

DOI: 10.5846/stxb201810212275

王伟伟,周立华,孙燕,陈勇.禁牧政策对宁夏盐池县农业生态系统服务影响的能值分析.生态学报,2019,39(1): - .

Wang W W, Zhou L H, Sun Y, Chen Y. Emergy analysis of the crop ecosystem services of Yanchi County in Ningxia. Acta Ecologica Sinica, 2019, 39(1): - .

禁牧政策对宁夏盐池县农业生态系统服务影响的能值分析

王伟伟^{1,3}, 周立华^{1,2,*}, 孙 燕⁴, 陈 勇¹

1 中国科学院西北生态环境资源研究院 沙漠与沙漠化重点实验室, 兰州 730000

2 中国科学院科技战略咨询研究院, 北京 100190

3 中国科学院大学, 北京 100049

4 兰州大学 资源环境学院, 兰州 730000

摘要: 农牧交错区农业可持续发展问题一直是我国区域农业研究的重要课题, 本文以典型北方农牧交错区宁夏盐池县为例, 利用农业生态系统能值分析框架, 评估盐池县 1991—2016 年农业生态系统正反服务, 揭示禁牧政策对农业可持续发展的影响。研究结果表明: (1) 1991—2016 年盐池县农业投入能值和农业生态系统正反服务能值一直处于增长的趋势, 禁牧政策实施以后增长速度高于禁牧之前, 其中农业投入能值的增加主要是由于经济反馈能值投入的增加。(2) 根据 Pearson 相关性分析, 盐池县农业生态系统服务和反服务在 0.01 水平 (双侧) 呈显著的强正相关, 农业生态系统服务和反服务具有相同的变化趋势。(3) 生态环境的改善、经济反馈能值和农业灌溉面积的增加, 可以增强北方农牧交错区农业抵御气候波动的能力。(4) 盐池县农业可持续性高于全国和典型农区的平均水平, 禁牧政策实施之前盐池县农业可持续性表现出稳定的下降趋势, 而禁牧政策实施以后其可持续性表现为上升的趋势, 禁牧政策的实施已初步实现农业生产的生态经济效益。

关键词: 北方农牧交错区; 能值分析; 生态系统服务; 生态系统反服务; 盐池县

Emergy analysis of the crop ecosystem services of Yanchi County in Ningxia

WANG Weiwei^{1,3}, ZHOU Lihua^{1,2,*}, SUN Yan⁴, CHEN Yong¹

1 Key Laboratory of Desert and Desertification, Northwest Institute of Eco-Environment and Resources, Chinese Academy of Sciences, Lanzhou 730000, China

2 Institutes of Science and Development, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China

3 University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

4 College of Earth and Environmental Sciences, Lanzhou University, Lanzhou 730000, China

Abstract: The sustainable development of agriculture in the agro-pastoral ecotone has always been an important topic of regional agricultural research in China. In this paper, Yanchi County in Ningxia was taken as a typical case area of the agro-pastoral transitional zone in north China; a ecosystem services and dis-services of the crop ecosystem in Yanchi County from 1991 to 2016 were evaluated by using the framework of emergy analysis of an agricultural ecosystem, to try to reveal the effects of a grazing-prohibition policy on sustainable development of crops. The results showed that: (1) From 1991 to 2016, the emergy input, ecosystem services and dis-services of the cropping ecosystem in Yanchi County increased. After the implementation of the grazing-prohibition policy, the growth rate increased. The increase of emergy input in cropping was mainly due to the increase of purchased emergy input. (2) According to the Pearson correlation analysis, there was a significant positive correlation between the ecosystem services and anti-services at the 0.01 level (bilateral), and changes in agricultural ecosystem services and dis-services had the same trend. (3) The implementation of the grazing-prohibition

基金项目: 国家重点研发计划项目 (2018YFA0606402) 国家自然科学基金项目 (41471436, 41601587)

收稿日期: 2018-10-21; **网络出版日期:** 2018-11-19

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: lhzhou@lzb.ac.cn

policy promoted an improvement in the ecological environment, the increase in the purchased emergy input of the social economic system, and the increase in irrigated area, which can enhance the ability of the semi-arid northern agro-pastoral ecotone to withstand climate fluctuations. (4) The sustainability of crops in Yanchi County was higher than the national average and that of typical agricultural areas, and its sustainability showed a steady downward trend before the implementation of the grazing-prohibition policy, whereas an upward trend was observed after the implementation of this policy. The implementation of the grazing-prohibition policy has led to preliminary ecological and economic benefits for agricultural production.

Key Words: agro-pastoral transitional zone; emergy analysis; ecosystem services; ecosystem dis-services; Yanchi County

生态系统服务(ES)是指人类从生态系统获得的惠益^[1-2],尽管人类一直依赖于生态系统服务而得以生存和发展,但其作为科学问题开展相关研究仅始于 20 世纪 70 年代^[3]。21 世纪初期,随着《千年生态系统评估》的开展,生态系统价值的评估成为研究的焦点之一^[4]。相同的生态系统类型或者生态功能可能会同时产生生态系统服务和反服务,生态系统反服务(EDS)可以定义为生态系统产生的功能、过程和属性对人类福祉产生感知或者实际的负面影响^[5-6],在评估生态系统服务时要同时考虑生态系统反服务,才能更全面的评估生态系统服务。

农业生产占全球土地面积的 1/3^[7],农业生态系统是依靠土地、光、温、水分等自然要素以及人为投入,如种子、化肥、农药、灌溉、机械等,利用农田生物与非生物环境之间以及农田生物种群之间的关系来进行食物、纤维和其他农产品生产的半自然生态系统^[8]。农业生产应该在提供多种生态系统服务的同时保证粮食生产的安全和限制对环境的不利影响^[9],因此有必要对农业生态系统正反服务变化的社会经济影响因素进行研究。广义农业包括种植业、林业、畜牧业、渔业和副业等产业形式,而狭义农业就是指种植业^[10],本文所研究的农业是指狭义农业。

北方农牧交错带是我国面积最大和空间尺度最长的农牧交错带和世界四大农牧交错带之一,生态政策实施之前的几十年该区沙漠化急剧发展,生态环境明显恶化,已给当地人民生产、生活带来了极大危害,并对我国东部地区的生态环境和经济发展带来了不良影响,成为我国生态问题最为严重的农牧交错带^[11]。新中国成立后,人口的急剧增长、工农业生产的迅猛发展,开垦草原达到空前的规模,放牧压力和放牧制度失常,草原退化和荒漠化现象严重,在生态环境受到破坏的同时,严重影响旱地农业和草原畜牧业的发展,农业种植业也并未真正发展起来^[12]。在此背景下,国家在 2002 年开始实施了禁牧政策,禁牧政策实施以后北方农牧交错区生态环境显著改善,部分农牧交错区出现了明显的沙漠化逆转趋势^[13-15]。禁牧政策迫使农户进行农业种植结构调整和劳动力转移,禁牧政策实施以后农业发展是否可持续?农业生态系统正反服务是如何变化的?则成为北方农牧交错区可持续发展需要解决的问题。

