

DOI: 10.5846/stxb201802050301

王梦媛^{1,2}, 高小叶^{1,2}, 侯扶江^{1,2,*}. 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. 生态学报, 2019, 39(5): - .
Wang M Y, Gao X Y, Hou F J. Emergy analysis of farmer producing system in the transitional zone of Qinghai-Tibet Plateau on Loess Plateau: Tongwei-Weiyuan-Xiahe Transect as an Example. Acta Ecologica Sinica, 2019, 39(5): - .

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

王梦媛^{1,2}, 高小叶^{1,2}, 侯扶江^{1,2,*}

1 草地农业系统国家重点实验室, 兰州 730020

2 兰州大学草地农业科技学院, 兰州 730020

摘要: 通渭-渭源-夏河样带位于黄土高原向青藏高原过渡的生态区, 是我国北方典型农牧交错带。长期以来, 不合理的农业生产结构带来的生态、经济问题, 严重地制约了该地区草地农业的持续发展。旨在从能值角度分析, 为研究区农业生产结构调整、政策制定和农(牧)户决策提供新的数据支撑和理论依据, 为优化区域农业生产结构提供科学依据。本研究收集研究区农户作物生产和家畜生产的投入-产出数据; 利用能值方法分析作物生产与家畜生产的投入-产出结构特征、农户生产决策行为及生产系统耦合作用; 用结构方程模型(SEM)分析农户生产系统能量的组间转换。研究发现, 随海拔增高, 农户作物生产活动减少, 作物总产出能值递减; 尽管作物生产主要投入和产出要素相同, 但同一作物不同地点的同一要素投入、产出能值和能值收益率均存在显著差异($P < 0.05$); 同一地点不同作物的同一要素投入、产出能值和能值收益率均差异显著($P < 0.05$); 作物生产投入要素中, 有机肥能值在通渭和渭源均有较高贡献; 作物投入和产出能值的农户生产决策阈值自东向西递减, 在能值投入初始增加时, 夏河农户作物生产规模扩增最为迅速。家畜养殖规模、能值投入和产出自东向西递增; 通渭和渭源, 小麦秸秆和苜蓿作为中间投入, 能值贡献率达到 80%; 夏河家畜生产投入要素中, 补饲粮食能值贡献率高达 90%; 家畜投入和产出能值的农户生产决策阈值点自东向西递增; 能值收益率随耦合度的增加呈指数上升, 通渭和渭源能值收益率的增加速度, 随耦合度的增加趋于缓慢, 而夏河能值收益率增速随耦合度的增加而增加。调整作物生产内部粮、经、饲产品比例结构, 加强作物生产与家畜生产耦合作用, 优化天然草地利用方式, 实现生态效益最大化; 阈值点调控农户生产决策行为, 实现该区域农业生产结构优化。

关键词: 能值; 作物生产; 家畜生产; 系统耦合; Logistic 模型; 结构方程模型

Emergy analysis of farmer producing system in the transitional zone of Qinghai-Tibet Plateau on Loess Plateau: Tongwei-Weiyuan-Xiahe Transect as an Example

WANG Mengyuan^{1,2}, GAO Xiaoye^{1,2}, HOU Fujian^{1,2,*}

1 State Key Laboratory of Grassland Agro-ecosystems, Lanzhou 730020, China

2 College of Pastoral Agriculture Science and Technology, Lanzhou University, Lanzhou 730020, China

Abstract: The Tongwei-Weiyuan-Xiahe transect zone is located in the ecological zone of transition ranging from the Loess Plateau to the Qinghai-Tibet Plateau. It is a typical agri-pastoral transitional zone of the Northern China. For a long time, ecological and economic problems caused by the inappropriate agricultural production structure have severely restricted the sustainable development of grassland agriculture in this region. From the perspective of emergy, this research aims to (1) provide a new data support and theoretical basis for the adjustment of local agricultural production structure, policy formulation, and agricultural (pastoral) household decision-making in this area and (2) provide a scientific basis for the

基金项目: 长江学者和创新团队发展计划项目 (IRT-17R50); 国家自然科学基金 (31672472) 中央高校基本科研业务费专项资金 lzujbky-2018-et01, 甘肃省退牧还草科技支撑 (GH2017-TMHC001)

收稿日期: 2018-02-05; 网络出版日期: 2018-00-00

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: cyhoufj@lzu.edu.cn

optimization of regional agricultural production structure. Input-output data of crop production and livestock production of households in the study area have been collected; the emergy value method has been adopted to analyze the input-output structure characteristics of crop production and livestock production, the production decision-making behavior of farmers, and the coupling effect of production systems. By applying the structural equation model (SEM), this research analyzed the energy conversion between components of production systems. It is demonstrated by this research that with the increase of altitude, crop production activities of farmers would decrease and the total output value of crops would also decrease. Although the main inputs and output factors of crop production are the same, the input emergy, output emergy, and emergy yield ratio of the same factor in different parts of the same crop can be varied. Significant differences can be seen from the input, output emergy value, and emergy yield ratio of the same factor at the same location of different crops ($P < 0.05$). In the input factors of crop production, the emergy value of organic fertilizer made significant contribution in Tongwei and Weiyuan. Agricultural production decision thresholds for crop input and output emergy values decreased from the east to the west, while the crop production scale in Xiahe expanded most rapidly when the initial input of emergy increased. Animal husbandry scale, emergy input, and output of animal production increased from the east to the west. In Tongwei and Weiyuan, wheat straw and alfalfa, as intermediate inputs, achieved 80% emergy contribution rate. In Xiahe, with animal production input factors, the contribution rate of supplement grain emergy value was as high as 90%, while the farm production decision threshold of livestock input and output emergy increased from the east to the west. The emergy yield ratio increased exponentially with the increase of the coupling degree. The speed of emergy yield ratio in both Tongwei and Weiyuan tended to decrease with the increase of the coupling degree, whereas, the speed of emergy yield ratio in Xiahe increased with the increase of the coupling degree. Adjusting the internal proportion of grain, cash crop, and feed products in crop production can strengthen the coupling effect between crop production and livestock production. Thus, optimizing the use of natural grassland and maximizing ecological benefits can be achieved. The threshold point can be used to regulate the production decision-making behavior of farmers and optimize the agricultural production structure in the region.

Key Words: Emergy; crop production; livestock production; system coupling; Logistic model; structural equation model

能量是生态系统发生和发展的动力^[1]。生态系统分析中常用的统一各要素的度量单位是能量或货币^[2]。但是,各种性质的能量之间难以比较,货币也不能体现出生态系统真正的财富^[3],以及自然的本质和规律^[4]。能值方法是以能量为工具分析生态系统的一种环境会计方法,规定了生态系统主要组分的能量含量,或其行为的能量流通量,将不同质的能量转换成同一标准的“能值”,既克服了能量和货币指标的不足^[5-6],又统一了各种能量流、物质流、经济流和信息流的度量,因而广泛地应用于各类生态系统能值的空间分布、产业的动态平衡和城市的生态足迹等分析,在不同空间尺度上构建生态系统的能值评价指标体系,改进生态系统服务功能,优化区域的生态产业模式和经济发展^[7-13]。生态系统的生物能来自太阳能,被生产者通过光合作用固定后,通过收获、加工、贮运、动物采食等在系统各组分间进行传递。农业系统使用畜力、农具、农家肥和实行农作物与绿肥轮栽等,得以从外界获得辅助能源,进而提升系统生产力,获得更高经济效益^[14]。

草地农业是以草地资源为基础的农业生态系统,由微生物、植物、家畜等生物因子;气候、土壤、地形等非生物环境因子;社会管理因素在能量的驱动下构成,典型特征在于作物和家畜的种类、数量及其相互作用、管理方式的差异,植物生产与家畜生产的相互作用为草地农业系统的发展提供了核心动力^[15]。与传统种植业和畜牧业相比,草地农业组分更丰富,农业多样性更高,能量的流程更长、调控选择更多、耦合潜势更大,生态区域之间的环境效应和经济效益差异更显著^[16-17]。作物生产与家畜生产的系统耦合是农牧交错带农户生产的主要模式,调控草地农业生态系统中生产层之间的纵向耦合,提高能量转化效率,降低环境与市场风险,提高农牧交错带农户生产系统的稳定性,实现区域生产与生态平衡发展^[18]。通过农业生产结构调整,促进农业系统组份之间的系统耦合,是世界各地提升生态生产力的有效途径^[19]。北美大平原中东部,引入饲草作物发

