

DOI:10.11686/cyxb2019532

<http://cyxb.magtech.com.cn>

丛一鸣,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量平衡分析——以“通渭—渭源—夏河”样带为例.草业学报,2020,29(9):5—19.

Cong Y M, Gao X Y, Hou F J. Energy balance analysis of farm production systems in the transitional zone between the Loess Plateau and the Qinghai Tibet Plateau, China——A case study of the Tongwei—Weiyuan—Xiahe transect. Acta Prataculturae Sinica, 2020, 29(9): 5—19.

黄土高原—青藏高原过渡带农户生产系统的能量平衡分析——以“通渭—渭源—夏河”样带为例

丛一鸣,高小叶,侯扶江*

(草地农业生态系统国家重点实验室,农业农村部草牧业创新重点实验室,兰州大学草地农业科技学院,甘肃 兰州 730020)

摘要:黄土高原—青藏高原过渡带是全球生态环境最脆弱、变化最剧烈、对气候变化响应最敏感的区域之一。能量是维持生态系统结构与功能可持续性的动力,是衡量农业系统生态与生产效益的重要指标。本研究在黄土高原—青藏高原过渡带东西方向上建立通渭(TW)—渭源(WY)—夏河(XH)样带,分析农户生产系统的能量平衡特征及其海拔的变化规律和影响因素。结果表明:1)作物生产系统,户均能量投入、能量产出、能量收益、能量效率从黄土高原向青藏高原逐渐减少。农户占比 50%时,通渭和渭源的户均能量净收益分别为 104.80 和 44.59 GJ。2)家畜生产系统,渭源的户均能量投入最高,夏河最低;农户占比为 50%时,夏河、通渭和渭源的户均能量净收益为分别为 160.42、−47.43 和 −55.25 GJ;能量产出、能量收益和能量效率均随海拔升高而逐渐增加。3)作物一家畜综合系统,能量投入依次为渭源>通渭>夏河,能量产出、能量收益和能量效率依次为夏河>通渭>渭源;农户占比为 50%时,户均能量收益阈值夏河、渭源和通渭地区分别为 91.54、16.50 和 76.98 GJ,此时,农户占比对能量变化最敏感,调控农户的能量投入能够最大化收益。4)农户生产系统的 Shannon—Wiener 多样性指数、Pielou 均匀度指数与能量效率间均呈显著相关($P<0.05$)。结构方程模型(SEM)显示,海拔是影响作物一家畜生产系统能量效率的关键因素($P<0.05$)。研究结果可对青藏高原—黄土高原过渡区农业可持续发展和政策制订提供科学依据。

关键词:草地;作物;家畜;系统耦合;能量产出;农业多样性

*Energy balance analysis of farm production systems in the transitional zone between the Loess Plateau and the Qinghai Tibet Plateau, China——A case study of the Tongwei—Weiyuan—Xiahe transect

CONG Yi-ming, GAO Xiao-ye, HOU Fu-jiang*

State Key Laboratory of Grassland Agro-ecosystems, Key Laboratory of Grassland Livestock Industry Innovation, Ministry of Agriculture, College of Pastoral Agriculture Science and Technology, Lanzhou University, Lanzhou 730020, China

Abstract: The transitional zone between the Loess Plateau and the Qinghai—Tibet Plateau (LP—QTP) has become recognized as a region with one of the most sensitive and fragile environments in China from an ecological perspective, with high susceptibility to climate change. Agriculture is important in the region and energy supply is the driving force for sustainable development of farm structure and function in agricultural production systems, and is an important indicator for measuring the ecological and production benefits of agricultural production systems. In this paper, a Tongwei (TW)—Weiyuan (WY)—Xiahe (XH) transect was established in the LP—QTP transitional zone to analyze the energy output of agricultural production systems on the altitude gradient (approx. 2000—3000 m above sea level). The results showed that: 1) In crop production systems the energy input, energy output, energy income and energy efficiency decreased from the LP to the QTP. When

* 收稿日期:2019-12-04;改回日期:2020-03-11

基金项目:国家自然科学基金项目(31672472),长江学者和创新团队发展计划(IRT_17R50),973 国家重点基础研究计划课题(2014CB138706)和 2018 年度甘肃省科技重大专项计划项目(18ZD2FA009)资助。

作者简介:丛一鸣(1995—),女,山东威海人,在读硕士。E-mail: congym17@lzu.edu.cn

* 通信作者 Corresponding author. E-mail: cyhoufj@lzu.edu.cn

the farmers percentage accounted for 50% (as identified by logistic regression), energy income of farms in TW and WY were 104.80 and 44.59 GJ, respectively. 2) In livestock production systems, the energy input per household was the highest in WY and lowest in XH. Energy income of XH, TW and WY were 160.42, -47.43 and -55.25 GJ, respectively. The energy output, energy income and energy efficiency all progressively increased with the altitude. 3) In crop-livestock integrated systems energy input ranked $WY > TW > XH$, while energy output, energy income and energy efficiency ranked $XH > TW > WY$. The threshold of energy income of XH, TW and WY were 91.54, 16.50 and 76.98 GJ, respectively, when the farmers percentage accounted for 50%. The point is most sensitive to energy changes, and regulating energy behavior can maximize the benefits. 4) The Shannon-wiener diversity index, Pielou evenness index and energy efficiency of the agricultural production systems were significantly correlated ($P < 0.05$). The structural equation model indicated that altitude was the most significant factor determining energy balance of crop-livestock production systems ($P < 0.05$). The results provide a scientific basis for agricultural production development and policy formulation in the transition zone, based on system energy balance.

Key words: grassland; crops; livestock; system coupling; energy output; agricultural diversity

能量是维持农业系统持续发展的动力。在草地农业系统中,能量沿着环境(土)、植物(草)、家畜、人类社会(市场)这一主干流动^[1],随着其物质载体在生态系统中运动、转化,最终以动植物产品的形式输出到社会。农业系统能量可分为生态能和人工(辅助)能。生态能来源于自然界,包括太阳能、雨水势能等;人工能来源于人类社会,其投入受农业活动直接调控^[2]。人工能对生态能的利用和转化有调控作用^[3],进而控制系统中所有能量的利用与分配^[4]。人工能包括可再生能和不可再生能,前者主要是人力、畜力等,后者主要是化石燃料或以其为原料生产的化肥、农药、薄膜等农业生产资料^[5-6]。可再生能占比愈高,农业系统的可持续性愈强^[7]。农业投入化肥、农药、机械、燃料等不可再生能,可收获生物能^[8]。草地农业系统将秸秆、作物副产品等作物生产的废弃物作为家畜生产的原料,粪尿等家畜生产的废弃物则作为作物生产的原料,作物生产与家畜生产实现系统耦合^[9-10],通过家畜放牧,物质和能量在天然草地和作物地之间流动,促进资源高效利用,收获更多的能量,提高能量转化效率^[11-12]。

能流研究始终是生态学、农学等多学科研究的热点和前沿。1976年,Odum 等^[13]在《人和自然界的能量基础》中,指出生态系统是一定区域内,生物与环境间进行物质交换与能量流动所形成的统一整体,并根据能量划分生态系统类型。20世纪80年代,Odum^[14-15]首次提出能值概念和能值分析,把生态系统的自然属性和社会经济属性定量地联系起来,提供了生态系统尺度分析其结构与功能的新方法^[16-17]。此后,国内外开始广泛运用能值理论和方法研究生态系统结构,1987年,Diamond^[18]发现生产用水和湿地结合是密西西比河流域有效的管理方法;2006年,Martin 等^[19]提出俄亥俄州橡树(*Quercus palustris*)可持续利用的解决方案;2008年,La Rosa 等^[20]评估西西里岛生产方式对红桔(*Citrus reticulata*)生产的作用;2016年,邓健等^[21]提出了珠江三角洲和黄土高原种植业系统可持续发展模式及其对策。能值理论借助系统热力学的方法,统一标准衡量生态系统中各种来源能量的价值和作用,但是人工能对生态能的作用没有充分体现。农业系统中的人工能与太阳能等生态能远不在一个数量级,但其流动受到人为控制和管理,直接影响农作物对太阳能的转化效率,对生态能的效应起着“四两拨千斤”的调控作用,因此从人工能的角度分析农业系统的能量平衡,可以更准确地识别各种性质的能量投入对农业生态系统的作用^[22]。

黄土高原和青藏高原均是全球独特的生态环境脆弱区,两者之间的过渡带地处我国地形的第一与第二阶的“坡坎”,农耕文明与畜牧文明长期互作,作物生产与家畜生产耦合,分布着多种类型的农户生产系统,与海拔、热量、降水等自然因素共同影响着过渡带农户生产系统的结构和功能^[23]。以往的研究多从黄土高原和青藏高原社会经济发展和农业系统能值等角度进行研究,农户生产系统中能量投入产出随着海拔梯度等自然因素的变化是分析农业结构的基础,但相关报道较少。为此,本研究选择黄土高原向青藏高原过渡的通渭—渭源—夏河样带,从能量效率和能量收益等角度分析农户生产系统的能量平衡特征及其空间变化规律,为优化区域农业结构,提高农业资源利用效率提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

