

风险厌恶下天气影响产出的农产品供应链协调

但斌, 伏红勇, 徐广业, 陈伟

(重庆大学经济与工商管理学院, 重庆 400044)

摘要: 针对农产品产出受不利天气影响的特点, 在农产品生产商为风险厌恶的情形下, 建立了由生产商和销售商组成的两级农产品供应链随机利润模型, 基于条件风险价值(conditional value-at-risk, CVaR)准则, 构建具有风险厌恶特性生产商的条件风险价值模型, 分析了不利天气与生产商的风险厌恶度对最优农资投入水平及供应链协调的影响. 研究表明: 生产商的风险厌恶特性加剧了双重边际效应并降低了供应链利润; 在销售商所设计的单位产品风险补偿与转移支付满足一定条件下, 与不利天气指数和风险厌恶度相关的风险补偿机制能够实现农产品供应链的完美共赢协调, 这增强了不利天气影响下农产品供应链的稳健性并在一定程度上保障了农产品的稳定供应.

关键词: 农产品供应链; 供应链协调; 风险厌恶; CVaR; 天气

中图分类号: F224

文献标识码: A

文章编号: 1000-5781(2014)03-0362-09

Coordination of agri-food supply chain with weather-related yield under risk-averse producer

Dan Bin, Fu Hongyong, Xu Guangye, Chen Wei

(School of Economics and Business Administration, Chongqing University, Chongqing 400044, China)

Abstract: To aim at the characteristic that adverse weather affects the outputs of agri-foods, this paper firstly builds a stochastic profit model for a two-stage agri-food supply chain that consists of a risk-averse producer and a risk-neutral sales-agent. Secondly, based on CVaR (conditional value-at-risk) criterion, a CVaR model is established in view of the risk-averse producer. Finally, the paper analyzes the effects of adverse weather and producer's risk-averse degree on optimal investment level and supply chain coordination. The results show that the producer's risk-averse characteristics intensifies double marginalization phenomenon and reduces the supply chain profits. If the risk-reward of unit product and transfer payment are satisfied certain conditions, the perfect and win-win coordination of the agri-food supply chain will be achieved by the risk-reward mechanisms. This can enhance the robustness of the agri-food supply chain under the influence of adverse weather, and also guarantees the stable supply of agri-foods.

Key words: agri-food supply chain; supply chain coordination; risk-averse; CVaR; weather

1 引言

农业是对天气变化最为敏感的行业之一, 天气与季节性是影响农业生产的重要决定因素^[1]. 近年来, 不利天气对我国农业生产造成严重影响, 如自2009年以来, 我国西南地区连续三年出现干旱造成大量耕地减产; 2010年, 由于低温、连续强降雨等不利天气, 造成我国多地棉花不同程度的减产. 生产商不仅受到不利天

收稿日期: 2011-12-28; 修订日期: 2012-06-11.

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(70972056; 71172084); 中央高校基本科研业务费资助项目((CDJSK11003).

气的影响而且还面临不确定的市场收购价格等随机因素,这将导致农产品供应链稳健性的降低.因此,研究不利天气对农业生产的影响,发现生产商风险厌恶下农产品供应链的协调策略具有重要的现实意义.

一些学者从生产商的视角对不利天气影响农产品生产的问题^[2-4]以及天气预测问题^[5]进行了研究.更多相关研究可参阅文献[1,6].上述研究主要从生产商的视角指出不利天气影响下生产决策中应关注的一些问题.然而,不利天气不仅影响农产品生产而且使整条农产品供应链面临着供给与需求相匹配的难题.目前,考虑不利天气影响的供应链协调研究中^[7,8]考虑了农产品生产受季节性影响这一因素,运用收益共享契约实现了产出与需求扰动均服从均匀分布情形下的农产品供应链协调;文献[9]在不利天气影响产品(包括农产品)需求下,通过设计风险补偿协调机制实现了天气影响需求下供应链的协调.然而,文献[7-9]均未考虑不利天气影响农产品产出这一在生产环节区别于工业品供应链的显著特性,并且以上文献均未考虑供应链成员的风险偏好这一特性.