展家畜生产,扭转了草原过度利用、粮食生产停滞的局面,改善了生态环境,生产力稳定上升;大平原西部,施行集约化作物生产系统,外部投入多,提高了化石能源的利用效率^[20]。澳大利亚农业向作物-家畜综合生产系统转型,实现了区域高效、可持续发展^[21]。通过能值方法同一度量农业生产系统中不同质的能量投入和产出要素,为剖析农牧耦合、草地与耕地耦合以及作物生产与家畜生产耦合内在规律,揭示其本质特征,提供实证依据。

我国黄土高原向青藏高原的过渡区属于北方典型的农牧交错带。长期以来,农区的作物生产与牧区的家畜生产缺少区域间的系统耦合^[22];农区内粮经饲种植结构不合理、饲草作物严重不足,作物生产与家畜生产缺乏系统耦合的“纽带”^[23];牧区单纯地依赖草原开展家畜生产,过度重视草原的生产功能,忽视生态功能;草畜空间的、时间的和种间的系统相悖造成了农区耕地和牧区草原退化,制约了区域可持续发展^[24-25]。农牧交错带草地畜牧业+种植业的生产模式是典型的以户为单位的种、养、加工结合的综合生产模式。为此,本研究在黄土高原—青藏高原过渡区设立通渭-渭源-夏河样带,收集农户作物生产和家畜生产数据^[26],利用能值方法分析农户生产系统的结构与功能及其沿海拔梯度的变化规律,明确系统组分间能量转化及其主导因子的作用,力图为优化区域农业生产结构和改进农牧户生产决策提供科学依据。

1 研究方法

1.1 研究区概况

研究区位于甘肃省通渭(Tongwei, TW)、渭源(Weiyuan, WY)和夏河(Xiahe, XH),是黄土高原向青藏高原的生态过渡区,2个县大致处于同一纬度,经度总体呈等差排列;平均海拔高度依次增加(图1),年积温($\geq 0^{\circ}\text{C}$)、湿润度、无霜期自东向西逐渐减少(表1)。TW和WY的农业以作物生产为主,夏河主要家畜生产为主,作物产值TW>WY>XH,农业总产值、家畜产值及林业产值自西向东递减(表1)。TW和WY的作物主要有小麦(*Triticum aestivum* L.)、玉米(*Zea mays* L.)、马铃薯(*Solanum tuberosum* L.)^[27],家畜主要有绵羊(*Ovis aries*)、滩羊(*Procavia przewalski*)、黄牛(*Bos taurus*);XH主要家畜是牦牛(*Bos mutus*)^[28]。

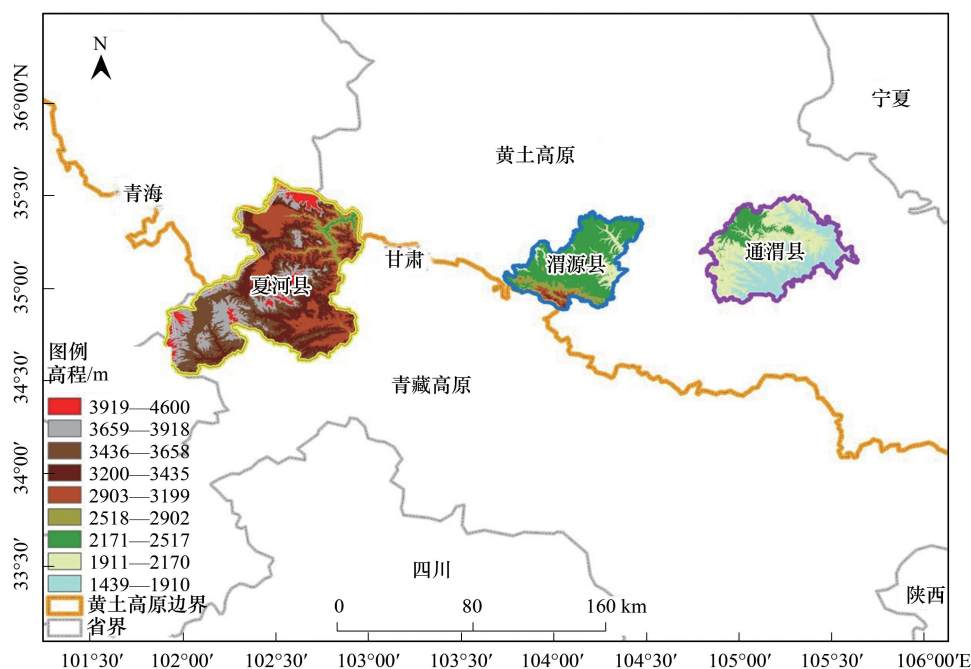


图1 研究区地理位置

Fig.1 Location of the study site

表 1 研究区自然、经济概况

项目 Items	TW	WY	XH
自然状况 Nature conditions			
地理位置 Location	34°55′—35°29′N 104°57′—105°38′E	34°54′—35°25′N 103°44′—104°29′E	34°32′—35°34′N 101°54′—103°25′E
年均降水 Annual mean precipitation/mm	450	523	516
年均气温 Annual mean temperature/℃	7.7	5.7	2.6
≥0℃年积温 Annual accumulation temperature/℃	2900	2679	1810
湿润度 Humidity/K	1.6	1.9	2.9
无霜期 Frost-free/d	160	135	56
草地类型 Rangeland type	微温湿润森林草原	微温湿润森林草原	寒冷潮湿高山草甸类
社会经济状况 Industrial Structure			
农业总产值 Total Output Value/(10 ⁴ ¥)	4464	4124	7258
作物生产 Crop production/(10 ⁴ ¥)	3764	3425	778
林业 Forestry/(10 ⁴ ¥)	62	57	527
家畜生产 Animal production/(10 ⁴ ¥)	638	642	5953

TW:通渭,Tongwei;WY:渭源,Weiyuan;XH:夏河,Xiahe

1.2 数据收集与分析

1.2.1 数据收集

农户调查样本选取采用随机抽样与典型抽样相结合^[29]。研究区农户生产系统结构相似,故每个县选取当地农户具有农业生产规模及农业生产结构稳定的乡(镇),每个村按农户人均收入排序,等距抽取 10 个村,每村随机选取 3 个典型农户问卷调查。问卷内容包括三部分,家庭情况包括人口、年龄、受教育程度、家庭收入以及收入来源;作物生产包括作物种植面积、单产、售价饲料用量和成本(种子、农药、化肥、人力及畜力等);家畜生产包括家畜的饲料供给状况、家畜的数量与种类、家畜的繁殖、饲喂、产出等^[30]。同时收集 3 个县统计年鉴、政府报告等。

1.2.2 数据分析

(1) 能值转换系数(Unit energy value)

整理农户调查数据,计测单位面积或每个农户每一项投入的生产要素与产出,根据能值转换系数得到每一要素单位面积或单位农户的能值^[31]。其中,把各种作物、家畜、机械、能源、肥料、农药等要素形成和田间管理、畜群管理所投入的直接和间接的有效能(J 或 kg)通过太阳能值转换率(sej/J 或 sej/kg)换算标准能值(sej)^[32](表 2)。

(2) 能值收益率(Energy yield ratio,EYR)

$EYR = Y / (F_N + F_R)$,其中 Y 是能值总产出, F_N 是不可更新工业辅助能值, F_R 是可更新有机能值^[37]。EYR 越高,表明农户生产的资源利用效率越高。

表 2 太阳能值转换系数

项目 Item	太阳能转换率 Solar transformity	参考 Reference
太阳能 Solar energy	1.00	
风能 Wind energy source	6.63×10^2	
雨水势能 Rain energy	8.89×10^3	
雨水化学能 Rainwater chemical energy	1.54×10^4	
地球旋转能 Earth rotation energy	2.90×10^4	
表土层损失 Topsoil loss	1.70×10^5	
氮肥 Nitrogenous fertilizer	4.62×10^9	
磷肥 Phosphate fertilizer	1.78×10^{10}	
农药 Pesticide	1.62×10^{11}	
农膜 Agricultural film	3.80×10^8	
人力 Manual labour	3.85×10^5	Odum, 1988 ^[33]
畜力 Horsepower	1.46×10^5	Odum, 1995 ^[34]
有机肥 Organic fertilizer	2.70×10^9	陈阜, 2002 ^[35]
种子 Seed	6.80×10^4	蓝盛芳, 2002 ^[36]
小麦 Wheat	6.80×10^4	
玉米 Corn	2.70×10^4	
薯类 Tubers	8.30×10^4	
油料 Oil plants	5.30×10^4	
猪肉 Pork	1.70×10^6	
牛肉 Beef	4.00×10^6	
羊肉 Mutton	2.00×10^6	
奶类 Dairy	1.71×10^6	
绵羊毛 Sheep's wool	4.40×10^6	
山羊毛 Goats hair	4.40×10^6	