在甘肃省中部黄土高原向青藏高原的过渡区域自东向西建立通渭(TW)一渭源(WY)一夏河(XH)样带,3个样本县大致分布于35°N左右,经度基本呈等差分布(图1),海拔、年均降水量呈逐渐增加的趋势,年平均气温则逐渐降低(表1)。样带由东向西,人均草原面积逐渐增加,耕地总面积和户均耕地面积均递减,粮食作物种植比例逐渐减少,饲草作物种植比例渭源最高,家畜数量和户均畜群规模逐渐增加(表1)。根据草原综合顺序分类法,通渭和渭源属于微温湿润森林草原类,夏河属于冷温潮湿高山草甸类^[24]。通渭的草地农业系统类型为传统作物一家畜综合系统,渭源属于传统作物/天然草地一家畜综合生产系统,夏河属天然草地一家畜系统^[9]。

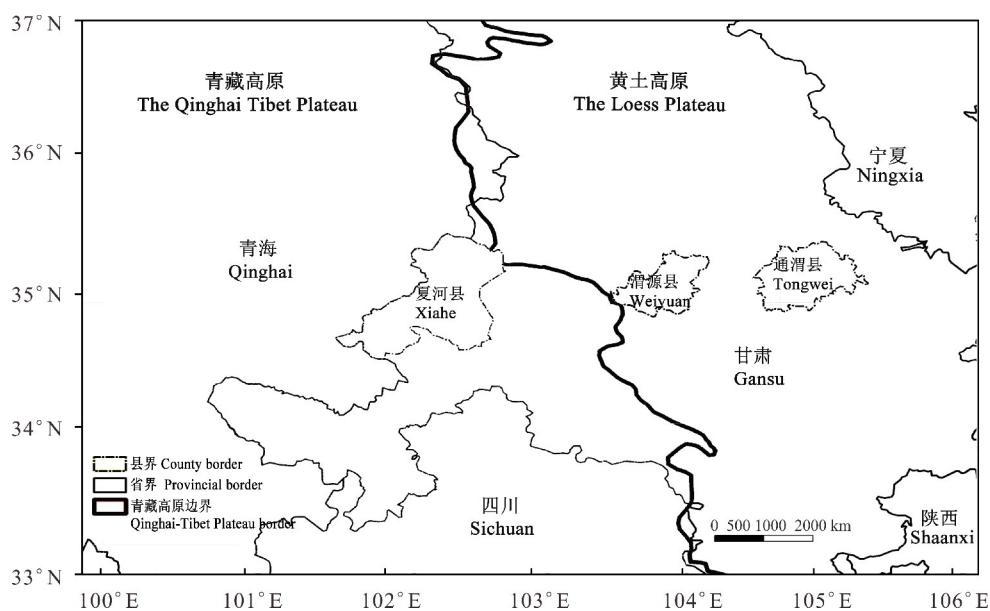


图 1 研究区地理位置

Fig. 1 Location of study site

1.2 数据收集

收集2015年3个县年鉴、政府报告以及问卷调查统计数据。研究区内采用随机抽样与典型抽样相结合的方式开展问卷调查。依据农业生产结构不同,每县选取具有代表性且农业生产结构内部稳定的2个乡镇,共计6个乡镇;村级采用等距随机抽样,在典型乡(镇)内对农户人均收入由高到低进行排序,依次等距选取10个村,由于研究区长期整村推进农业新技术,每个村内部农业生产结构稳定,农户间具有相似的农业生产结构,每村随机抽取3个典型农户进行调查研究。农业生产调查包括家庭结构(成员、年龄、性别、教育、务工等)、经济收入、支出结构、作物生产(作物种植种类与面积,人力、畜力、机械和能源等投入,种子、薄膜、肥料和农药等使用,价格,作物产品的产量、售价等)、家畜生产(家畜种类、数量、结构,繁殖,出栏,人力、机械和能源等投入,饲料购买情况等)等^[25](表2)。

通过查阅政府年鉴、信息网等,搜集样带的农业数据,以验证农户调查数据的准确性和完整性。

表 1 研究区自然和社会概况

Table 1 Natural and social survey of study area

项目 Item	通渭 Tongwei	渭源 Weiyuan	夏河 Xiahe
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
海拔 Altitude (m)	2032	2311	2930
气候类型 Climate type	温带大陆性季风气候 Temperate continental monsoon climate	温带大陆性季风气候 Temperate continental monsoon climate	高原大陆性气候 Plateau continental climate
年均降水 Annual mean precipitation (mm)	380	500	530
年均气温 Annual mean temperature (°C)	7.7	5.7	2.6
≥0 °C年积温 ≥0 °C accumulated temperature (°C)	2900	2679	1810
湿润度 Humidity	1.6	1.9	2.9
无霜期 Frost-free (d)	160	135	56

草原类型 Rangeland type	微温湿润森林草原类 Cool temperate-humid forest steppe	微温湿润森林草原类 Cool temperate-humid forest steppe	寒冷潮湿高山草甸类 Frigid perhumid rain tundra alpine meadow
总耕地面积 Arable land area (hm^2)	115.39	53.33	11.33
草原面积 Rangeland ($\times 10^3 \text{ hm}^2$)	60.67	54.27	502.67
粮食作物种植比例 Planted ratio of grain crops (%)	73.9	68.9	50.0
经济作物种植比例 Planted ratio of cash crop (%)	14.8	5.1	28.5
饲草作物种植比例 Planted ratio of forage crop (%)	11.3	26.0	21.6
人均牲畜存栏数 Per-capita livestock inventory (sheep unit)	1.28	0.76	10.79
人均羊出栏数 Per-capita sheep for sale (sheep unit)	0.15	0.18	7.07
人均牛出栏数 Per-capita cattle for sale (sheep unit)	0.01	0.02	0.33
人均猪出栏数 Per-capita pig for sale (sheep unit)	0.40	0.35	0.11
草地农业系统类型 Type of grassland agriculture	传统作物一家畜系统 Classically integrated crop-livestock system	传统作物/天然草地一家畜 Classically integrated crop-livestock system	天然草地一家畜系统 Integrated system based on rangeland based on rangeland

1.3 指标计算

根据农户生产系统中人力、畜力、种子、肥料、农药、薄膜和机械等能量系数和用量计算其能量投入和能量产出(energy, EN)。计算公式如下：

$$EN = \sum (EN_i \times A_i)$$

式中: EN_i 为作物 i 单位面积的能量投入或产出; A_i 为作物 i 的种植面积。

$$\text{能量效率} = \text{产出} / \text{投入}$$

$$\text{能量收益} = \text{产出} - \text{投入}$$

$$\text{可持续发展指数} = \text{可更新能} / \text{不可更新能}^{[30]}$$

式中: 可更新能包括种子、有机肥、人力、畜力; 不可更新能包括磷肥、氮肥和农药以及薄膜等。研究区为雨养农业区,不考虑灌溉因子。

$$\text{家畜生产的能量投入或产出} = \text{饲料能} + \text{管理能}$$

综合生产系统中,家畜排泄物、作物秸秆和畜力在作物与家畜两个子系统之间流动,分析综合系统时不计入农户的投入和产出。

表 2 投入与产出的能量系数

Table 2 Energy coefficient of input and output

项目 Item	种子 Seed	籽实 Grain	秸秆或干草 Straw or hay
马铃薯 Potato ($\text{MJ} \cdot \text{kg}^{-1}$)	—	16.89 ^[26]	—
冬小麦 Winter wheat ($\text{MJ} \cdot \text{kg}^{-1}$)	13.75 ^[27]	17.90 ^[27]	17.22 ^[27]
苜蓿 Alfalfa ($\text{MJ} \cdot \text{kg}^{-1}$)	108.82 ^[26]	—	17.56 ^[27]
玉米 Maize ($\text{MJ} \cdot \text{kg}^{-1}$)	104.65 ^[27]	18.26 ^[27]	15.22 ^[27]
油菜 Rape ($\text{MJ} \cdot \text{kg}^{-1}$)	33.30 ^[28]	28.30 ^[28]	18.40 ^[28]
胡麻 Flax ($\text{MJ} \cdot \text{kg}^{-1}$)	—	18.60 ^[27]	—
大豆 Soybean ($\text{MJ} \cdot \text{kg}^{-1}$)	33.49 ^[26]	16.83 ^[26]	18.30 ^[26]
猪 Pig ($\text{MJ} \cdot \text{kg}^{-1}$)	21.90 ^[27]	—	—
牛 Cattle ($\text{MJ} \cdot \text{kg}^{-1}$)	13.88 ^[27]	—	—
羊毛 Wool ($\text{MJ} \cdot \text{kg}^{-1}$)	20.90 ^[27]	—	—
羊羔 Lambs carcass weight ($\text{MJ} \cdot \text{kg}^{-1}$)	11.01 ^[27]	—	—
运输能 Transportation ($\text{MJ} \cdot \text{kg}^{-1}$)	8.80 ^[27]	—	—
薄膜 Mulch ($\text{MJ} \cdot \text{kg}^{-1}$)	51.88 ^[27]	—	—
磷酸氢二铵 Ammonium phosphate ($\text{MJ} \cdot \text{kg}^{-1}$)	62.40 ^[27]	—	—
磷肥 Phosphate ($\text{MJ} \cdot \text{kg}^{-1}$)	11.93 ^[27]	—	—
农家肥 Farmyard manure ($\text{MJ} \cdot \text{kg}^{-1}$)	14.63 ^[27]	—	—

杀虫剂 Pesticide (MJ · kg ⁻¹)	238.00 ^[26]	—	—
男劳力田间操作(重度)Field operation of male labor (heavy) (MJ · h ⁻¹)	0.68 ^[29]	—	—
女劳力田间操作(中度)Field operation of female labor (moderate) (MJ · h ⁻¹)	0.52 ^[29]	—	—
畜力田间操作 Field operation of livestock labor (MJ · h ⁻¹)	7.75 ^[29]	—	—

“—”表示该指标无统计意义。下同。“—” indicates that the index has no statistical significance. The same below.