能值理论是由美国著名生态学家 H·T·Odum 提出,用以研究生态系统与人类社会经济系统,定量分析资源环境与经济活动的真实价值以及他们之间的关系^[16]。基于此理论,学者们进行了大量的实证研究,Sun 等^[17]利用此理论对中国沿海地区的海洋生态系统服务价值进行了评估,Zhan 等^[18]基于此理论对崇明岛的生态系统服务进行了评价,Huang 等^[19]利用此理论以台北为研究区对城市边缘区的生态系统服务进行了评价,喻锋等^[20]基于此理论和生态用地分类对中国生态系统生产总值进行了核算,马凤娇等^[21]基于此理论对河北栾城县农田生态系统正反服务进行了评估。本文以典型北方农牧交错区—宁夏自治区盐池县为例,利用 Ma 等^[22]提出的农业生态系统能值分析框架,评估盐池县农业生态系统正反服务,研究禁牧政策对盐池县农业可持续发展的影响,以期为提高禁牧政策的效益及促进区域可持续发展提供理论依据。

1 研究方法

1.1 研究区概况

盐池县位于宁夏回族自治区东部(37°04'N,106°30'E),北临毛乌素沙地,南靠黄土高原,处于甘肃、陕西、

宁夏、内蒙古四省区的交界地带(图1),是地形、气候、植被、农牧生产方式等方面的过渡地带,是黄河中游重要的生态保护屏障和国家重点生态功能区。气候干旱少雨、风大沙多、属于典型的温带大陆性气候^[23],海拔1295—1951 m,平均海拔1600 m。干旱是本地区突出的特点,多年平均降水量只有290 mm左右,潜在蒸发量是降水量的6—7倍^[24]。

全县总面积 $8.67 \times 10^5 \text{ hm}^2$,其中2016年耕地面积 $1.02 \times 10^5 \text{ hm}^2$,农作物播种面积 $0.83 \times 10^5 \text{ hm}^2$,主要种植玉米、荞麦、薯类等,2016年农业总产值5.39亿元,占农林牧副渔总产值的40%。2016年全县总人口17.18万人,人均地区生产总值4.66万元,同比增长11.5%,随着经济社会的发展,盐池县农民家庭的人均纯收入逐年升高,2016年农牧民人均纯收入达到8532元。2002年11月,盐池县全县范围内实施草原禁牧封育政策,政策的实施有效的改善了生态环境,除北部部分草原尚存在不同程度的沙化之外,整体呈现沙漠化逆转趋势^[23]。

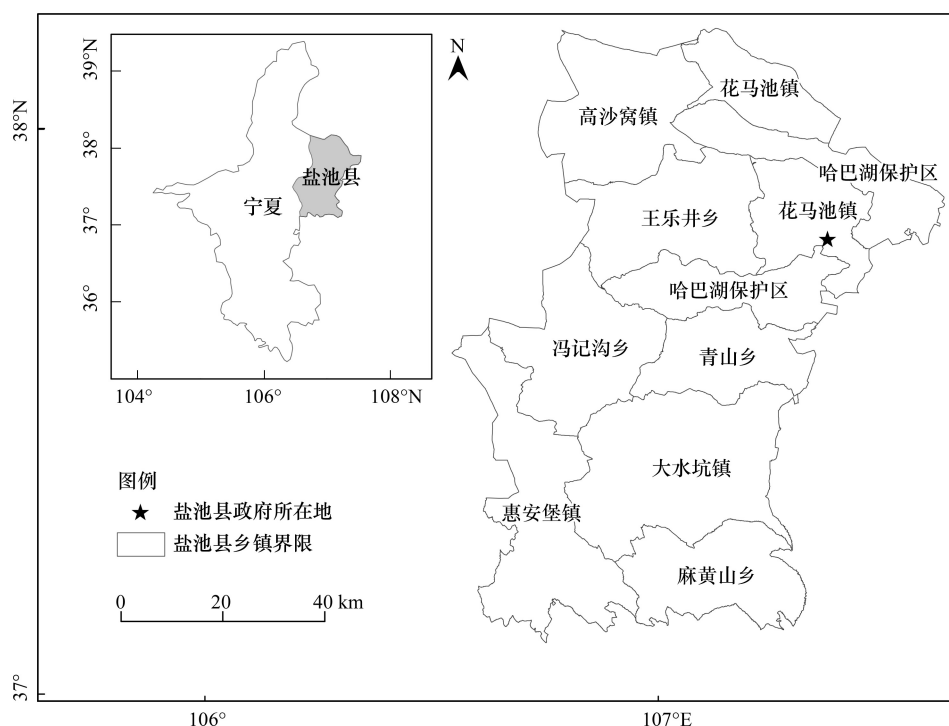


图1 盐池县区位图

Fig.1 The location of Yanchi County

1.2 能值分析法

Odum 把能值定义为:产品或服务形成过程中直接或间接消耗的一种类型的能量总和^[25],能值分析将不同类型、不可比较的能量转换为统一的能值进行比较分析^[26],能值分析生态系统的结构和功能,评价和分析其可持续发展能力。能值分析可以方便地将输入输出系统的各种形式的能量以及系统内部能量的流转进行量化,来表征生态系统复杂的自然过程。与价值评估、物质质量评估方法相比较,能值理论建立在紧密的连接经济系统和生态系统基础之上,更契合生态系统服务的研究^[27]。能值分析将不同类型的能量转换为统一的能值进行比较分析^[26],通常用太阳能表示,将不同的能量转换为太阳能值需要太阳能值转换率,即单位能量或物质所含的太阳能值之量^[28],通过太阳能值转换率就可以把不同类型的能量转化为同一量纲的能值,在此基础上就能对研究对象进行更为全面和科学的分析。鉴于能值与生态系统联系的紧密性,本文采用能值分析的方法对北方农牧交错区农业生态系统服务和反服务进行研究。通过构建生态系统服务能值综合指标来探讨农业生态系统服务和反服务变化情况,研究禁牧政策对北方农牧交错区农业生态系统的影响。由于农田几乎没有文化服务^[21],所以只考虑《千年生态系统评估》MA 评估框架中^[29]的供给、支持、调节服务和反服务,

在此基础上建立能值核算系统。

1.3 数据来源、处理及能值分析综合指标的建立

本文采用的数据主要来源于盐池县统计年鉴、盐池县经济要情手册、宁夏统计年鉴、盐池县农牧局和文献资料,整理了 1991—2016 年的数据,投入能值部分缺失数据根据已有数据线性回归分析得到,回归分析拟合效果不好的数据,根据数据所占宁夏自治区数据的比例推算得到。可更新资源能值(R)主要计算了太阳辐射能、雨水化学能、雨水势能、风能和地球旋转能,采用文献[30]的计算方法,为避免重复计算,同一来源的能量投入只取其最大值,则区域农业生态系统可更新资源能值为前四者的最大值与地球旋转能之和。不可更新资源能值(N)、不可更新经济反馈能值(F_N)、可更新经济反馈能值(F_R)的计算方法按照文献[31]的方法进行计算。生态系统服务和反服务计算方法参照文献[21—22],其中农产品所含能量根据文献[31]和《中国食物成分表》(第二版)^[32]进行计算,土壤有机质、氮、磷、钾的含量根据文献[31, 33]获得,化肥、农药的利用率参照文献[34]。本文能值分析采用 9.26×10^{24} sej/a 的全球能值基准值,由于不同基准值的能值转换率不同,对基准值为 15.83×10^{24} sej/a 的能值转换率乘以 0.58 ($9.26/15.83$) 得到本研究采用的能值转换效率^[35],具体能值转换率见表 1。