(3) 农户占比及其与能值的 Logistic 模型

农户占比表示现有生态资源条件下,农户从事农业生产时,其能值特征低于或高于某一数值的农户比例,体现了农户生产决策行为与生产能值的关系^[38]。

农户占比随农户生产系统能值投入、产出的变化进行曲线估计,Logistic 模型拟合效果较好。Logistic 模型: $Y=A/(1+Be^{-kx})$, A 为极限能值投入或产出积累量, B 表示修正误差常量, k 表示相对增长速度。S 型曲线反映农户占比 3 个增长阶段:缓慢增长阶段,快速增长阶段,饱和增长阶段。相邻阶段存在状态转变的能值阈值和相应的农户占比阈值。阈值 A 为从缓慢增长阶段过渡到快速增长阶段转变的阈值;阈值 B 为从快速增长阶段到饱和阶段转变的阈值;阈值 C 为农户占比增长速度存在拐点($Y=A/2$)。阈值 C,农户占比响应最敏感;拐点之前,响应速率逐渐加快,之后逐渐变慢^[39]。

(4) 系统耦合度 (Coupling intensity, CI)

$CI = \text{畜产品总能值} / (\text{粮食产出能值} \times \text{利用系数} + \text{牧草和秸秆能值}) \times (\text{高品质产品能值} / \text{低质产品能值})$ ^[40]

其中,高品质产品能值为草食家畜牛、羊的肉和毛类的能值,低质产品能值为秸秆和牧草的能值^[41]。 CI 大小表明农业系统内部或农业系统之间作物生产与家畜生产系统耦合的强度。

(5) 能流图

基于能值计算结果和农业生态系统能流过程做能量流动结构图,反映系统内外及系统内部各组分之间的直接与间接能量转化关系(图 2)。

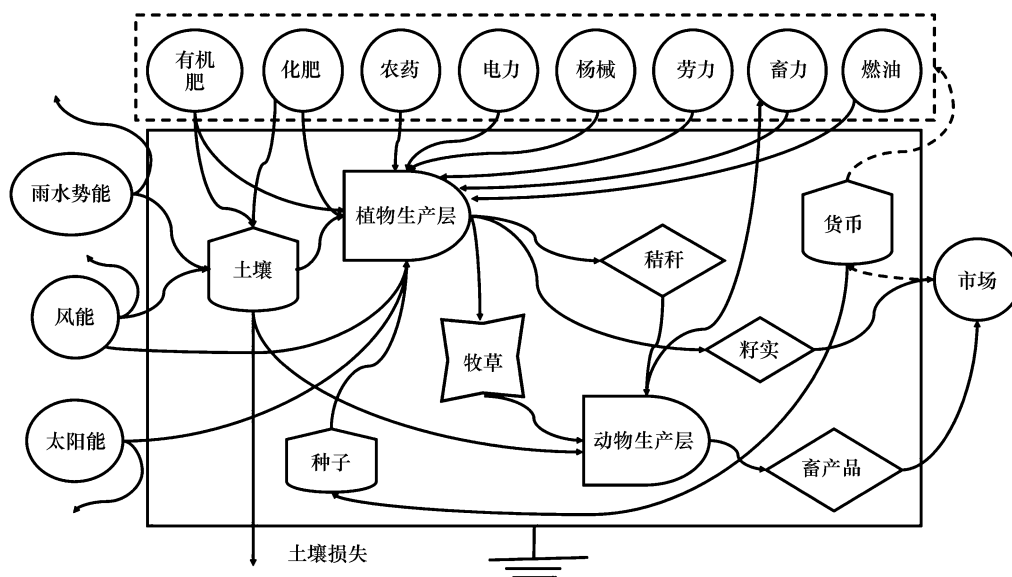


图 2 农业系统能流图

Fig.2 Emergy Flow of agricultural system

1.2.3 统计分析

采用单因素方差(one-way ANOVA)比较三个地区农户能值投入、产出要素差异显著性,LSD 法进行多重比较($\alpha=0.05$);一般线性模型(GLM)进行主效应分析,计算各投入要素的贡献率及显著性;拟合耦合度和能值收益率指数模型;相关性分析各投入、产出指标之间的相关关系($\alpha=0.05$),并拟合多元回归预测模型。Amos 分析模块拟合能量流动结构方程模型。用 SPSS 20.0 统计软件进行数据统计分析,Excel 2012 进行绘图。

3 结果与分析

3.1 作物生产

3.1.1 作物生产要素能值分析

农作物种植规模、生产总投入能值自东向西递减,产出能值与作物种植面积呈正比(表3)。研究区随着海拔的增高,农户作物生产活动减少,作物生产总产出能值递减。除玉米外,其他作物生产能值收益率:WY > TW > XH。总体上,同一作物的能值投入要素在不同地区存在显著性差异($P < 0.05$)。各项能值投入要素对海拔变化的敏感程度(投入要素随海拔变化的变动程度,越敏感则变动程度越大)不同,小麦生产中,依次为人力>磷肥>农药>畜力>有机肥>种子>氮肥;玉米生产中,依次为人力>磷肥>产出>农药>种子>有机肥;马铃薯生产中,依次为人力>种子>农药>畜力>有机肥;豆类作物生产中,依次为人力>有机肥>磷肥>农药>畜力>氮肥;油料作物生产中,依次为磷肥>畜力>氮肥>人力>种子。同一地点投入要素、产出能值和能值收益率在不同作物间差异显著($P < 0.05$),说明同一地区每种作物能量利用方式不同。

能值投入各要素的贡献率分析表明,种子和人力是小麦、马铃薯、豆类作物、油类作物的重要能值投入要素(表4),对作物产出影响显著($P < 0.05$),贡献累计达到70%;有机肥对小麦、马铃薯、豆类作物、油类作物的产出贡献显著($P < 0.05$)。TW和WY的主要能值投入贡献分别为种子和人力,且随海拔增加,N肥、P肥和畜力的贡献降低。

3.1.2 农户作物生产决策行为能值分析

能值投入、产出和农户占比进行 Logistic 拟合,结果表明,随着投入或产出的增加,达到某一能值投入或产出数值的农户占比呈现出缓慢增长-快速增长-缓慢趋于饱和的3个阶段,符合S型增长曲线。XH的农户占比增长最为迅速,依次是WY、TW(表5)。由于XH地区作物生产规模最小,所以在起初能值投入增加时,作物生产规模扩增最为迅速。对比不同地区能值投入的三个农户占比阈值点,在拐点处,TW、WY和XH的能值投入阈值自东向西递减;在进入快速增长期和进入饱和期时,WY的农户占比阈值最高。对比不同地区能值产出的三个农户占比阈值点,WY和XH的农户占比三个阈值比较接近;进入快速增长期时,TW农户占比阈值最高,且最早进入饱和期;在拐点处,TW农户占比最高。

3.2 家畜生产

3.2.1 家畜生产要素能值分析

随着海拔的降低家畜生产规模自东向西递减,能值产出与生产规模呈正比,能值收益率 WY < TW < XH(表6)。过渡区域耦合方式发生变化,TW和WY以作物秸秆、精料、苜蓿(*Medicago sativa*)为主要投入要素,XH投入要素以天然牧草为主,补饲为辅。同一家畜的投入要素不同地区比较,牛生产中,玉米秸秆投入差异显著($P < 0.05$),其他家畜的投入要素在不同地区无显著差异($P > 0.05$)。海拔增高,家畜产出能值递增。XH牦牛能值收益率最高,即牦牛生产中投入较少能量可得到更多能量产出。牛生产中,XH能值产出显著高于TW和WY($P < 0.05$);羊生产中,能值收益率 XH > TW > WY;猪生产中,WY能值收益率高于TW。