1.4 多样性分析

农业生态系统多样性是体现其结构与功能的基本测度之一。

1.4.1 Shannon—Wiener 多样性指数 农户种植作物或饲养家畜种类越多,作物面积或家畜数量分布越均匀,多样性指数越高^[31]。

$$H = - \sum_{i=1}^m P_i \ln P_i$$

$$P_i = N_i / N_m$$

式中: H 为农户作物(家畜)系统多样性指数; m 是作物或家畜的种数; P_i 是作物(家畜) i 的种植面积比例; N_i 是第 i 种作物的种植面积或第 i 种家畜的饲养数量; N_m 是 m 种植作物(饲养家畜)的总种植面积(总数量)。

1.4.2 Pielou 均匀度指数 在作物或家畜生产系统中,作物种植面积比例或各种家畜的数量越均匀,均匀度指数越大^[32]。

$$E = H / H_{\max}$$

式中: E 为均匀度指数; H 为作物(家畜)生产系统的多样性指数; H_{\max} 为最大的多样性指数, $H_{\max} = \ln M$, M 为系统中的作物(家畜)种类总数。

1.5 数据处理

农户占比,将每个农户根据其能量投入(或产出)的高低水平进行排序,可计算出能量投入(或产出)高于或低于某一数值的农户数量占所有农户的比例^[33]。

利用 SPSS 20.0 软件中的单因素方差分析模块对 3 个县、各种农户生产系统的能量投入、产出进行差异显著性分析($\alpha=0.05$)。用 Logistic 模型对农户占比随能量投入或产出水平的变化进行曲线估计:

$$Y = \frac{K}{1 + b e^{-ax}}$$

式中: K 表示农户占比达到饱和状态,理论上为 100%; a 表示农户生产系统的能量投入和产出的响应速率,即能量投入或产出变化 1 个单位时,相对应的农户占比的变化,反映了农户能量管理的响应速率或者农户能量调控的效率; b 为常数。

根据 Logistic 模型,农户能量变化包括缓慢增长阶段、快速增长阶段、饱和增长阶段。 $Y=K/2$ 、 $X=\ln b/a$,此时,农户占比对能量投入或产出的敏感性最大,是调控农户占比与能量平衡之间的耦合关键点,为阈值Ⅱ;拐点之前处于缓慢增长阶段,响应效率由慢变快,农户占比与能量平衡存在阈值Ⅰ;拐点之后响应速率逐渐变慢,达到饱和阶段,此时存在阈值Ⅲ。每个阈值点是农户占比对能量投入(产出)响应的拐点,是农户生产中能量调控的关键点^[33]。

1.6 结构方程模型(structural equation modeling, SEM)

将年均温和降水作为自变量,能量投入、能量产出、能量收益作为因变量,通过使用 IBM SPSS Amos 21 对收集的数据进行分析,定量各因素对能量利用的影响途径^[34—35],当 $0 \leq \chi^2/d(f) \leq 2$ 且 $0.05 \leq P \leq 1$,该方程拟合度高,模型成立^[36]。

2 结果与分析

2.1 作物生产的能量平衡分析

2.1.1 能量投入 在黄土高原—青藏高原过渡带,随着海拔升高,作物种植面积和种类下降;小麦(*Triticum aestivum*)、玉米(*Zea mays*)和马铃薯(*Solanum tuberosum*) 3 种作物的种植面积占 90% 左右,能量投入自东向西逐渐减少(表 3)。同一地区作物的能量投入由高到低依次为玉米>小麦>马铃薯。同种作物生产要素的能量投入,马铃薯以种子投入的能量最多;其他作物,N 肥投入能量最多,占 45%~70%,人力最少,仅占 1.8%~5.1%。夏河县天然草地广阔,只需要投入适量劳动力,就可以进行家畜生产,作物生产的农户比例较低。

表 3 2 个县 3 种主要作物生产的能量投入结构

Table 3 Energy input structure of three main crop productions in two counties

作物	地区	面积	种子	厩肥	人力	畜力	P 肥	N 肥	农药	F	P
Crop	Region	Area	Seed	Manure	Manpower	Animal power	P fertilizer	N fertilizer	Pesticide		
		(hm ² · farm ⁻¹)	(MJ · farm ⁻¹)								
小麦	TW	0.60	203.04	1095.00	13.97	29.56	87.83	1237.60	81.36	140.80	<0.05
Wheat	WY	0.20	137.96	727.57	13.16	21.63	82.17	1840.80	82.81	92.53	<0.05
	F	—	42.90	11.09	4.29	0.27	0.13	12.92	0.07	—	—
	P	—	<0.05	<0.05	<0.05	<0.05	0.72	<0.05	0.79	—	—
玉米	TW	0.17	513.12	1130.32	26.91	45.71	252.26	4831.00	209.03	779.44	<0.05
Cron	WY	0.07	310.46	730.00	13.81	22.71	170.00	3120.00	107.28	559.09	<0.05
	F	—	12.16	3.74	0.07	0.49	8.63	25.59	0.01	—	—
	P	—	<0.05	0.06	0.80	0.49	0.05	<0.05	0.91	—	—
马铃薯	TW	0.19	2205.00	586.43	8.16	21.09	126.08	644.82	61.92	238.29	<0.05
Potato	WY	0.09	2940.00	730.14	8.09	21.81	88.97	626.08	48.24	367.54	<0.05
	F	—	0.57	5.66	0.05	0.41	10.22	0.05	5.74	—	—
	P	—	0.45	<0.05	0.83	0.52	<0.05	0.80	<0.05	—	—

TW: 通渭 Tongwei; WY: 渭源 Weiyuan; XH: 夏河 Xiahe. F 表示 F 显著性检验。 F mean significance test. $P < 0.05$: 差异显著 There is significant difference at $P < 0.05$ level; $P > 0.05$: 差异不显著 There is no significant difference at $P < 0.05$ level. 同上。The same below.

2.1.2 能量产出 从黄土高原向青藏高原,作物生

产减少,农户作物生产的能量投入逐渐降低;小麦和玉米户均能量产出下降,但马铃薯户均能量产出增加。小麦和马铃薯能量效率、能量收益,通渭明显高于渭源($P<0.05$)(表4)。

2.1.3 农户作物生产能量行为的分布 作物生产

系统的能量投入、产出和收益，在缓慢增长阶段向快速增长阶段过渡的阈值Ⅰ、快速增长阶段的阈值Ⅱ以及快速增长阶段与趋于饱和阶段之间的阈值Ⅲ，均为通渭大于渭源（表5），即随着海拔升高呈下降趋势。与能量投入阈值Ⅰ相对应的农户占比，通渭大于渭源；与能量产出阈值Ⅰ相对应的农户占比通渭略高于渭源；由此导致与能量收益阈值Ⅰ对应的农户占比，通渭小于渭源；通渭和渭源农户占比的阈值Ⅲ差异较小（表5）。

2.2 家畜生产的能量平衡分析

2.2.1 能量投入

和羊的饲养量增加,户均秸秆、精料和苜蓿(*Medicago sativa*)等干草的能量投入呈下降趋势(表 6)。同种家畜同种形式的能量投入在不同地区内差异显著($P < 0.05$),同一地区同种家畜的不同形式的能量投入有明显差异($P < 0.05$)(表 6)。

表 4 2 个县 3 种主要作物生产的能量平衡分析

Table 4 Energy balance analysis of three main crops in two counties

项目 Item	地区 Region	小麦 Wheat	玉米 Cron	马铃薯 Potato
能量投入 Energy input (GJ · farm ⁻¹)	TW	20.62	9.20	10.65
	WY	10.14	5.09	6.47
	F	49.06	17.16	9.88
	P	<0.05	<0.05	<0.05
能量产出 Energy output (GJ · farm ⁻¹)	TW	48.15	18.93	15.27
	WY	11.30	15.66	18.55
	F	97.28	2.91	1.99
	P	<0.05	0.09	0.16
能量效率 Energy efficiency	TW	2.34	2.06	1.43
	WY	1.11	3.08	2.87
	F	72.66	7.47	16.28
	P	<0.05	0.08	<0.05
能量收益 Energy income (GJ · farm ⁻¹)	TW	27.53	9.76	4.62
	WY	1.16	10.57	12.08
	F	85.45	0.31	8.75
	P	<0.05	0.58	<0.05
可持续发展指数 Sustainability index	TW	11.02	3.61	271.35
	WY	12.64	4.60	167.83

表 5 作物生产系统中农户占比与能量的 Logistic 模型

Table 5 Logistic equation of farmer percentage and energy in crop production system

项目	地区	Logistic 方程参数 Logistic equation parameter				阈值 I Threshold I		阈值 II Threshold II		阈值 III Threshold III	
		a	b	R ²	P	X	Y	X	Y	X	Y
Item	Region					(GJ · farm ⁻¹)	(%)	(GJ · farm ⁻¹)	(%)	(GJ · farm ⁻¹)	(%)

能量投入	TW	289.88	0.999889	0.984	<0.05	32.51	9.7	52.10	50	82.30	99.1
Energy input	WY	1289.97	0.999793	0.968	<0.05	20.01	7.2	35.50	50	49.98	98.8
能量产出	TW	223.43	0.999965	0.968	<0.05	91.20	10.1	156.90	50	276.70	99.5
Energy output	WY	5642.74	0.999894	0.978	<0.05	55.31	9.6	80.09	50	121.03	98.3
能量收益	TW	184.67	0.999951	0.948	<0.05	46.92	5.1	104.80	50	190.30	98.7
Energy income	WY	9056.87	0.999807	0.884	<0.05	34.90	9.8	44.59	50	75.01	99.1

注:X 表示能量行为(能量投入、能量产出、能量收益),Y 表示对应能量行为下的农户占比。下同。

Note: X represents energy behavior (energy input, energy output, energy income), Y represents the proportion of farmers under energy behavior.

