

DOI: 10.5846/stxb201411172273

宋乃平, 王兴, 杨新国, 吴旭东, 陈林, 米楠. 农牧交错带县域农牧系统对气候波动的响应机制. 生态学报, 2016, 36(13): - .

Song N P, Wang X, Yang X G, Wu X D, Chen L, Mi N. Response mechanisms of a county territory agro-pastoral system to climate fluctuations in an agro-pastoral transitional zone. Acta Ecologica Sinica, 2016, 36(13): - .

农牧交错带县域农牧系统对气候波动的响应机制

宋乃平, 王 兴, 杨新国, 吴旭东, 陈 林, 米 楠

宁夏大学 西北土地退化与生态恢复国家重点实验室培育基地, 西北退化生态系统恢复与重建教育部重点实验室, 银川 750021

摘要: 农牧系统过程对气候波动的响应机制既是建立农牧耦合系统的主要科学问题又是农牧交错带可持续发展的关键问题之一。以盐池县 1954—2013 年气候和农牧系统过程为例, 运用变异系数、逐步回归方法和经验模态分解法, 分析了气候、农业、牧业系统 12 个指标的波动周期、振幅和方差贡献率, 据此研究了它们之间的波动关系。结果表明: 1) 农牧系统受气候影响具有较大波动性。波动由强到弱依次为气候、农业、牧业, 呈逐级传递的特性。三者的高频波动分量的方差贡献率依次减小, 而中低频波动分量的方差依次增大。2) 近 60 年农牧系统过程主要受经济系统驱动发生趋势性变化, 同时受气候的驱动发生波动。农业在突变前受气候影响较大而突变后明显减小; 同样牧业在突变前受农业影响大, 突变后也明显减小。经济对农牧系统过程的影响逐渐增强。它在提高和稳定粮食总产量同时导致家畜数量特别是羊只总数的剧增, 使得牧业波动加剧。3) 农牧系统的波动差异、相互关联以及对气候的响应的分析表明, 农牧耦合系统具有减少内部要素波动性的功能。因此, 依据生态和经济规律设计具有健全正负反馈机制的农牧耦合系统是实现农牧交错带农牧业可持续发展的重要途径。

关键词: 农牧系统; 气候波动; 响应机制; 农牧交错带; 盐池县

Response mechanisms of a county territory agro-pastoral system to climate fluctuations in an agro-pastoral transitional zone

SONG Naiping*, WANG Xing, YANG Xinguo, WU Xudong, CHEN Lin, MI Nan

Breeding Base for State Key Laboratory of Land Degradation and Ecological Restoration in Northwest China, Key Laboratory for Restoration and Reconstruction of Degraded Ecosystem in North-western China of Ministry of Education, Ningxia University, Yinchuan 750021, China

Abstract: The response mechanism of an agro-pastoral system to climate fluctuations is one of the major scientific challenges associated with the establishment of an agro-pastoral coupling system, as well as being a key problem related to the sustainability of an agro-pastoral transitional zone. By using stepwise regression analysis (SRA) and empirical mode decomposition method, we evaluated the dynamics of climate fluctuation and the corresponding changes in the agro-pastoral system of Yanchi County between 1954 and 2013. The range, amplitude, and variance contribution rate were analyzed for 12 indicators in the climate system, agricultural system, and animal husbandry system. Furthermore, we explored the relationships among fluctuations in climate, agriculture, and animal husbandry. The results demonstrated the presence of clear fluctuations in the agro-pastoral system, which corresponded to climate fluctuations in the past 60 years. The sequence of fluctuations ranging from strong to weak comprised the climate, agriculture, and animal husbandry systems. The amount of variance contributed by high-amplitude intrinsic mode functions (IMFs) was the highest for climate indicators, followed by agricultural indicators and animal husbandry indicators. However, the amounts of variance contributed by medial- and low-amplitude IMFs exhibited the opposite trend, increasing from climate indicators to agricultural indicators and then animal husbandry indicators. The SRA showed that the main factors contributing to the fluctuations were annual

基金项目: 国家重点基础研究计划(973)前期专项(2012CB723206); 国家科技支撑计划(2011BAC07B03); 宁夏大学 211 建设项目

收稿日期: 2014-11-17; 网络出版日期: 2015-00-00

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: songnp@163.com

precipitation, followed by the total grain output and total number of sheep. Thus, the amplitude of the system was higher when it was more controlled by nature. Furthermore, the agriculture and animal husbandry systems generally exhibited changes due to the combined effects of economic factors and climate fluctuation during the past 60 years. Agriculture was affected the most strongly by climate before 1999 when an abrupt change occurred, but subsequently, the effects were weak. Similarly, animal husbandry was affected the most strongly by agriculture before the abrupt change point, and the effects were weaker thereafter. In addition, in recent years, both the agriculture and animal husbandry systems have been increasingly influenced by economic factors. The input of water and capital has improved and stabilized the total grain yield, thereby leading to dramatic increases and further extreme fluctuations in livestock numbers. Finally, the differences in the fluctuations, correlations, and climate response features of the agriculture and animal husbandry systems demonstrated that coupling these systems may help to reduce fluctuations in these individual systems. Therefore, it is important to design an agriculture and animal husbandry coupling system with balanced positive and negative feedback according to the rules of ecology and economics in order to achieve sustainability in the agro-pastoral transitional zone.