表 1 本文的主要能值转换率

Table 1 The energy transformity of this paper

项目 Item	单位 Unit	能值转换率 Transformity/ (sej/unit)	来源文献 Reference	项目 Item	单位 Unit	能值转换率 Transformity/ (sej/unit)	来源文献 Reference
太阳能 Sunlight	J	1.0	—	劳动力 Labor	J	2.2×10^5	[31]
风能 Wind, kinetic energy	J	1.4×10^3	[31]	种子 Seeds	J	4.6×10^4	[31]
雨水化学能 Rain, chemical energy	J	1.8×10^4	[22]	灌溉能值 Irrigating water	J	2.4×10^4	[36]
雨水势能 Rain, chemical energy	J	1.0×10^4	[22]	小麦 Wheat	J	6.5×10^4	[22]
地球旋转能 Earth cycle	J	3.4×10^4	[22]	玉米 Corn	J	8.2×10^4	[22]
土壤流失能 Soil loss	J	3.7×10^4	[31]	其他粮食作物 Other grain	J	6.5×10^4	[22]
电力 Electricity	J	1.6×10^5	[28]	薯类 Tubers	J	2.7×10^3	[36]
氮肥 Nitrogen fertilizer	g	3.8×10^9	[28]	蔬菜和瓜果 Vegetables and melons	J	2.7×10^4	[36]
磷肥 Phosphorus fertilizer	g	3.9×10^9	[28]	油料作物 Oil-bearing crops	J	8.3×10^4	[22]
钾肥 Potash fertilizer	g	1.1×10^9	[28]	作物秸秆(玉米) Crop residues	J	4.4×10^4	[37]
复合肥 Compound fertilizer	g	2.8×10^9	[28]	水果 Fruits	J	5.3×10^4	[28]
地膜 Plastic sheeting	g	3.8×10^8	[28]	释放 O_2 O_2 Release	g	9.3×10^6	[22]
农药 Pesticides	g	1.6×10^9	[28]	吸收 SO_2 SO_2 Release	g	5.3×10^{10}	[22]
农用柴油 Agricultural diesel	J	6.2×10^4	[31]	释放 NO_x NO_x Release	g	6.6×10^{10}	[22]
有机肥 Organic manure	J	5.4×10^4	[38]	释放 CO_2 CO_2 Release	g	2.4×10^7	[22]

为了评估农业生态系统服务的可持续性,利用 Ma 等^[22]建立的能值分析综合指标,把评价指标分为 4 个方面,即投入产出指标、投入资源指标、生态系统服务指标和可持续性指标,具体指标见表 2。

表 2 本文用到的评价指标
Table 2 Evaluation indicators used in this paper

项目 Items	指数 Indexes	计算方法 Formulation
投入产出指标 Input-output index	EYR	$PS/(F_R+F_N)$
	EESR	$ES/(F_R+F_N)$
	nEESR	$(ES-EDS)/(F_R+F_N)$
投入资源指标 Input resources index	EIR	$(F_R+F_N)/(R+N)$
	ELR	$(N+F_N)/(R+F_R)$
	ESR	$(R+N)/(F_R+F_N)$
生态系统服务指标 Ecosystem services index	EDR	ES/EDS
可持续性指标 Sustainability index	ESI	EYR/ELR
	ESSI	$EESR/ELR$
	nESSI	$nEESR/ELR$

PS:生态系统供给服务能值, Provisioning services; F_R :可更新经济反馈能值, Purchased renewable resources; F_N :不可更新经济反馈能值, Purchased nonrenewable resources; ES:生态系统服务能值, Ecosystem services; EDS:生态系统反服务能值, Ecosystem dis-services; N:不可更新资源能值, Nonrenewable resources; R:可更新资源能值, Renewable resources; EYR:生态系统供给服务能值经济产出率, Economic energy provisioning services yield ratio; EESR:生态系统服务能值的经济产出率, Economic energy ecosystem services yield ratio; nEESR:净生态系统服务能值的经济产出率, Economic energy net ecosystem services yield ratio; EIR:能值投资率, Emergy investment ratio; ELR:环境负载率, Environment loading ratio; ESR:能值自给率, Emergy self-sufficiency ratio; EDR:正反服务之比, Ecosystem services and ecosystem dis-services ratio; ESI:能值可持续指数, Emergy sustainability index; ESSI:生态系统服务能值可持续指数, Ecosystem services emergy sustainability index; nESSI:净生态系统服务能值可持续指标, Net ecosystem services emergy sustainability index

2 结果与分析

2.1 农田生态系统的能值投入

投入农业生态系统的能值可以分为自然系统能值和社会经济系统能值,社会经济系统能值包括不可更新经济反馈能值(F_N)和可更新经济反馈能值(F_R),自然系统能值包括可更新资源能值(R)和不可更新资源能值(N)。根据计算结果可知,1991—2016 年宁夏盐池县农业投入的总能值一直处于增长的趋势,从 1991 年的 1.2×10^{20} sej 增长到 2016 年的 2.5×10^{20} sej,增加了一倍多(图 2)。26 年来盐池县所投入的自然系统能值保持相对稳定,而投入的经济反馈能值增长明显,且占总投入的比重也越来越大,由 1991 年的 69%增长到 2016 年的 78%。投入的不可更新经济反馈能值主要是化学辅助能值,为了提高农产品产量,提高农户收入,降低我国粮食危机,以及农业机械化的普及,均促进了我国农业化肥、农药和农用柴油等的投入,相对应的能值也快速增加。

禁牧政策实施以后(2003—2016 年)盐池县农业投入的经济反馈能值的增长速度总体高于禁牧之前(1991—2002 年)(图 3)。禁牧政策实施以后盐池县的灌溉面积增长迅速,由 2003 年的 1.1 万 hm^2 增长到至今的 3.1 万 hm^2 ,灌溉的耕地化肥和农药等化学辅助能投入量大,加之此时农业机械化的推广,农用柴油使用量迅速增加,都使禁牧以后盐池县化学辅助能值的投入保持稳定的增长。此外禁牧政策实施初期,盐池县羊