The same below.

2.2.2 能量产出 随着海拔的升高,家畜规模逐渐扩大,夏河家畜养殖(牛、羊)的能量产出,能量效率,能量收益显著高于通渭和渭源。牛的能量产出分别高出通渭和渭源 90.43%、95.86%,能量收益分别高出通渭和渭源 165.56% 和 1.74%,能量效率比通渭和渭源分别高 85.17% 和 99.36%。羊的能量产出分别多于通渭和渭源 96.14%、47.82%,能量效率多出通渭和渭源 99.36%、93.38%,能量收益则高出通渭、渭源两地 133.38%、93.65%(表 7)。

表 6 3 个县 3 种主要家畜生产的能量投入结构

Table 6 Energy input of three main livestock production in three counties

家畜	地区	数量 Number (sheep · farm ⁻¹)	秸秆 Straw (GJ · farm ⁻¹)	精料 Concentrated feed (GJ · farm ⁻¹)	苜蓿/干草 Alfalfa/hay (GJ · farm ⁻¹)	F	P
Livestock	Region						
牛 Cattle	TW	44.02	11.55	1.31	15.04	7.49	<0.05
	WY	62.02	10.04	9.40	1.31	5.08	<0.05
	XH	200.81	7.52	6.03	—	5.92	<0.05
	F	—	6.51	2.30	16.30	—	—
	P	—	<0.05	<0.05	<0.05	—	—
羊 Sheep	TW	13.60	2.35	0.26	1.08	1.28	<0.05
	WY	25.20	1.00	0.58	2.51	1.04	<0.05
	XH	40.02	1.50	1.17	—	0.93	<0.05
	F	—	6.89	3.07	10.26	—	—
	P	—	<0.05	0.05	<0.05	—	—
猪 Pig	TW	7.01	—	6.68	3.42	2.25	<0.05
	WY	7.93	—	8.04	1.85	6.98	<0.05
	XH	—	—	—	—	—	—
	F	—	—	9.81	8.53	—	—
	P	—	—	<0.05	<0.05	—	—

表 7 研究区家畜生产的能量平衡分析

Table 7 Energy balance analysis of livestock production in study area

项目	地区	牛	羊	猪	项目	地区	牛	羊	猪
Item	Cattle	Cattle	Sheep	Pig	Item	Cattle	Cattle	Sheep	Pig
能量投入 Energy input (GJ · farm ⁻¹)	TW	41.04	9.15	12.22	能量效率 Energy efficiency	TW	0.14	0.11	0.09
	WY	42.44	11.99	2.98		WY	0.06	1.13	1.33
	XH	6.38	1.52	—		XH	9.44	17.06	—
	F	92.12	11.11	31.49		F	187.23	14.87	19.69
	P	<0.05	<0.05	<0.05		P	<0.05	<0.05	<0.05
能量产出 Energy output (GJ · farm ⁻¹)	TW	5.76	1.00	1.13	能量收益 Energy income (GJ · farm ⁻¹)	TW	-35.28	-8.15	-11.09
	WY	2.49	13.53	3.97		WY	-39.95	1.55	0.99
	XH	60.20	25.93	—		XH	53.82	24.41	—
	F	57.99	4.84	25.14		F	163.41	9.34	93.40

<i>P</i>	<0.05	<0.05	<0.05		<i>P</i>	<0.05	<0.05	<0.05
----------	-------	-------	-------	--	----------	-------	-------	-------

2.2.3 农户家畜生产能量行为的分布 自东向西,家畜生产的能量产出与能量收益逐渐增加。能量投入和能量产出的变化在缓慢增长向快速增长过渡阶段的阈值Ⅰ渭源最高;能量收益的阈值Ⅰ夏河最高,通渭最低,自东向西呈逐渐增加的趋势,但该阈值Ⅰ下对应的农户占比在3个区域间变化较小(表8)。农户能量产出、能量收益在快速变化阶段的阈值Ⅱ,均表现为随海拔升高而上升的趋势,夏河远高于渭源和通渭;农户能量产出、能量收益在快速增长阶段与饱和增长阶段之间的阈值Ⅲ,自东向西呈现逐渐增加的趋势,相对应的农户占比在阈值区间内变化较小(表8)。

2.3 综合系统能量平衡分析

2.3.1 能量投入 黄土高原是典型的作物一家畜综合系统,通渭、渭源地区农业生产结构相似,而青藏高原是天然草地一家畜综合生产系统,样地带间能量投入差异显著。农牧户能量投入在前两个增长阶段的阈值(I、II)均表现为渭源>通渭>夏河,而能量投入在快速增长阶段向饱和阶段过渡的阈值Ⅲ则表现为渭源>夏河>通渭;阈值Ⅰ和Ⅲ相对应的农户占比均随海拔升高而逐渐增加(表9)。

2.3.2 能量产出 黄土高原—青藏高原过渡带,从缓慢增长向快速增长过渡阶段,能量产出变化的阈值Ⅰ渭源最高,此处农户占比阈值夏河略高于通渭、渭源;能量收益的阈值Ⅰ则夏河最高,渭源最低,与之相对应的农户占比阈值夏河显著高于通渭、渭源(表9)。农户能量产出、能量收益在快速变化阶段的阈值Ⅱ,渭源低于通渭和夏河;在进入饱和增长阶段农户能量产出、能量收益阈值Ⅲ渭源远低于通渭和夏河,但农户占比在阈值区间内变化较小(表9)。

表8 家畜生产系统中农户占比与能量的 Logistic 模型

Table 8 Logistic equation of farmer percentage and energy in livestock production system

项目 Item	地区 Region	Logistic 方程参数 Logistic equation parameter				阈值Ⅰ Threshold I		阈值Ⅱ Threshold II		阈值Ⅲ Threshold III	
		<i>a</i>	<i>b</i>	<i>R</i> ²	<i>P</i>	X (GJ · farm ⁻¹)	Y (%)	X (GJ · farm ⁻¹)	Y (%)	X (GJ · farm ⁻¹)	Y (%)
能量投入 Energy input	TW	73.80	0.999927	0.98	<0.05	24.88	7.9	62.37	50	110.80	97.9
Energy input	WY	13655.12	0.999833	0.93	<0.05	40.01	8.2	57.50	50	78.60	98.8
	XH	6.73	0.999739	0.90	<0.05	0.10	8.1	1.68	50	4.67	97.2
能量产出 Energy output	TW	60.02	0.999455	0.94	<0.05	2.98	9.2	7.12	50	14.02	98.9
Energy output	WY	126.37	0.999542	0.96	<0.05	6.14	7.8	10.07	50	19.12	99.3
	XH	9.23	0.999971	0.89	<0.05	0.95	8.3	70.80	50	23.87	99.1
能量收益 Energy income	TW	0.01	0.999912	0.98	<0.05	-90.23	5.0	-55.25	50	-20.10	96.9
Energy income	WY	0.00	0.999701	0.92	<0.05	-57.85	5.2	-47.43	50	-35.22	97.9
	XH	0.08	0.999998	0.90	<0.05	401.13	4.9	160.42	50	750.01	98.2

表9 综合生产系统中农户占比与能量的 Logistic 模型

Table 9 Logistic equation of farmer percentage and energy in integrated production system

项目 Item	地区 Region	Logistic 方程参数 Logistic equation parameter				阈值Ⅰ Threshold I		阈值Ⅱ Threshold II		阈值Ⅲ Threshold III	
		<i>a</i>	<i>b</i>	<i>R</i> ²	<i>P</i>	X (GJ · farm ⁻¹)	Y (%)	X (GJ · farm ⁻¹)	Y (%)	X (GJ · farm ⁻¹)	Y (%)
能量投入 Energy input	TW	757.68	0.999410	0.92	<0.05	7.01	7.90	11.33	50	17.20	98.10
Energy input	WY	134.48	0.999880	0.97	<0.05	17.51	9.30	38.91	50	69.88	98.80
	XH	4.48	0.998000	0.76	<0.05	0.08	12.10	7.48	50	25.04	99.40
能量产出 Energy output	TW	43.99	0.999963	0.98	<0.05	30.15	7.30	102.87	50	178.54	97.72
Energy output	WY	3854.42	0.999849	0.96	<0.05	35.01	6.90	55.41	50	80.21	98.12
	XH	9.23	0.999971	0.89	<0.05	0.09	10.10	84.07	50	207.36	99.31
能量收益 Energy income	TW	35.81	0.999961	0.98	<0.05	13.76	4.89	91.54	50	193.21	98.20
Energy income	WY	3198.37	0.999480	0.90	<0.05	12.68	5.01	16.89	50	26.78	97.70