Key Words: agro-pastoral system; agro-pastoral transitional zone; climate fluctuation; response mechanism; Yanchi County in the Hui Autonomous Region of Ningxia

农牧交错带的脆弱性主要由过程波动和界面脆弱两方面造成的。降水量少且波动性强,由此引起农田、草地、林地的生产力波动,进一步向牧业系统传递^[1]。波动性引发的土地利用和人类活动的机会主义因素,对生态系统维持的危害极大^[2-3]。自然系统波动的突变性、随机性与社会系统的稳定性、保守性形成了尖锐的矛盾^[4]。对此问题,史培军等人提出建立“波动性农牧业”的观点^[5]。孙武认为牧草、粮食会放大降水的波动性^[4]。系统的波动性、人口压力、脆弱性三者之间在空间分布和成因上均有密切的联系^[6]。并且认为,荒漠草原的波动性最大,由此向两侧的草原化荒漠和典型草原降低^[1]。非洲半干旱地区和南美洲干湿交替地区的生态系统年际间也具有显著的波动性^[7-8],当地农牧民的许多传统习惯以及土地利用的策略都与波动密切相关^[9-10]。建立稳定的农牧耦合系统是缓解这些地区生态与生产矛盾的重要途径,农牧系统对气候波动的响应及传导机制是其主要科学问题。但目前关于农牧耦合系统稳定性的研究较少,尤其缺乏波动结构分析及其在系统内部传递过程的研究。盐池县近 60 年经历了从草地畜牧业为主到大力发展农业再到农林牧结合的发展过程,为农牧结构变化及其耦合系统对气候波动的响应机理研究提供了良好材料。

1 研究区域与研究方法

1.1 研究区概况

盐池县位于我国北方农牧交错带北缘、宁夏回族自治区东部,地理坐标 37°04′—38°10′N, 106°30′—107°47′E,面积约 6769 km²。以麻黄山为界,北部为组成鄂尔多斯高原的剥蚀准平原,南部为黄土丘陵。属于典型中温带大陆性气候,年均气温为 8.4 °C,年均无霜期为 160 d;境内多年平均降水量在 250—350 mm,从东南向西北递减,县城多年平均降水量为 292 mm,1954—2013 年年降水变率为 29.71%。土壤类型以灰钙土、风沙土、黑垆土为主,还有少量盐碱土。植被类型主要有干草原、荒漠草原、沙生及隐域性的盐生植被和草甸植被。耕地面积 88879 hm²,占全县国土面积的 13.36%。粮食播种面积占总播种面积的比例从 1954 年的 82.03%减少到 2013 年的 55.32%。盐池县从 1970 年代发展井灌,1988 年开始建设扬黄灌溉工程,目前已发展扬黄灌溉面积 13140 hm²,井灌面积 3553 hm²。草地面积占全县总面积的 58.67%,林地占 10.55%。畜牧业产值在农林牧渔总产值中的比重为 21.90%—87.38%,1954—2013 年平均为 49.87%,属偏牧型农牧交错区。1954—2013 年的家畜数量为 480935(1976 年)—1494261(2011 年)羊单位,羊占家畜数量的比重在 69.31%(1976 年)—97.99%(2013 年)(图 1)。

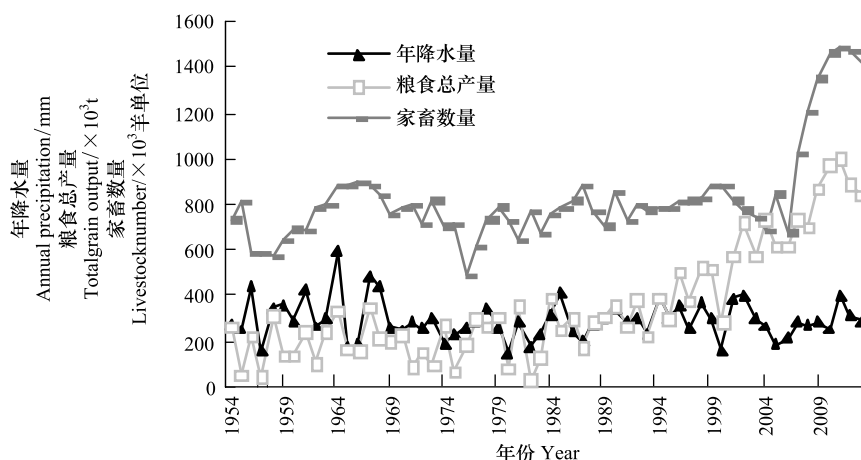


图1 近60年盐池县降水量、粮食产量、家畜数量变化

Fig.1 Precipitation, output of grain and livestock number of Yanchi County in the recent 60 years

