

DOI: 10.5846/stxb201405110964

郭贝贝, 金晓斌, 林忆南, 杨绪红, 周寅康. 基于生态流方法的土地整治项目对农田生态系统影响研究. 生态学报, 2015, 35(23): - .

Guo B B, Jin X B, Lin Y N, Yang X H, Zhou Y K. Determining the effect of the Land Consolidation Project on the Cropland ecosystem based on the ecological flow method. Acta Ecologica Sinica, 2015, 35(23): - .

基于生态流方法的土地整治项目对农田生态系统影响研究

郭贝贝, 金晓斌*, 林忆南, 杨绪红, 周寅康

南京大学地理与海洋科学学院, 南京 210023

摘要: 将土地整治活动作为外界对农田生态系统(项目区)集中性的外部激励, 以陕西关中凤翔县典型土地整治项目为例, 分析了项目实施前后生态流(物质流、能量流、信息流)变化状况, 建立了土地整治生态影响概念性模型, 明确了相应生态流的流向与路径关系, 使用可用能法和能值法测算项目区外部输入及生态产品输出, 应用生态流分析法, 对土地整治项目生态流和系统效率进行了定量计算。根据设定的土地整治工程使用年限, 评估了项目实施后区域净生态价值、自然资源依赖度、可更新资源依赖度、生态产出率、生态承载力和生态可持续度等指标的时间变化过程。得到以下研究结果: (1) 可用能法和能值法测算出的系统生态效益均呈现由项目建设初期陡降为负值, 而后指数增加, 再趋于平稳的过程; (2) 可用能法测算出项目实施后的第 29 年, 生态效益由亏转盈, 体现出系统从被扰乱后恢复自然平衡状态的过程; (3) 能值法测算出项目实施后的第 4 年, 生态系统趋于平衡状态; (4) 研究区土地整治项目的经济效益为负, 于项目实施 3 年后趋于平稳, 总投资中农业生产年投入占资金总额的 78.35%。通过可用能和能值方法的结合, 可以定量计算系统稳定性, 为土地整治项目的物质、劳动力和资金投资选择等提供借鉴。

关键词: 土地整治; 农田生态系统; 生态流; 可用能; 能值; 宝鸡凤翔

Determining the effect of the Land Consolidation Project on the Cropland ecosystem based on the ecological flow method

GUO Beibei, JIN Xiaobin*, LIN Yinan, YANG Xuhong, ZHOU Yinkang

School of Geographic and Oceanographic Sciences, Nanjing University, Nanjing 210023, China

Abstract: Ecological flows reflect the relationships among metabolism, energy conversion, information exchange, and so forth. A quantitative analysis of the development of ecological flow patterns of various parameters was performed. Based on existing exergy accounting, ecological flow networks in a typical semi-natural cropland ecosystem were analyzed, with five ecological indicators being used to evaluate the ecological effectiveness of these networks. Exergy buffers the capacity and environmental impact on cropland ecosystems. Previous studies have examined exergy effectiveness in a variety of fields, but exergy analysis has rarely been applied to assess cropland ecosystems. Research time is significant because ecosystem stability varies in different periods; hence, ecological flow results will differ. In the cropland ecosystem used for this study, we chose the time period from planting to harvest to determine eco-flows based on the life-cycle theory, and set the land consolidation project edge as the boundary. This study only considered crop growth and the impacts of human-assisted primary production. As a sudden short-term external incentive of the project cropland ecosystem area, land consolidation

基金项目: 教育部博士点基金(20120091110014); 国家自然科学基金(41201386); 江苏省普通高校研究生科研创新计划资助项目(CXZZ13_0046)

收稿日期: 2014-05-11; 网络出版日期: 2015- -

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: jinxb@nju.edu.cn

activities influenced ecological flow changes after land consolidation project implementation (LCPI), which included material, energy, and information flow changes. A land consolidation ecological conceptual model was built and reflected ecological flow direction and path. It used exergy and emergy accounting methods to study the external input, output, and ecological products. The study used a land consolidation project in Fengxiang County of Shaanxi Province as a case study, and applied ecological flow analysis to it to determine the intensity of ecological flow and system efficiency. Using different land consolidation project terms, this study evaluated net ecological value, natural resource dependency, renewability dependency, ecosystem productivity, ecological capacity, and ecological sustainability after LCPI. The exergy and emergy accounting methods presented changes to the ecological benefits process as a steep negative decline at the preliminary stage, followed by an exponential increase, and finally leveled off. Second, the exergy accounting method traced the ecological benefit losses and profit over the 29 years after LCPI in the study area was initiated, and manifested the system process recovery from chaos to natural balance. Third, the emergy accounting method demonstrated that, in the fourth year after LCPI, the ecosystem tended toward a state of relative balance, with an increase in ecological productivity and potential investment demands. Fourth, the economic benefits of the land consolidation project were negative and leveled off after 3 years, reflecting an annual agricultural production investment of 78.35%. Through the combination of exergy and emergy, the system stability was quantified and calculated. This study can be used as a reference for deciding input material, labor, capital, etc. for use in future land consolidation project planning.

Key Words: Land consolidation; cropland ecosystem; ecological flow; exergy; emergy; Fengxiang County

土地是人类赖以生存的基础,是人类最珍贵的自然资源,随着人口增长,经济发展,以及城市化和工业化迅速推进,土地尤其是耕地,在确保粮食安全、拓展发展空间、建立生态红线、建设美丽中国的道路上承受的压力越来越重。土地整治是世界上许多国家解决社会经济发展过程中土地利用问题,调整土地利用结构和布局,改善土地关系的活动和推动农村发展的政策工具^[1]。在此宏观背景下,土地整治仍将在我国粮食安全战略方面担任重要的角色,其具有持续性和规模性。而随着新型城镇化的推进,土地整治将不仅增加耕地数量、提升耕地质量,确保粮食安全,而且与新型城镇化以及城乡统筹发展相结合,逐步由自然性工程转变为综合性社会工程,成为破解目前存在的农村分散性经营与现代农业规模化趋势之间基本矛盾的重要途径或方式^[2]。因此,土地整治一方面在增加有效耕地面积适度提升耕地质量的同时将富有更深刻的时代内涵,同时业已成为我国现阶段最为显著的土地利用方式之一。

与欧洲地区广泛开展的,以地块归并、生态环境与景观建设为重点^[3-4]的土地整治相比,我国在集体土地所有制背景下,受产权制度、地块分散等因素的影响,现阶段土地整治主要以提升农田水利基础设施水平和配套率,以稳定耕地数量和提高耕地质量为主要目标。据统计,2006—2012年,国家共安排土地整理项目 15.23 万个,建设总规模 829 万 hm^2 ,实现新增耕地 270 万 hm^2 ,投资总额为 2203.7 亿元,《全国土地整治规划(2011—2015 年)》进一步提出“十二五”期间,全国要完成 2670 万 hm^2 高标准基本农田建设任务^[5-6]。随着土地整治的迅速发展,相关规划控制、技术方法^[7]、环境影响、绩效评价^[8]等研究受到广泛关注,但在生态影响与生态风险方面尚缺乏系统化的研究,不多的研究集中在对生态系统单要素、景观生态影响等方面,利用定量方法进行土地整治生态影响的研究存在一定的欠缺,以持续监测数据为基础的定量分析更为鲜见。