Lau等^[10]将风险偏好引入到供应链环境中以来,部分学者进行了相关研究.如Gan等^[11]运用期望效用理论研究风险厌恶下供应链协调问题;Choi等^[12]运用均值-方差理论度量供应链成员的风险偏好研究供应链协调问题.然而,期望效用理论是基于理性人在风险条件下的决策行为,而均值-方差理论则是对称地处理收益与损失.虽然VaR在金融风险领域中得到广泛的应用^[13],但VaR方法也存在一定缺陷;对此,Rockfellar等^[14,15]提出条件风险价值(conditional value-at-risk, CVaR)准则用于度量决策者的风险偏好.随后,Yang等^[16],叶飞等^[17]等运用CVaR准则研究了考虑决策主体具有风险厌恶特性的供应链协调问题.然而,文献[16,17]均未考虑不可控不利天气对农业生产和农产品供应链协调的影响这一关键问题.

鉴于此,本文在订单农业模式下针对不利天气影响农产品产出这一特点,运用CVaR准则,研究由一个风险厌恶的农产品生产商和一个风险中性的销售商组成的两级农产品供应链的协调问题,拟设计一种可形成有效内在激励的协调机制以增强农产品供应链的稳健性,并探讨实现供应链协调时契约参数所满足的条件.

2 问题描述与模型假设

文中研究的不利天气均指的是非灾难性不利天气.在考虑不利天气影响农产品产出的情形下,研究由一个风险厌恶的生产商与一个风险中性的销售商组成的两级农产品供应链系统的协调问题.在生产季节开始前销售商与农产品生产商签订一个双方同意的订单.在该订单生产模式下,农产品生产商决策农资投入水平 x ,生产结束(双方均可观测到生产过程中的天气情况)后,为分担价格波动带来的风险销售商以“保底收购、随行就市”¹的价格机制收购生产商生产的所有农产品,并在销售市场上以市场价格 p 进行销售.针对农产品产出受不利天气影响的特点,用天气指数 w 来表征天气情况(如温度、湿度、降雨量等).因农产品自身特性单一农作物适宜的天气指数 $w \in [\underline{w}, \bar{w}] \subset [\underline{w}, \bar{w}]$,其中 $\underline{w}, \bar{w}$ 为适宜农作物生长的天气指数上下界, $\underline{w}, \bar{w}$ 为自然界出现的非灾难性不利天气指数上下界,且 $\underline{w}, \bar{w}, \underline{w}, \bar{w}$ 均是外生的.当 $w \in [\underline{w}, \underline{w})$ 时,意味着发生了低温、干旱等不利天气;当 $w \in (\bar{w}, \bar{w}]$ 时,意味着发生了暖冬、洪涝等不利天气.

文中用下标“p”代表农产品生产商;“r”代表销售商;“c”代表集中式决策;“d”代表分散式决策;上标“*”代表最优. p 为由市场决定的农产品零售价格; ω 为农产品市场收购价格; ω_r 为销售商所决策的农产品保底收购价格; ω_p 为生产商出售农产品的保留价格; ω' 为农产品的实际收购价格; c_p 为生产商投入农资水平的单位成本; π_{i1} 为分散式决策下协调前节点企业 i 的利润, $i = p, r$; π_{i2} 为分散决策下协调后节点企业 i 的利润, $i = p, r$; π_c 为集中式决策下供应链系统利润.

为了定量分析风险厌恶下不利天气影响产出的农产品供应链优化协调问题,作如下假设.

假设 1 整条农产品供应链在一个运作周期中交易某一特定地区的单一农产品,销售商未售出农产品的残值为零且不考虑因缺货导致的损失.