1.2 资料来源与研究方法

(1) 资料来源

本研究统计数据来自《盐池县五十年》和《盐池县经济要情手册(2011—2013)》,气象数据来自盐池县气象局,灌溉数据来自盐池县水务局,植被指数来源于参考文献[11-12]。

(2) 波动性测度方法

通常用生产力变异系数来表示波动性,本文分别用粮食总产量和家畜数量的变异系数表示盐池县农业系统和牧业系统的波动性。其中家畜数量是牛、马、驴、骡、羊等大小牲畜按照各自的折算系数折合为标准羊单位的加总数量。

$$C_v = Sd/M \quad (1)$$

式中, C_v 代表指标的变异系数, Sd 代表标准差, M 代表平均值。

(3) 多元逐步回归分析法

用SPSS统计分析软件中的 regression 功能,参考鲁欣等对宁夏粮食产量主要因素的研究结果[13]和牛创民等对盐池县粮食产量的主要因素研究结果[14],结合课题组在盐池县的调查和数据的可获得性,本研究选择年降水量、年平均气温、引黄灌溉水量、有效灌溉面积、粮食播种面积、化肥施用量、农业机械总动力作为粮食总产量的影响因子。参考周道玮等草地畜牧业系统的要素研究[15]和周海林对盐池县畜牧业主要因素的研究结果[16],结合盐池县牧业特点和数据的可获得性,选择年降水量、年平均气温、引黄河灌溉水量、有效灌溉面积、粮食播种面积、粮食总产量、当年造林面积、草场面积、植被指数、农业劳动力、农民人均纯收入作为家畜数量的影响因子。进行多元回归分析,比较各主要指标对粮食总产量和家畜数量的相对重要性。

(4) 经验模态分解法(empirical mode decomposition, EMD)

将时间信号 $X_{(t)}$ 分解成一系列本征模态函数(intrinsic mode function, IMF),每个 IMF 分量具有如下特征:从全局特征上看,极值点数和零点数目相等或者至多相差一个;分别连接其局部极大值和局部极小值所形成的两条包络线的均值在任一点处为零。EMD 分解过程的主要步骤为:从时间序列数据 $X_{(t)}$ 中将具有不同大小时间尺度的模态分离出来,产生一系列本征模态函数分量;逐级进行平稳化处理,把不同周期的波动从原信号中分离出来,最后得到趋势量。所分解出的 IMF 包含并突出了原信号的局部特征信息,并且各 IMF 分量分别包含了原信号的不同时间尺度的局部特征信息^[17]。

2 结果与分析

2.1 气候—农业—牧业系统波动的时间序列特征

根据数据的可获得性以及盐池县各层级生产力的相关性,用年降水量、粮食总产量、家畜数量分别作为气

候、农业、牧业系统的主要指标,并研究它们的波动性(表1)。根据盐池县年降水量、粮食总产量和家畜数量突变点,将其分为两个阶段。1954—1999年为平稳波动期,这一阶段粮食总产量围绕19011t上下波动,基本呈现平稳趋势;家畜数量呈现两轮上升再下降的长周期波动,在1990年代呈现少有的低波动平稳态势。2000—2013年为上升波动期,伴随扬黄灌区开发和草原恢复显效,粮食总产量呈上升与波动复合的趋势;家畜数量大幅上升(图1)。

近60a,粮食总产量的波动程度最大,其次是降水量,最后是家畜数量。平稳波动期的情况与此相同,但在近14a的上升波动期,粮食总产量的波动性大幅降低,且波动最小,牧业的波动性大幅增加,居于首位。平稳波动期的粮食总产量与降水量在0.01水平上显著相关,二者在上升波动期在0.10水平上相关。年降水量与家畜数量的相关性不显著,但是粮食总产量与家畜数量显著相关,与翌年家畜数量极显著相关。说明年降水量、粮食总产量、家畜数量之间存在逐步传递关系。尤其是粮食总产量对牧业的支持作用更加显著。

表1 气候—农业—牧业系统的波动性和相关性

Table 1 Volatility and relationship of climate, agriculture and husbandry in the recent 60 years

项目 Items	平稳波动期 Steady period with fluctuation (1954—1999)	上升波动期 Rise period with fluctuation (2000—2013)	近60年 In the recent 60 years (1954—2013)	突变年份 The year that abrupt change point occurred
降水量波动性(C_v) Fluctuation of precipitation	0.2828	0.2429	0.2971	1993, 2000
粮食总产量波动性(C_v) Fluctuation of grain output	0.4364	0.1770	0.6999	1999
家畜数量(以羊单位计)波动性(C_v) Fluctuation of livestock numbers in sheep unit	0.1237	0.3071	0.2623	2000
降水量与粮食总产量R R value of precipitation and grain output	0.4531 ***	0.4601 *	0.2073	—
降水量与当年家畜数量R R value of precipitation and livestock numbers in current year	0.1036	0.2047	0.0655	—
降水量与翌年家畜数量R R value of precipitation and livestock numbers in the next year	0.2372	0.1247	0.0895	—
粮食总产量与当年家畜数量R R value of grain output and livestock numbers in current year	0.2885 **	0.7456 ***	0.7249 ****	—
粮食总产量与翌年家畜数量R R value of grain output and livestock numbers in the next year	0.5486 ****	0.7622 ****	0.7808 ****	—