现阶段土地整治根据建设对象和目标可以分为农用地整治、建设用地整治和区域综合整治,其中农用地整治是当前土地整治项目的主体。在农用地整治中,对农田生态系统影响的要素包括土壤、水、植被以及生物等。在土壤要素研究方面,当前研究主要侧重于土地整治工程实施过程中对土壤理化性质及相关生态过程的影响,如改变土壤结构与质地^[9]、改变土壤质量、改变土壤肥力与养分循环、造成土壤侵蚀与加剧土壤退化等^[10-12];对于水要素的研究,重点体现于改变水文过程^[13]、影响水环境质量^[14]、影响区域水资源配置、改善水资源管理系统等^[15];在植被要素方面,主要分析对区域植被数量结构^[16]和空间格局^[9]的影响;对于生物与生

态,主要分析土地整治区关键或敏感动植物及生境(栖息地)影响与变化^[17]。相关研究多集中于土地整治活动带来的项目区生态环境影响结果,较少涉及对其影响机制的分析。

土地整治涉及项目区田块规模、地块形状、地块平整度等的改变,一般引入景观生态学中斑块、廊道、基质、节点、网络等概念,对由斑块—廊道—基质构成的景观空间格局以及相应的水、土、生物等生态过程的相互作用进行研究。如项目区灌排体系与田间道路的重新布设,将改变项目区的斑块与廊道,引起土地整治区域土地景观格局的变化^[18],或致田块规整度提高、田块连片程度提高、田块破碎度降低^[19]、廊道连通度提高、景观复杂度降低等^[20]。

土地整治生态环境影响是评价土地整治对生态环境产生正面或负面影响的生态效应,是相关研究中的热点与难点之一。现有研究多运用生态系统服务功能价值、生态足迹^[21]、生态敏感性评价等,以定量研究土地整治的生态环境影响^[22]。其中生态系统服务功能价值核算多根据生态系统生态服务价值当量表及全国平均状态的生态系统生态服务价值单价为基础,结合土地整治生态变化特征,得到修正后的生态系统服务价值估算模型,以测算不同土地利用类型的生态系统服务功能价值。也有学者从景观角度出发,通过土地整治后整治区的景观结构、景观功能的评价分析土地整治的生态环境影响^[23]。

综合而言,土地整治对项目区水、土、植被等要素的影响机制及其定量关系尚待深入。现有土地整治生态环境影响评价的方法侧重于考虑某一方面的整体效应,评价测算方法较单一,未能考虑生态系统不同组分受土地整治活动的影响。考虑到中国土地整治建设特点,建立农田生态系统输入输出模型,采用可用能和能值的方法以单一介质进行统一定量测算^[24]是系统性探索生态影响的有效途径之一。而可用能方法^[25]比能值法^[26]更为系统,内涵上不仅包含了能值方法所研究的能流^[27]和物质流^[28],还包含了生态系统中的信息流^[29],因此使用两种方法结合研究更为全面。本文以陕西关中凤翔县开展的典型土地整治项目为例,通过可用能^[30-31]和能值方法分析土地整治行为对此区域农田生态系统的生态流产生的影响,通过资金流计算来衡量研究区内的经济效益^[32],可为生态效益提供定量的方法研究,同时采用可用能和能值方法^[33]分别对比分析不同工程使用年限的土地整治工程对农田生态系统的影响,可估算土地整治建设期、恢复期和稳定期的时长,为土地整治项目规划实施和生态建设提供理论依据。

1 方法

基于可用能与能值方法可使用统一量纲进行参数分析,结合清单法简便清晰的特点,本文提出了具有生态影响量化功能以及反馈功能的生态流^[34-36](物质流、能量流、信息流)分析方法,该方法包含三大部分:生态流系统模型、输入输出流计算和指标分析,其中生态流系统模型是基础。

1.1 生态流模型

土地整治项目的建设行为是对农田生态系统的一种集中性外部刺激,将对项目区生态流(物质流、能量流、信息流)产生影响,其概念性模型如图1所示,此模型从生态流的流向与路径两个层面来考察土地整治项目可能引起的生态流变化。土地整治项目对农田生态系统生态流输入和输出的影响如图2所示,包括农田生态系统内的自然资源、人工、环境的投入和生态产品输出等,以生态流和资金流来系统分析土地整治项目实施后,土地整治活动的一次性投入和引发整治工程设施运行期的农业生产投入变化对生态系统的共同影响^[37]。

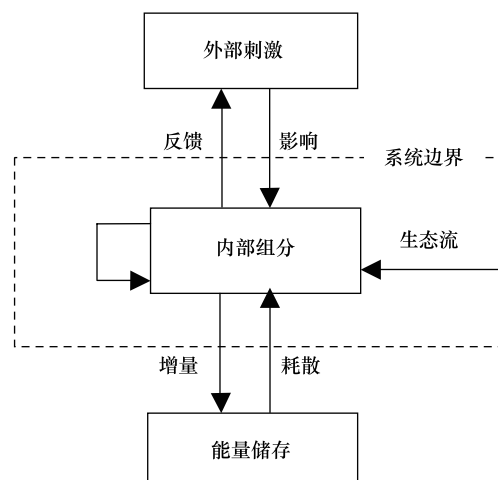


图1 土地整治项目生态影响概念性模型示意图

Fig. 1 Conceptual model diagram of ecological effect of land consolidation projects

