

赵瑾,李莉,郭利京. 外界冲击对猪肉价格波动的非对称性影响[J]. 江苏农业科学, 2017, 45(18): 303-306.

doi:10.15889/j.issn.1002-1302.2017.18.076

外界冲击对猪肉价格波动的非对称性影响

赵瑾¹, 李莉², 郭利京³

(1. 安徽科技学院管理学院, 安徽凤阳 233100; 2. 中国电子物资总公司, 北京 100036; 3. 安徽财经大学经济学院, 安徽蚌埠 233030)

摘要:外界冲击对猪肉价格波动的影响存在非对称性, 研究这一问题对理解猪肉价格形成和制定稳定生猪生产政策具有重要意义。已有猪肉价格波动性的研究忽视了外界冲击发生时猪肉价格波动所处的周期。首先, 将猪肉价格波动划分为上涨周期和下跌周期 2 个阶段, 运用指数 GARCH 模型研究不同周期猪肉价格对正向冲击和负向冲击的非对称性反应特征。其次, 从生猪养殖主体结构、养殖者价格预期、生猪市场交易机制 3 个方面解释猪肉价格非对称性波动的原因。最后, 为养殖者选择生猪生产策略和政府部门制定稳定生猪生产的政策提供政策建议。

关键词:猪肉价格; 外界冲击; 非对称性; 指数 GARCH 模型; 生猪养殖主体结构; 养殖者价格预期; 市场交易机制

中图分类号: F323.7 **文献标志码:** A **文章编号:** 1002-1302(2017)18-0303-04

猪肉是我国城乡居民肉食品消费的主要来源, 2015 年以来我国猪肉价格上涨迅速。2016 年 3 月我国猪肉价格高达 29.16 元/kg, 与 2015 年同期的 19.7 元/kg 相比, 上涨了 48.02%。信息是生猪养殖者生产决策和行为调整的主要依据, 是影响猪肉价格波动的核心要素。从信息对猪肉价格波动的影响方向看, 可以将信息分为正向冲击信息(表现为价格上升)和负向冲击信息(表现为价格下降)。有效市场论认为猪肉价格能够反映全体市场参与者所掌握的全部信息, 即已经发生的信息都能够在猪肉价格中得到体现, 而未来猪肉价格的走向只与市场中新出现的信息有关。因此, 外界正向冲击和负向冲击对猪肉价格波动的影响应该是对称的。然而, 现实市场并不完全有效, 正向冲击和负向冲击对价格波动的影响不对称, 导致猪肉价格波动对外界冲击的非对称性反应。

1 文献综述

国内外学者关于外界信息冲击对猪肉价格非对称性波动的影响已有研究。国外学者认为, 正向冲击信息与负向冲击信息对猪肉价格的影响是不对称的。Piggott 等发现, 食品安全信息对美国猪肉价格波动的影响存在非对称性^[1]; Abao 等发现, 口蹄疫的暴发均会导致菲律宾猪肉和鸡肉价格发生不对称性波动^[2]; Karali 等发现, 在加拿大、法国、日本食品价格波动中存在同样的非对称波动现象^[3]。总之, 与正向冲击信息相比, 负向冲击信息能引起价格发生更大的波动。

目前, 国内文献没有对外界冲击信息进行上述区分, 也没

有系统性地研究其对猪肉价格的影响。一些文献研究结果表明, 我国生猪和猪肉价格波动存在非对称性^[4-5]。于爱芝等认为, 猪肉价格对生猪价格上涨冲击的波动幅度大于下跌冲击的波动幅度^[6]。王晶晶发现, 相对于猪肉价格上涨的冲击, 生猪价格对猪肉价格下跌的冲击存在着滞后性^[7]。郭利京等认为, 猪肉价格对生猪价格上涨冲击的反应要大于下跌冲击的反应^[8]。这一发现对猪肉价格形成、猪肉收储及生猪生产稳定政策的制定具有重要意义。