家畜生产的投入中,TW和WY牛的产出能值主要来自小麦和玉米秸秆的投入(表7)。家畜产出中,充分利用了作物生产的秸秆,说明TW和WY作物生产与家畜生产耦合紧密。TW和WY牛生产舍饲为主,短时放牧为辅;相反,XH牦牛生产以天然草地长期放牧为主,补饲为辅,但补饲在农户投入中的贡献率最高。羊生产与牛生产类似,TW和WY分别以秸秆和粮食投入为主,XH补饲贡献率最高。猪生产中,苜蓿贡献率最高。

3.2.2 农户家畜生产决策行为能值分析

能值投入、产出和农户占比进行 Logistic 拟合,结果表明,XH的农户占比进入快速增长期最早,且到达饱和期最快,依次是TW、WY。原因可能是各地区自然资源差异,XH自然资源禀赋,在起初增加能值投入时,家畜生产规模迅速扩增;WY则在家畜生产初期门槛较高,难以快速扩大生产规模,进入饱和阶段最晚,增长持

表 3 主要作物生产要素能值分析
Table 3 Energy analysis of main crops' production factors

作物 Crops	地区 Region	面积 Area/ hm ²	比例 Percentage/%	种子 Seeds/ (10 ¹³ ·sej)	有机肥 Organic manure/ (10 ¹¹ ·sej)	P 肥 Phosphorus fertilizer/ (10 ¹² ·sej)	N 肥 Nitrogen fertilizer/ (10 ¹¹ ·sej)	农药 Pesticides/ (10 ⁹ ·sej)	人力 Labor force/ (10 ¹³ ·sej)	畜力 Livestock force/ (10 ¹³ ·sej)	薄膜 Membrane/ (10 ⁹ ·sej)	总投入 Total output/ (10 ¹⁴ ·sej)	总产出 Total output/ (10 ¹⁴ ·sej)	能值收益率 Energyeffi ciency
冬小麦 Winter wheat	TW	17.87	45.3	9.61 ±4.3Ca	25.4 ±19.2Aa	1.61 ±1.3Aa	7.91 ±3.54Aa	5.36 ±1.72Ba	38.8 ±12.2Aa	23.7 ±7.91Aa	—	7.26 ±2.11Aa	19.5 ±8.2Aa	2.69b
	WY	6.90	26.8	4.82 ±2.3Cb	17.5 ±8.01Bb	0.534 ±0.5Bb	4.14 ±2.78Ab	1.84 ±0.812Bb	12.4 ±5.46Bb	6 ±2.62Bb	—	2.35 ±1.03Bb	8.26 ±3.67Cb	3.51a
	XH	3.61	100	2.85 ±0.48c	—	0.436 ±0.037c	8.75 ±1.21c	0.489 ±0.065c	9.7 ±0.178c	—	—	1.27 ±0.096c	1.66 ±0.195c	0.04c
玉米 Corn	TW	4.97	12.6	0.818 ±0.359Ea	5.54 ±4.45Da	0.685 ±0.404Da	4.6 ±2.2B	1.95 ±0.941Ca	10.6 ±4.4Ca	5.36 ±2.77D	0.944 ±0.413	1.69 ±0.771Ea	4.86 ±1.90Ea	2.87a
	WY	2.73	10.1	0.433 ±0.286Eb	5.36 ±4.01Cb	0.38 ±0.256Cb	2.6 ±1.87B	0.883 ±0.589Cb	4.9 ±3.41Cb	2.23 ±1.5D	0.424 ±0.276	0.769 ±0.528Db	2.01 ±1.46Eb	2.62b
马铃薯 Potato	TW	5.80	14.7	14.6 ±8.03Ba	6.17 ±3.1Ca	0.779 ±0.426C	1.39 ±0.902C	1.36 ±0.845Ea	7.30 ±3.29Ba	5.71 ±3.28Ca	—	2.78 ±1.47Ca	14.4 ±6.73Ba	5.17b
	WY	3.00	11.3	9.52 ±7.07Ab	3.74 ±3.40Db	0.301 ±0.35D	0.732 ±0.744D	0.527 ±0.456Db	3.65 ±2.99Db	2.67 ±1.79Cb	—	1.59 ±1.19Cb	8.55 ±6.92Bb	5.37a
豆类作物 Legume crop	TW	6.50	16.4	8.31 ±3.24D	8.97 ±4.86B	0.567 ±0.344Eb	0.793 ±0.668Eb	1.46 ±0.684Db	12.7 ±5.41Bb	6.47 ±2.29Bb	—	2.76 ±1.10Db	14.3 ±6.85Cb	5.18
	WY	11.4	44.2	6.34 ±3.10B	30.6 ±17.9A	0.941 ±0.601Aa	1.22 ±0.886Ca	2.55 ±1.52Aa	17.4 ±7.62Aa	11.3 ±5.41Aa	—	3.54 ±1.64Aa	19.9 ±10.5Aa	5.61
油料作物 Oil crop	TW	4.40	11	46.9 ±7.73Aa	2.03 ±0.55E	0.866 ±0.799B	0.941 ±0.591D	5.61 ±1.04Aa	3.08 ±2.99Ea	4.21 ±2.38E	—	5.43 ±2.28Ba	14 ±6.98Da	2.57b
	WY	1.80	7.6	1.38 ±0.559Db	1.33 ±0.877E	—	—	0.448 ±0.193Eb	2.96 ±1.15Eb	—	—	0.435 ±0.172Eb	5.28 ±2.08Db	12.14a
总量 Total	TW	39.54	100	80.33 ±20.32a	48 ±7.98	45 ±17.82a	15.63 ±17.82	15.73 ±2.37a	72.3 ±1.04a	45.3 ±34.2	0.943 ±0.379	19.93 ±2.36a	67 ±14.5a	3.36b
	WY	25.83	100	22.5 ±8.97b	58.3 ±16.85	2.15 ±1.38b	8.7 ±3.65	6.23 ±1.32b	38.3 ±0.98b	22.17 ±16.85	0.423 ±0.211	8.4 ±0.79b	44.23 ±22.5b	5.24a
	XH	3.61	100	2.85 ±0.48c	—	0.436 ±0.037c	8.75 ±1.21	0.489 ±0.065c	9.7 ±0.178c	—	—	1.27 ±0.096c	1.66 ±0.195c	1.31c

大写字母表示同一地点不同作物之间的差异显著性;不同小写字母表示同一作物不同地点之间的差异显著性,“—”表示没有该项投入

表 4 能值投入要素贡献率

Table 4 Contribution ratio of input factors' energy

作物 Crop	产地 Region	种子 Seed	人力 Labor force	畜力 Livestock force	P 肥 Phosphate fertilizer	N 肥 Nitrogen fertilizer	有机肥 Manure	农药 Pesticide	薄膜 Mulch
小麦 Wheat	TW	0.263 ***	0.421 ***	0.058 ***	0.137 ***	0.039 ***	0.078 ***	0.003	—
	WY	0.832 ***	0.007 ***	0.006 ***	0.020 ***	0.003 ***	0.127 *	0.004	—
	XH	0.172 ***	0.585 ***	—	0.000	0.002 *	—	0.000	—
玉米 Corn	TW	0.676 ***	0.176 ***	0.015	0.044 **	0.024 *	0.034 *	0.019	0.012
	WY	0.914 ***	0.000	0.000	0.010	0.009	0.002	0.008	0.056 ***
马铃薯 Potato	TW	0.776 ***	0.085 ***	0.105 ***	0.007 *	0.005	0.020 ***	0.001	—
	WY	0.872 ***	0.027 ***	0.008 ***	0.070 ***	0.008 ***	0.015 ***	0.000	—
豆类作物 Legume crop	TW	0.693 ***	0.036 **	0.005	0.047 ***	0.008	0.206 ***	0.004	—
	WY	0.749 ***	0.070 ***	0.017	0.023 *	0.004	0.132 ***	0.003	—
油料作物 Oil crop	TW	0.222 ***	0.440 ***	0.174 ***	0.000	0.005	0.131 ***	0.028	—
	WY	0.618 ***	0.181 ***	—	—	—	0.191 ***	0.010	—