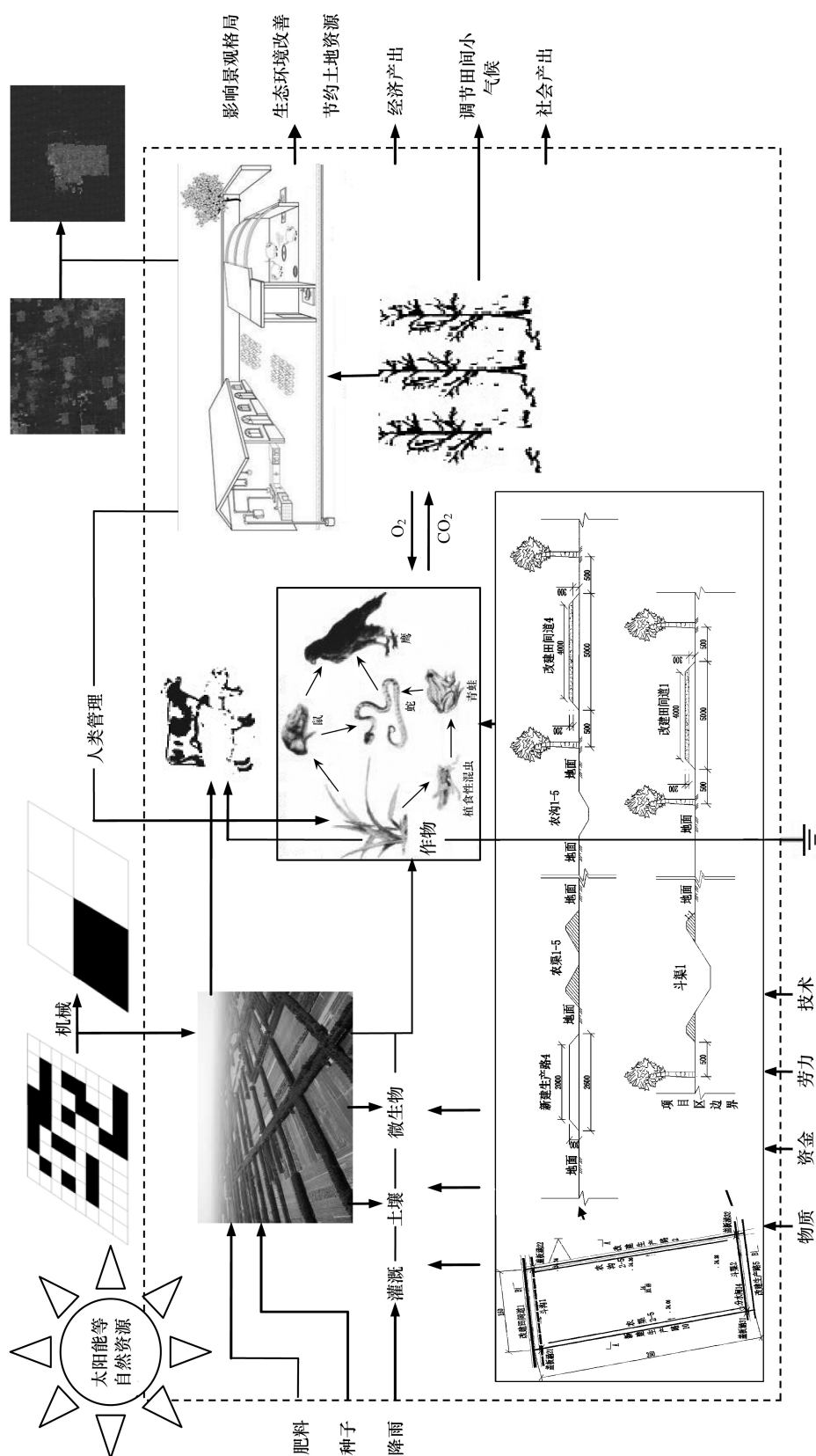


图 2 土地整治项目的生态流(流向与路径)示意图
Fig. 2 Diagram of ecological flow and path of land consolidation project

1.2 生态可用能分析

可用能又称火用能^[38-40],生态系统中火用能是当系统由一任意状态可逆地变化到与给定环境相平衡的状态时,理论上可以无限转换为任何其他能量形式的那部分能量,主要的火用能参数和表示方法为:

$$\eta_{Ex} = Ex_{in}/Ex_{out} \quad (1)$$

式中, η_{Ex} 是指系统储存的火用值转化率(%), Ex_{in} 是带动整个过程或者系统运作的火用值(J), Ex_{out} 是指过程输出的火用值。

根据热力学第二定律,定义生态系统中的生态火用密度为:

$$ex = RT \sum_{i=0}^n \left[c_i \ln \left(\frac{c_i}{c_i^{eq}} \right) + (c_i - c_i^{eq}) \right] \quad (2)$$

式中, R 为气体常数($\text{kJ g}^{-1} \text{K}^{-1}$); T 为绝对温度(K); c_i 和 c_i^{eq} 分别为生态系统中第 i 种组分在现有状态和平衡状态的单位质量(g/m^3); n 为系统中存在着的 n 种组分。

与同系统组分中的单位质量对生态火用的贡献相比,压力和温度的贡献十分微小,因此,为了实际应用的方便,简化计算过程,忽略压力和温度对最终结果的影响,将农田生态系统中主要能量输入和输出之间的火用指数表示为:

$$eX = \varphi \sum_{i=0}^n \beta_i c_i \quad (3)$$

式中, φ 指对系统平衡影响的系数; β_i 指生态系统内各组分要素 i 的权重,可根据系统内要素的信息或某种水平上的组分含量计算,通过实验方法获得各部分 c_i 的数据。

1.3 生态影响评价指标

借鉴 Odum 的能值研究方法,依据土地整治活动的特性和生命周期,将农田生态系统中的生态流影响的输入和输出分为年自然资源输入(AN)、年购买资源输入(AP)、一次性自然资源输入(ON)、一次性购买资源输入(OP)、年生态输出(AY)和一次性生态输出(OY)六个方面^[41]。自然资源输入光、温、水等自然资源的,为避免重复仅计算新增耕地部分的自然资源输入;购买资源输入指资金、劳动力、材料、灌溉水量和技术等投入,其中一次性输入为土地整治整个建设期的投入,年购买资源输入为新增耕地部分的购买资源投入,具体指标如表 1 所示。农田生态系统是一个典型的半人工半自然的生态系统,将土地整治行为视为一个整体的外部刺激,以年为研究周期,土地整治项目边界为系统边界,其受土地整治活动影响具体的输入和输出流向和路径如图 2 所示。

生态影响评价指标参考了前人对可用能和能值的分析,反应了农田生态系统各方面的生态影响,主要的评价指标有净生态价值、自然资源依赖度、可更新自然资源依赖度、生态产出率、生态承载率和生态可持续度^[42]。而将土地整治活动以及农业生产活动中产生的资金流与生态流进行比较,为土地整治规划的经济效益提供数据支撑。可通过这些指标的定量计算,来评价研究区域的土地整治活动对生态环境在一定空间和时间范围内的影响。

(1) 净生态价值

$$NEV = Y - I \quad (4)$$

通过比较生态输出(Y)和生态输入(I)的差值得到净生态价值(NEV),反映了土地整治行为对农田生态系统稳定性的总量影响, NEV 值为正,说明土地整治对农田生态系统产生了生态效益富余,反之则对生态效益产生了负面影响。

(2) 自然资源依赖度

$$ND = \frac{N}{I} = \frac{AN + ON}{AN + AP + ON + OP} \quad (5)$$

自然资源依赖度(ND)为输入自然资源的总和(N)与总输入(I)之比,反映了土地整治实施后农田生态系

统对自然资源投入的依赖程度,依赖度越高,说明土地整治对农田生态系统的影响越小,系统受外部刺激时的缓冲能力越强。

(3) 可更新资源依赖度

$$RD = \frac{R}{I} \quad (6)$$

可更新资源依赖度(RD)为土地整治和农业生产中对农田生态系统的可更新资源的输入(R)占总输入(I)的比例,反映了土地整治后可更新资源在系统运行中的重要程度, RD 值越高,系统的可更新能力越强。

(4) 生态产出率

$$EYR = \frac{Y}{P} \quad (7)$$

生态产出率(EYR)为总生态产出(Y)与购买资源(P)的比值,反映了土地整治后农田生态系统的外部投入利用效率,生态产出率越高说明在吸引外部投入时更具有竞争力。

(5) 生态承载力

$$ELR = \frac{P + NN}{PR + NR} \quad (8)$$

生态承载力(ELR)^[31,43]为购买资源(P)与不可更新自然资源(NN)的和与购买的可更新资源(PR)与可更新自然资源输入值(NR)的和之比,反映了土地整治后农田生态系统自然资源的承载压力,按照资源的质量(自我调节能力和可更新能力)评价系统的竞争力。