猪肉价格总是处于不断涨跌的周期性波动中, 外界冲击对上涨周期中猪肉价格的影响与下跌周期中猪肉价格的影响是否相同? 或者上涨周期中猪肉价格对冲击的反应与下跌周期中猪肉价格对冲击的反应是否相同? 如果猪肉价格在上涨周期与下跌周期对冲击的反应具有非对称性, 那么考察外界冲击的出现对猪肉价格的影响, 以及研究猪肉价格形成、实施猪肉收储、制定稳定生猪生产的政策时就应该区分猪肉价格所处的位置(上涨周期或下跌周期)。而已有研究猪肉价格波动性的文献并没有对此加以明确区分。

本试验采用指数 GARCH 模型, 将猪肉价格波动划分为上涨周期和下跌周期 2 个阶段, 实证研究外界正向冲击与负向冲击对不同周期猪肉价格波动的非对称性影响。

2 价格非对称性波动的理论

为了衡量外界正向冲击或负向冲击对价格的非对称性影响, 假定正向冲击为价格的非预期上涨, 负向冲击为价格的非预期下跌。这样假定的好处是不必区分外界冲击的来源, 只关注其对价格影响所造成的结果。

设 $t-1$ 到 t 期的猪肉价格为 x_t , $t-1$ 期及其以前的所有信息集为 s_{t-1} 。养殖者在 $t-1$ 期作决策时已掌握了 s_{t-1} 的冲击信息, 那么在 s_{t-1} 条件下价格 x_t 的条件期望 e_t 和条件方差 v_t 就是养殖者预期的第 t 期猪肉价格及其波动性, 即 $e_t = E(x_t | s_{t-1})$, $v_t = \text{var}(x_t | s_{t-1})$ 。因此, t 期的非预期价格波动为 $f_t = x_t - e_t$, f_t 是价格对第 t 期外部冲击信息的反映。当 $f_t > 0$ 时, 表示正向外部冲击, 表明养殖者非预期的价格上升; 当 $f_t < 0$ 时, 表示负向外部冲击, 表明非预期的价格下降。 $|f_t|$ 的

收稿日期: 2016-04-01

基金项目: 国家自然科学基金(编号: 71303002); 安徽高校省级人文社会科学研究重点项目(编号: SK2015A307); 安徽科技学院科研项目(编号: SRC2014374); 安徽省哲学社会科学规划办项目(编号: AHSKQ2015D48)。

作者简介: 赵瑾(1982—), 女, 河南沈丘人, 硕士, 讲师, 主要从事农业经济研究。E-mail: njynxz@163.com。

通信作者: 郭利京, 博士, 副教授, 主要从事农业经济研究。E-mail: guolijing0379@163.com。

值越大表示外部冲击越大,因为它导致了价格非预期的大幅波动。

在刻画价格波动性的各种模型中,自回归条件异方差模型(ARCH)得到了广泛应用。该模型将 v_t 表示为滞后 f_t 的函数,即非预期的价格波动性与外部冲击信息有关。依据该模型,滞后 q 阶的价格波动性 v_t 可以表示成如下公式:

$$v_t = \alpha + \sum_{i=1}^q \beta_i f_{t-i}^2 \quad (1)$$

式中: α 和 β_i 是参数。参数 β_i 表示 i 期以前的外部冲击对当期价格波动的影响。由于离现在越远的外部冲击对当前价格波动的影响越小,因此,假定对于 $i > j$,有 $\beta_i < \beta_j$ 。

在模型(1)的回归估计中,常常需要很多的滞后期数才能得到较好的拟合效果,使用该模型就不可避免地须要估计很多参数。于是计量经济学家 Granger 等提出了广义自回归条件异方差模型 GARCH 模型^[9],其公式如下:

$$v_t = \alpha + \sum_{i=1}^q \beta_i f_{t-i}^2 + \sum_{j=1}^p \varphi_j v_{t-j} \quad (2)$$