XH	9.29	0.999971	0.89	<0.05	21.08	12.20	76.98	50	180.72	97.35
----	------	----------	------	-------	-------	-------	-------	----	--------	-------

2.4 农户生产系统能量平衡机制与过程

2.4.1 农业多样性与能量效率关系 农业多样性指数、均匀度指数与能量效率显著相关($P<0.05$)。作物生产系统中,通渭的多样性指数和均匀度指数分别略高于渭源 6.85% 和 6.10%, 能量效率则高出 27.53%。家畜生产系统中, 多样性指数和均匀度指数, 通渭比渭源分别高出 25.00% 和 25.81%, 比夏河多 507.14%、290.00%;但是, 能量效率通渭和渭源分别只有夏河的 1.02% 和 1.48%。可见, 多样性与均匀度指数自东向西呈现逐渐降低的趋势, 而能量效率则有逐渐升高的趋势(表 10)。

表 10 生产系统多样性与能量效率的关系

Table 10 The relationships of system diversity and energy efficiency

项目	地区	多样性指数	均匀度指数	能量效率	F	P
Item	Region	Diversity index	Evenness index	Energy efficiency		
作物系统 Crop system	TW	1.56	0.87	3.15	186.93	<0.05
	WY	1.46	0.82	2.47	164.31	<0.05
家畜系统 Livestock system	TW	0.85	0.78	0.13	107.79	<0.05
	WY	0.68	0.62	0.19	301.19	<0.05
	XH	0.14	0.20	12.80	250.37	<0.05

2.4.2 能量对农户生产系统的作用机制 SEM 显示, 海拔通过降水量、热量、作物面积、家畜数量间接影响能量投入、能量产出和能量效率。其中, 对能量投入直接效应最大的因子是年均温和降水量, 间接效应最大的因子是海拔。对能量产出直接效应最大的因子是降水量, 间接效应最大的因子是海拔; 对能量效率影响最大的直接效应来自海拔(图 2), 因为海拔影响降水和热量的分布及两者相互关系, 调控着农业生产活动。

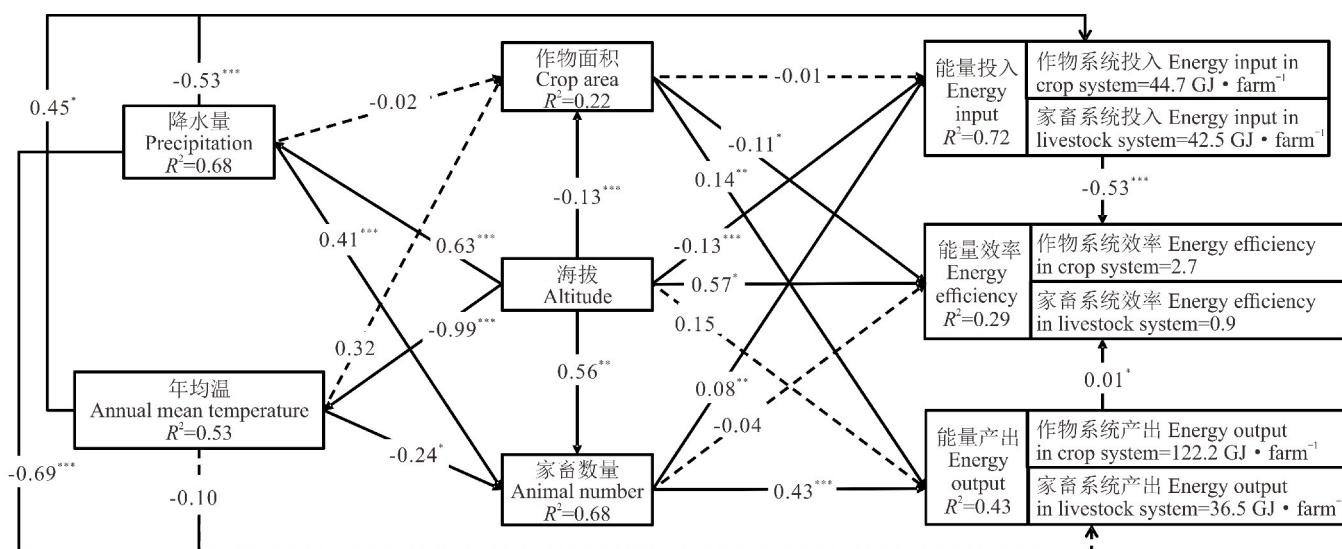


图 2 样地带各因素影响 SEM 结构模型

Fig. 2 The influence of various factors in the SEM structure model

路径系数右上标为 P 值。 $P<0.05$ 为 *, $P<0.01$ 为 **, $P<0.001$ 为 ***, 虚线说明 $P>0.05$, 不显著。 $\chi^2/d(f)=1.35$ 。The upper right corner of path coefficient is P value. * indicate significant differences at $P<0.05$, ** indicate significant differences at $P<0.01$, *** indicate significant differences at $P<0.001$; dotted lines mean no significance. $\chi^2/d(f)=1.35$.

3 讨论

3.1 农户生产系统能量收益与能量效率的关系

本研究中, 作物生产的能量效率随着能量收益的增加而上升, 但 3 个县的增速不同(图 3)。作物系统中, 拟合曲线的斜率两个县显著差异($P<0.05$), 但通渭能量效率整体大于渭源(图 3a); 家畜生产系统, 通渭和渭源能

量收益均为负值,能量效率随着能量收益的增加而上升,渭源县收益均为正值,综合系统可持续性强,并且能量效率整体相关不显著($P>0.05$)。

海拔梯度上,农业生产具有显著的季节性和区域性,通渭和渭源农业主要是作物系统,种植粮食作物和经济作物,养殖牛、羊和猪等家畜。随着海拔升高,马铃薯户均能量产出、能量效率和能量收益逐渐增加,在作物系统当中,高海拔地区应重视马铃薯新品种的引入以及产业化生产,随海拔降低,小麦和玉米的生产愈加重要。在各个海拔地区,由于玉米是家畜生产的主要补饲来源^[37],为提升能量利用率,均应保持适度种植规模。

家畜生产随海拔增加,生产规模逐渐扩大,通渭和渭源的秸秆和苜蓿作为主要人为能量投入,有效促进系统耦合提高生产效益,原有基础上调整种植和养殖结构规模^[38-39],鼓励农户适当增加家畜数量,引进牧草等经济作物,优化作物一家畜系统^[40],作物补饲家畜,家畜为作物生产提供粪便和畜力,通过物质与能量循环,减少能量投入,增加能量收益,获得较高的能量效率,从而提高生产力水平,获取较好的经济效益^[41-43]。

3.2 农户生产经营活动与能量调控

黄土高原—青藏高原过渡带,农业作为主要的人为活动,农户作为系统的生产者和管理者,都占有重要的位置,而能量在农业系统各组分之间流动,把系统联系成一个整体。通过 Logistic 模型^[44-46]将农户生产情况与能量行为结合,分析 3 地农业系统的结构与功能。结果显示在黄土高原—青藏高原样地带,农户占比随着能量投入、产出增加而增加,符合“S”型增长,并且相同农户占比下,能量行为对应的响应速率都各有不同。在农户生产发展初期,通渭县能够很快进入快速增长阶段,说明通渭易开展农业生产活动,有巨大的生产潜力;渭源县从事农业生产门槛较高,需要政府及相关部门引导支持进行农业生产;夏河县主要以单一家畜系统为主,可以迅速获取良好的生产效益,合理调控载畜量,保持家畜生产,稳固生产优势^[47]。通过结构方程模型发现种养规模对能量效率存在直接和间接影响,3 地可以合理规划种植饲草,同时适当扩大家畜养殖规模^[48-49],加快家畜出栏,调整系统各因素能量投入水平与结构,保持草地农业生产系统可持续性发展^[50-51]。

3.3 农业多样性与能量关系

农业物种多样性和均匀度随海拔的增加而降低,并且与能量效率显著相关($P<0.05$),是解放系统生产潜力,实现生产系统低能级向高能级转变的关键,保持种植或养植物种丰富度,不过度依赖某一农业物种,不但有效降低病虫害或流行疫病带来的风险^[52],使生态系统向稳定和可持续的方向发展,并且采用间种、轮作等手段提高土地利用率、解放生产潜力,避免长期耕种同一物种导致的某些元素富集或某种元素流失,维护土壤健康^[53]。美国得克萨斯州西北部,棉花(*Gossypium* spp)—小麦—黑麦(*Secale cereale*)轮作系统,小麦和黑麦用于肉牛放牧,产草量和棉花产量分别增加 33% 和 29%。北美大草原北部,综合农业系统与专门化系统相比,能量投入显著减少,能量利用效率提高了 50% 左右^[54]。3 县要重视多样化种植,而非单一地扩大规模生产,能够避免某一生产链断裂造成的经济风险,帮助农户降低损失提高市场竞争力。