假设 2 整个生产过程中农产品生产商投入的农资水平为 $x \in [0, 1]$, $C_p(x)$ 是与农资投入水平相关的投

¹即实际收购价格为 $\omega' = \max(\omega_r, \omega)$,其中 ω_r 为销售商所决策的保底收购价格(应不低于农产品生产商的保留价格), ω 为由市场决定的农产品收购价且满足 $\omega \in [L, U]$,其概率密度函数与分布函数分别为 $f(\cdot)$, $F(\cdot)$ ^[17]

入成本,投入的农资水平越高付出的成本越高,不失一般性,设为 $C_p(x) = c_p x$.

假设 3 农产品产出用 $Q(x, w) = Q_0 \sigma(x, w)$ 表征,其中 Q_0 为最高产出量, $\sigma(x, w) \in [0, 1]$ 为受不利天气和农资投入水平影响的产出因子, σ 为 x 的严格递增凹函数,这表明产量随 x 的增加而提高且呈边际递减趋势; σ 关于 w 满足,当 $\underline{w} \leq w < \bar{w}$ 时 σ 与 w 正相关且呈边际递增趋势,这表明不利天越严重(w 越小) σ 越小;当 $\bar{w} < w \leq \bar{\bar{w}}$ 时 σ 与 w 负相关且呈边际递减趋势,这表明不利天越严重(w 越大) σ 越小.

假设 4 销售商所面对的市场需求为非负随机变量 D ,其概率密度函数与分布函数分别为 $g(\cdot)$, $G(\cdot)$.

假设 5 农产品生产商与销售商的所有信息均为双方的共同知识^[17].

3 农产品生产商与销售商的基准决策模型

3.1 集中式决策模型

在集中式决策下无需考虑双方间的利润分配与风险分担问题,此时供应链系统的随机利润函数为

$$\pi_c = p \min(Q(x, w), D) - c_p x. \quad (1)$$

对式(1)求关于农资投入水平 x 的二阶导数可得

$$\frac{d^2 \pi_c}{dx^2} = p(1 - G(Q(x, w))) \frac{d^2 Q(x, w)}{dx^2} - g(Q(x, w)) \left(\frac{dQ(x, w)}{dx} \right)^2, \quad (2)$$

由于 $\frac{dQ(x, w)}{dx} > 0$, $\frac{d^2 Q(x, w)}{dx^2} \leq 0$, 则 $\frac{d^2 \pi_c}{dx^2} < 0$. 因此,供应链系统存在最优的农资投入水平 x_c^* 满足一阶最优条件 $\frac{d\pi_c}{dx} = 0$, 求解整理可得系统最优的农资投入水平 x_c^* 由下式唯一确定

$$\frac{dQ(x_c^*, w)}{dx} = \frac{c_p}{p - pG(Q(x_c^*, w))}. \quad (3)$$

3.2 分散式决策模型

3.2.1 基于 CVaR 准则农产品生产商的最优决策

分散式决策下农产品生产商的随机利润函数为

$$\pi_{p1} = \omega' Q(x, w) - c_p x, \quad (4)$$

其中 $\omega' = \max(\omega_r, \omega)$ 为农产品的实际收购价格.

农产品生产商决策农资投入水平时不仅考虑自身收益而且还关心生产结束后最终收益的风险大小,对此运用 CVaR 准则度量风险,研究具有风险厌恶特性生产商的农资投入决策行为.根据 Rockfellar 等^[14]提出的 CVaR 一般化定义,生产商的目标函数为

$$\text{CVaR}_{\eta_p}(\pi_{p1}) = \max_{v \in R^+} \left(v + \frac{1}{\eta_p} E_\omega [\min(\pi_{p1} - v, 0)] \right), \quad (5)$$

其中 $v = q_{\eta_p}(\pi_{p1}) = \inf \{z | \Pr(\pi_{p1} \leq z) \geq \eta_p\}$ 为 η_p 分位数, $\eta_p \in (0, 1]$ 为生产商的风险厌恶度, $\eta_p = 1$ 时为风险中性.