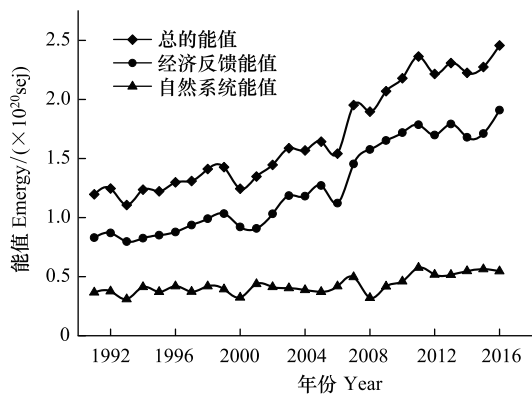


图 2 盐池县农业生态系统 1991—2016 年能值投入的变化情况
Fig.2 The variation of crop ecosystem energy input in 1991—2016

只存栏量出现了轻微的波动,在 2006 年以后出现了稳定快速的增长,加之养殖方式从自由放牧向舍饲的转型,增加了盐池县农业有机肥的使用量,增加了盐池县农业生产的可更新经济反馈能值的投入。

2.2 农业生态系统服务变化

1991—2016 年盐池县农业生态系统服务能值增长较快,从 1991 年的 2.85×10^{20} sej 增长到 2016 年的 5.65×10^{20} sej,增长接近一倍(图 4)。在生态系统的三种服务中,支持服务相对稳定,所占的比重在减少。2008 年之前调节服务所占的比重最大,2008 年以后由于供给服务快速增长,所占的比重被供给服务超过。

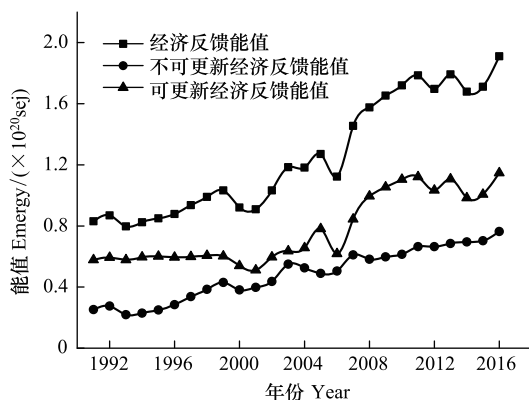


图 3 1991—2016 年农业生态系统经济反馈能值投入变化

Fig.3 The variation of crop ecosystem purchase energy input in 1991—2016

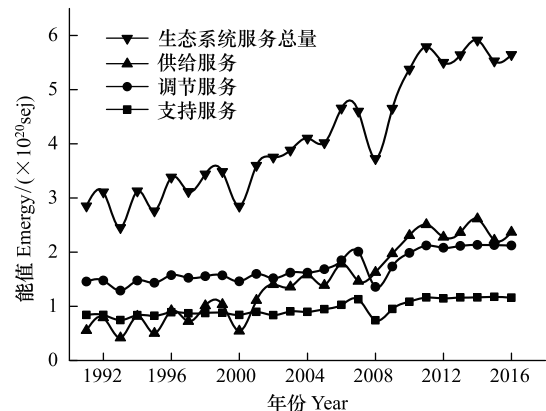


图 4 1991—2016 年生态系统服务的变化情况

Fig.4 The variation of ecosystem services in 1991—2016

供给服务是农业发展的主要目的,1991—2016 年供给服务能值快速增长,并且波动比较大,导致生态系统服务能值波动较大,并且变化趋势一致(图 4)。2002 年以前(禁牧政策实施之前),盐池县草原沙漠化严重,沙漠化面积一度达到草原面积的 61%^[39],此时农业生产条件恶劣,受风沙危害大,灌溉面积所占的比例较小,经济反馈能值的投入增长相对缓慢(图 3),农作物产量较低,农作物的产量受降水影响较大,根据 Pearson 相关性分析可知,1991—2002 年农业生态系统供给服务能值与年降水量之间在 0.01 水平(双侧)呈显著的正相关,相关系数达到了 0.75,2002 年之前供给服务能值随降水的变化在低水平剧烈波动(图 4)。

2003—2008 年,禁牧政策实施的初期,经济反馈能值的投入增长迅速(图 3),农业生态系统供给服务在波动中缓慢增长,其波动幅度要小于禁牧政策实施之前,此时供给服务已经超过支持服务,接近调节服务,并于 2008 年超过调节服务成为 3 种生态系统服务的最大值。2008 年盐池县农业生态系统服务出现了较大的下降,出现了阶段性的低值,这是由于此时盐池县灌溉面积比较小,2008 年只有 1.4 万 hm^2 ,占盐池县耕地面积的 15%,春夏连旱会对农作物播种造成巨大的影响。2008 年盐池县 4—6 月的平均降水只有 4 mm,5 月和 6 月的降水分别只有 1.5 mm 和 0.4 mm,干旱严重影响了旱地农作物的播种,使 2008 年盐池县农作物播种面积比 2007 年下降了三分之一,从而导致生态系统服务出现了较大的下降。

2008—2016 年禁牧政策生态效益显现以后,盐池县沙漠化出现了逆转,风沙危害减弱,农业生产条件明显好转,经济反馈能值投入的稳定增加,加上灌溉面积的增长,都使 2008 年以后生态系统供给服务能值迅速增加(图 4),到达 2011 年的高值以后,保持稳定中有所波动,经济反馈能值的投入对农业生态系统供给服务的提高遇到了瓶颈。根据 Pearson 相关性分析可知,2008—2016 年农业生态系统供给服务能值与年降水量之间的相关性不显著,禁牧政策生态效益显现以后,由于农业生产环境的改善,农业灌溉面积的增加,目前灌溉面积达到了 3.1 万 hm^2 ,占实有耕地面积的三分之一,盐池县农业生态系统供给服务受降水的影响在减弱。生态环境的改善、经济反馈能值投入的增加和灌溉面积的增加,可以增强半干旱的北方农牧交错区农业抵御气候波动的能力。

2.3 生态系统反服务变化

与农业生态系统服务相比,农业生态系统反服务能值相对较小,但保持相对稳定的增长趋势,由 1991 年的 5.55×10^{19} sej 增长到 2016 年的 8.58×10^{19} sej,增加了 55%(图 5)。在生态系统反服务中支持反服务所占的比重最小,2016 年只占总量的 7%,并且相对稳定。供给反服务保持相对稳定的增长,这是由于供给反服务能值的计算主要考虑化肥和农药的流失,由于化肥和农药使用量的稳定增加,而利用率相对较低。调节反服务在三种反服务中所占的比重最大,并保持缓慢和稳定的增长,在全球气候变化的背景下,控制温室气体排放是政策制定需要考虑的一个重要因素,需要制定相应的政策减少调节反服务中 CO_2 和 NO_x 的释放,减少农业生态系统调节反服务。