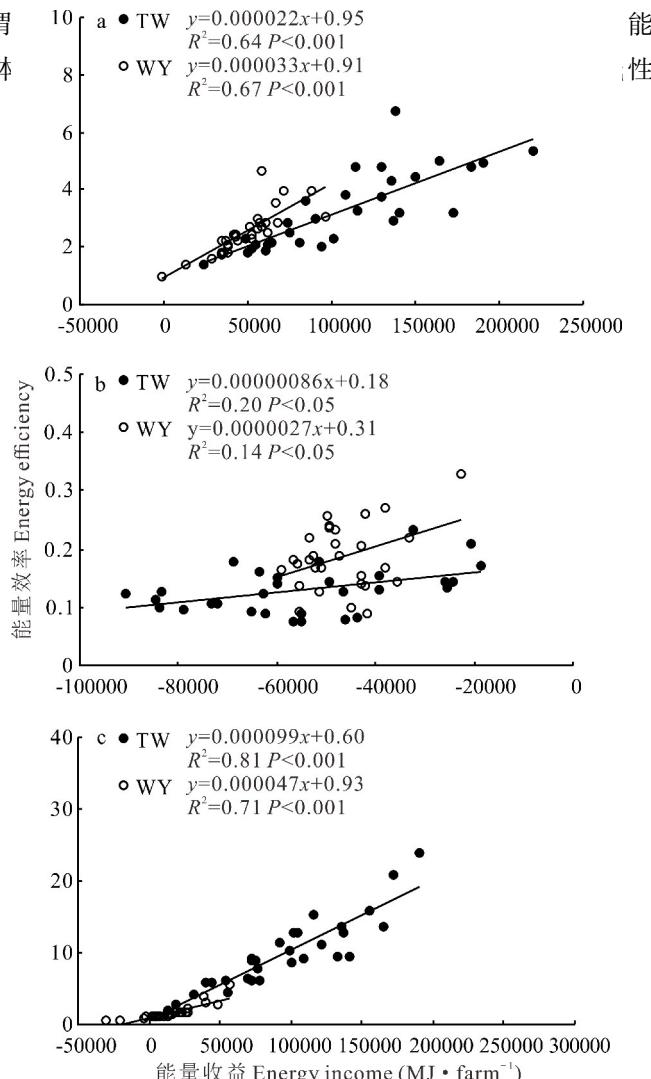


图 3 不同系统能量收益与能量效率的关系

Fig. 3 Relationships between energy income and energy efficiency in different systems

a:作物系统能量收益与能量效率关系 The relationship between energy income and energy efficiency in crop system;b:家畜系统能量收益与能量效率关系 The relationship between energy income and energy efficiency in livestock system;c:综合系统能量收益与能量效率关系 The relationship between energy income and energy efficiency in integrated system.

4 结论

黄土高原—青藏高原过渡带,海拔、降水和热量等自然因子一定程度上决定了作物种植和家畜养殖规模,农户生产系统自东向西以作物系统为主向家畜系统为主过渡。农业生产优化化肥、农药等人工能的组合,均衡系统内各要素能量投入比例,增强人工能对农业系统的调控,提高系统内农作物对太阳能的转化与传递效率,进而对农业系统起到“四两拨千斤”的增益作用。在农业生产过程中,促进作物一家畜系统耦合,调整种养结构,可以解放系统生产潜力,降低农(牧)户从事农业生产的风险,缓解为追求经济而造成的能力利用浪费,从而实现区域系统结构最优化与收益最大化,提高可持续性。

参考文献 References:

- [1] Ren J Z, Ma Z F, Liang T G, et al. Developing an agro-grassland think tank system to assist agricultural structure transformation in China. *Acta Prataculturae Sinica*, 2017, 26(3): 191—198.
任继周, 马志愤, 梁天刚, 等. 构建草地农业智库系统, 助力中国农业结构转型. 草业学报, 2017, 26(3): 191—198.
- [2] Zhou J, Xiang P A. Ecological energy analysis of different paddy ecosystems in Hunan Province. *Scientia Agricultura Sinica*, 2018, 51(23): 4496—4513.
周江, 向平安. 湖南不同季别稻作系统的生态能值分析. 中国农业科学, 2018, 51(23): 4496—4513.
- [3] Bian Y S. Analysis calculation and study on the output and input ratio of the artificial supplementary energy for liu min ying agroecosystem. *Journal of Ecology and Rural Environment*, 1989, 1: 15—19.
卞有生. 留民营生态农业系统中人工辅助能产投比的计算、分析与研究. 生态与农村环境学报, 1989, 1: 15—19.
- [4] Wei X H, Lin H M, Hu H J. Analysis of input and output of energy and energy efficiency in cropland-ecosystem of Hexi district, Gansu. *Acta Prataculturae Sinica*, 2001, 10(3): 79—84.
魏小红, 蔺海明, 胡恒觉. 甘肃河西地区农田生态系统能量投入产出及效率分析. 草业学报, 2001, 10(3): 79—84.
- [5] Pulselli R M, Simoncini E, Pulselli F M. Energy analysis of building manufacturing, maintenance and use: Em-building indices to evaluate housing sustainability. *Energy and Buildings*, 2007, 39(5): 620—628.
- [6] Zhou L F, Wu W, Yan G S, et al. Analysis on energy value of Shifosi constructed wetland ecosystem and regional development. *Ecological Economy*, 2014, 30(4): 149—152.
周林飞, 武祎, 闫功双, 等. 石佛寺人工湿地生态系统能值分析与发展评价. 生态经济, 2014, 30(4): 149—152.
- [7] Wang M Y, Gao X Y, Hou F J. Energy analysis of farmer producing system in transitional zone of Qinghai-Tibet Plateau on Loess Plateau as an example. *Acta Ecologica Sinica*, 2019, 39(5): 1758—1771.
王梦媛, 高小叶, 侯扶江. 黄土高原—青藏高原过渡区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): 1758—1771.
- [8] Guo L N, Zhang M H, Wang H N. Evaluation of agricultural ecosystems in Tangshan city based on energy theory. *Research of Soil and Water Conservation*, 2017, 24(2): 300—306, 313.
郭力娜, 张梦华, 王海南. 基于能值理论的唐山市农业生态系统评价. 水土保持研究, 2017, 24(2): 300—306, 313.
- [9] Hou F J, Nan Z B, Ren J Z. Integrated crop-livestock production system. *Acta Pratacultura Sinica*, 2009, 18(5): 211—234.
侯扶江, 南志标, 任继周. 作物一家畜综合生产系统. 草业学报, 2009, 18(5): 211—234.
- [10] Yan Z G, Li W, Yan T H, et al. Evaluation of energy balances and greenhouse gas emissions from different agricultural production systems in Minqin Oasis, China. *The Journal of Life and Environmental Sciences*, 2019, 7: 6890—6918.
- [11] Lou S N, Chen X J, Hou F J. Carbon balance analysis methods of grassland agro-ecosystems. *Acta Ecologica Sinica*, 2017, 37(2): 557—565.
娄珊宁, 陈先江, 侯扶江. 草地农业生态系统的碳平衡分析方法. 生态学报, 2017, 37(2): 557—565.
- [12] Li X P, Han J P, Yang D G. Agricultural ecosystem energy flow an analysis based on peasant house holds. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2008, 16(6): 1535—1540.
李秀萍, 韩剑萍, 杨德刚. 基于农户的农业生态系统能流分析. 中国生态农业学报, 2008, 16(6): 1535—1540.
- [13] Odum H T, Odum E C. Energy basis for man and nature. New York: McGraw-Hill, 1976: 1—297.
- [14] Odum H T. Principle of environmental energy matching for estimating potential economic value: A rebuttal. *Coastal Zone Management*, 1980, 5(3): 239—243.
- [15] Odum H T. Remarks on the future of ecology. *Intecol Bulletin*, 1980, 7(8): 21—24.
- [16] Odum H T. Energy analysis evaluation of coastal alternatives. *Water Science and Technology*, 1984, 16: 717—734.
- [17] Odum H T. Energy and agriculture. Berlin: Springer-Verlag, 1984: 24—51.
- [18] Diamond C. Energy basis for the regional organization of the Mississippi River Basin. Florida: University of Florida, 1984.
- [19] Martin J F, Stewart A W, Diemont S A, et al. Energy evaluation of the performance and sustainability of three agricultural systems with different scales and management. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 2006, 115(1): 128—140.
- [20] La Rosa A D, Siracusa G, Cavallaro R. Energy evaluation of Sicilian red orange production. A comparison between organic and conventional farming. *Journal of Cleaner Production*, 2008, 16: 1907—1914.
- [21] Deng J, Zhao F Z, Han X H. Energy analysis on different planting patterns of typical watersheds in Loess Plateau. *Journal of*