“***”表示 $P<0.001$, “**”表示 $0.001<P<0.01$, “*”表示 $0.01<P<0.05$; “—”表示没有该项投入

表 5 Logistic 回归方程
Table 5 Logistic regression model

项目 Item	地区 Region	曲线回归 S equation	R ²	國值 A Threshold		國值 B Threshold		國值 C Threshold	
				X/(10 ¹⁴ sej)	Y/%	X/(10 ¹⁴ sej)	Y/%	X/(10 ¹⁴ sej)	Y/%
能值投入 Input	TW	$Y=1/(1+56.417e^{-X})$	0.825***	16	20.38%	20.4	60.54%	19.2	0.50
	WY	$Y=1/(1+8065.305e^{-X})$	0.971***	7.54	22.88%	9.94	78.62%	9.30	0.50
	XH	$Y=1/(1+121.226e^{-X})$	0.973***	0.842	16.28%	1.54	62.03%	1.52	0.50
能值产出 Output	TW	$Y=1/(1+8065.305e^{-X})$	0.971***	60.05	28.61%	79.1	71.21%	71.2	0.50
	WY	$Y=1/(1+2782.493e^{-X})$	0.981***	36.4	16.48%	54.6	81.60%	45.7	0.50
	XH	$Y=1/(1+113.921e^{-X})$	0.971***	1.09	16.20%	2.59	81.60%	2.09	0.50

Y:农户占比,household ratio;X:能值,energy;“***”表示 $P<0.001$ ，“**”表示 $0.001<P<0.01$ ，“*”表示 $0.01<P<0.05$

表 6 主要家畜生产要素能值分析
Table 6 Energy analysis of main animal production factors

家畜 Animal	地区 Region	数量 Number/ (羊单位)	比例 Percentage/%	小麦秸秆 Wheat residue/ (10 ¹⁴ sej)	玉米秸秆 Maize residue/ (10 ¹⁴ sej)	人力 Labor force/ (10 ¹² sej)	补饲精料 Concentrated feeding/ (10 ¹³ sej)	苜蓿 Alfalfa/ (10 ¹⁴ sej)	总投入 Total output/ (10 ¹⁵ sej)	总产出 Total output/ (10 ¹⁵ sej)	能值收益率 Energy efficiency
牦牛 Yak	XH	5340.9	83	—	—	3.73 ±2.64	62.3 ±57.1Aa	—	16.6 ±11.8	114 ±80.9Aa	6.89a
	TW	188.4	63	5.35 ±1.75	4.18 ±1.40	468 ±135	51.3 ±35.7b	24.6 ±13.8	3.93 ±1.56	4.81 ±1.66b	1.22b
牛 Cattle	WY	269.4	48	5.74 ±1.85	10.18 ±5.96	677 ±168	7.21 ±4.75c	21.4 ±5.96	4.48 ±1.11	5.15 ±1.76c	1.15c
	TW	57.9	19.4	1.64 ±0.21	1.05 ±0.133	694 ±146	2.60 ±0.592	3.28 ±0.515	1.32 ±0.217	1.66 ±0.321	1.26b
羊 Sheep	WY	210.3	38	3.88 ±0.46	3.88 ±0.38	2440 ±210	18.4 ±17.9	32.7 ±29	6.67 ±5.39	6.42 ±5.19	0.96c
	XH	1086.6	17	—	—	3.79 ±0.78	4.14 ±0.83B	—	5.26 ±1.09	44.9 ±9.29B	8.54a
猪 Pig	TW	52.5	17.6	—	—	434 ±172	26.3 ±13.3	5.74 ±4.4	1.27 ±0.581	2.64 ±1.22	2.08
	WY	79.5	14	—	—	666 ±308	43.4 ±20.7	4.17 ±2.25	1.52 ±0.653	4.46 ±2.52	2.94
总量 Total	TW	298.8	100	7 ±3.45	5.23 ±0.38	1595.4 ±320	340.083 ±25.86	336.2 ±73.8	62.5 ±10.8	91.16 ±9.85	1.40b
	WY	559.2	100	9.63 ±5.87	14.06 ±7.89	3783.73 ±530	690.166 ±77.89	583.13 ±23	126.7 ±45.6	160.3 ±7.52	1.27c
	XH	6427.5	100	—	—	7.52 ±0.34	664.49 ±123.6	—	218.51 ±33.7	1592.4 ±280.2	7.29a

大写字母表示同一地点不同家畜之间的差异显著性;不同小写字母表示同一家畜不同地点之间的差异显著性;“—”表示没有该项投入

表 7 畜产品能值投入贡献率

Table 7 Contribution rate of livestock products' emergy input

家畜 Livestock	产地 Region	补饲粮食 Feed food	人力 Labor force	小麦秸秆 Wheat residue	玉米秸秆 Corn stalks	苜蓿 Alfalfa
牛 Cattle	TW	0.0001	0.00000	0.9995 ***	0.0048 ***	0.0002 *
	WY	0.000002	0.00033 *	0.998 ***	0.0013 ***	0.000007
牦牛 Yak	XH	0.988 ***	0.0103 ***	—	—	—
羊 Sheep	TW	0.00000	0.0096 ***	0.9104 ***	0.0009 ***	0.0397 ***
	WY	0.991 ***	0.00000	0.0006	0.0016 ***	0.0070 ***
	XH	0.987 ***	0.013 ***	—	—	—
猪 Swine	TW	0.0195 ***	0.00000	—	—	0.9805 ***
	WY	0.0106 ***	0.005 ***	—	—	0.989 ***

“***”表示 $P < 0.001$, “**”表示 $0.001 < P < 0.01$, “*”表示 $0.01 < P < 0.05$; “—”表示没有该项投入

续过程最长。在拐点处,投入能值自东向西逐渐递增。对比不同地区能值产出的三个农户占比阈值点,TW、夏河进入快速增长期较快,WY 产出能值较晚进入快速增长阶段和饱和阶段。在拐点处,XH 的产出能值最高(表 8)。

表 8 Logistic 回归方程

Table 8 Logistic regression model

项目 Item	地区 Region	曲线回归 S equation	R^2	阈值 A Threshold		阈值 B Threshold		阈值 C Threshold	
				X/ (10^{15} sej)	Y/%	X/ (10^{15} sej)	Y/%	X/ (10^{15} sej)	Y/%
能值投入 Input	TW	$Y = 1 / (1 + 142.164e^{-X})$	0.974 ***	4.30	0.15	10.8	0.93	7.34	0.50
	WY	$Y = 1 / (1 + 153.641e^{-X})$	0.956 ***	12.6	0.23	20.7	0.94	14.8	0.50
	XH	$Y = 1 / (1 + 39.307e^{-X})$	0.847 ***	12.0	0.09	50.8	0.89	30.4	0.50
能值产出 Output	TW	$Y = 1 / (1 + 191.656e^{-X})$	0.921 ***	5.43	0.05	13.5	0.86	9.16	0.50
	WY	$Y = 1 / (1 + 370.719e^{-X})$	0.955 ***	17.5	0.36	23.4	0.95	18.6	0.50
	XH	$Y = 1 / (1 + 35.680e^{-X})$	0.823 ***	86	0.09	357	0.88	217	0.50

“***”表示 $P < 0.001$, “**”表示 $0.001 < P < 0.01$, “*”表示 $0.01 < P < 0.05$

3.3 作物-家畜耦合能值分析

3.3.1 草地农业综合系统能量流动模型

在农牧交错带的生态经济系统中,理想的农牧转化模式是将低质能的初级产品如秸秆、牧草等农副产品,通过草食家畜转换为高质能的次级产品如家畜肉、毛、奶等产品,形成较高的系统生产力,从而实现系统功能的整合和放大。农业生态系统能量转化过程中,太阳能、风能、土壤损失等资源能以及化肥、农药等物质能作为初始能值投入作物生产系统,之后作物产出(籽实体等)作为最终产品流入市场进行贸易,创造经济价值;秸秆等营养体作为中间产品继续投入家畜生产。TW 和 WY 作物种类丰富,生产规模较大,投入要素复杂,耦合方式相似;XH 耦合方式较为简单,系统能量流动单一(图 3)。

3.3.2 作物-家畜耦合度与能值收益率分析

TW、WY 和 XH 的植物生产层与家畜生产层的纵向系统耦合度均与家畜能值产出率显著正相关($P < 0.05$);随着耦合度的增加,不同地区家畜能值产出率增加趋势不同。在耦合度相同范围内,TW 家畜能值产出率比 WY 增加更快(图 4)。XH 家畜能值产出率随着耦合度的增加而迅速增加。当耦合度超过一定值时,TW 拟合曲线斜率逐渐减小。随着耦合度增加,WY 拟合曲线趋势平缓,且当耦合度低于 8.0 时,能值产出率小于 1,此时系统达到自我维持临界点。XH 能值产出率在耦合度超过 60 时快速增加。