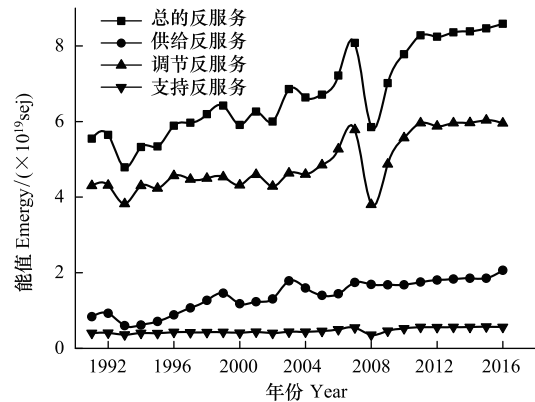


图 5 1991—2016 年生态系统反服务变化情况

Fig.5 The variation of ecosystem disservices in 1991—2016

通过对农业生态系统服务能值和反服务能值进行 Pearson 相关性分析可知,生态系统服务和反服务在 0.01 水平(双侧)呈显著的强正相关,相关系数达到了 0.96。农业生态系统服务的提升是经济反馈能值投入的增加、农业灌溉面积的提升和禁牧政策改善农业生产环境共同作用的结果,经济反馈能值投入的增加,特别是不可更新化学辅助能投入的增加,会增加生态系统反服务,使农业生态系统服务和反服务具有相同的变化趋势。

2.4 农业生态系统综合指标的变化

2.4.1 投入产出指标

26 年来盐池县农业生态系统供给服务能值经济产出率(EYR)和生态系统服务能值经济产出率(EESR)波动较大(图 6),波动主要是由生态系统供给服务能值波动引起的,受降水的影响,产量波动是旱作农业的特点^[40]。与生态系统服务能值相比,农业产出的生态系统反服务的能值相对较小,净生态系统服务能值经济产出率(nEESR)与生态系统服务能值经济产出率(EESR)保持一致的变化趋势(图 6)。禁牧政策实施的生态效益显现以后(2008 年以后),EYR、EESR 和 nEESR 波动幅度要小于禁牧之前,在经济反馈能值稳定增加和灌溉面积增加的情况下,农业产出的生态系统服务能值波动在减小,这进一步说明禁牧政策使生态环境改善,加之经济反馈能值和灌溉面积的增加可以增强半干旱的北方农牧交错区农业抵御气候波动的能力。

2.4.2 投入资源指标

由于环境的无偿能值输入相对稳定,而经济反馈能值的投入一直保持稳定的增长,能值投资率(EIR)保持稳定增长的趋势(图 7),此结果与我国农业能值投资率一致^[41],说明盐池县的农业发展的经济成本在增加而对环境的依赖度在降低。

禁牧政策实施之前(1991—2002 年),环境负载率(ELR)保持稳定快速的的增长趋势(图 7),而禁牧政策实施以后(2003—2016 年),ELR 在波动中轻微的下降。禁牧政策实施以后,盐池县农业有机肥的使用量增加迅速,虽然不可更新资源能值的投入也在增长,但其增长速度要小于可更新资源的投入。盐池县农业生态系统 ELR 低于全国农业生态系统的水平,1991—2016 年间的平均值是 0.45,而 2000 年全国的环境负载率是 2.72^[41]。盐池县农业生产主要是旱作农业,目前灌溉面积只占农作物播种面积的三分之一,根据调研发现,盐池县旱作农业施用化肥较少,其他经济反馈能值的投入也相对较少,加上有机肥使用量的增加共同造成了盐池县环境负载率低于全国水平。地处北方农牧交错带的盐池县,生态环境脆弱,控制环境负载率的增长,已成为盐池县环境改善和农业可持续发展的重要方面。

1991—2016 年盐池县农业生态系统的能值自给率(ESR)保持稳定的下降趋势,表明该系统的自给能力

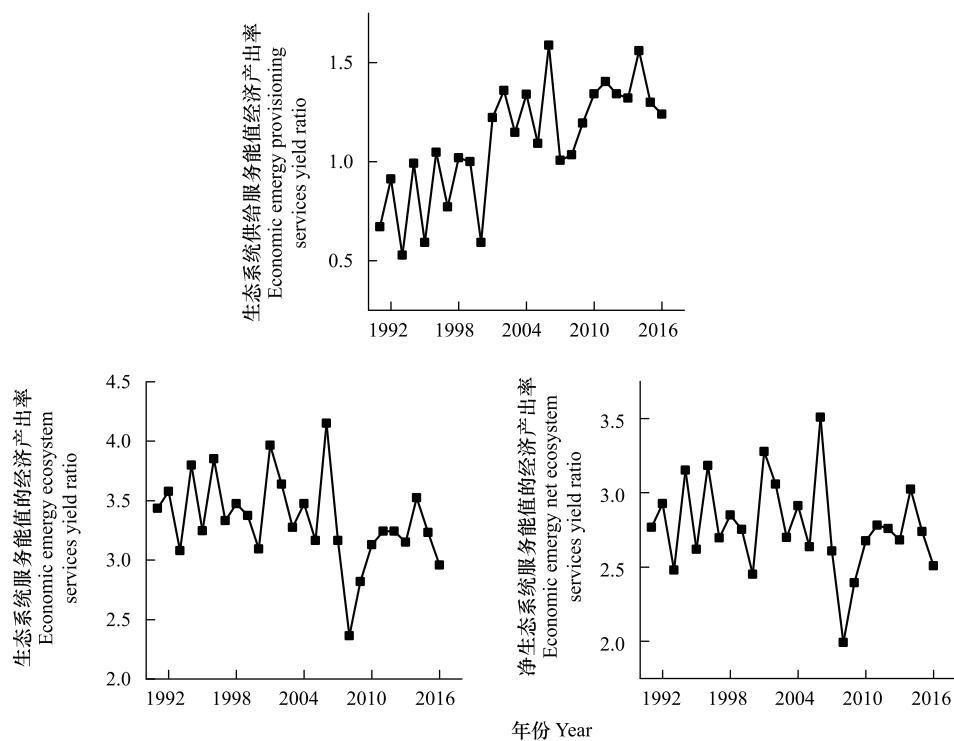


图6 盐池县 EYR、EESR 和 nEESR 变化情况

Fig.6 The variation of EYR, EESR and nEESR in Yanchi County

EYR:生态系统供给服务能值经济产出率,Economic energy provisioning services yield ratio;EESR:生态系统服务能值的经济产出率,Economic energy ecosystem services yield ratio;nEESR:净生态系统服务能值的经济产出率,Economic energy net ecosystem services yield ratio

在变弱,这与全国的变化趋势一致,说明农业生态系统与外部的联系在加大,进一步反映了化肥、农业机械化等经济反馈能值投入的增加。

2.4.3 生态系统服务指标

26年间生态系统正反服务之比(EDR)保持稳定的增长趋势,这说明26年来盐池县农业生态系统服务的增长速度超过了生态系统反服务,从图8可以看出禁牧政策实施之前(1991—2002年)EDR的增长速度明显小于禁牧政策实施以后(2003—2016年),这是由于禁牧政策实施后,随着经济反馈能值投入的稳定增加、生态环境的改善和灌溉面积的增加,使生态系统服务迅速增长。