- Applied Ecology, 2016, 27(5): 1576—1584.
- 邓健, 赵发珠, 韩新辉. 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.
- [22] Liu C G, Huang Q, Deng M R, et al. Energy, material and values flows in the different systems of Chinese prickly ash-crop intercropping in the upper reaches of the Minjiang river. Ecology and Environment Sciences, 2013, 22(1): 116—122.
- 刘成刚, 黄强, 邓铭瑞, 等. 岷江上游椒农间作模式能流、物流及价值流研究. 生态环境学报, 2013, 22(1): 116—122.
- [23] Wu C C, Gao X Y, Hou F J. Carbon balance of household production system in the transition zone from the Loess Plateau to the Qinghai-Tibet Plateau, China. Chinese Journal of Applied Ecology, 2017, 28(10): 3341—3350.
- 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.
- [24] Ren J Z, Liang T G, Lin H L, et al. Study on grassland's response to global climate change and its carbon sequestration potentials. Acta Prataculturae Sinica, 2011, 20(2): 1—22.
- 任继周, 梁天刚, 林慧龙, 等. 草地对全球气候变化的响应及其碳汇潜势研究. 草业学报, 2011, 20(2): 1—22.
- [25] Yan Z G, Hou F J, Yan T H. Evaluation of greenhouse gas emission from three contrasting integrated crop and livestock production systems during 1991—2016 in Gansu of China. Pakistan Journal of Agricultural Sciences, 2019, 56(2): 24—39.
- [26] Huang Z W, Yang D G, Li X P, et al. Analysis on energy flow of the farmer households and the characteristics of the eco-economic fractals in the middle and lower reaches of the Tarim River. Arid Zone Research, 2004, 3: 117—121.
- 黄子蔚, 杨德刚, 李秀萍, 等. 塔里木河中下游农户能流分析及生态经济分形特征. 干旱区研究, 2004, 3: 117—121.
- [27] Pimentel D. Handbook of energy utilization in agriculture. Experimental Agriculture, 1980, 15(1): 45—48.
- [28] Burhan O, Handan A, Cemal F. Energy input-output analysis in Turkish agriculture. Renewable Energy, 2004, 29: 29—51.
- [29] Nautiyal S, Maikhuri R K, Semwal R L, et al. Agroforestry systems in the rural landscape—a case study in Garhwal Himalaya, India. Agroforestry Systems, 1998, 41: 151—165.
- [30] Hu X D, Wang L C, Xue L L, et al. Study on sustainable development of agro-ecosystem in China western region based on EMA and GIS. Journal of Southwest University (Natural Science Edition), 2010, 32(2): 7—12.
- 胡小东, 王龙昌, 薛兰兰, 等. 基于能值分析方法的中国西部地区农业生态系统可持续发展研究. 西南大学学报(自然科学版), 2010, 32(2): 7—12.
- [31] Zhang C L. Agricultural diversity and resource efficiency of small households on eastern Gansu Loess Plateau. Lanzhou: Lanzhou University, 2012.
- 张重丽. 陇东黄土高原小农户生产系统农业多样性与资源利用效率. 兰州: 兰州大学, 2012.
- [32] Pielou E C. Ecological diversity. New York: Wiley Publishing, 1975.
- [33] Peng L X, Gao X Y, Hou F J. The economic benefits of integrated farming system in the transitional region from Loess Plateau to Qinghai-Tibet Plateau—A case study of Tongwei—Weiyuan—Xiahe transect. Chines Science Bulletin, 2018, 63(2): 201—214.
- 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. 科学通报, 2018, 63(2): 201—214.
- [34] Li H, Wang J K, Pei J B, et al. Equilibrium relationships of organic carbon in the main croplands of northeast China based on structural equation modeling. Acta Ecologica Sinica, 2015, 35(2): 517—525.
- 李慧, 汪景宽, 裴久渤, 等. 基于结构方程模型的东北地区主要旱田土壤有机碳平衡关系研究. 生态学报, 2015, 35(2): 517—525.
- [35] Cui D, Li Rui, Chen Y, et al. An evaluation of the water environmental carrying capacity using structural equation modeling: A case study of the upstream areas of Xiaoxia Bridge Section in Huangshui river basin. Acta Scientiae Circumstantiae, 2019, 39(2): 624—632.
- 崔丹, 李瑞, 陈岩, 等. 基于结构方程的流域水环境承载力评价——以湟水流域小峡桥断面上游为例. 环境科学学报, 2019, 39(2): 624—632.
- [36] Wu M L. Structural equation modeling. Chongqing: ChongQing University Press, 2010: 1—50.
- 吴明隆. 结构方程模型. 重庆: 重庆大学出版社, 2010: 1—50.
- [37] Yang Y G, Chen Z F, Zan L S. The production status, problems and countermeasures of corn silage in Northwest China. China Cattle Science, 2016, 42(4): 69—72.
- 杨云贵, 陈志飞, 詹林森. 西北地区青贮玉米的生产现状、问题及对策. 中国牛业科学, 2016, 42(4): 69—72.
- [38] Yang X M. Alfalfa planting and dairy cattle feeding. China Cattle Science, 2003, 29(3): 53—58.
- 杨效民. 种植苜蓿与饲养奶牛. 中国牛业科学, 2003, 29(3): 53—58.
- [39] Li X L, Shen Y Y, Wang L Q. Potential analysis and policy recommendations for restructuring the crop farming and developing forage industry in China. Strategic Study of Chinese Academy of Engineering, 2016, 18(1): 94—105.
- 李向林, 沈禹颖, 万里强. 种植业结构调整和草牧业发展潜力分析及政策建议. 中国工程科学, 2016, 18(1): 94—105.
- [40] Ren J Z, Lin H L. Promoting prataculture development in arable region to ameliorate the farming system and insure food security in China. Acta Prataculturae Sinica, 2009, 18(5): 1—9.
- 任继周, 林慧龙. 农区种草是改进农业系统, 保证粮食安全的重大步骤. 草业学报, 2009, 18(5): 1—9.
- [41] Kragt M E, Pannell D J, Robertson M J. Assessing costs of soil carbon sequestration by crop-livestock farmers in Western

- Australia. Agricultural Systems, 2012, 112: 27—37.
- [42] Ren J Z, Nan Z B, Lin H L. Taking the grassland agro-system to insure food security. Acta Prataculturae Sinica, 2005, 14(3): 1—10.
任继周, 南志标, 林慧龙. 以食物系统保证食物(含粮食)安全—实行草地农业, 全面发展食物系统生产潜力. 草业学报, 2005, 14(3): 1—10.
- [43] Gao P, Wang Z F, Chang S H, et al. Livestock production features and development strategy in main ecological regions of northwest of China. Pratacultural Science, 2014, 31(12): 2316—2322.
高鹏, 王召锋, 常生华, 等. 西北主要生态区家畜生产特征及发展对策分析. 草业科学, 2014, 31(12): 2316—2322.
- [44] Qian Y Q, Sun Z Y, Han L, et al. Simulation of clonal growth curve based on nonlinear models of logistic and gompertz for buffalo grass (*Buchloe dactyloides* (Nutt.) EngelmTexoka). Scientia Agricultural Sinica, 2011, 44(11): 2252—2259.
钱永强, 孙振元, 韩蕾, 等. 基于 Logistic 与 Gompertz 非线性模型的野牛草克隆生长模拟与分析. 中国农业科学, 2011, 44(11): 2252—2259.
- [45] Deng J, Brown J H. Models and tests of optimal density and maximal yield for crop plants. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, 2012, 109(39): 15823—15828.
- [46] Wang Z F, Guan J, Su Z X. Prediction of China's population increase based on Logistic model. Journal of Bohai University (Natural Science Edition), 2010, 31(4): 326—330.
王志福, 管杰, 苏再兴. 基于 Logistics 模型的中国人口增长预测. 渤海大学学报(自然科学版), 2010, 31(4): 326—330.
- [47] Ma S X. Development status and countermeasures of grassland animal husbandry in Xiahe County. Agricultural Science and Information, 2009, 5: 44—45.
马生祥. 夏河县草原畜牧业发展现状与对策. 农业科技与信息, 2009, 5: 44—45.
- [48] Hao H G, Li X B, Tan M H, et al. An analysis on crops choice and its driving factors in the agro-pastoral ecotone in Northern China——A case of household survey in Taibus County, Inner Mongolia. Journal of Natural Resources, 2011, 7: 1107—1118.
郝海广, 李秀彬, 谈明洪, 等. 农牧交错区农户作物选择机制研究——以内蒙古太仆寺旗为例. 自然资源学报, 2011, 7: 1107—1118.
- [49] Gao X Y, Hou F J. Preliminarg discussion of agricultural structure and economy from Qinghai Tibet to Loess Plateau. Pratacultural Science, 2011, 28(8): 1556—1560.
高小叶, 侯扶江. 浅析青藏高原向黄土高原过渡的农业系统结构和经济特征——以夏河—渭源—通渭样带为例. 草业科学, 2011, 28(8): 1556—1560.
- [50] Yang F, Wu Y C, Wei W S. Study on agriculture ecological sustainable development index based on energy analysis. Chinese Journal of Agricultural Resources and Regional Planning, 2017, 38(11): 17—23.
杨芳, 吴永常, 韦文珊. 基于能量分析的农业生态可持续发展指数方法研究. 中国农业资源与区划, 2017, 38(11): 17—23.
- [51] Ren J Z, Hou F J, Zhang Z H. Developing grassland agriculture and advancing sustainable development in western China. Advance in Earth Sciences, 2000, 15(1): 19—24.
任继周, 侯扶江, 张自和. 发展草地农业推进我国西部可持续发展. 地球科学进展, 2000, 15(1): 19—24.
- [52] Wang Y, Yang Y T, Yang J, et al. Current state of species diversity and pest management. Chinese Journal of Biological Control, 2015, 31(5): 801—810.
王一, 杨雅婷, 杨静, 等. 物种多样性与病虫草害管理研究进展. 中国生物防治学报, 2015, 31(5): 801—810.
- [53] Huang G Q, Zhao Q G. Mode of rotation/fallow management in typical areas of China and its development strategy. Acta Pedologica Sinica, 2018, 2: 283—292.
黄国勤, 赵其国. 中国典型地区轮作休耕模式与发展策略. 土壤学报, 2018, 2: 283—292.
- [54] Melannie D, Hartman, Emily R, et al. Impact of historical land-use changes on greenhouse gas exchange in the U. S. Great Plains, 1883—2003. Ecological Applications, 2011, 21(4): 1105—1119.