为求解最优的农资投入水平,依据 CVaR 的一般化定义并结合式(5)定义函数

$$g(x, v) = v + \frac{1}{\eta_p} E_\omega [\min(\pi_{p1} - v, 0)]. \quad (6)$$

根据 CVaR 的定义, $g(x, v)$ 为 (x, v) 的联合凹函数,因此 $x_d^* = \arg \max_{v \in R^+} \max_{x > 0} g(x, v)$. 由于随机的市场收购价格 ω 在区间 $[L, U]$ 上的概率密度函数与分布函数分别为 $f(t)$, $F(t)$. 将式(4)代入式(6)整理可得

$$g(x, v) = v - \frac{1}{\eta_p} \int_L^{\omega_r} [v - \omega_r Q(x, w) + c_p x]^+ dF(t) - \frac{1}{\eta_p} \int_{\omega_r}^U [v - tQ(x, w) + c_p x]^+ dF(t), \quad (7)$$

其中 $[y]^+ = \max(y, 0)$.

在给定的农资投入水平 x 下, 下面分三种情形分析求解最优的 v^* .

1) 当 $v \leq \omega_r Q(x, w) - c_p x$ 时, $g(x, v) = v$, 则 $\frac{\partial g(x, v)}{\partial v} = 1 > 0$.

2) 当 $\omega_r Q(x, w) - c_p x < v \leq UQ(x, w) - c_p x$ 时,

$$g(x, v) = v - \frac{1}{\eta_p} \int_L^{\omega_r} (v - \omega_r Q(x, w) + c_p x) dF(t) - \frac{1}{\eta_p} \int_{\omega_r}^{\frac{v+c_p x}{Q(x, w)}} (v - tQ(x, w) + c_p x) dF(t), \quad (8)$$

对式(8)求 v 的一阶偏导数整理可得

$$\left. \frac{\partial g(x, v)}{\partial v} \right|_{v=\omega_r Q(x, w)-c_p x} = 1 - \frac{1}{\eta_p} F(\omega_r), \quad (9)$$

$$\left. \frac{\partial g(x, v)}{\partial v} \right|_{v=UQ(x, w)-c_p x} = 1 - \frac{1}{\eta_p} F(U) < 0. \quad (10)$$

3) 当 $v > UQ(x, w) - c_p x$ 时,

$$g(x, v) = v - \frac{1}{\eta_p} \int_L^{\omega_r} [v - \omega_r Q(x, w) + c_p x] dF(t) - \frac{1}{\eta_p} \int_{\omega_r}^U (v - tQ(x, w) + c_p x) dF(t), \quad (11)$$

对式(11)求 v 的一阶偏导数可得

$$\frac{\partial g(x, v)}{\partial v} = 1 - \frac{1}{\eta_p} \int_L^{\omega_r} f(t) dt - \frac{1}{\eta_p} \int_{\omega_r}^U f(t) dt = 1 - \frac{1}{\eta_p} < 0. \quad (12)$$

由于 $g(x, v)$ 是 v 的凹函数, 并由以上分析可知 $v^* \in (\omega_r Q(x, w) - c_p x, UQ(x, w) - c_p x]$.

当 $\omega_r \geq F^{-1}(\eta_p)$ 时, $\left. \frac{\partial g(x, v)}{\partial v} \right|_{v=\omega_r Q(x, w)-c_p x} = 1 - \frac{F(\omega_r)}{\eta_p} \leq 0$,

又由于 $v \leq \omega_r Q(x, w) - c_p x$ 时, $\frac{\partial g(x, v)}{\partial v} > 0$, 因此, 若存在最优的 v^* , 则 $v^* = \omega_r Q(x, w) - c_p x$. 这与 $v^* \in (\omega_r Q(x, w) - c_p x, UQ(x, w) - c_p x]$ 相矛盾.

当 $\omega_r < F^{-1}(\eta_p) \leq U$ 时, $\left. \frac{\partial g(x, v)}{\partial v} \right|_{v=\omega_r Q(x, w)-c_p x} = 1 - \frac{1}{\eta_p} F(\omega_r) > 0$,

又由于 $\left. \frac{\partial g(x, v)}{\partial v} \right|_{v=UQ(x, w)-c_p x} < 0$, 则 v^* 满足一阶最优条件 $\frac{\partial g(x, v)}{\partial v} = 1 - \frac{1}{\eta_p} F\left(\frac{v+c_p x}{Q(x, w)}\right) = 0$, 求解可得 $v^*(x) = F^{-1}(\eta_p) Q(x, w) - c_p x$.