(6) 生态可持续度

$$ESI = \frac{EYR}{ELR} \quad (9)$$

生态可持续度^[42,44](ESR)为生态产出率与生态承载力之比,反映了整体的生态产出和负荷,可衡量土地整治后农田生态系统的可持续发展能力,可持续度越高,系统越趋于相对稳定。

2 研究区和数据

研究区位于陕西省宝鸡市凤翔县,是关中地区典型黄土台塬区,涉及郭店镇、彪角镇和虢王镇三个镇的18个行政村,地理坐标介于107°23'41"—107°32'44" E、34°22'00"—34°27'03" N,总面积2848.96 hm²,如图3所示。研究区地势平坦,土层深厚,土质良好,属暖温带半湿润半干旱季风气候区,年平均日照时数2101.2 h,年辐射总量113.3 Kcal/cm²。多年平均降水量534.1—550.5 mm,年平均气温11.5℃,平均无霜期207 d。粮食作物夏田主要以小麦、油菜为主,秋田以玉米为主,经济作物有辣椒、烤烟、蔬菜和棉花等,植被覆盖度为4.97%(不含农作物),土壤类型中娄土和黄绵土面积占95%,耕地土壤熟化层一般在50 cm左右,土层养分有机质含量0.5—1.65%。除农村居民点、池塘、主干公路外,项目建设规模为2520.87 hm²,其中农用地整理面积309.37 hm²,旧居民点、砖厂、取土场、谷场等复垦117.40 hm²,预算总投资4287.40万元,主要工程建设内容包括完成覆土6.86万m³,修建硬质化输水渠道67.77 km,开挖机井95眼,敷设低压管道49.51 km,修建泥结碎石田间道37.4 km,防护林网总长112.46 km,栽树37476株。项目2006年完成规划设计,工程建设期为两年。

本研究所采用的数据来源于项目规划设计成果资料、验收报告等项目建设资料,以及《凤翔县统计年鉴》(2012年)等统计资料。在整治项目验收实施后,在所在村集体的组织下,大部分耕地通过大户承包或引入农业生产企业进行现代化生产,主要种植粮食作物和经济作物。具体工程施工和农业生产中物质投入和产出量计算参数如表1和表2所示。

3 结果分析

土地整治项目实施后,新增耕地面积为117.4 hm²,根据可用能转化率计算研究区域的生态流,得出年自

然资源输入的可用能值为 1.05 TJ,年购买资源输入的可用能值为 0.12 PJ,一次性自然资源输入为 0.13 PJ,一次性购买资源输入为 7.30 PJ,年生态输出为 84.4 TJ,一次性生态输出为 0.30 PJ。其中一次性购买资源输入占总输入的 96.72%,但由于工程使用年限的增加,一次性购买输入所占比例会逐渐减少。

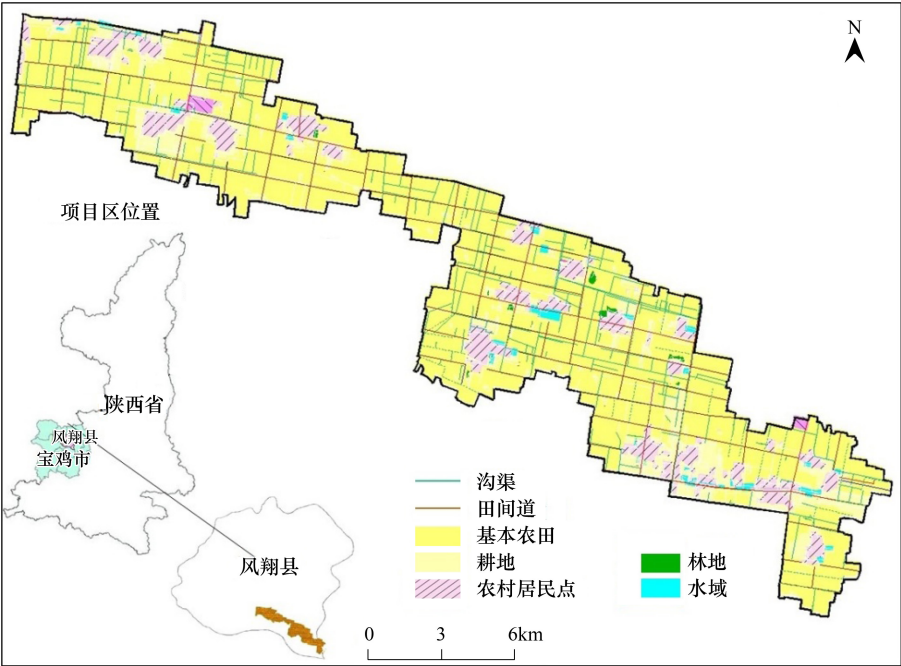


图 3 研究区示意图
Fig. 3 Location of study area

表 1 土地整治对生态流影响指标体系

Table 1 The index system of land consolidation on ecological flow effect						
项目 Item	原始数据 Raw data	火用转化率 ^[25,31] Exergy transformity	能值转化率 ^[45-46] Energy transformity	可用能值 (J) Exergy	能值(sej) Energy	资金流(元) Capital flow
年自然资源输入 Annual natural resources input						
1 光照 Sunlight(J)	5.51×10 ¹⁵	1.02×10 ⁻⁵	1.00	5.62×10 ¹⁰	5.51×10 ¹⁵	
2 风,动能 Wind, kinetic energy(J)	9.48×10 ¹¹	3.12×10 ⁻²	2.45×10 ³	2.96×10 ¹⁰	2.32×10 ¹⁵	
3 降雨 Rain(J)	1.57×10 ¹²	6.08×10 ⁻¹	3.06×10 ⁴	9.56×10 ¹¹	4.81×10 ¹⁶	
4 地球循环能 Earth cycle(J)	1.55×10 ¹²	7.82×10 ⁻³	5.80×10 ⁴	1.21×10 ¹⁰	8.99×10 ¹⁶	
年购买资源输入 Annual purchase resources input						
5 种子 Seeds(g)	1.32×10 ⁷	1.44×10 ¹⁰	2.00×10 ¹⁵	1.90×10 ¹¹	2.64×10 ¹⁶	7.13×10 ⁵
6 农业电力 Agricultural Electricity(J)	1.03×10 ¹²	3.76×10 ¹	2.00×10 ⁵	3.85×10 ¹³	2.05×10 ¹⁷	2.85×10 ⁵
7 农药 Pesticides(g)	2.00×10 ⁶	4.20×10 ⁵	1.48×10 ¹⁰	8.40×10 ¹¹	2.96×10 ¹⁶	1.05×10 ⁵
8 农业机械 Mechanical equipment(g)	1.59×10 ⁷	2.13×10 ⁴	6.79×10 ⁹	3.40×10 ¹¹	1.08×10 ¹⁷	6.07×10 ⁷
9 灌溉水 Irrigation water(g)	2.03×10 ¹²	9.09×10 ⁻¹	8.80×10 ⁵	1.85×10 ¹²	1.79×10 ¹⁸	1.58×10 ⁵
10 N 肥 Nitrogen fertilizer(g)	4.06×10 ⁸	3.28×10 ⁴	3.80×10 ⁹	1.33×10 ¹³	1.54×10 ¹⁸	7.51×10 ⁵
11 P 肥 Phosphate fertilizer(g)	7.97×10 ⁷	7.52×10 ⁴	3.90×10 ⁹	5.99×10 ¹²	3.11×10 ¹⁷	2.07×10 ⁵
12 K 肥 Potash fertilizer(g)	3.41×10 ⁸	4.56×10 ⁴	1.10×10 ⁹	1.55×10 ¹³	3.75×10 ¹⁷	6.99×10 ⁵
13 农膜 Plastic mulch(g)	2.81×10 ⁷	1.50×10 ⁶	2.80×10 ⁹	4.22×10 ¹³	7.87×10 ¹⁶	3.49×10 ⁵
一次性自然资源输入 One-off natural resources input						
14 净土方量 Net earthwork(g)	8.24×10 ⁸	1.55×10 ⁵	2.00×10 ⁹	1.28×10 ¹⁴	1.65×10 ¹⁸	3.43×10 ⁵
一次性购买资源输入 One-off purchase resources input						
15 劳动力 Labour(元)	1.77×10 ⁶	5.25×10 ⁸	2.38×10 ¹¹	9.31×10 ¹⁴	4.22×10 ¹⁷	1.77×10 ⁶