3.4 能值产出预测

3.4.1 作物能值产出预测

各项要素能值投入与能值产出的相关性分析结果表明,总体上,要素投入与作物能值产出显著线性相关

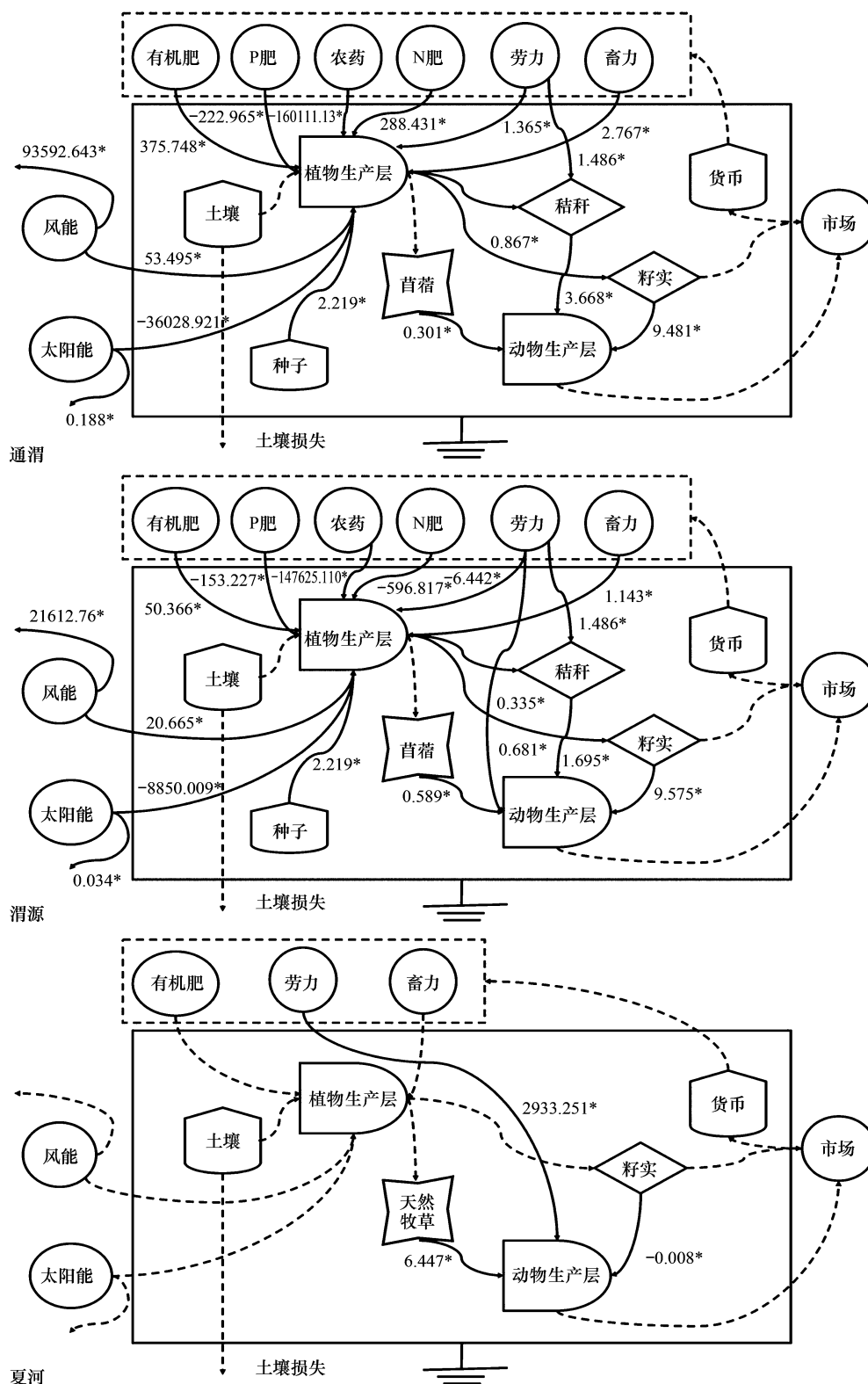


图3 农业系统能流图

Fig.3 Emergy Flow of agricultural system

(表9)。种子、有机肥、人力和农药与作物能值产出均显著线性正相关。小麦、玉米、马铃薯的各项投入与能值产出的相关系数随着海拔增加而增大。基于此,利用各项投入要素拟合多元回归模型,较好预测能值产出

(表 10)。

3.4.2 家畜能值产出预测

牛(牦牛)与羊(羊肉,羊毛)产出,TW、WY 和 XH 能值产出均与人力显著($P<0.05$)正相关。猪产出(猪肉),TW 和 WY 分别与苜蓿和人力、补饲显著($P<0.05$)相关(表 11)。基于此,利用各项投入要素拟合多元回归模型,较好预测家畜能值产出(表 12)。

4 讨论

4.1 农业系统能值投入与产出

能量维持着生态系统的发展演替。通渭-渭源-夏河过渡带,自然禀赋各异,农业生产特征不同,生态系统能量转化和效率不同。农业系统内部气候、农地规模、经济政策环境、农业资本、农户生产行为不同,都影响着现代农业系统的稳定与演替^[42]。黄土高原向青藏高原过渡时,由于海拔变化,形成不同水热条件和气候特征,经过长期人类生产活动的作用,农业生态系统不断演替,能量流通转换发生着变化^[43]。通渭和渭源位于研究区东部,靠近黄土高原边界,农户经营方式以作物生产为主,畜牧养殖结合的多样性生产方式,马铃薯、豆类作物作物有较高的能量效率,扩大马铃薯和豆类作物的生产规模可有效提高作物生产生态效益。通渭种植业为农业生产支柱,尽管当地农户作物生产已相对成熟,但传统生产模式相对落后,制约了当地发展,通过现代化、产业化转变提高经济效益同时,维护生态系统健康。渭源整体作物生产规模较小,但生态效益较高,可利用这种优势进一步拓展种植规模,创造更高收益。有机肥在通渭和渭源作物生产中均为重要投入,除有机肥利用外,通渭相较渭源更依赖 N 肥投入,改善有机肥利用方式,避免滥用 N 肥、P 肥等,较少土壤污染与温室气体排放,保证生态系统可持续性。苜蓿作为多年生优质牧草,投入少、效益高,在通渭、渭源猪生产中发挥重要作用,应保持种植规模;秸秆和苜蓿饲喂为主,补饲为辅的种养结合模式具有重要意义。夏河地区农户利用天然草地规模化养殖,生产成本低,且家畜产品质量好,市场广,适当的粮食补饲可以促进能量产出,但要注意过牧等影响草地资源可再生。

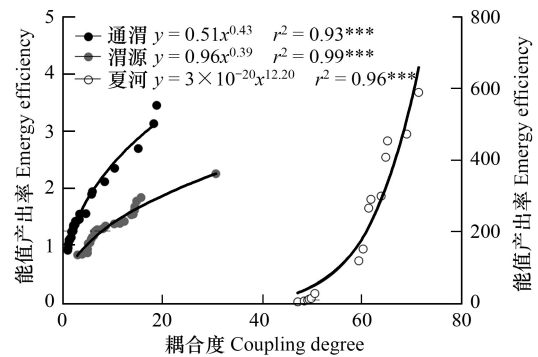


图 4 耦合度与家畜能值收益率关系

Fig.4 The relationship between coupling intensity and energy output rate of animal