***表示在0.001置信水平相关; **表示在0.01置信水平相关; *表示在0.05置信水平相关; 表示在0.10置信水平相关

2.2 气候—农业—牧业系统波动的关联性

为了进一步研究波动性在生态系统中气候、农业、牧业之间的传导机理,利用多元逐步回归分析1954—2013年粮食总产量和家畜数量突变前后各因子的作用大小及显著性。结果表明,粮食总产量在1999年突变点之前的显著性影响因子为农业机械总动力、年降水量和年平均气温,三者对粮食总产量的解释量分别为46.8%、20%、3.6%;突变之后的显著性影响因子为农业机械总动力和年降水量,二者对粮食总产量的解释量分别为73.9%和11.7%(表2)。虽然气候因子的解释量在突变后大幅减少,但始终是粮食总产量的显著性影响因子。家畜数量在2000年突变点之前的显著性影响因子为年平均气温,其对家畜数量的解释量为10.9%;在2000年突变之后的显著性影响因子为粮食总产量、农业劳动力人数和农民人均纯收入,三者对家畜数量的解释量分别为70.7%、22.8%和5.6%。气候因子的解释量在粮食总产量和家畜数量之间以及它们突变前后的差别,说明其对粮食总产量的影响大于家畜数量,在它们的突变前大于突变后。总体来看,近60a,气候对粮食总产量的影响显著,粮食总产量对家畜数量的影响显著,其中前46a的解释量比后14a更加显著。这

反映了波动在气候、农业、牧业之间的逐步传导特征;也反映了近 14 a 要素投入、扬黄灌区开发等措施在克服农牧业生产随气候波动方面效果显著。粮食生产系统中农业机械总动力等经济因子对农业生产的解释量要远高于气候对粮食的解释量,牧业生产中的粮食总产量、农业劳动力人数和农民人均纯收入等社会经济因子对牧业生产的解释量要远高于气候对家畜数量的解释量,说明盐池县农牧生产的集约化程度显著提高,稳定性维持的内在机制发生了重大改变,从而在后期表现出波动上升的发展趋势。

表 2 盐池县粮食总产量、家畜数量与各影响因子的多元逐步回归分析
Table 2 Multiple regression analysis of grain output and livestock number and their influence factors

因变量 Dependent variable	分析时段 Analysis period	模型组成 Model terms	参数 p 值 Parameter P value	决定系数 变化量/% R ² change/%	自由度 df	模型 p 值 Model P value	决定系数 R ²	方差膨胀因子 Variance inflation factor
粮食总产量 Grain output	突变前 (1954—1999)	截距	39752		45	0.029	0.704	
		农业机械总动力	<0.001	46.8				2.471
		年降水量	<0.001	20.0				1.048
		年平均气温	0.029	3.6				2.514
	突变后 (2000—2013)	截距	—13925		13	0.013	0.878	
家畜数量 Livestock numbers	突变前 (1954—2001)	农业机械总动力	<0.001	73.9				1.013
		年降水量	0.012	11.7				1.013
		截距	4.3×10 ⁵		46	0.016	0.109	
		年平均气温	0.016	10.9				1
	突变后 (2002—2013)	截距	5.7×10 ⁶		11	0.034	0.912	
		粮食总产量	0.002	70.7				1.381
		农业劳动力人数	0.01	22.8				1.249
	农民纯收入	0.024	5.6				1.666	

2.3 气候—农业—牧业系统波动的幅度

为了深入分析系统波动的特征和影响,用经验模态分解法(EMD)将农业和牧业及支持它们的气候、林草、经济方面的 12 个指标(表 4)近 60 a 的时间序列分解为数目不等的本征模态函数(IMF)分量和趋势量,并且分析它们的波动幅度及变化趋势。

年降水量以准 3 年周期的 IMF1 分量波动幅度最大,近 60 a 平均达到±55mm。1954—1968 年波动幅度最大,此后在 1978—1987、1993—2002 年有所增加,1988—1992、2003 年以来,波动幅度减少。准 4.6 a 的 IMF2 分量的波动幅度在 1978—1993 年略有增加,总体平稳。准 9 a 的 IMF3 和准 30 a 的 IMF4 的波动幅度略有下降。趋势量呈现下降并略有回升的趋势,但幅度不大。各分量呈现高频大幅波动、中频小幅波动、低频中幅波动与趋势量略有下降的组合(图 2)。结合 IMF 各分量的方差来说,准 3 a 周期波动是最主要的,对农牧业的影响最大。总体来说,年降水量波动幅度呈减下趋势。