在实践中,由于考虑了时间序列的时变性、自相关和异方差问题,GARCH 模型能够非常成功地模拟价格的波动性,使该模型得到了广泛的应用。

虽然模型(1)和模型(2)在模拟价格波动性方面是成功的,然而对于价格波动非对称性的模拟,二者却存在不足。非对称性的存在表明正向冲击和负向冲击(即非预期的价格上涨和下跌)对价格波动的影响程度不同,因此模型(1)和模型(2)中对 f_t^2 的系数 β_i 施以对称性的约束是不合适的。

为了反映外部冲击对参数的非对称性影响,Allen 等对 GARCH 模型进行了修改,解除了参数的非负性约束,提出指数 GARCH 模型^[10],其公式如下:

$$\ln(v_t) = \alpha + \sum_{i=1}^p \beta_i \varphi(j_{t-i}) + \sum_{j=1}^q \kappa_j \ln(v_{t-j}) \quad (3)$$

式中: $\varphi(j_i) = \Gamma j_i + \kappa(|j_i| - E|j_i|)$, $j_i = e_i / \sqrt{v_i}$ 服从正态分布。系数 Γ 使得模型(3)对外界冲击的反应是非对称的。

如果 $\Gamma > 0$,表明外部正冲击对价格波动的影响大于负冲击的影响; $\Gamma = 0$ 则表示外部正冲击对价格波动的影响与负冲击相同;如果 $-1 < \Gamma < 0$,表示外部正冲击对价格波动性的影响将小于负冲击;如果 $\Gamma < -1$,表示外部正冲击将减少价格

的波动,而负冲击将增加价格的波动。通常是 $\Gamma < 0$,表示外部正冲击对价格波动的影响小于负冲击的影响。

GARCH(1,1) 模型和指数 GARCH(1,1) 模型对外部冲击的反应路径见图 1,图 1 中实线和虚线分别表示二者对外部冲击的影响路径。在 GARCH(1,1) 模型中,外部冲击的影响可以用以 $f_{t-1} = 0$ 为中心的对称曲线表示,在对称轴两边冲击的影响路径相同;而指数 GARCH(1,1) 模型中,外部冲击的影响以 $f_{t-1} = 0$ 为最低点,在最低点的两边以指数形式上升,但反应路径不同。图 1 表明二者的差异如下:(1)指数 GARCH 模型可以显示出外部正向冲击或负向冲击对价格波动的不同影响,而 GARCH 模型只能显示对称的影响。(2)指数 GARCH 模型可以显示较大外部冲击对价格波动的更大影响,而 GARCH 模型中影响是相同的。

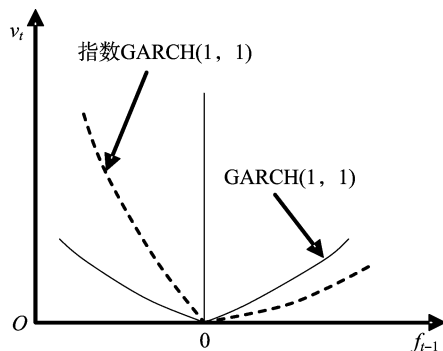


图1 外部冲击的影响

允许正外部冲击或负外部冲击,以及大小不同的外部冲击对价格波动具有不同的影响,对理解猪肉价格形成、实施猪肉收储、判定猪肉价格走向及制定稳定生猪生产的政策均具有重要的意义。本试验运用指数 GARCH 模型,实证研究正向外部冲击和负向外部冲击对我国猪肉价格在上涨周期和下跌周期的非对称性影响。

3 样本的选取及数据特征

采用中国畜牧业信息网 1995 年 1 月至 2016 年 3 月共 255 个月的去皮带骨猪肉价格作为分析样本,猪肉价格走势见图 2。图 2 反映了我国猪肉价格的主要波动趋势。