表 9 投入要素相关分析

Table 9 Correlation analysis of Input factor

作物产出 Crop output	地区 Region	种子 Seed	有机肥 Manure	人力 Labor force	畜力 Livestock force	P 肥 Phosphate fertilizer	N 肥 Nitrogen fertilizer	农药 Pesticide	薄膜 Membrane
小麦 Wheat	TW	0.503 **	0.848 **	0.799 **	0.673 **	-0.224	0.115	0.394 **	—
	WY	0.903 **	0.940 **	0.925 **	0.944 **	0.401 *	0.531 **	0.760 **	0.892 **
	XH	0.805 **	—	0.766 **	—	0.212	0.309	0.443 *	—
玉米 Corn	TW	0.775 **	0.691 **	0.872 **	0.810 **	0.581 **	0.831 **	0.694 **	—
	WY	0.961 **	0.881 **	0.924 **	0.897 **	0.871 **	0.881 **	0.807 **	0.956 **
马铃薯 Potato	TW	0.870 **	0.922 **	0.911 **	0.958 **	0.728 **	0.409 *	0.581 **	—
	WY	0.931 **	0.946 **	0.857 **	0.884 **	0.580 **	0.802 **	0.702 **	—
豆类作物 Legume crop	TW	0.805 **	0.891 **	0.804 **	0.718 **	0.248	0.198	0.443 *	—
	WY	0.832 **	0.902 **	0.838 **	0.828 **	0.205	0.347	0.623 **	—
油料作物 Oil crop	TW	0.449 *	0.430 *	0.224	0.804 **	0.483 **	0.664 **	0.458 *	—
	WY	0.686 **	0.752 **	0.766 **	—	—	—	0.547 **	—

表内数字为皮尔逊相关系数, $R>0$ 为正相关, $R<0$ 为负相关;“*”表示在 0.05 水平显著相关,“**”表示在 0.01 水平极显著相关;“—”表示在种植该作物时没有这样投入

表 10 能值产出预测模型

Table 10 Prediction model of emergyoutput

作物 Crop	研究区 Region	预测模型 Predictive model	R^2	P
小麦 Wheat	TW	$E = 233.13M + 3.28L + 464.65NF - 1.56 \times 10^{14}$	0.916	*
	WY	$E = 14.73AP - 166.35M - 1.97 \times 10^{10}$	0.971	**
玉米 Corn	TW	$E = 544.94NF - 82397.36P + 1.17 \times 10^{14}$	0.902	*
	WY	$E = 1146813.74MU - 2.62 \times 10^{13}$	0.932	***
马铃薯 Potato	TW	$E = 11.89AP + 643.36M + 6.34L + 1.25 \times 10^{14}$	0.973	**
	WY	$E = 1038.68M + 7.65S - 11.37AP + 1403.38NF + 1.60 \times 10^{13}$	0.993	*
豆类作物 Legume crop	TW	$E = 1180.27M + 5.43L - 7.911 - 1.43 \times 10^{14}$	0.936	*
油料作物 Oil crop	TW	$E = 319.15M - 1.71 \times 10^{14}$	0.925	***
	WY	$E = 1556.62M + 1.14 \times 10^{14}$	0.907	***
	WY	$E = 14.11S + 1142.32M + 1 \times 10^{14}$	0.761	*

“***”表示 $P < 0.001$, “**”表示 $0.001 < P < 0.01$, “*”表示 $0.01 < P < 0.05$; E : 产出能值, emergy; S : 种子能值投入, seed; M : 有机肥能值投入, manure; L : 人力能值投入, labor force; AP : 畜力能值投入, animal power; PF : 磷肥能值投入, Phosphate fertilizer; NF : 氮肥能值投入, Nitrogen fertilizer; P : 农药能值投入, pesticide; MU : 薄膜能值投入, membran

表 11 能值投入产出相关分析

Table 11 Correlation analysis of emergyinput-Output

家畜 Animal	产地 Region	补饲粮食 Concentrated feeding	人力 Labor force	小麦秸秆 Wheat residue	玉米秸秆 Corn residue	苜蓿 Alfalfa
牛 Cattle	TW	0.454 *	0.865 **	0.784 **	0.568 **	0.467 **
	WY	0.201	0.843 **	0.634 **	0.760 **	0.534 **
牦牛 Yak	XH	0.804 **	1.000 **	—	—	—
羊 Sheep	TW	0.945 **	0.995 **	0.515 **	0.234	0.936 **
	WY	0.797 **	0.825 **	0.713 **	0.736 **	0.847 **
	XH	0.951 **	1.000 **	—	—	—
猪 Pig	TW	0.898 **	0.942 **	—	—	0.326
	WY	0.956 **	0.977 **	—	—	0.451 *

表内数字为皮尔逊相关系数, $R > 0$ 为正相关, $R < 0$ 为负相关; “*”表示在 0.05 水平显著相关, “**”表示在 0.01 水平极显著相关; “—”表示在种植该作物时没有这样投入

表 12 能值产出预测模型

Table 12 Prediction model of emergyoutput

家畜 Livestock	研究区 Region	预测模型 Predictive model	R^2	P
牛 Cattle	WY	$E = 7.03L + 1.57 \times 10^{13}$	0.999	**
牦牛 Yak	XH	$E = 30660.16L - (2.13 \times 10^{12}) \times CF + 14.75$	1.000	***
羊 Sheep	TW	$E = 2.26L + 1.82CR - 7.85 \times 10^{12}$	1.000	***
	WY	$E = 0.81A + 1.58CR + 1.50CF - 1.65 \times 10^{13}$	0.997	**
	XH	$E = 11840.34L - (1.05 \times 10^{11}) \times CF + 7.68$	1.000	***
猪 Pig	TW	$E = 9.63CF + 1.20A - 1.33 \times 10^{13}$	1.000	***
	WY	$E = 8.07L - 1.56A - 8.51 \times 10^{12}$	0.999	*

“***”表示 $P < 0.001$, “**”表示 $0.001 < P < 0.01$, “*”表示 $0.01 < P < 0.05$; L : 劳力, labor; WR : 小麦秸秆, wheat residue; CR : 玉米秸秆, corn residue; CF : 补饲精料, concentrate feeding; A : 苜蓿, Alfalfa

4.2 农户经营活动与农业系统能值

农户是生产经营者,在农业生态系统中扮演着重要角色,作为理性人个体,农户具有趋利避害,追求最高

经济效益的特性,而且在农户生产决策过程中,政策激励、从众心理等原因会影响农户生产活动行为^[44]。从生态系统健康出发,研究农户占比与投入和产出能值的关系,通过农户占比调节农户生产经营,为建立有效的经营激励制度,合理调控公共资源有效利用,促进现阶段农牧户生产经营向适度规模转型提供科学依据^[45]。结果表明研究区农户占比与投入和产出能值关系呈现三个阶段变化:缓慢增长期、快速增长期、饱和期;通渭海拔低,人口密度大,开展作物生产门槛最低,也最容易进入饱和(调节农户行为的手段失灵),现阶段作物生产规模经营成熟,家畜生产尚有潜力,需要把握机会提高种养殖技术,向产业化、现代化转变。渭源海拔次高,地形以山、林地为主,开展作物或家畜生产的门槛最高,但持续增长期最长,在初期推广生产经营要投入较高成本,可通过政策引导、激励农牧户,促进发展。夏河具有天然草地优势,家畜生产生态效益可观,作物生产薄弱,为保持草地生态系统健康、可持续发展,不可盲目扩大家畜生产规模,合理的种养规模尤为重要。

4.3 系统耦合与农业系统能量流动

农业生态系统通过系统耦合促进自由能-系统会聚-超循环系统的发育,解放生产潜力,实现潜能从低级到高级的系统进化^[46]。作物-家畜系统的核心部分是作物-家畜耦合,提高系统耦合度,促进农业循环经济和生态发展^[47],形成以非平衡态自由能作为驱动力的超循环新系统。夏河为典型草地/家畜生态系统,家畜养殖依靠天然草地,作物种植少,耦合密切,经济效益高,但能量转化方式单一,生态系统脆弱,故制定相应政策,引导农牧户主动保护生态健康的同时,丰富系统能量转化层级与途径是未来发展趋势。通渭和渭源农户种养结合密切,家畜生产过程中,作物秸秆补饲家畜,占其生产投入的70%以上,极大减少了农户投入,通渭秸秆利用率高于渭源,能量转化层级丰富,系统稳定性和可持续性较强,通过现代化、产业化促进系统进化,如何多方面释放系统催化潜势、位差潜势、多稳定潜势和管理潜势是今后发展课题。

5 结论

黄土高原向青藏高原过渡,自然资源和社会经济情况等沿海拔梯度而变化,农户生产经营以作物生产为主向家畜生产为主过渡,扩大马铃薯和豆类作物的生产规模可有效提高生态效益,避免滥用N肥、P肥,增加生态系统可持续性,加强作物秸秆对家畜生产的补饲作用,适当比例种植苜蓿,优化天然草地利用方式,调整作物生产内部粮、经、饲产品比例结构,实现生态效益最大化;调控农户占比,引导农户生产决策,避免农户追求经济效益最大化而忽视草场资源的公共性,实现该区域农业生产结构优化。