粮食总产量也以准 3 a 周期的 IMF1 波动幅度最大,近 60 a 平均达到±7240 t。其波动幅度随时间的变化较小;短暂下降的时期,如 1970—1973、1988—1990 和近 10 a;明显的增加时期,如 1980—1985、1992—2003 年,正好与土地承包到户、扬黄灌区开发的转折相吻合。到 2004 年之后,由于扬黄灌区的成熟和经济投入提高,16693 hm²灌溉耕地大大稳定了粮食总产量,因而波动幅度明显减低。准 5.5 a 周期的 IMF2 呈现小幅增大的趋势。准 12 a 周期的 IMF3 则呈现明显减少的趋势,2005 年以后 IMF3 的波动几乎消失。各分量呈现高频大幅波动、中频中幅波动与趋势量显著上升的组合(图 2)。结合 IMF 各分量的方差,准 3 a 周期波动是最主要的。总体而言,粮食总产量呈现趋势上升和波动幅度减少的向好态势。

家畜数量波动幅度呈现出频率越高波动幅度越小的规律。准 3 a 周期的 IMF1 分量幅度很不规则,在 1957—1968 年和 1992—2001 年波动大幅减小,近 10 a 波动又急剧增大。主要是由于近 14 a 粮食总产量大增、大牲畜数量大减、植被恢复和禁牧之后饲养方式改变、羊肉价格不断攀升等,大大刺激了农户养殖的意愿。IMF2 在 1982—1995 年波动大幅减小。IMF3 和 IMF4 近 20 a 呈现明显的波动幅度增加趋势。各分量呈现高频中幅波动、中频和低频大幅波动与趋势量显著上升的组合(图 2)。结合 IMF 各分量的方差(表 4),准 3 a 和

准 26 a 周期波动更为重要。说明在消弱了自然因素对牧业的影响后,社会经济因素引起的牧业增长和波动均趋于显著。

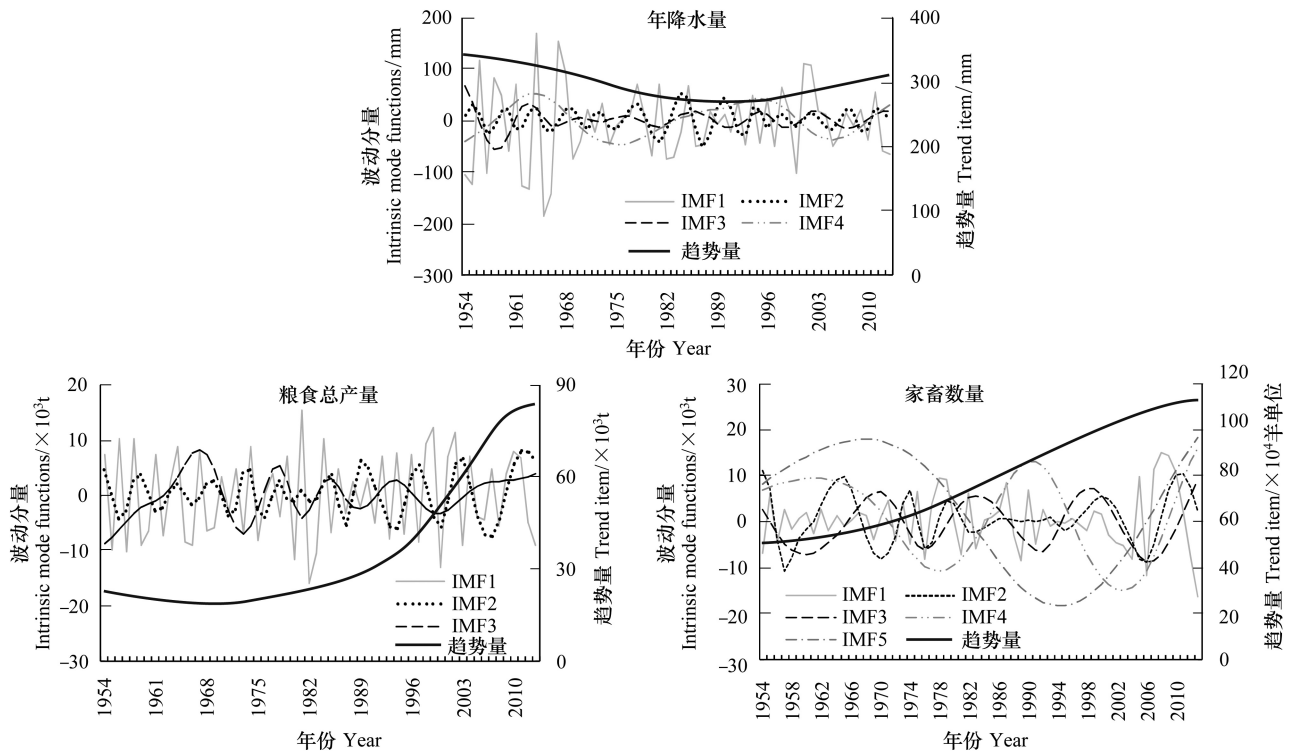


图 2 盐池县近 60 年年降水量、粮食总产量、家畜数量的波动幅度及变化趋势

Fig.2 Variance range and its trends of IMF of annual precipitation, grain output and livestock number