2.4.4 可持续指标

禁牧政策实施之前(1991—2002年),盐池县农业发展的能值可持续指数(ESI)表现为下降的趋势(图9),而禁牧政策实施以后(2003—2016年),能值可持续指数(ESI)出现上升的趋势,这说明随着禁牧政策的实施盐池县农业发展的可持续性在上升。禁牧政策实施以后,虽然盐池县农业投入的不可更新化学辅助能进一步增加,但投入的可更新有机肥也快速增加,农业生态系统供给服务能值也增长迅速,使禁牧政策实施以后盐池县ESI表现为上升的趋势。按照 Sergio Ulgiati 等^[42]和蓝盛芳等^[28]的总结,能值可持续指数 $ESI < 1$ 为发达国家,表示高度发展的消费导向型经济, $1 < ESI < 10$ 为发展中国家,表明产品对社会发展有净贡献, $ESI > 10$ 表明经济还未被开发。盐池县农业生态系统能值可持续指数(ESI)在1.2和3.6之间变动,26年的平均值是2.5,说明盐池县农业生态系统对社会的发展具有净贡献。与其他地区相比,盐池县的ESI高于全国平均水平,2000年全国农业生态系统ESI是0.77^[41],而典型农区的河北省乐城县的ESI在2000年只有0.04^[22],典型农牧交错区盐池县的农业系统的可持续性相对较高。

生态系统服务能值可持续指标(ESSI)与ESI的变化趋势一致,只是禁牧政策实施之前(1991—2002年)ESSI下降速度更快(图9),而禁牧政策实施以后(2003—2016年)ESSI保持相对平稳。禁牧政策实施以后盐

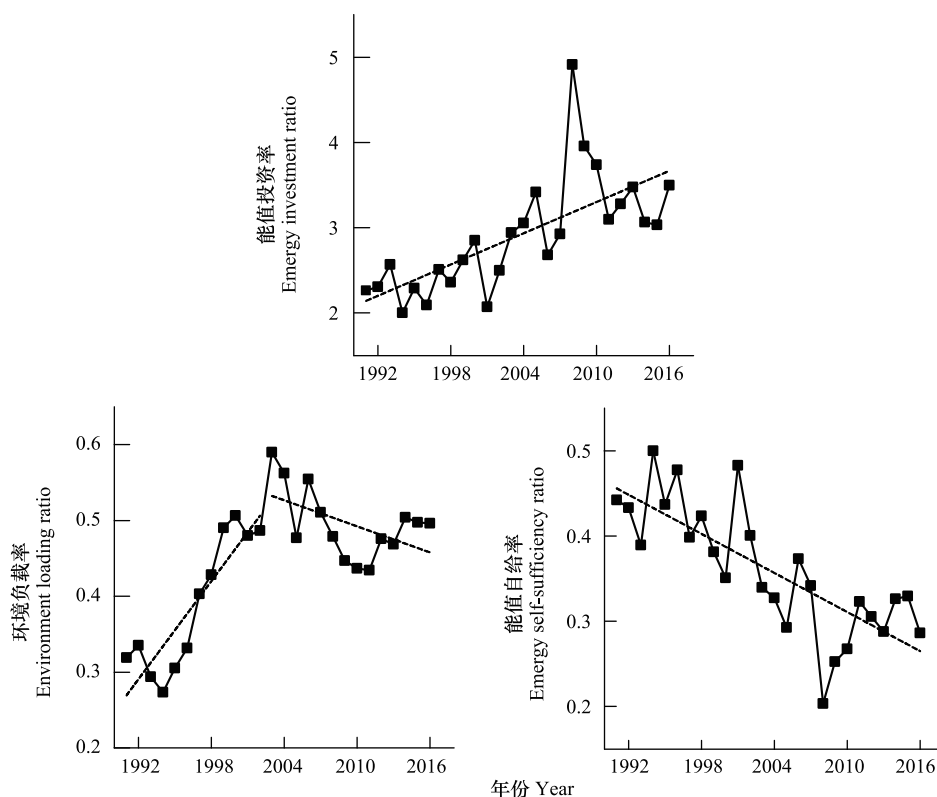


图7 盐池县 EIR、ELR、ESR 的变化情况

Fig.7 The variation of EIR, ELR and ESR in Yanchi County

EIR:能值投资率,Energy investment ratio;ELR:环境负载率,Environment loading ratio;ESR:能值自给率,Energy self-sufficiency ratio

池县农业生态系统支持服务和调节服务出现了稳定的增长,而禁牧政策实施之前生态系统支持服务和调节服务则保持相对稳定,从而在考虑了生态系统支持服务和调节服务以后,禁牧政策实施之前 ESSI 下降速度更快,而禁牧政策实施以后则增长速度相对较慢。净生态系统服务能值可持续指标 (nESSI) 与 ESSI 具有相同的变化趋势。

3 结论讨论

3.1 结论

(1) 1991—2016 年盐池县农业投入的能值一直处于增长的趋势,农业能值投入的增加主要是由经济反馈能值投入的增加引起的,并且禁牧政策实施以后农业投入能值增长的速度大于禁牧实施之前。随着能值投入的增加,盐池县农业生态系统服务能值出现了快速增长,禁牧政策实施以后的增长速度大于禁牧之前,其中以供给服务增长速度最快,与此同时生态系统反服务也保持稳定的增长趋势。盐池县农业生态系统服务和反服务具有很强的正相关,农业生态系统服务和反服务具有相同的变化趋势。

(2) 禁牧政策的生态效益显现以后 (2008 年以后),盐池县农业生态系统服务能值的经济产出率的波动幅度小于禁牧之前。根据 Pearson 相关性分析,1991—2002 年供给服务能值与年降水量呈显著的正相关,而

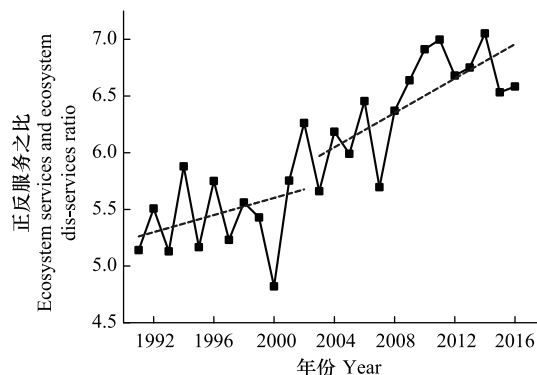


图8 盐池县农业生态系统正反服务之比 (EDR) 变化情况

Fig.8 The variation of ecosystem services and Ecosystem dis-services ratio (EDR) in Yanchi County

