.82	249.04	263.46	263.94	281.97	291.70
农产品(Y_1)	297.79	307.43	313.33	309.85	320.68	322.69
小麦	34.62	35.22	35.76	36.90	38.81	38.42
玉米	23.56	24.27	24.95	24.05	25.74	24.34
谷物	70.49	72.13	73.34	74.43	78.39	76.75
豆类	13.72	12.19	11.37	8.51	7.75	7.86
油料	141.79	151.68	156.90	155.63	159.73	164.89
棉花	6.18	4.15	3.07	2.38	2.04	1.63
烟叶	0.12	0.12	0.14	0.12	0.12	0.11
蔬菜	4.53	4.73	4.80	4.91	5.03	5.27
瓜果	2.76	2.91	2.99	2.91	3.06	3.41
薯类	0.02	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01
畜产品(Y_2)	149.97	155.46	156.06	155.04	157.14	158.87
牛肉	29.52	28.96	29.00	29.56	29.74	29.88
羊肉	6.77	6.98	6.98	7.16	7.30	7.46
其他肉类	52.11	55.90	55.88	54.03	54.57	55.54
奶产品	18.63	19.16	19.07	19.86	20.43	19.52
蛋类	42.96	44.46	45.13	44.44	45.10	46.48
渔业产品(Y_3)	11.32	12.07	12.83	13.24	13.79	14.12
渔产量	11.32	12.07	12.83	13.24	13.79	14.12
污染物(Y_4)	-232.26	-225.92	-218.76	-214.19	-209.64	-203.99
农业氮排放量	-66.61	-64.40	-61.48	-59.77	-58.06	-55.92
农业COD排放量	-165.65	-161.52	-157.28	-154.42	-151.58	-148.06

说明河南省农业生态系统对不可更新资源的依赖程度仍然较强。河南省作为一个正在快速发展的省份,如果长时间处于较大的环境负载率,将严重影响农产品的产出,不利于今后的可持续发展。

(3)能值可持续指数(ESI)

由图1可知,河南省农业生态系统能值可持续指标从2011年的3.33下降至2014年的2.90,而后从2015年的2.96上升至2016年的3.01,多年平均值为3.13。比较而言,河南省农业生态系统可持续指标值高于河北省(1.18)、山东省(2.20)及江苏省(3.25),略低于安徽省(3.39)^[17],说明河南农业生态系统具有较强的发展活力和潜力,处于较好的可持续状态,但指标值波动起伏较大,应引起高度重视。

(4)内部损耗率(ILR)

化肥农药的过量施用引发农业面源污染,造成水体富营养化、农产品品质降低等一系列问题,给农业生态系统带来严重影响。内部损耗率的存在是不可避免的,但是可以控制在一个合理的范围内,该值越低,表明系统资源利用率越高、清洁产出效率越高。

由图1可知,河南省农业生态系统内部损耗率从2011年的0.51逐渐下降至2016年的0.41,降低了19.6%,表明河南省农业生态系统的污染负产出逐年降低,系统正产出逐步提高,农业面源污染状况呈好转趋势。虽然研究期内每年净能值产出持续增长,但污染造成的内部损耗率仍大于0.40,故需继续开展耕地质量保护与提升行动,加快高效减肥技术推广,促进化肥用量继续减少,提高化肥利用率,提升土壤有机质含量和农产品品质。

3 结论

(1)河南省2011—2016年农业生态系统能值评价结果显示,河南省农业发展富有潜力,为资源输出型区域,但其对不可更新资源的依赖性较强。

(2)河南省农业生态系统总体可持续发展状态较好,但存在波动起伏;内部损耗率呈下降趋势,表明农业面源污染防治初见成效,但内部损耗率仍超过0.40。

(3)河南省应在保证粮食安全的前提下,尽快实现化肥农药的减施增效,发展绿色农业,促进粮食生

产与污染防治的协调发展,稳步推进农业生态系统可持续发展。

参考文献:

- [1] 周慧平, 高超, 朱晓东. 关键源区识别: 农业非点源污染控制方法[J]. 生态学报, 2005, 25(12): 3368-3374.
ZHOU Hui-Ping, GAO Chao, ZHU Xiao-Dong. Identification of critical source areas: An efficient way for agricultural nonpoint source pollution control[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2005, 25(12): 3368-3374.
- [2] 尚杰, 石锐, 张滨. 农业面源污染与农业经济增长关系的演化特征与动态解析[J]. 农村经济, 2019(9): 132-139.
SHANG Jie, SHI Rui, ZHANG Bin. Evolutionary characteristics and dynamic analysis of the relationship between agricultural non-point source pollution and agricultural economic growth[J]. *Rural Economy*, 2019(9): 132-139.
- [3] 张小平, 何伟, 方婷. 湟水谷地农业生态经济系统的能值分析——以西宁市为例[J]. 干旱区地理, 2011, 34(2): 344-354.
ZHANG Xiao-ping, HE Wei, FANG Ting. Emergy analysis of agricultural eco-economic system in Huangshui Valley: A case of Xining City[J]. *Arid Land Geography*, 2011, 34(2): 344-354.
- [4] 刘水琴, 王万雄, 张洁琼. 基于能值分析的高台县农田生态系统可持续发展评价[J]. 干旱地区农业研究, 2016, 34(4): 259-265.
LIU Shui-qin, WANG Wan-xiong, ZHANG Jie-qiong. Evaluation of sustainability for farmland ecosystem of Gaotai County based on emergy analysis[J]. *Agricultural Research in the Arid Areas*, 2016, 34(4): 259-265.
- [5] 徐宏. 江苏省农业生态可持续发展评价[J]. 中国农业资源与区划, 2019, 40(8): 164-170.
XU Hong. Evaluation on sustainable development of agricultural ecology in Jiangsu Province[J]. *Chinese Journal of Agricultural Resources and Regional Planning*, 2019, 40(8): 164-170.
- [6] 杨增玲, 于璐, 王德睿, 等. 呼和浩特市种植业生产系统能值分析与评价[J]. 中国农业大学学报, 2019, 24(8): 179-193.
YANG Zeng-ling, YU Lu, WANG De-rui. Emergy analysis and evaluation of the cropping system in Hohhot[J]. *Journal of China Agricultural University*, 2019, 24(8): 179-193.
- [7] 王梦媛, 高小叶, 侯扶江. 黄土高原-青藏高原过渡带农户生产系统的能值分析——以通渭-渭源-夏河样带为例[J]. 生态学报, 2019, 39(5): 1758-1771.
WANG Meng-yuan, GAO Xiao-ye, HOU Fu-jiang. Emergy analysis of farmer producing system in the transitional zone of Qinghai-Tibet Plateau on Loess Plateau: Tongwei-Weiyuan-Xiahe transect as an example[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2019, 39(5): 1758-1771.
- [8] 苍靖. 我国农业化肥污染控制与管理政策探讨[J]. 工业技术经济, 2003(2): 52-53.
CANG Jing. Discussion on agricultural fertilizer pollution control and management policy in China[J]. *Industrial Technology & Economy*,

- 2003(2): 52-53.
- [9] Odum H T. Environmental accounting: Emergy and environmental decision making[M]. New York: John Wiley & Sons, 1996.
- [10] 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.
LAN Sheng-fang, QIN Pei, LU Hong-fang. Emergy analysis of eco-economic system[M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2002.
- [11] 吕翠美, 吴泽宁. 区域水资源生态经济系统可持续发展评价的能值分析方法[J]. 系统工程理论与实践, 2010, 30(7): 1293-1298.
LÜ Cui-mei, WU Ze-ning. Emergy analysis for sustainable development assessment of regional water ecological-economics system[J]. *Systems Engineering-Theory & Practice*, 2010, 30(7): 1293-1298.
- [12] 朱冰莹, 陈留根, 盛婧, 等. 稻麦两熟农田径流养分循环利用模式的能值分析与生态补偿标准测算[J]. 农业资源与环境学报, 2019, 36(5): 592-599.
ZHU Bing-ying, CHEN Liu-gen, SHENG Jing, et. al. Emergy analysis and ecological compensation standard of the runoff nutrient recycling system in rice-wheat rotation systems[J]. *Journal of Agricultural Resources and Environment*, 2019, 36(5): 592-599.
- [13] 河南省统计局. 河南统计年鉴(2012—2017)[M]. 北京: 中国统计出版社, 2012—2017.
Henan Province Bureau of Statistics. Henan statistical yearbook (2012—2017)[M]. Beijing: China Statistics Press, 2012—2017.
- [14] 河南省水利厅. 河南省水资源公报(2011—2016)[R]. 郑州: 河南省水利厅, 2011—2016.
Department of Water Resources of Henan Province. Water resources bulletin of Henan Province (2011—2016) [R]. Zhengzhou: Department of Water Resources of Henan Province, 2011—2016.
- [15] 河南省生态环境厅. 河南省生态环境状况公报(2011—2016)[R]. 郑州: 河南省生态环境厅, 2011—2016.
Department of Ecological Environment of Henan Province. Bulletin on the ecological environment of Henan Province (2011—2016) [R]. Zhengzhou: Department of Ecological Environment of Henan Province, 2011—2016.
- [16] 肖阳. 农业绿色发展背景下我国化肥减量增效研究——以河南省为例[D]. 北京: 中国农业科学院, 2018.
XIAO Yang. Reduction and efficiency of chemical fertilizer under the background of agricultural green development in China: An empirical study of Henan Province[D]. Beijing: Chinese Academy of Agricultural Sciences, 2018.
- [17] 陶金. 中国耕地生态系统运行效应与响应[D]. 北京: 中国地质大学(北京), 2013.
TAO Jin. Running effects and response for China's cultivated land ecosystem[D]. Beijing: China University of Geosciences(Beijing), 2013.
- [18] Cavalett O, de Queiroz J F, Ortega E. Emergy assessment of integrated production systems of grains, pig and fish in small farms in the south Brazil[J]. *Ecological Modelling*, 2006, 193(3): 205-224.