将上述分析与表 3 结合发现,年降水量对处于植物生产层的粮食总产量的波动幅度影响大,而对处于动物生产层的家畜数量影响小;年降水量对高频分量 IMF1 的波动幅度影响大,而对中低频分量 IMF2 和 IMF3 的影响小。剖析气候波动引起的农牧业负反馈机制(图 3)和资源经济投入引起的农牧业正反馈机制(图 4)发现,受气候波动的影响,土地生产力波动使得家畜数量处在数量增加和饲草料不足而被动下降的往复变化中。而一旦资源和经济投入增加减缓了土地生产力波动之后,又会使得家畜数量大幅增长,挑战承载能力。这是突变前后的农牧业波动的主要机制,也是牧业与农业的主要差别。这正是农牧复合的优势和切入点。家畜数量的波动特点与粮食的不同,既是农牧矛盾的表现,也是克服波动的契机。

表 3 气候—农业—牧业系统主要变量的波动幅度

Table 3 Variance range of IMF in changing of climate agriculture husbandry system factors

项目 Items	IMF1 Intrinsic mode function 1		IMF2 Intrinsic mode function 1		IMF3 Intrinsic mode function		IMF4 Intrinsic mode function	
	绝对波 动幅度 Amplitude	相对波动 幅度/% Percentage of IMF1 in amplitude	绝对波 动幅度 Amplitude	相对波动 幅度/% Percentage of IMF1 in amplitude	绝对波 动幅度 Amplitude	相对波动 幅度/% Percentage of IMF1 in amplitude	绝对波 动幅度 Amplitude	相对波动 幅度/% Percentage of IMF1 in amplitude
年降水量 Annual precipitation	-56.18— 54.71	38.24	-18.11— 19.02	12.80	-14.3—12.51	9.24	-27.52— 25.98	18.45
粮食总产量 Grain output	-7502.26— 6978.50	40.80	-3164.99— 3209.23	17.96	-3052.41— 3067.74	17.25		
家畜数量 Livestock number	-48804.48— 45119.01	11.36	-38766.72— 41644.07	9.72	-44706.55— 42668.96	10.56	-83452.40— 78390.42	19.57

绝对波动幅度是指各波动分量的最大波幅平均值和最小波幅平均值区间;相对波动幅度=(绝对波动幅度/指标平均值)*100%

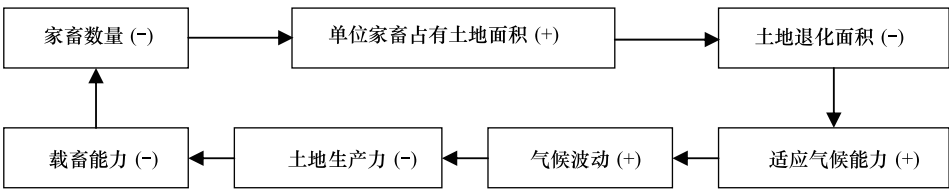


图 3 气候波动引起的农牧系统负反馈过程

Fig.3 Negative feedback of farming and husbandry system by climate volatility



图 4 资源和经济投入引起的农牧系统正反馈过程

Fig.4 Positive feedback of farming and husbandry system by the input of natural resources and economic factors

2.4 气候—农业—牧业系统波动的周期

运用经验模态分解法(EMD)对 12 个变量分解出的本征模态函数(IMF)特征表明,12 个变量的 IMF1 的周期均为 3—4 a,多数变量的 IMF2 的周期为 6—8 a,IMF3 的周期为 12—15 a,IMF4 的周期为 22—40 a,IMF5 的周期大于 60 a。对于农牧业系统影响最大的是 3—4 a 的高频波动,较难调适。其次是 6—8 a 的波动。20 a 及以上低频波动在实际感受中比较模糊。气候指标以高频波动为主,年降水量和年平均气温的 IMF1 分量的方差贡献率居于 12 个指标最前列,而趋势量接近或为 0。农业指标(有效灌溉面积除外)的高频波动分量 IMF1 的方差贡献率仅次于气候指标,波动较大。粮食播种面积的准 4 a 周期 IMF2 分量的方差贡献率也较高。由于灌区开发和投入增加,粮食总产量的趋势量的方差贡献率高达 82.86%。牧业指标的高频波动分量 IMF1 的方差贡献率明显低于农业指标,2 个指标的趋势量都在 66%—71%之间,如果加上准 16 a 和准 26 (24) a 的低频波动分量的方差贡献率,也都超过 80%,稳定性高于农业。林草指标与同在植物生产层的农业接近,但由于投入要素不同,其波动略高于农业。而支持农牧业的经济指标的稳定性最高,趋势量的方差贡献率在 97%以上。