续表

项目 Item	原始数据 Raw data	火用转化率 ^[25,31] Exergy transformity	能值转化率 ^[45-46] Emergy transformity	可用能值 (J) Exergy	能值(sej) Emergy	资金流() Capital flow
16 汽油 Gas(g)	8.46×10 ⁴	4.70×10 ⁴	2.92×10 ⁹	3.98×10 ⁹	2.47×10 ¹⁴	4.31×10 ²
17 柴油 Diesel(g)	7.80×10 ⁷	4.49×10 ⁴	2.83×10 ⁹	3.50×10 ¹²	2.21×10 ¹⁷	3.98×10 ⁵
18 施工电力 Construction electricity(J)	6.25×10 ⁹	3.76×10 ¹	2.00×10 ⁵	2.35×10 ¹¹	1.25×10 ¹⁵	1.30×10 ³
19 水 Water(g)	1.20×10 ⁹	9.09×10 ⁻¹	9.36×10 ⁵	1.09×10 ⁹	1.12×10 ¹⁵	1.20×10 ³
20 沙 Sand(g)	6.28×10 ⁹	2.11×10 ⁵	1.00×10 ⁹	1.33×10 ¹⁵	6.28×10 ¹⁸	1.26×10 ⁵
21 碎石 Stone(g)	9.80×10 ⁹	2.10×10 ⁵	1.00×10 ⁹	2.06×10 ¹⁵	9.80×10 ¹⁸	3.38×10 ⁵
22 水泥 Cement(g)	2.77×10 ⁹	1.03×10 ⁵	2.07×10 ⁹	2.86×10 ¹⁴	5.74×10 ¹⁸	9.36×10 ⁵
23 钢材 Steel(g)	2.74×10 ⁹	8.00×10 ⁵	1.40×10 ⁹	2.20×10 ¹⁵	3.84×10 ¹⁸	9.93×10 ⁶
24 PVC 管 PVC pipe(g)	3.36×10 ⁵	8.28×10 ⁵	1.25×10 ¹⁰	2.78×10 ¹¹	4.20×10 ¹⁵	3.50×10 ⁶
25 树木 Tree(g)	7.81×10 ⁸	6.45×10 ⁵	2.44×10 ⁸	5.04×10 ¹⁴	1.91×10 ¹⁷	3.50×10 ⁵
年生态输出 Annual ecological output						
26 小麦 Wheat(t)	2.41×10 ³	1.53×10 ¹⁰	1.23×10 ¹⁵	3.68×10 ¹³	2.96×10 ¹⁸	6.02×10 ⁶
27 玉米 Corn(t)	1.87×10 ³	8.60×10 ⁹	1.17×10 ¹⁴	1.61×10 ¹³	2.20×10 ¹⁷	7.31×10 ⁶
28 油菜 Rape(t)	2.28×10 ²	3.70×10 ¹⁰	2.65×10 ¹⁵	8.42×10 ¹²	6.04×10 ¹⁷	1.37×10 ⁶
29 辣椒 Pepper(t)	3.77×10 ³	3.50×10 ⁹	4.81×10 ¹³	1.32×10 ¹³	1.81×10 ¹⁷	3.40×10 ⁶
30 蔬菜 Vegetable(t)	5.15×10 ³	1.90×10 ⁹	4.52×10 ¹³	9.78×10 ¹²	2.33×10 ¹⁷	7.27×10 ⁶
31 水果 Fruit(t)	2.05×10 ¹	1.89×10 ⁹	6.61×10 ¹⁴	3.87×10 ¹⁰	1.35×10 ¹⁶	1.23×10 ⁵
一次性生态输出 One-off ecological output						
32 土地覆被面积 Land cover area(m ²)	1.22×10 ⁶	5.36×10 ⁶	1.97×10 ¹¹	6.55×10 ¹²	2.41×10 ¹⁷	1.22×10 ⁶
33 生态水量 Ecological water amount(m ³)	1.69×10 ⁶	1.74×10 ⁸	4.32×10 ¹²	2.94×10 ¹⁴	7.30×10 ¹⁸	1.69×10 ⁷

表 2 土地整治施工内容和农业生产相关参数

Table 2 Relevant parameters of land consolidation construction and agricultural inputs

条目 Item	参数 Parameters
施工物质投入	PVC 管 110 mm 壁厚 6.6 mm 参考重量 3.343 kg/m
Construction material inputs	PVC 管 75 mm 壁厚 2.9 mm 参考重量 1.072 kg/m
	中砂密度 1500 kg/m ³
	碎石密度 1450 kg/m ³
	树苗直径 0.04 m
	树苗高度 4 m
农业生产投入	大中型机械使用年限(重量>1 t) 15 a
Agricultural inputs	小型机械使用年限(重量<1 t) 10 a
	种子需求量 75 kg/hm ²

注:(1)农业机械包括播种机、收割机、拖拉机等;
(2)不考虑未直接参与农田生态系统内部循环的安装设备及建设中使用的小型设备;
(3)作物产量采用原耕地的产量增加值和新增耕地的产量总和计算。

再分别使用可用能、能值、资金流方法对生态流的各项指标进行计算,可得出土地整治活动对农田生态系统的生态流不同时间范围内的影响,并分析不同土地整治建设工程的使用年限下农田生态系统的净生态价值、生态转化率、自然资源依赖度和生态可持续度等,具体结果如图 4 和表 3 所示。

3.1 可用能转化率

从农业生产角度,土地整治生命周期可分为建设期、恢复期和稳定期。从可用能角度分析得出,农田生态系统是典型的半自然半人工的生态系统,在农业生产投入相对固定且其他自然条件不变的前提下,计算得出土地整治对农田生态系统的影响的自然恢复期限为 29 年;其中土地整治项目建设后第 1 年的生态负面影响