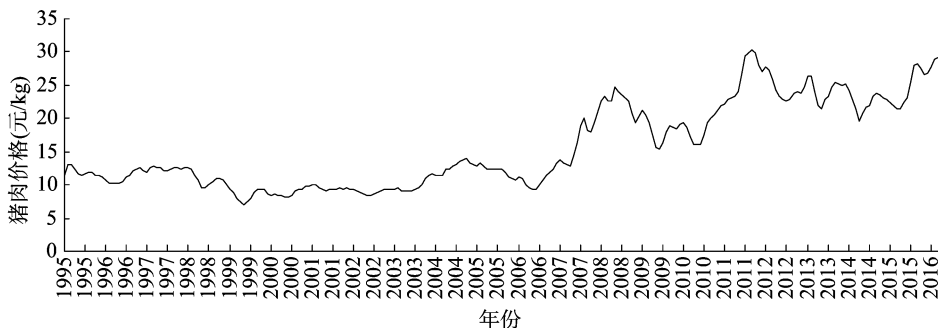


图2 1996 年 1 月至 2016 年 3 月我国猪肉价格趋势

为了较准确地分析猪肉价格波动,依据略特浪中浪波浪理论(elliott wave theory, EWT),即大浪有中浪,中浪有小浪,小浪中还有超小浪的特点,并结合我国生猪养殖业发展情况和政策干预特征,将猪肉价格波动划分为 9 个周期 4 种波浪(表 1)。波浪 I 和波浪 IV 为下跌浪,波浪 II 和波浪 III 为上

涨浪。

依据猪肉价格波动特征,将总样本划分为 2 个部分:一为价格下跌周期,包括 1995 年 1 月至 1999 年 5 月、2013 年 1 月至 2013 年 5 月、2013 年 5 月至 2015 年 3 月;二为价格上涨周期,包括 1999 年 5 月至 2013 年 1 月、2015 年 3 月至 2016 年 3

表 1 我国猪肉价格波动情况

序号	波动范围(元/kg)	趋势	波动幅度(%)	经历月份	时间	波段
周期 1	13.05 ~ 10.21	下跌	-27.82	17	1995 年 1 月至 1996 年 5 月	波浪 I
	10.21 ~ 12.67	上涨	19.42	18	1996 年 5 月至 1997 年 10 月	
周期 2	12.67 ~ 7.00	下跌	-81.00	20	1997 年 10 月至 1999 年 5 月	波浪 II
	7.00 ~ 10.08	上涨	44.00	22	1999 年 5 月至 2001 年 2 月	
周期 3	10.08 ~ 8.49	下跌	-18.73	10	2001 年 2 月至 2002 年 6 月	波浪 III
	8.49 ~ 13.89	上涨	63.60	33	2002 年 6 月至 2004 年 10 月	
周期 4	13.89 ~ 9.32	下跌	-32.90	21	2004 年 10 月至 2006 年 5 月	波浪 III
	9.32 ~ 24.71	上涨	165.13	25	2006 年 5 月至 2008 年 5 月	
周期 5	24.71 ~ 15.46	下跌	-37.43	14	2008 年 5 月至 2009 年 6 月	波浪 III
	15.46 ~ 19.31	上涨	19.94	15	2009 年 6 月至 2010 年 1 月	
周期 6	19.31 ~ 16.04	下跌	16.89	6	2010 年 1 月至 2010 年 6 月	波浪 III
	16.04 ~ 30.35	上涨	36.41	16	2010 年 6 月至 2011 年 9 月	
周期 7	30.35 ~ 22.61	下跌	-34.23	11	2011 年 9 月至 2012 年 7 月	波浪 IV
	22.61 ~ 26.43	上涨	14.45	7	2012 年 7 月至 2013 年 1 月	
周期 8	26.43 ~ 21.48	下跌	-18.73	4	2013 年 1 月至 2013 年 5 月	波浪 IV
	21.48 ~ 25.39	上涨	15.39	4	2013 年 5 月至 2013 年 9 月	
周期 9	25.39 ~ 19.70	下跌	-22.41	18	2013 年 9 月至 2015 年 3 月	波浪 IV
	19.70 ~ 29.16	上涨	48.02	12	2015 年 3 月至 2016 年 3 月	