表 4 气候—农业—牧业—经济系统各变量的 EMD 分量及方差贡献率

Table 4 Variance contribution of IMF in changing of climate-agriculture-husbandry and economic system factors							
项目 Items	指标 Indicators	IMF1 Intrinsic mode function 1	IMF2 Intrinsic mode function 2	IMF3 Intrinsic mode function 3	IMF4 Intrinsic mode function 4	IMF5 Intrinsic mode function 5	趋势量 Trend item
气候指标 Climate variables	年降水量	70.58(3)	6.19(6)	4.65(9)	11.83(30)	—	6.76
	年平均气温	23.14(4)	16.58(7)	8.98(14)	—	51.30(-)	0.00
林草指标 Forest and grass variables	当年造林面积	14.14(4)	26.64(8)	15.32(13)	—	—	43.91
	草地面积	6.33(4)	5.89(6)	5.64(14)	1.26(22)	13.49(-)	67.38
	植被指数	17.39(4)	2.17(8)	—	—	—	80.44
经济指标 Economic variables	农业劳动力人数	0.32(4)	—	0.39(12)	—	—	99.28
	农民人均纯收入	0.35(3)	—	2.38(16)	—	—	97.27
农业指标 Agriculture variables	粮食播种面积	15.16(3)	27.48(4)	27.09(7)	22.25(15)	—	8.01
	有效灌溉面积	0.27(4)	—	2.16(14)	6.53(40)	—	91.04
	粮食总产量	11.70(3)	2.82(5.5)	2.61(12)	—	—	82.86
牧业指标 Animal husbandry variables	家畜数量	7.74(3)	4.42(7)	4.11(16)	13.29(26)	—	70.44
	羊只总数	7.42(3)	11.52(10)	—	15.00(24)	—	66.59

IMF:波动分量 Intrinsic mode function;各列括号内的数据表示相应的模态函数的准周期(年)

总体来说,气候、农业、牧业指标的高频波动分量的方差贡献率依次减小,而低频波动分量的方差依次增大。将各指标模态分量的频率、振幅与方差贡献率综合起来看,波动由强到弱依次为气候、农业、牧业。说明越是受气候影响的产业,越是以高频波动为主,稳定性越小。

3 讨论

单纯的变异系数计算(表 1)说明粮食总产量的波动性大于年降水量,而 EMD 分析说明农业的稳定性高于气候,二者的差别在于不同频率的波动分量的方差大小和应对难度。孙武等人对内蒙古东南部的研究认为农业对气候的波动具有放大效果^[1]。而在盐池县既有农业对气候波动的放大,也有农业对气候波动的缩小。在干旱年份,农户缩减旱耕地播种面积,减少对耕地的施肥、劳动力等投入,都会加强旱情对粮食产量正反馈。相反,在风调雨顺的年份,农户则扩大种植面积,甚至开荒和利用“帮忙田”,各种投入也相对较多。因此,粮食总产量对气候波动的响应不仅是气候生产力的年际变化,还有农户种植规模和投入大小的叠加效应。另一方面,扬黄灌溉区拓展从提高和稳定粮食产量、促使农户放弃产量低而不稳的旱耕地等多方面减少了波动。农业究竟放大还是缩小气候波动,在于以上两方面的平衡结果,2000 年前后粮食总产量的变异系数大相径庭正是这种平衡向不同方向演变的结果。

以上分析说明气候尤其是降水量是粮食总产量的显著影响因子,粮食总产量也显著地影响着畜牧业。加之农业的稳定性比林草指标高,在水分条件较好的壤质土壤上发展一定量的较为稳定的农业实属必要。过度实施退耕还林还草,甚至弃农从牧,有违现实,很难实现牧业发展和草原生态保护^[18]。事实证明,盐池县最近十几年粮食总产量的率先突破,不但承担了封育禁牧的压力,有效保护了草原,而且为家畜数量特别是羊只总数的突破奠定了基础。但是家畜数量过度增长导致了波动加大。因此,家畜饲养量必将有一个理性回归的过程。

牧业对气候波动的响应与种植业不同。毫无疑问,气候异常会加大自然或经济方式淘汰家畜的可能。但实际上农户为了适应市场波动和应对干旱时期牲畜高死亡,往往增加牲畜存栏数量^[19]。牧业虽然对气候波动具有减缓作用,但是代价高、效率低,造成草地的过载和破坏。孙武的研究认为农业发展消弱了降水量与牧业之间的相关关系^[1]。粮食总产量与家畜数量存在的相邻年份的极显著相关性,对于减弱家畜数量的准 3 a 波动、稳定牧业具有积极作用(表 2)^[20]。但这并不是必然结果。非洲坦桑尼亚的隆基多(Longido)和肯尼亚马萨伊地区,水利条件改善后生态恶化的情况仍有出现^[19]。农业发展产生的秸秆和子实体大大刺激了农户扩大牲畜养殖规模的欲望。从 EMD 分解结果看(图 2),近十多年盐池县牧业有偏离农业的倾向,经济、水利和畜牧业发展导致羊只数量过度增长,生态潜在压力加大。