由以上分析可知, 当 $F(\omega_r) < \eta_p \leq 1$ 时, 将 $v^*(x) = F^{-1}(\eta_p) Q(x, w) - c_p x$ 代入式(8)整理可得

$$g(x, v^*(x)) = F^{-1}(\eta_p) Q(x, w) - c_p x - \frac{Q(x, w)}{\eta_p} \int_{\omega_r}^{F^{-1}(\eta_p)} F(t) dt. \quad (13)$$

由于 $g(x, v^*(x))$ 为 x 的凹函数, 则满足一阶最优条件 $\frac{dg(x, v^*(x))}{dx} = 0$, 求得 x_d^* 由如下方程确定

$$\frac{dQ(x_d^*, w)}{dx} = \frac{c_p}{F^{-1}(\eta_p) - \frac{1}{\eta_p} \int_{\omega_r}^{F^{-1}(\eta_p)} F(t) dt}. \quad (14)$$

3.2.2 销售商的最优决策

分散式决策下风险中性的销售商的随机利润函数为

$$\pi_{r1} = p \min(Q(x, w), D) - \omega' Q(x, w), \quad (15)$$

其中 $\omega' = \max(\omega_r, \omega)$.

销售商所收购的农产品应具有正的边际效益, 结合式(15)分析可得销售商收购农产品的约束条件为

$$p(1 - G(Q(x, w))) > U - \int_{\omega_r}^U F(t) dt. \quad (16)$$

对式(15)求解关于 ω_r 的二阶导数可得 $\frac{d^2\pi_{r1}}{d\omega_r^2} = -f(\omega_r)Q(x, w) < 0$, 从而可知 π_{r1} 为 ω_r 的凹函数, 又由于 $\frac{d\pi_{r1}}{d\omega_r} = -F(\omega_r)Q(x, w) < 0$, 则 $\omega_r^* = \omega_p$. 这说明在收购约束式(16)下销售商的最优决策是以生产商的保留价格为最优保底收购价格, 则农产品的实际收购价格为 $\omega' = \max(\omega_p, \omega)$. 联合式(14)分析可得, 生产商的最优农资投入水平 x_d^* 由下式确定.

$$\frac{dQ(x_d^*, w)}{dx} = \frac{c_p \eta_p}{\eta_p F^{-1}(\eta_p) - \int_{\omega_p}^{F^{-1}(\eta_p)} F(t)dt}. \quad (17)$$

在本文研究的一定地区范围内两级农产品供应链系统中, 农产品生产商与销售商会面临着相同的天气情况, 在相同的天气指数下比较集中式与分散式决策下的最优农资投入水平、利润可得如下结论.

定理 1 在相同的天气条件下, 1) x_d^* 为 η_p 的单调增函数, 且对任意的 $0 < \eta_p \leq 1$, 则有 $x_d^*(\eta_p) < x_c^*$; 2) $\pi_{p1}^*(x_d^*) + \pi_{r1}^*(x_d^*) < \pi_c^*(x_c^*)$.

证明 1) 运用函数的超模性质进行分析, 对式(13)求解关于 (x, η_p) 的混合偏导数, 则有

$$\frac{\partial^2 g(x, v^*)}{\partial x \partial \eta_p} = \frac{1}{\eta_p^2} \frac{dQ(x, w)}{dx} \int_{\omega_r}^{F^{-1}(\eta_p)} F(t)dt, \quad (18)$$

易知 $\frac{\partial^2 g(x, v^*)}{\partial x \partial \eta_p} > 0$, 从而 $g(x, v^*)$ 关于 (x, η_p) 具有严格超模性. 因此, 农产品生产商的最优农资投入水平 x_d^* 为 η_p 的单调增函数, 当 $\eta_p = 1$ 时, 农资投入水平达到最大.