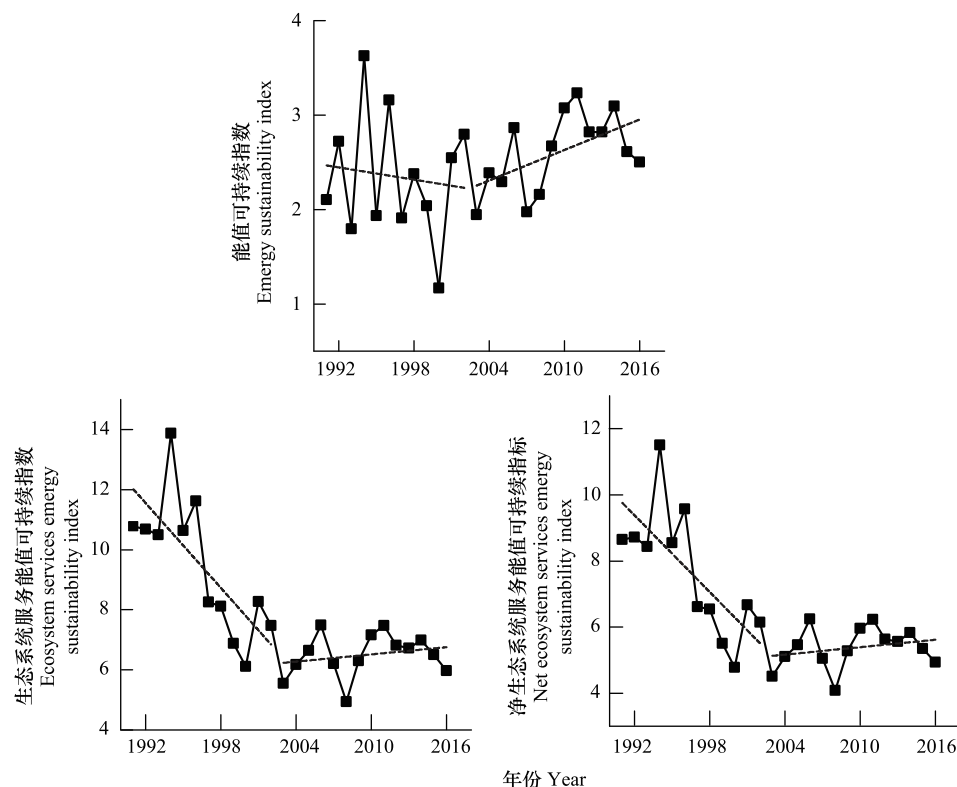


图9 盐池县 ESI、ESSI 和 nESSI 变化情况

Fig.9 The variation of ESI, ESSI and nESSI in Yanchi County

ESI: 能值可持续指数, Energy sustainability index; ESSI: 生态系统服务能值可持续指数, Ecosystem services energy sustainability index; nESSI: 净生态系统服务能值可持续指标, Net ecosystem services energy sustainability index

2008—2016 年供给服务与年降水量的相关性不显著, 生态环境的改善、经济反馈能值投入的增加、加上灌溉面积的增加, 可以增强半干旱的北方农牧交错区农业抵御气候波动的能力。

(3) 农业生态系统能值综合指标表明, 盐池县农业可持续性高于全国和典型农区的平均水平, 禁牧政策实施之前盐池县农业可持续性表现出稳定的下降趋势, 而禁牧政策实施以后其可持续性表现为上升的趋势。

3.2 讨论

农业生态系统的首要目的是在人类的管理下为人类提供粮食、饲料和燃料等供给, 即农业生态系统的供给服务, 在此过程中需要依靠外部环境提供的生态系统服务^[7], 禁牧政策能改善外部环境, 提高外部环境提供生态系统服务的能力, 改善农业生产条件, 提高旱地农业抵御气候波动的能力。为了保证当地和全球的粮食安全, 农业生产不得不抛弃传统的生产方式, 转向增加外部投入的农业生产方式, 目前这种转变已经满足了日益增长的粮食、饲料和植物纤维的需求^[43]。在其他条件不变的情况下, 化学辅助能值投入增加到一定程度后, 边际供给服务将不再增长, 化学辅助能值投入的继续增加已不能导致相应的供给服务能值增加和生态系统服务的提升, 化学辅助能值投入的增加对提升农业生态系统供给服务遇到了瓶颈。与此同时农业投入化学辅助能值的增加, 会使面源污染的风险显著增大, 农业生产的环境成本越来越大, 生态系统反服务也在增长, 对区域的可持续发展造成严重的威胁。

禁牧实施初期, 对盐池县畜牧业的发展造成了一定的影响, 羊肉产量在禁牧初期出现了波动, 随着农业结构的调整和畜牧业转型的完成, 以及盐池县滩羊品牌享誉海内外, 市场前景广阔, 盐池县在 2006 年以后羊肉产量出现了连续快速的生长, 2016 年是 2006 年的四倍。禁牧政策迫使畜牧业改变原有粗放的生产方式, 在改善生态环境和农业取得较大发展的同时, 促进了畜牧业的发展升级。禁牧政策实施, 促进畜牧生产方式的转变, 由传统的自由放牧转为舍饲, 舍饲会产生大量的有机肥, 从而增加农业可更新资源能值的投入, 促进北

方农牧交错区农业的可持续发展。禁牧政策实施以后,为了解决畜牧业发展的饲料粮问题,迫使盐池县农业改变种植结构,由于玉米的秸秆和籽粒可以作为畜牧业发展的饲料,伴随着灌溉面积的增加,盐池县灌溉玉米的种植面积增加显著。而灌溉玉米需要投入大量的化肥、农药等化学辅助能值,增加北方农牧交错区面源污染的风险,阻碍区域农业的可持续发展。如何通过对生态系统服务的集约化利用来减少外部化学辅助能值的投入,减少面源污染的风险,同时提高农业产出的稳定性,成为农业生态系统服务研究的重点。

生态系统反服务的计算方法和反服务的确定会使生态系统反服务计算值偏小,诸如农业生态系统造成的生物多样性损失、农化肥流失对其他生态系统所造成的损失等生态系统反服务没有计算在内,这些反服务相对难以估算,而数值可能会比较大。如何准确的确定和计算生态系统反服务,成为今后研究工作的重点和难点。

参考文献(References):