4 结论

(1)农牧交错带的农牧系统受气候影响具有较大的波动性。气候、林草、经济、农业、牧业的多数指标共享 3—4 a、6—8 a、12—15 a、22—40 a 准周期的波动。气候、农业、牧业指标的高频波动分量(准 3—4 a 周期)的方差贡献率依次减小,而中低频波动分量的方差依次增大。波动由强到弱依次为气候、农业、牧业。说明受气候影响越大的产业越是以高频波动为主,波动呈现为由气候到农业再到牧业逐级传递的特性。

(2)农牧系统在近 60 年主要受经济系统的驱动发生趋势性变化,同时受气候的驱动发生波动。农业在突变之前受气候影响大,突变之后明显减小;牧业在突变之前受农业影响大,突变之后也明显减小。与此同时,农业机械总动力和农民纯收入等经济指标对农牧系统的影响越来越大。近十几年的灌区开发和投入增加对于提高和稳定粮食总产量具有显著作用,但也激发了家畜数量特别是羊只总数剧增和牧业波动加剧。

(3)农牧系统的波动差异、年际间的极显著相关、对气候和经济投入的响应差异,说明农牧耦合系统能够减少各自的波动性。资源和经济投入并不必然导致农牧系统稳定。必须按照生态和经济规律对农牧系统进行设计,特别是建立正负反馈机制健全的农牧耦合系统,实现农牧交错带农牧业可持续发展。

参考文献 (References):

- [1] 孙武, 吴薇. 内蒙古高原东南部降水驱动的农业系统波动性分析. 植物生态学报, 2002, 26(1): 23-28.
- [2] 张新时, 唐海萍. 中国北方农牧交错带优化生态-生产范式集成. 北京: 科学出版社, 2008: 24-24.
- [3] 孙特生, 李波, 张新时. 北方农牧交错区农业生态系统生产力对气候波动的响应——以准格尔旗为例. 生态学报, 2012, 32(19): 6155-6167.
- [4] 孙武. 波动性生态脆弱带的特征. 中国沙漠, 1997, 17(2): 199-203.
- [5] 史培军. 中国北方农牧交错地带的降水变化与“波动农牧业”. 干旱区资源与环境, 1989, 3(3): 3-9.
- [6] 孙武, 侯玉, 张勃. 生态脆弱带波动性、人口压力、脆弱度之间的关系. 生态学报, 2000, 20(3): 369-373.
- [7] Shi W J, Tao F L. Vulnerability of African maize yield to climate change and variability during 1961-2010. Food Security, 2014, 6(4): 471-481.
- [8] E F Viglizzo. Agroecosystems stability in the Argentine Pampas. Agriculture, Ecosystems & Environment, 1986, 16(1): 1-12.
- [9] Nicholson S E, Farar T J. The influence of soil type on the relationships between NDVI, rainfall, and soil moisture in semiarid Botswana. I. NDVI response to rainfall. Remote Sensing of Environment, 1994, 50(2): 107-120.
- [10] Lambin E F, Ehrlich D. Land-cover changes in sub-Saharan Africa (1882-1991): Application of a change index based on remotely sensed surface temperature and vegetation indices at a continental scale. Remote Sensing of Environment, 1997, 61(2): 181-200.
- [11] 陈晓光, 李剑萍, 李志军, 陈葆德, 韩颖娟. 宁夏盐池近年来植被与气候变化分析. 生态学报, 2006, 26(5): 1516-1522.
- [12] 宋乃平, 杜灵通, 王磊. 盐池县 2000-2012 年植被变化及其驱动力. 生态学报, 2015, 35(22), doi: 10.5846/stxb201403050374.
- [13] 鲁欣, 秦大庸, 刘俊, 周祖昊, 胡晓寒. 宁夏粮食产量主要影响因子分析. 灌溉排水学报, 2006, 25(6): 65-70.
- [14] 牛创民, 温学飞, 王峰. 基于因子分析法的盐池县粮食生产影响因素分析. 水土保持研究, 2010, 17(6): 278-282.
- [15] 周道玮, 钟荣珍, 孙海霞, 刘华伟, 王敏玲, 余苗, 李光棣. 草地畜牧业系统: 要素、结构和功能. 草地学报, 2013, 21(2): 207-213.
- [16] 周海林. 宁夏盐池牧业生产系统的研究. 自然资源学报, 1992, 7(2): 171-179.
- [17] 张明阳, 王克林, 刘会玉, 林振山. 基于 EMD 的洪涝灾害成灾面积波动的多时间尺度分析. 中国农业气象, 2005, 26(4): 220-224.
- [18] 胡兵辉, 廖允成, 王克勤, 陈奇伯. 北方农牧交错带县域典型农业生态系统结构的对比演变. 水土保持研究, 2011, 18(2): 35-39, 43-43.
- [19] Zev Naveh (李秀珍, 冷文芳, 解伏菊, 李团胜, 角媛梅译). 景观与恢复生态学: 跨学科的挑战. 北京: 高等教育出版社, 2010: 133-134.
- [20] 孙芳, 王堃. 农牧交错带复合生态经济系统农牧业经济关系研究. 农业现代化研究, 2007, 28(2): 221-224.