令 $M(x) = F^{-1}(x) - \frac{1}{x} \int_{\omega_p}^{F^{-1}(x)} F(t)dt$, $x \in [0, 1]$, 由于

$$\frac{dM(x)}{dx} = \frac{dF^{-1}(x)}{dx} + \frac{1}{x^2} \int_{\omega_p}^{F^{-1}(x)} F(t)dt - \frac{F(F^{-1}(x))}{x} \frac{dF^{-1}(x)}{dx} = \frac{1}{x^2} \int_{\omega_p}^{F^{-1}(x)} F(t)dt > 0, \quad (19)$$

则 $M(x)$ 为 x 在区间 $[0, 1]$ 上的增函数, 从而可得

$$F^{-1}(\eta_p) - \frac{1}{\eta_p} \int_{\omega_p}^{F^{-1}(\eta_p)} F(t)dt < F^{-1}(1) - \int_{\omega_p}^{F^{-1}(1)} F(t)dt = U - \int_{\omega_p}^U F(t)dt, \quad (20)$$

结合式(16)分析知

$$p(1 - G(Q(x, w))) > F^{-1}(\eta_p) - \frac{1}{\eta_p} \int_{\omega_p}^{F^{-1}(\eta_p)} F(t)dt, \quad (21)$$

比较式(3)与式(17)可得 $c_p / (p(1 - G(Q(x, w)))) < c_p / \left(F^{-1}(\eta_p) - \frac{1}{\eta_p} \int_{\omega_p}^{F^{-1}(\eta_p)} F(t)dt \right)$, 又由于在一定天气条件下 $Q(x, w)$ 为 x 在 $[0, x_c^*]$ 上的单增凹函数, 则对任意的 $0 < \eta_p \leq 1$, 有 $x_d^*(\eta_p) < x_c^*$.

2) 分析式(2)可知 $\frac{\partial^2 \pi_c}{\partial x^2} < 0$, 由于 x_c^* 为系统利润的最优努力水平且对任意的 $0 < \eta_p \leq 1$, 有 $x_d^*(\eta_p) < x_c^*$, 则在相同的天气条件下, $\pi_{p1}^*(x_d^*) + \pi_{r1}^*(x_d^*) = \pi_c^*(x_d^*) < \pi_c^*(x_c^*)$. 证毕.

由定理 1 可知, 生产商风险厌恶下的最优农资投入水平严格低于风险中性下最优农资投入水平且随风险厌恶度的减小而降低; 生产商的风险厌恶特性加剧了双重边际效应, 这将导致农产品产量的降低进而会增加农产品的供需波动; 在相同的天气条件下分散决策时双方的利润之和小于集中决策下系统利润. 这意味着销售商需设计合理的激励机制来协调供应链以期保证农产品的稳定供应.

下面分析不利天气对最优农资投入水平的影响. 由于 ω 的分布函数与单位农资投入成本均是外生的, 那么在风险厌恶度一定的条件下式(13)右边为定值, 结合 $Q(x, w)$ 关于 x, w 的性质, 可得如下结论.

推论 1 当 $w \in [\underline{w}, \underline{w}]$ 时, x_d^* 随 w 的减小而减小; 当 $w \in (\overline{w}, \overline{w})$ 时, x_d^* 随 w 的增大而减小.

推论 1 说明当受到不利天气影响时生产商的最优决策是降低农资投入水平, 并且不利天气越严重所投入

的农资水平越低进而降低了农产品产量, 这将导致农产品供需不匹配的难题并降低了供应链的稳健性.