月。通过对上涨周期和下跌周期猪肉价格的研究,可以考察外部正向冲击和负向冲击对上涨和下跌周期中猪肉价格波动影响的异同。

4 实证分析与原因探究

4.1 实证分析

指数 GARCH 模型是对猪肉价格模型的残差即非预期猪肉价格进行分析,因此首先须要建立猪肉价格模型,获得非预期猪肉价格。由于受生猪生产周期和猪肉消费季节因素的影响,猪肉价格波动会受到年内定期季节性因素的影响。在获得非预期猪肉价格之前,应消除季节性因素,然后运用自回归方法消除猪肉价格序列中的可预测部分,剩余的即为非预期猪肉价格。

4.1.1 数据处理 首先分离猪肉价格序列中的季节性因素,其模型如下:

$$p_{ij} = \Psi_0 + \Psi_1 sum + \Psi_2 aut + \Psi_3 win + \xi_i \quad (4)$$

式中: p_{ij} 表示第 i 年第 j 月份的猪肉价格; sum 、 aut 、 win 表示季节虚拟变量。

$$sum = \begin{cases} 1 & 6、7、8 \text{ 月} \\ 0 & \text{其他月份} \end{cases}; aut = \begin{cases} 1 & 9、10、11 \text{ 月} \\ 0 & \text{其他月份} \end{cases};$$
$$win = \begin{cases} 1 & 12、1、2 \text{ 月} \\ 0 & \text{其他月份} \end{cases}$$

运用 DW 方法对模型(4)的残差进行自相关性检验,发现无论是上涨周期还是下跌周期,猪肉价格均存在自相关。再应用逐步自回归方法确定残序列的阶数,选定初始阶数为 13(1 年有 12 个月,阶数选择为 12 + 1),采用极大似然法进行估计。

对于猪肉价格上涨周期来说,自回归检验结果显示 8、11 月自回归参数显著,因此自回归残差模型为 AR(8,11);对于猪肉价格下跌周期来说,自回归检验结果显示 2 月参数显著,因此自回归残差模型为 AR(2)。异方差检验结果显示,残差 ξ_i 存在自回归条件异方差。以上检验结果表明,在上涨和下跌周期内,猪肉价格残差的自相关性和异方差并存,表明适合

应用指数 GARCH 模型进行估计。

4.1.2 实证结果 估计结果显示,无论是猪肉价格上涨周期还是下跌周期,指数 GARCH 模型的系数多数在 1% 水平上显著(表 2、表 3),表明猪肉价格波动存在显著的指数广义自回归条件异方差效应。从检验结果看,在猪肉价格上涨周期, Γ 显著为正(0.324 7),生猪下跌周期 Γ 显著为负(-0.434 5),表明猪肉价格对外界冲击的波动存在显著的非对称性,且在上涨和下跌周期中的非对称性波动不同。

表 2 猪肉价格上涨周期指数 GARCH 模型估计结果

变量	系数	标准差	t 值	P 值
常数	0.113 6	0.012 00	9.466 7	0.002 3
sum	-0.032 2	0.003 10	-10.387 1	0
aut	0.013 4	0.009 30	1.440 9	0.113 5
win	0.032 5	0.009 20	3.532 6	0.007 2
AR8	-0.038 1	0.008 30	-4.590 4	0.003 4
AR11	0.048 2	0.014 20	3.394 4	0.000 1
EARCH0	0.438 6	0.095 34	4.600 4	0.000 2
EARCH1	-0.784 1	0.065 30	-12.007 7	0
指数 GARCH1	0.854 2	0.037 60	22.718 1	0
Γ	0.324 7	0.058 30	5.569 5	0.000 4