DOI:10.11686/cyxb2019506

<http://cyxb.magtech.com.cn>

滕锐,李广,罗永忠,等.基于生态足迹的玛曲县近10年可持续发展研究.草业学报,2020,29(9):20—27.

Teng R, Li G, Luo Y Z, et al. Research on sustainable development of Maqu County over the past decade based on ecological footprint. Acta Prataculturae Sinica, 2020, 29(9): 20—27.

基于生态足迹的玛曲县近10年可持续发展研究

滕锐¹,李广^{1*},罗永忠²,于文辉³,马维伟²,陈国鹏²,
刘强¹,王钧¹,卓玛草²,袁建钰²,张尚文²

(1. 甘肃农业大学信息科学技术学院,甘肃 兰州 730070; 2. 甘肃农业大学林学院,甘肃 兰州 730070;

3. 甘肃民勤连古城国家级自然保护区管理局,甘肃 民勤 733399)

摘要:玛曲县是稳定与维护青藏高原和黄河上游生态系统的重要屏障。研究其生态环境与社会经济发展的可持续性具有重要意义。应用生态足迹模型对玛曲县2007—2016年的生态足迹、生态承载力、生态赤字及可持续发展指数变化进行了研究。结果表明,10年间研究区人均生态足迹显著增加,由2007年的4.26 hm²增加到2016年的5.91 hm²,增幅达到38.73%,草地在该区域人均生态足迹中占98.83%;生态承载力从2007年的3.74 hm²下降到2016年的3.04 hm²,降幅达到18.72%,草地和林地占到了人均生态承载力的88.04%;该区域10年均呈现生态赤字,总体生态安全形势较弱,处于弱不可持续发展状态。草地是玛曲县主要生态足迹消耗资源,且草地消费需求和草地退化之间的矛盾突出,应加强对该区域草地生态的保护。

关键词:玛曲县;生态足迹;生态承载力;生态赤字;可持续发展

* Research on sustainable development of Maqu County over the past decade based on ecological footprint

TENG Rui¹, LI Guang^{1*}, LUO Yong-zhong², YU Wen-hui³, MA Wei-wei², CHEN Guo-peng², LIU Qiang¹, WANG Jun¹, ZHUO Ma-cao², YUAN Jian-yu², ZHANG Shang-wen²

1. College of Information Science and Technology, Gansu Agricultural University, Lanzhou 730070, China; 2. College of Forest, Gansu Agricultural University, Lanzhou 730070, China; 3. Gansu Minqin Liancheng National Nature Reserve Administration, Minqin 733399, China

Abstract: Maqu County is an important indicator region for the stability and maintenance of the Qinghai-Tibet Plateau and includes the upper reaches of the Yellow River. It is of great significance to study the sustainability of its ecological environment and social and economic development. The ecological footprint model was applied to study the changes in per capita ecological footprint, ecological carrying capacity, ecological deficit and sustainable development index of Maqu County from 2007 to 2016. The results indicate that the per capita ecological footprint of the study area increased significantly in the past 10 years, from 4.26 ha in 2007 to 5.91 ha in 2016, an increase of 38.73%. Pasture accounted for 98.83% of the per capita ecological footprint of the region, ecological carrying capacity trended downward from 3.74 ha in 2007 to 3.04 ha in 2016, with a drop of 18.72%. In this region, all 10 years for which data were analyzed showed an ecological deficit, and the overall ecological security situation was very weak and unsustainable. Pasture is the main resource for consumption in ecological footprint evaluation in Maqu County, and the imbalance between demand for pasture forage for consumption and sustainable supply, with resulting pasture degradation, is strongly evident. Therefore the protection of grassland through adoption of ecologically sustainable practice in this area should become apriority.

* 收稿日期:2019-11-20;改回日期:2019-12-30

基金项目:甘肃省财政专项(SSCZZ-20160909),2020年甘肃省重点人才项目,甘肃省重点研发计划(18YF1NA070),甘肃省高等学校协同创新团队项目(2018C-16)和甘肃省林业厅沙化封禁保护区社会效益监测(XZ20190205)资助。

作者简介:滕锐(1995-),女,甘肃张掖人,在读硕士。E-mail: 980402893@qq.com

* 通信作者 Corresponding author. E-mail: lig@gasu.edu.cn

Key words: Maqu County; ecological footprint; ecological carrying capacity; ecological deficit; sustainable development

玛曲县位于青藏高原东部边缘,是黄河上游重要的“蓄水池”和“水源补给区”^[1],每年供给黄河 30% 的水量^[2]。玛曲县拥有天然草原面积 89 万 hm²,是甘南高原最大的绿色生态屏障,具有特殊的生态保护功能。近年来,随着气候的暖干化和人类活动的不断加剧,玛曲逐渐成为青藏高原草地沙化最严重的区域之一,可持续发展受到了严重威胁,研究玛曲县不同时期生态及经济可持续状态对其生态环境与社会经济发展十分重要。

生态足迹是一个维持人、地区、国家生存所需要的或能够容纳人类所排放废弃物的,且具有生物生产力的地域面积。生态足迹法(ecological footprint)作为一种区域可持续发展的度量方法,被广泛用在国外很多国家和地区可持续态势的研究上^[3]。1999 年生态足迹法被我国学者徐中民等^[4-5]首次应用。国内有学者对生态足迹模型进行研究,也有对某一地区的各个领域进行分析的,如对城市和区域研究^[6-7]、旅游业^[8]、水资源足迹等^[9],及杨丹荔等^[10]基于生态足迹模型在西南地区典型资源型城市攀枝花进行了可持续发展研究。近年来,由于玛曲县生态环境不断恶化,针对玛曲县生态环境的研究也越来越多,但基于生态足迹模型的可持续发展研究还较少。本研究以玛曲县为研究区,利用生态足迹模型核算该县 2007—2016 年的生态足迹、生态承载力、生态赤字及可持续发展指数,据此评价玛曲县资源环境的供需矛盾及可持续状态,剖析人口急剧增长和生活水平提高对资源需求、土地承载力及草地生态系统的影响,为玛曲县经济社会健康可持续发展提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

玛曲县位于青藏高原东部边缘,甘肃省西南角,地处甘、青、川三省结合部,九曲黄河之首。地处东经 100°45'45"—102°29'00",北纬 33°06'30"—34°30'15",玛曲县气候属明显的高原大陆性高寒湿润区,境内平均海拔 3500~4800 m,气候寒冷阴湿。全县国土总面积 101.90 万 hm²,其中草地 78.48 万 hm²,林地 8.67 万 hm²,水域 9.33 万 hm²,居民、工矿交通用地 0.30 万 hm²,未利用地 4.32 万 hm²。玛曲县是甘肃省唯一的纯牧业县,草地面积占全县总面积的 77.63%。草原畜牧业是全县国民经济的主导产业和特色产业。

1.2 研究方法

本研究使用国际通用的生态足迹模型,计算公式如下:

1) 生态足迹

$$EF = N \times ef = N \times r_j \times \sum (aa_i) = N \times r_j \times \sum \left(\frac{c_i}{p_i} \right) \quad (1)$$

式中,EF 为该县总的生态足迹(hm²);N 为该县总人口数;ef 为该县人均生态足迹(hm²);i 为核算中消费类型;aa_i 为第 i 项消费项目人均占用的实际生态生产性土地面积(hm²);c_i 为第 i 项的人均年消费量;p_i 为第 i 项消费商品的年全球平均产量(kg · hm⁻²);r_j 为土地利用均衡因子;j 为生产性空间的类型(j=1,2,3,4,5,6)。

$$B = \frac{Q}{P \times N} \times r_j \times y_i \quad (2)$$

式中,B 为消纳废弃物所需要占用的人均生产性面积;Q 为县域年内处理垃圾的总费用;P 为玛曲县年内单位面积耕地创造的产值;N、r_j 同公式(1);y_i 为产量因子。

2) 生态承载力

$$ec = \sum_{j=1}^6 (r_j \times a_j \times y_i) \quad (3)$$

$$EC = N \times ec \quad (4)$$

式中,ec 为人均生态承载力(hm²);EC 为该县实际总生态承载力(hm²);a_j 为第 j 类型生产性空间的人均实际占有面积(hm²);i,j,r_j,y_i,N 含义同公式(1)(2)。

3) 生态盈亏与可持续发展指数

$$eb = ef - ec \quad (5)$$

式中,eb 为人均生态盈亏;eb>0 时为生态赤字;eb<0 时则为生态盈余。

$$SDI = ec / (ec + ef) \quad (6)$$

式中,SDI(sustainable development index)为可持续发展指数。当 SDI 等于 0.5 时,ef 和 ec 相等,表明各项生