参考文献(References):

- [1] 侯惠香. 生态系统功能的归纳. 希望月报, 2007, (1): 66-66.
- [2] 侯彦林. 社会—经济—自然复合生态系统有效物质(能量、货币)平衡模型的建立及其应用. 生态学报, 2001, 21(12): 2147-2152.
- [3] 胡聃, 文秋霞, 李锋, 王震, 冯强, 张艳萍. 北京城市生态系统的能值动态分析. 城市环境与城市生态, 2006, 19(6): 1-4.
- [4] 王金照. 基于能值分析的陕西小麦、玉米、苹果、大枣比较优势研究[D]. 西安: 西北农林科技大学, 2011.
- [5] 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.
- [6] 陆宏芳, 沈善瑞, 陈洁, 蓝盛芳. 生态经济系统的一种整合评价方法: 能值理论与分析方法. 生态环境, 2005, 14(1): 121-126.
- [7] 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.
- [8] Safonov P, Comar V, Ortega E. Systems modeling of Brazilian sustainability with emergy flows diagrams//Crabbé P, Holland A, Ryszkowski L, Westra L, eds. Implementing Ecological Integrity. Dordrecht: Springer, 2000: 185-189.
- [9] 张芳怡, 濮杰, 张健. 基于能值分析理论的生态足迹模型及应用——以江苏省为例[J]. 自然资源学报, 2006, 21(4): 653-660.
- [10] Viglia S, Civitillo D F, Cacciapuoti G, Ulgiati S. Indicators of environmental loading and sustainability of urban systems. An emergy-based environmental footprint. Ecological Indicators, 2017, doi: 10.1016/j.ecolind.2017.03.060.
- [11] Ohnishi S, Dong H J, Geng Y, Fujii M, Fujii T. A comprehensive evaluation on industrial & urban symbiosis by combining MFA, carbon footprint and emergy methods—Case of Kawasaki, Japan. Ecological Indicators, 2017, 73: 513-524.
- [12] Nakajima E S, Ortega E. Carrying capacity using emergy and a new calculation of the ecological footprint. Ecological Indicators, 2016, 60: 1200-1207.
- [13] Fang W, An H Z, Li H J, Gao X Y, Sun X Q, Zhong W Q. Accessing on the sustainability of urban ecological-economic systems by means of a

- coupled energy and system dynamics model: A case study of Beijing. *Energy Policy*, 2017, 100: 326-337.
- [14] 徐磊. 陇东黄土高原农业系统的环境适应性和生产力调控[D]. 兰州: 兰州大学, 2015.
- [15] 侯扶江, 南志标, 任继周. 作物-家畜综合生产系统. *草业学报*, 2009, 18(5): 211-234.
- [16] 任继周, 万长贵. 系统耦合与荒漠-绿洲草地农业系统——以祁连山-临泽剖面为例. *草业学报*, 1994, (3): 1-8.
- [17] 王搏. 基于耦合模型的我国区域经济与生态环境协调发展动态研究[D]. 长沙: 湖南大学, 2014.
- [18] 董孝斌, 高旺盛, 隋鹏, 严茂超. 北方农牧交错带典型农户系统的能值分析. *干旱区资源与环境*, 2006, 20(4): 78-82.
- [19] 董孝斌, 高旺盛. 黄土高原丘陵沟壑区典型流域农业生态系统生产力研究——以纸坊沟为例. *草业学报*, 2003, 12(4): 14-19.
- [20] Hilimire K. Integrated crop/livestock agriculture in the United States: a review. *Journal of Sustainable Agriculture*, 2011, 35(4): 376-393.
- [21] Lockie S. Landcare in Australia: cultural transformation in the management of rural environments. *Culture, Agriculture, Food and Environment*, 1998, 20(1): 21-29.
- [22] 王宁, 李克昌, 黄兆鸿, 樊振军. 宁夏大农业内部系统耦合初探——I 牧区育成农区育肥畜牧业生产体制现状调查(以平罗县为例). *草业科学*, 2000, 17(4): 6-12.
- [23] 侯扶江, 常生华, 南志标, 任继周. 建立草地农业系统, 治理民勤荒漠化//中国草学会青年工作委员会 2008 年农区草业论坛论文集. 厦门: 中国草学会, 2008: 68-74.
- [24] 朱兴运, 任继周. 河西走廊山地-绿洲-荒漠草地农业生态系统的运行机制与模式[J]. *草业科学*, 1995(3): 1-5.
- [25] 任继周. 草地农业生态系统通论(精). 合肥: 安徽教育出版社, 2004.
- [26] 高小叶. 农业系统从黄土高原向青藏高原过渡的能量、经济和碳平衡特征[D]. 兰州: 兰州大学, 2011.
- [27] 付强国. 陇东黄土高原农户系统结构和家庭结构[D]. 兰州: 兰州大学, 2016.
- [28] 杨延彪, 刘占龙. 关于夏河县草地畜牧业可持续发展的思考. *家畜生态*, 2001, 22(1): 23-25.
- [29] 彭露茜, 高小叶, 侯扶江. 黄土高原-青藏高原过渡带农户生产系统的经济效益——以通渭-渭源-夏河样带为例[J]. *科学通报*, 2018(2): 201-213.
- [30] 吴超超, 高小叶, 侯扶江. 黄土高原-青藏高原过渡带农户生产系统的碳平衡. *应用生态学报*, 2017, 28(10): 3341-3350.
- [31] 李艳春. 基于能值理论的农牧复合系统效能分析[D]. 银川: 宁夏大学, 2009.
- [32] 董晓佳. 定西市农业生态经济系统能值分析[D]. 兰州: 甘肃农业大学, 2014.
- [33] Odum H T. Self-organization, transformity, and information.[J]. *Science*, 1988, 242(4882): 1132-9.
- [34] Odum H T. Environmental Accounting——EMERGY and Environmental Decision Making[J]. *Child Development*, 1995, 42(4): 1187-201.
- [35] 陈卓. 农业生态学[M]. 中国农业大学出版社, 2002.
- [36] 蓝盛芳, 钦佩, 陆宏芳. 生态经济系统能值分析[M]. 化学工业出版社, 2002.
- [37] 高雪松, 邓良基, 张世熔. 基于能值方法的成都平原农田生态系统秸秆循环利用模式研究. *中国生态农业学报*, 2014, 22(6): 729-736.
- [38] 宋雨河. 农户生产决策与农产品价格波动研究[D]. 北京: 中国农业大学, 2015.
- [39] 缪文慧. 农产品主产区农户耕种意愿及补偿标准测算研究[D]. 南宁: 广西大学, 2016.
- [40] 董孝斌, 高旺盛, 严茂超. 基于能值理论的农牧交错带两个典型县域生态经济系统的耦合效应分析. *农业工程学报*, 2005, 21(11): 1-6.
- [41] 锡文林, 张新田, 李卫军, 靳发兰. 农区奶牛业主要饲草能值分析. *草食家畜*, 2009, (2): 60-61, 66-66.
- [42] 任继周. 论华夏农耕文化发展过程及其重农思想的演替//农耕文化与现代农业论坛论文集. 庆阳: 农业部农村社会事业发展中心, 甘肃省农牧厅, 2009: 31-38.
- [43] 林慧龙, 任继周, 傅华. 草地农业生态系统中的能值分析方法评介. *草业学报*, 2005, 14(4): 1-7.
- [44] 滕玉华, 刘长进, 陈燕, 赖良玉. 基于结构方程模型的农户清洁能源应用行为决策研究. *中国人口·资源与环境*, 2017, 27(9): 186-195.
- [45] 任继周, 侯扶江, 晋刚. 放牧管理的现代化转型——我国亟待补上的一课. *草业科学*, 2011, 28(10): 1745-1754.
- [46] 唐静, 林慧龙. 草地农业的循环经济特征分析. *草业学报*, 2013, 22(1): 167-175.
- [47] 林慧龙, 侯扶江. 草地农业生态系统中的系统耦合与系统相悖研究动态. *生态学报*, 2004, 24(6): 1252-1258.