表 3 猪肉价格下跌周期指数 GARCH 模型估计结果

变量	系数	标准差	t 值	P 值
常数	-0.326 7	0.003 4	-11.503 5	0.000 1
sum	0.059 6	0.006 2	9.612 9	0.000 1
aut	-0.024 2	0.008 4	-0.614 2	0.458 4
win	-0.047 9	0.003 5	-2.038 3	0.030 2
AR2	0.274 5	0.032 5	8.446 2	0.000 1
EARCH0	-0.353 7	0.073 4	-4.818 8	0.003 3
EARCH1	0.187 3	0.024 5	7.644 9	0.000 1
指数 GARCH1	0.894 5	0.052 3	17.103 3	0.000 0
Γ	-0.434 5	0.078 5	-5.535 0	0.000 2

在上涨周期中,外界冲击使猪肉价格发生了显著的正向非对称性波动,即正向冲击对猪肉价格的影响大于负向冲击

的影响;在下跌周期中,外界冲击对猪肉价格的影响发生了显著的负向非对称性波动,即负向冲击对猪肉价格的影响大于正向冲击的影响。正向冲击对猪肉价格上涨周期的影响大于下跌周期的影响,而负向冲击对猪肉价格下跌周期的影响大于上涨周期的影响,即外界冲击使猪肉价格波动表现出强市恒强、弱市恒弱的非对称性现象。

4.2 原因探究

什么原因导致了猪肉价格对外界冲击的非对称性波动呢?依据经济学原理,价格是由供求市场共同决定的,在猪肉消费市场相对稳定的情况下,供给市场养殖者特征、心理预期及生猪市场交易机制就成为影响猪肉价格波动的主要原因。

4.2.1 养殖者的构成 依据生猪年出栏量,可以将生猪养殖主体分为散养户(年出栏量 1~49 头)、规模养殖场(年出栏量 ≥ 50 头)。规模养殖场具有资金、技术、市场信息等绝对优势;而散养户具有数量上的优势,但生猪养殖规模小,在市场信息获取和分析方面不具有优势。伴随我国经济社会的快速发展,散养户生猪出栏比重逐步下降、规模化养殖比重则不断提高。但是,散养户作为生猪养殖主体的地位并没有发生根本改变。目前,从生猪年出栏量来看,虽然规模养殖场生猪出栏量已经占总出栏量的一半以上,但其在全国养殖主体中所占比例不及 5%,而散养户却高达 90% 以上。

由于在信息获取、分析和利用方面远不如规模养殖场,多数散养户认为其他养殖者(特别是规模养殖场)的生产行为包含一定的市场信息,因此在生产行为上采取跟从他人的养殖策略,这就形成了散养户的从众行为。一条并不确切、重要的信息,经过此机制的作用,就很有可能在养殖者之间产生放大效应。持续上涨或持续下跌的猪肉价格就容易产生从众行为,因为这种信息更符合多数养殖者的判断。

4.2.2 养殖者的心理预期 养殖者的正反馈心理行为导致猪肉价格对外界冲击的非对称性波动。该行为建立在生猪养殖者适应性预期的心理基础之上,由于当前猪肉价格持续上升,养殖主体预期到未来猪肉价格将延续这种上涨趋势,反之亦然。其特点是养殖者对价格趋势的过度预期,且在养殖行为上积极跟进(如从众行为),说明养殖者主要是对价格持续增长趋势的反应,而不是对价格偶然变化现象的反应。

在猪肉价格持续上涨中,养殖者预期未来猪肉价格将继续上涨,因此应加速仔猪补栏;对于价格上涨周期中的负向冲击,养殖者认为是价格的偶然变化,不会产生反向变化的预期,因此在上涨周期中养殖者对负向冲击的反应不敏感。在猪肉价格持续下跌过程中(负向冲击),养殖者预期未来猪肉价格将延续这一跌势,加速育肥猪出栏或退出生猪养殖市场,其影响远大于猪肉价格持续上涨周期中负向冲击的影响,于是同样的外部冲击对价格的影响结果却不同,即价格产生了非对称性波动。因此,这种正反馈心理预期行为使猪肉价格的变动趋势被加强,猪肉价格变动的幅度增大。