最大,达到 7.17 PJ,随着时间变化可用能值呈指数递减,实施后第 4 年,生态效益变化曲线出现减速变缓,净生态价值为-1.59 PJ,自然资源依赖度为 1.67%;高标准基本农田建设标准(TD/T1033-2012) 中规定基础设施使用年限不低于 15 年,项目实施后第 15 年使用可用能值法得出农田生态系统的生态产出率为 67.30%,生态可持续度为 5.10%,生态承载力提高为 62.06,负生态效益减小速率变小;至第 29 年土地整治对农田生态系统的生态效益由亏转盈,净生态效益的可用能值为 8.96 TJ,自然资源依赖度为 1.45%,生态产出率为 109.00%。

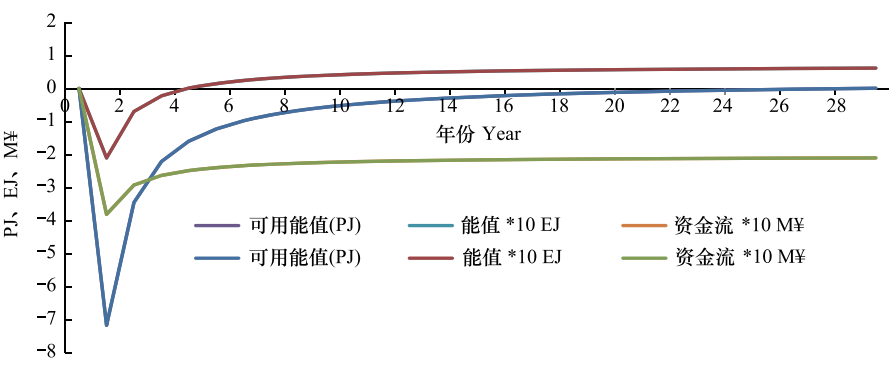


图 4 不同工程使用年限净生态效益的可用能、能值和资金流变化数值
Fig. 4 Changes of net ecological efficiency in different project usage term of exergy, emergy and currency

表 3 不同工程使用年限的生态流指标变化值
Table 3 Values changes of different project usage term of eco-flow indicators

项目 Item	4 年(4-th a)			15 年(15-th a)			29 年(29-th a)		
	可用能 值/TJ	能值 /(Psej)	资金流 /万元	可用能 值/TJ	能值 /(Psej)	资金流 /万元	可用能 值/TJ	能值 /(Psej)	资金流 /万元
生态流 Eco-flow									
年可更新自然资源输入 Annual renewable natural resource input	1.05	146							
年购买可更新资源输入 Annual purchase renewable resource input	0.19	26.40	71.30						
年购买不可更新资源输入 Annual purchase non-renewable resource input	119	4440	6330						
一次性可更新自然资源输入 One-off renewable natural resource input	631	1840	69.30						
一次性不可更新购买资源输入 One-off purchase non-renewable resource input	6800	26300	1700						
年生态输出 Annual ecological output	84.40	4210	2550						
一次性生态输出 One-off ecological output	301	7540	1810						
生态指标 Ecological indicators									
生态输出 Ecological output	385	11800	43.60	385	11800	43.60	385	11800	43.60
生态输入 Ecological input	1980	11600	68.40	615	6490	65.20	376	5580	64.60
输入自然资源 Natural resource input	33	558	0.09	9.57	256	0.02	442	5830	0.01
可更新资源输入 Renewable resource input	33.20	584	0.80	9.76	282	0.74	5.65	229	0.73
输入购买资源 Purchase resource input	1940	11100	68.30	606	6230	65.20	371	5380	64.60
净生态价值 Net ecological value	-1590	103	-24.80	-230	5260	-21.60	8.96	6170	-21
自然资源依赖度 Natural resource dependency	1.67%	4.79%	0.13%	1.56%	3.94%	0.04%	1.45%	3.63%	0.02%
可更新资源依赖度 Renewable resource dependency	8.04%	5.42%	1.30%	7.04%	4.54%	1.17%	6.12%	4.22%	1.14%
生态产出率 Ecological yield ratio	21.17%	106.41%	63.90%	67.30%	188.97%	66.96%	109%	218.76%	67.52%
生态承载力 Ecological load ratio	11.43	17.48	77.00	13.20	21.09	85.77	15.35	22.80	87.62
生态可持续度 Ecological sustainable index	1.85%	6.09%	0.83%	5.10%	8.96%	0.78%	7.10%	9.60%	0.77%

自然资源依赖度、可更新资源依赖度随着时间增加而递减,但变化幅度较小,仍处于 1%—2% 之间,一次性可更新资源输入可用能占生态输入可用能的比重 1.69%,因此,一次性可更新资源的输入对研究区农田生态系统带来的影响变化较小;生态承载力和生态可持续度与时间变化成正比,变化幅度较小;净生态价值和生态产出率随时间变化较大,其中一次性不可更新购买资源输入对生态系统影响很大,可见农田生态系统受土地整治活动干扰之后需要通过一定的时间才能恢复到系统自然平衡状态。

3.2 能值转化率

以能值方法分析结果可知,农田生态系统受土地整治活动集中性影响 4 年之后可达到系统相对平衡状态,其生态效益由负转为正值,生态效益为负时,最大值为 21.02 EJ,约为可用能值的 3000 倍;能值法测算的生态效益变化趋势与可用能值法相似,但土地整治对区域农田生态系统的影响其他指数变化明显不同于可用能值法的结果;能值法计算的其他各项指标变化均于土地整治项目实施第 15 年之后变化减缓。能值实际上表现为一种“能量记忆”,表示所有通过系统的初级、次级生产等能量总和,而不是现实系统包含的能量^[33],所有能值投入浓缩在农田生态系统中后又被输入到产出的粮食作物中,能值只是记录了自然与社会生态流和资金流等的来源与去向,与农业生产过程和投入方式无关。

项目实施后第 4 年,生态效益转为正值,自然资源依赖度为 4.79%,可更新资源依赖度为 5.42%,可见研究区内农田生态系统自我更新能力较弱;生态承载力为 17.48,高于可用能值计算的结果,系统在输入中购买资源与不可更新自然资源的和高于可更新资源的能值,反映系统输入仍以不可更新购买资源为主。项目实施后第 15 年,系统能值生态产出率为 188.97%,说明系统达到相对平衡一段时间后,会吸引越来越多的能量输入,鉴于生态承载力的增加,系统自然资源和可更新资源依赖的减少,会引起年购买资源输入的增加,如:农药、化肥和农膜等,可能会引起新一轮的系统动态平衡变化。项目实施后的第 29 年,即可用能方法中生态效益转为正值时,系统能值生态产出率高达 218.76%,但增幅明显减缓,同时自然资源依赖度、可更新自然资源依赖度和生态承载力数值趋于平稳。