- [1] Daily G C. *Nature's Services: Societal Dependence on Natural Ecosystems*. Washington DC: Island Press, 1997.
- [2] 刘海, 武靖, 陈晓玲. 丹江口水源区生态系统服务时空变化及权衡协同关系. *生态学报*, 2018, 38(13): 4609-4624.
- [3] 张玲玲, 巩杰, 张影. 基于文献计量分析的生态系统服务研究现状及热点. *生态学报*, 2016, 36(18): 5967-5977.
- [4] 吴霜, 延晓冬, 张丽娟. 中国森林生态系统能值与服务功能价值的关系. *地理学报*, 2014, 69(3): 334-342.
- [5] Shackleton C M, Ruwanza S, Sinasson Sanni G K, De Lacy B P, Modipa R, Mtati N, Sachikonye M, Thondhlana G. Unpacking pandora's box: understanding and categorising ecosystem disservices for environmental management and human wellbeing. *Ecosystems*, 2016, 19(4): 587-600.
- [6] 王文瑞, 田璐, 唐琼, 邓小永. 生态恢复中生态系统反服务与居民生存的博弈——以甘肃“猪进人退”现象为例. *地理研究*, 2018, 37(4): 772-782.
- [7] Zhang W, Ricketts T H, Kremen C, Carney K, Swinton S M. Ecosystem services and dis-services to agriculture. *Ecological Economics*, 2007, 64(2): 253-260.
- [8] 谢高地, 肖玉. 农田生态系统服务及其价值的研究进展. *中国生态农业学报*, 2013, 21(6): 645-651.
- [9] Chen Y J, Yu Z R, Li X D, Li P Y. How agricultural multiple ecosystem services respond to socioeconomic factors in Mengyin County, China. *Science of the Total Environment*, 2018, 630: 1003-1015.
- [10] 中国大百科全书总编辑委员会《农业》编辑委员会, 中国大百科全书出版社编辑部. 中国大百科全书: 农业 I、II 卷. 北京: 中国大百科全书出版社, 1990.
- [11] 赵哈林, 赵学勇, 张铜会, 周瑞莲. 北方农牧交错带的地理界定及其生态问题. *地球科学进展*, 2002, 17(5): 739-747.
- [12] 樊胜岳, 周立华, 赵成章. 中国荒漠化治理的生态经济模式与制度选择. 北京: 科学出版社, 2005.
- [13] 王涛, 宋翔, 颜长珍, 李森, 谢家丽. 近 35a 来中国北方土地沙漠化趋势的遥感分析. *中国沙漠*, 2011, 31(6): 1351-1356.
- [14] 周立华, 朱艳玲, 黄玉邦. 禁牧政策对北方农牧交错区草地沙漠化逆转过程影响的定量评价. *中国沙漠*, 2012, 32(2): 308-313.
- [15] 王晓君, 周立华, 石敏俊. 农牧交错带沙漠化逆转区禁牧政策下农村经济可持续发展研究——以宁夏盐池县为例. *资源科学*, 2014, 36(10): 2166-2173.
- [16] 徐中民, 张志强, 程国栋. *生态经济学理论方法与应用*. 郑州: 黄河水利出版社, 2003.
- [17] Sun C Z, Wang Y Y, Zou W. The marine ecosystem services values for China based on the emergy analysis method. *Ocean & Coastal Management*, 2018, 161: 66-73.
- [18] Zhan J Y, Zhang F, Chu X, Liu W, Zhang Y. Ecosystem services assessment based on emergy accounting in Chongming Island, Eastern China. *Ecological Indicators*. Amsterdam: Elsevier, 2018.
- [19] Huang S L, Chen Y H, Kuo F Y, Wang S H. Emergy-based evaluation of peri-urban ecosystem services. *Ecological Complexity*, 2011, 8(1): 38-50.
- [20] 喻锋, 李晓波, 王宏, 张丽君, 徐卫华, 符蓉. 基于能值分析和生态用地分类的中国生态系统生产总值核算研究. *生态学报*, 2016, 36(6): 1663-1675.
- [21] 马凤娇, 刘金铜. 基于能值分析的农田生态系统服务评估——以河北省栾城县为例. *资源科学*, 2014, 36(9): 1949-1957.
- [22] Ma F J, Eneji A E, Liu J T. Assessment of ecosystem services and dis-services of an agro-ecosystem based on extended emergy framework: A case study of Luancheng county, North China. *Ecological Engineering*, 2015, 82: 241-251.
- [23] 王娅, 周立华. 宁夏盐池县沙漠化逆转过程的脆弱性诊断. *中国沙漠*, 2018, 38(1): 39-47.
- [24] 樊胜岳, 周立华, 马永欢. 宁夏盐池县生态保护政策对农户的影响. *中国人口·资源与环境*, 2005, 15(3): 124-128.
- [25] Ulgiati S, Odum H T, Bastianoni S. Emergy use, environmental loading and sustainability an emergy analysis of Italy. *Ecological Modelling*, 1994,

- 73(3/4): 215-268.
- [26] 汤萃文, 杨莎莎, 刘丽娟, 张忠明, 肖笃宁, 田赐冬. 基于能值理论的东祁连山森林生态系统服务功能价值评价. 生态学杂志, 2012, 31(2): 433-439.
- [27] 马程, 王晓玥, 张雅昕, 李双成. 北京市生态涵养区生态系统服务供给与流动的能值分析. 地理学报, 2017, 72(6): 974-985.
- [28] 蓝盛芳, 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.
- [29] Millennium Ecosystem Assessment. Ecosystems and Human Well-being: Synthesis. Washington, DC: Island Press, 2005.
- [30] Chen W, Geng Y, Dong H J, Tian X, Zhong S Z, Wu Q, Xu Y, Zhang Q, Li S. An emergy accounting based regional sustainability evaluation: A case of Qinghai in China. Ecological Indicators, 2018, 88: 152-160.
- [31] Wang X H, Shen J X, Zhang W. Emergy evaluation of agricultural sustainability of Northwest China before and after the grain-for-green policy. Energy Policy, 2014, 67: 508-516.
- [32] 杨月欣, 王光亚, 潘兴昌, 中国疾病预防控制中心营养与食品安全所. 中国食物成分表(第二版). 北京: 北京大学医学出版社, 2009.
- [33] 何文寿. 宁夏不同农业生态区土壤养分时空变化特征. 干旱地区农业研究, 2004, 22(2): 25-30, 53-53.
- [34] 吴金凤, 王秀红, 郭跃升. 东西部县域农业化学物质投入产污强度对比分析——以山东平度市和宁夏盐池县为例. 中国农学通报, 2015, 31(14): 193-199.
- [35] 邓健, 赵发珠, 韩新辉, 冯永忠, 杨改河. 黄土高原典型流域种植业发展模式的能值分析. 应用生态学报, 2016, 27(5): 1576-1584.
- [36] Zhang X H, Zhang R, Wu J, Zhang Y Z, Lin L L, Deng S H, Li L, Yang G, Yu X Y, Qi H, Peng H. An emergy evaluation of the sustainability of Chinese crop production system during 2000-2010. Ecological Indicators, 2016, 60: 622-633.
- [37] 王红彦. 基于生命周期评价的秸秆沼气集中供气工程能值分析[D]. 北京: 中国农业科学院, 2016.
- [38] Zhang L X, Yang Z F, Chen G Q. Emergy analysis of cropping-grazing system in Inner Mongolia Autonomous Region, China. Energy Policy, 2007, 35(7): 3843-3855.
- [39] 刘满仓. 盐池县草原沙漠化的现状、成因与对策. 草业科学, 2002, 19(6): 5-6.
- [40] 樊胜岳. 中国荒漠化治理的生态经济模式与制度选择[D]. 兰州: 兰州大学, 2003.
- [41] Chen G Q, Jiang M M, Chen B, Yang Z F, Lin C. Emergy analysis of Chinese agriculture. Agriculture, Ecosystems & Environment, 2006, 115(1/4): 161-173.
- [42] Ulgiati S, Brown M T. Monitoring patterns of sustainability in natural and man-made ecosystems. Ecological Modelling, 1998, 108(1/3): 23-36.
- [43] Bommarco R, Vico G, Hallin S. Exploiting ecosystem services in agriculture for increased food security. Global Food Security, 2018, 17: 57-63.