4.2.3 生猪市场交易机制 从市场交易机制来看,我国生猪市场主要是现货交易。由于生猪期货、期权等避险手段的缺乏,生猪养殖者无法进行套期保值和风险规避。在猪肉价格上涨周期中,养殖者预期未来猪肉价格还将持续上涨,在推迟育肥猪出栏的同时,不断加大仔猪补栏量,其结果是当前猪肉

价格节节攀升,而随着未来生猪出栏量的增加,加剧了未来价格下跌的风险。

在猪肉价格下跌周期中,养殖者只能卖出育肥生猪,而不能运用期货卖空来减轻猪肉价格下跌的压力。由于生猪养殖周期长,面对增大的风险,养殖者只能自己承担风险,而不能使用期货进行套期保值或分散风险。现货交易机制以及生猪的自然再生产属性,使养殖者面对猪肉价格的大幅波动只能是价格的接受者,增加了生猪养殖的风险,也决定了猪肉价格单向大幅度波动的现象,进一步加剧了猪肉价格变化方向上的非对称性。

5 结论

本试验采用指数 GARCH 模型,研究了我国猪肉价格对外界冲击的非对称性波动特征,发现由于养殖主体结构、养殖者从众行为以及市场交易机制方面的不足,导致猪肉价格产生非对称波动的原因。对于养殖者来说,可反向利用这一结果,即当正向冲击信息对猪肉价格的影响大于负向冲击信息时,可判断猪肉价格大致处于上涨周期;反之,当负向冲击信息的影响大于正向冲击信息时,表明猪肉价格可能处于下跌周期中。外部正向冲击和负向冲击对猪肉价格上升和下跌周期的非对称性影响,有助于政策制订者选择适当的时机推出合适的稳定生猪生产政策,并科学地预期政策所产生的效果。

参考文献:

- [1] Piggott N E, Marsh T L. Does food safety information impact US meat demand? [J]. American Journal of Agricultural Economics, 2004, 86 (1): 154 - 174.
- [2] Abao L N B, Kono H, Gunarathne A, et al. Impact of foot - and - mouth disease on pork and chicken prices in Central Luzon, Philippines [J]. Preventive veterinary medicine, 2014, 113 (4): 398 - 406.
- [3] Karali B, Power G J. Short - and long - run determinants of commodity price volatility [J]. American Journal of Agricultural Economics, 2013, 95 (3): 724 - 738.
- [4] 郭利京, 胡 浩, 张 锋. 我国猪肉价格非对称性传递实证研究——基于产业链视角的考察[J]. 价格理论与实践, 2010(11): 52 - 53.
- [5] 冯 明. 猪肉价格波动的非对称性及其对 CPI 的影响[J]. 统计研究, 2013, 30(8): 63 - 68.
- [6] 于爱芝, 郑少华. 我国猪肉产业链价格的非对称传递研究[J]. 农业技术经济, 2013(9): 35 - 41.
- [7] 王晶晶. 生猪产业链价格传导机制研究——非对称性与空间效应[D]. 北京: 中国农业大学, 2014.
- [8] 郭利京, 韩 刚, 胡 联, 等. 信息不对称, 纵向市场特征与猪肉价格传递非对称性[J]. 农林经济管理学报, 2014, 13(4): 414 - 419.
- [9] Granger C W J, Ding Z X. Varieties of long memory models [J]. Journal of Econometrics, 1996, 73(1): 61 - 77.
- [10] Allen J P, Nelson M, Alling A. The legacy of biosphere 2 for the study of biospherics and closed ecological systems [J]. Advances in Space Research, 2003, 31(7): 1629 - 1639.