3.3 资金流效率

在土地整治项目对农田生态系统资金流的输入和输出影响中,可从生态系统角度看出土地整治项目的经济效益为负值,在项目实施后的第 3 年开始资金流的净生态价值趋于平稳,同时生态产出率和生态承载力也趋于平稳,而生态可持续度随着净生态价值变为正值之后,几乎无变化,仍为 0.7%—0.9% 之间;土地整治项目的资金投入并不能换取同等的产出,同时每年还需要一定的农资投入,但是考虑项目实施同时产生的生态效益和社会效益,其综合效益是可达到收益大于投资的水平。本项目经济效益核算中的投资回收期是 3 年,研究结果可证实资金流于投资回收期之后恢复相对平衡水平,其中年农业生产运行资金投入占总资金投入的 78.35%,因此仅在土地整治项目实施初期对农田生态系统的资金流影响较明显。

4 讨论与结论

4.1 讨论

土地整治项目的集中性实施,会对区域农田生态系统产生持续性的影响,在时间序列上,其影响会先骤变,后呈指数式变化,一定时间后变化趋势再趋于平缓。本研究从定量角度计算得出了研究区土地整治影响的建设期、恢复期和稳定期时长,其对系统各方面的影响可通过生态指标体现。

(1) 净生态价值

土地整治项目对农田生态系统的净生态价值影响最为明显,可通过净生态价值反映生态效益以及其变化过程。采用可用能或能值方法得出,研究区土地整治项目的生态影响均呈现了由项目实施初期负生态价值的陡增到指数变化再到逐渐平稳并转变为正效益的过程,预示该区域土地整治对生态系统的影响具有长期性和动态变化的特点。不同的土地整治项目实施所带来的影响会有差异,本研究通过净生态价值指数分析了影响的普遍趋势并预测了研究区的影响时间与生态系统各项变化的特征点。

(2) 自然资源依赖度

研究区内自然资源依赖度在项目实施后的年份一直在变小,同时项目实施初期的基值也很小,说明该研究区内对购买资源的依赖,对比自然资源投入和购买资源投入,年购买资源输入的可用能和能值分别约为年自然资源输入 112.7 倍和 30.6 倍;一次性购买资源输入的可用能和能值分别约为一次性自然资源输入的 57.2 倍和 16.1 倍。其中年购买资源中,农药、化肥和农膜的可能用能和能值比重较大;一次性购买资源输入的可用能和能值中,沙、碎石和钢材占的比重较大,这些购买资源对生态环境具有长期的影响,但却是土地整治和农业生产中常用的资源,因此要尽量减少此类资源的输入。

(3) 可更新资源依赖度

可更新资源是系统内不可或缺的主要资源,不仅可维持系统稳定性,还可以增加系统的可持续能力。研究区的可更新资源依赖度略高于自然资源依赖度,其中树木输入的可用能占总资源输入的 6.67%,生态系统内输入的可更新资源较少,不可更新资源较多,资源输入中不可更新资源占总输入资源的 90% 以上,严重影响了农田生态系统的更新和恢复能力。因此,在土地整治活动中,应考虑多输入可更新资源,例如增加项目的树木和植被种植等,不仅提高了系统的可更新能力,还能增加更多的生态产出,有效提高系统的生态效益。

(4) 生态产出率

研究区的生态产出率变化水平由低向高变化,其增长速率是逐渐降低的,超过相对稳定期(4 年)和自然稳定期(29 年)之后,其对应的产出率将分别高于 100%,此时农田生态系统开始产生生态正效益。以能值计算的结果约是可用能的 2-8 倍,可见系统的有效产出率仍有待提高,可在后期的土地整治项目规划中,将部分购买资源替换为更新能力强且能有效改善生态系统的资源输入,例如道路和水利工程建设中使用环保的材料。

(5) 生态承载力

生态承载力在土地整治项目的实施之后逐渐增加,但变化幅度较小,说明农田生态系统的承载能力需要逐渐增加才能维持稳定,这对系统的自恢复能力会产生影响,还会对部分生态效益产生抵消等。系统承载的不可更新资源和购买的自然资源的增加都将对系统的生态承载力产生影响。

(6) 生态可持续度

系统的生态可持续度在整治项目实施后逐年增加,基数和变化幅度均较小,可见系统的生态可持续能力较弱,需要在农业生产过程中增加净生态效益,提高生态产出率。由于较高的生态产出率会吸引年资源投入,因此在农业生产中,仍要减少部分购买资源的投入,特别是农药、化肥等。

4.2 结论

本研究以可用能和能值为统一量纲,分析了土地整治项目对农田生态系统集中性资源输入的定量影响,以及各类资源在不同使用年限的生态影响指数变化;通过分析生态流和资金流的输入和输出,预测各种生态影响指标变化带来的项目建设对系统稳定性和自恢复性的影响。研究结果显示,生态流方法能反映项目建设对生态系统动态平衡影响的机理,较为有效地分析土地整治项目对农田生态系统影响的路径、方向和大小;通过可用能法和能值法的结合,可以较为全面地体现系统变化过程,定量预测系统相对稳定期和自然稳定期时间变化;项目实施后各生态指标变化的趋势可提供人工修复系统的途径,为优化土地整治项目规划设计和实施管理提供建议。

本研究采用了生态流的概念模型,通过可用能、能值的方法定量计算土地整治项目对农田生态系统的影响,同时融入资金流以生态系统角度计算项目输入的经济效益。但研究案例仅局限为特地区域,仍需要针对不同区域和不同土地整治项目特点对生态系统影响进行对比分析,才能更好地为优化土地整治项目提供理论支撑,实现其综合效益最优。

参考文献 (References):

- [1] 刘彦随. 科学推进中国农村土地整治战略. 中国土地科学, 2011, 25(4): 3-8.

- [2] 陈玉福, 孙虎, 刘彦随. 中国典型农区空心村综合整治模式. 地理学报, 2010, 65(6): 727-735.
- [3] Crecente R, Alvarez C, Fra U. Economic, social and environmental impact of land consolidation in Galicia. Land Use Policy, 2002, 19(2): 135-147.
- [4] Tayfun C, Fatih I. Fuzzy expert system for land reallocation in land consolidation. Expert Systems with Applications, 2011, 38(9): 11055-11071.
- [5] 管棚, 金晓斌, 潘倩, 周寅康. 基于县域尺度的中国土地整治新增耕地空间差异分析. 农业工程学报, 2013, 29(20): 226-233.
- [6] 杨绪红, 金晓斌, 管棚, 郭贝贝, 周寅康. 2006-2012 年中国土地整治项目空间特征分析. 资源科学, 2013, 35(8): 1535-1541.
- [7] 景明, 白中科, 余勤飞, 张继栋, 曹银贵, 张耿杰. 省级土地整治规划中复垦规划方法与实证研究——以山西省为例. 水土保持研究, 2013, 20(6): 316-320.
- [8] 金晓斌, 丁宁, 张志宏, 周寅康, 杨悉廉. 中国土地整治资金在省际间分配及土地整治效果. 农业工程学报, 2012, 28(16): 1-9.
- [9] 罗明, 张惠远. 土地整理及其生态环境影响综述. 资源科学, 2002, 24(2): 60-63.
- [10] 张正峰, 赵伟. 土地整理的生态环境效应分析. 农业工程学报, 2007, 23(8): 281-285.
- [11] Mihara M. Effects of agricultural land consolidation on erosion processes in semi-mountainous paddy fields of Japan. Journal of Agricultural Engineering Research, 1996, 64(3): 237-247.
- [12] Yang Z S, Yang L F, Zhang B S. Soil erosion and its basic characteristics at karst rocky-desertified land consolidation area: A case study at Muzhe Village of Xichou County in Southeast Yunnan, China. Journal of Mountain Science, 2010, 7(1): 55-72.
- [13] Evrard O, Nord G, Cerdan O, Souchère V, Bissonnais Y L, Bonté P. Modelling the impact of land use change and rainfall seasonality on sediment export from an agricultural catchment of the northwestern European loess belt. Agriculture, Ecosystems and Environment, 2010, 138(1-2): 83-94.
- [14] 艾东, 朱道林, 赫晓霞. 土地整理与生态环境建设关系初探. 生态环境, 2007, 16(1): 257-263.
- [15] Demetriou D, Stillwell J, See L. Land consolidation in Cyprus: Why is an Integrated Planning and Decision Support System required?. Land Use Policy, 2012, 29(1): 131-142.
- [16] Sklenicka P, Šímová P, Hrdinová K, Salek M. Changing rural landscapes along the border of Austria and the Czech Republic between 1952 and 2009: Roles of political, socioeconomic and environmental factors. Applied Geography, 2014, 47: 89-98.
- [17] 范金梅, 王磊, 陈原, 张海峰. 关于中国农地整理中预测性环境影响评价问题. 农业工程学报, 2005, 21(10): 74-77.
- [18] Bonfanti P, Fregonese A, Sigura M. Landscape analysis in areas affected by land consolidation. Landscape Urban Planning, 1997, 37(1-2): 91-98.
- [19] Sklenicka P. Applying evaluation criteria for the land consolidation effect to three contrasting study areas in the Czech Republic. Land Use Policy, 2006, 23(4): 502-510.
- [20] Di Falco S, Penov I, Aleksiev A, van Rensburg T M. Agrobiodiversity, farm profits and land fragmentation: Evidence from Bulgaria. Land Use Policy, 2010, 27(3): 763-771.
- [21] 金丹, 卞正富. 基于能值的生态足迹模型及其在资源型城市的应用. 生态学报, 2010, 30(7): 1725-1733.
- [22] 王军, 余莉, 罗明, 翟刚. 土地整理研究综述. 地域研究与开发, 2003, 22(2): 8-11.
- [23] 谷晓坤, 陈百明. 土地整理景观生态评价方法及应用——以江汉平原土地整理项目为例. 中国土地科学, 2008, 22(12): 58-62.
- [24] Chen S Q, Fath B D, Chen B. Information indices from ecological network analysis for urban metabolic system. Procedia Environmental Sciences, 2010, 2: 720-724.
- [25] Jørgensen S E, Nielsen S N, Mejer H. Emergy, environ, exergy and ecological modelling. Ecological Modelling, 1995, 77(2-3): 99-109.
- [26] Tilley D R. Exploration of Odum's dynamic emergy accounting rules for suggested refinements. Ecological Modelling, 2014, 279(10): 36-44.
- [27] Tilley D R, Swank W T. EMERGY-based environmental systems assessment of a multi-purpose temperate mixed-forest watershed of the southern Appalachian Mountains, USA. Journal of Environmental Management, 2003, 69(3): 213-227.
- [28] Ayres R U, van den Bergh J C J M. A theory of economic growth with material/energy resources and dematerialization: Interaction of three growth mechanisms. Ecological Economics, 2005, 55(1): 96-118.
- [29] Kharrazi A, Rovenskaya E, Fath B D, Yarime M, Kraines S. Quantifying the sustainability of economic resource networks: An ecological information-based approach. Ecological Economics, 2013, 90: 177-186.
- [30] Lu H F, Wang Z H, Campbell D E, Ren H, Wang J. Emergy and eco-exergy evaluation of four forest restoration modes in southeast China. Ecological Economics, 2011, 37(2): 277-285.
- [31] Chen Z M, Chen B, Chen G Q. Cosmic exergy based ecological assessment for a wetland in Beijing. Ecological Modelling, 2011, 222(2): 322-329.
- [32] Robinson D A, Hockley N, Cooper D M, Emmett B A, Keith A M, Leborn I, Reynolds B, Tipping E, Tye A M, Watts C W, Whalley W R, Black H I J, Warren G P, Robinson J S. Natural capital and ecosystem services, developing an appropriate soils framework as a basis for valuation. Soil Biology and Biochemistry, 2013, 57: 1023-1033.

- [33] 陈秀琼. 基于能值和(火用)的钢铁工业园区可持续性评价[D]. 大连: 大连理工大学, 2009.
- [34] 郭贝贝, 金晓斌, 杨绪红, 周寅康. 生态流的构成和分析方法研究综述. 生态学报, 2015, 35(5). DOI: 10.5846/stxb201305070969.
- [35] Chen G Q. Scarcity of exergy and ecological evaluation based on embodied exergy. Communications in Nonlinear Science and Numerical Simulation, 2006, 11(4): 531-552.
- [36] Ahamed J U, Saidur R, Masjuki H H, Mekhilef S, Ali M B, Furqon M H. An application of energy and exergy analysis in agricultural sector of Malaysia. Energy Policy, 2011, 39(12): 7922-7929.
- [37] Giannetti B F, Barrella F A, Almeida C M V B. A combined tool for environmental scientists and decision makers: ternary diagrams and emergy accounting. Journal of Cleaner Production, 2006, 14(2): 201-210.
- [38] Dai J, Chen B. Extended exergy-based ecological accounting of China during 2000—2007. Procedia Environmental Sciences, 2011, 5: 87-95.
- [39] Ludovisi A, Poletti A. Use of thermodynamic indices as ecological indicators of the development state of lake ecosystems; 2. Exergy and specific exergy indices. Ecological Modelling, 2003, 159(2-3): 223-238.
- [40] Fath B D, Cabezas H. Exergy and Fisher Information as ecological indices. Ecological Modelling, 2004, 174(1-2): 25-35.
- [41] Kharrazi A, Kraines S, Hoang L, Yarime M. Advancing quantification methods of sustainability: A critical examination emergy, exergy, ecological footprint, and ecological information-based approaches. Ecological Indicators, 2014, 37: 81-89.
- [42] Tao J, Fu M C, Zheng X Q, Zhang J J, Zhang D X. Provincial level-based emergy evaluation of crop production system and development modes in China. Ecological Indicators, 2013, 29: 325-338.
- [43] Brown M T, Ulgiati S. Emergy measures of carrying capacity to evaluate economic investments. Population and Environment, 2001, 22(5): 471-501.
- [44] Zhang L X, Hu Q H, Wang B C. Emergy evaluation of environmental sustainability of poultry farming that produces products with organic claims on the outskirts of mega-cities in China. Ecological Engineering, 2013, 54: 128-135.
- [45] Odum H T. Environmental Accounting: Emergy and Environmental Decision Making. New York: John Wiley & Sons, 1996.
- [46] Odum H T. Emergy evaluation of an OTEC electrical power system. Energy, 2000, 25(4): 389-393.