4 基于风险补偿的供应链协调分析

分散式决策下生产商与销售商各自追求自身效用最大化而不是系统利润最大化, 这是导致扭曲农资投入水平并降低供应链整体绩效的根本原因. 若使不利天气影响产出下农产品供应链得以协调, 需设计一种新的机制使分散式与集中式决策下的最优农资投入水平相一致. 销售商为改善供应链整体绩效和增强供应链的稳健性, 需设计分担生产商所面临的不利天气风险的风险补偿机制, 生产季节结束后销售商给予所收购生产商的单位产品的补偿为 γ 以使双方“共担风险”, 同时生产商需向销售商提供一定的转移支付 T , 此支付可看作防范生产商机会主义行为的保证金, 这使双方真正做到了“风险共担、收益共享”. 在“保底收购, 随行就市”的订单价格 $\omega' = \max(\omega_p, \omega)$ 和协调机制 (γ, T) 下双方的利润函数分别为

$$\pi_{p2} = \omega' Q(x, w) + \gamma Q(x, w) - T - c_p x, \quad (22)$$

$$\pi_{r2} = p \min(Q(x, w), D) - \gamma Q(x, w) - \omega' Q(x, w) + T. \quad (23)$$

定理 2 在销售商所设计的风险补偿机制下, 若单位农产品风险补偿满足

$$\gamma = \frac{1}{\eta_p} \int_{\omega_p}^{F^{-1}(\eta_p)} F(t) dt + p(1 - G(Q(x, w))) - F^{-1}(\eta_p), \quad (24)$$

则 $x_d^* = x_c^*$, $\pi_{p1}(x_d^*) + \pi_{r1}(x_d^*) = \pi_c(x_c^*)$.

证明 在 CVaR 准则下, 结合式(22)整理可得, 风险补偿机制下风险厌恶生产商的目标函数为

$$\max_{v \in R^+} g(x, v) = \max_{v \in R^+} \left(v - \frac{1}{\eta_p} \int_L^U [v - \max(\omega_r, \omega) Q(x, w) - \gamma Q(x, w) + T + c_p x]^+ dF(t) \right). \quad (25)$$

类似销售商未提供协调机制情形的分析, 在销售商所设计的风险补偿协调机制下, 生产商在综合预期收益与所面临风险的基础上从个人效用最大化的视角选择的最优的农资投入水平 x_d^* 由下式确定.

$$\frac{dQ(x, w)}{dx} = \frac{c_p \eta_p}{\eta_p(\gamma + F^{-1}(\eta_p)) - \int_{\omega_p}^{F^{-1}(\eta_p)} F(t) dt}. \quad (26)$$

将式(24)代入式(26), 并结合式(3)分析可得 $x_d^* = x_c^*$. 易知, $\pi_{p1}(x_d^*) + \pi_{r1}(x_d^*) = \pi_c(x_c^*)$. 证毕.

从定理 2 的分析可发现, 在销售商所设计的单位产品风险补偿满足一定条件下可实现不利天气影响下农产品供应链的协调, 该协调机制与天气指数和生产商的风险厌恶度相关, 并可激励生产商选择供应链系统最优的农资投入水平, 从而提高农产品产量保障稳定供应. 由定理 2 的分析还可得到如下结论.

推论 2 1) 当 $w \in (\bar{w}, \bar{\bar{w}}]$ 时, $\gamma(\eta_p, w)$ 随 w 的增大而增大; 当 $w \in [\underline{w}, \underline{\bar{w}})$ 时, $\gamma(\eta_p, w)$ 随 w 的减小而增大; 2) $\gamma(\eta_p, w)$ 随 η_p 的增大而减小.

由推论 2 可知, 单位产品的补偿与不利天气的严重程度呈正比, 即生产过程中所遭遇的不利天气越严重, 在风险补偿机制下销售商所给予的补偿越多. 从推论 2 中还可发现, 单位产品的风险补偿是农产品生产商风险厌恶度的减函数, 这意味着风险补偿协调机制可能导致农产品生产商的机会主义行为.

由定理 2 以及推论 2 可知, 随着不利天气的加剧, 当 $\gamma(\eta_p, w) Q(x, w) > \Delta\pi_{r1} + T$ ($\Delta\pi_{r1} = \pi_{r1}(x_c^*) - \pi_{r1}(x_d^*)$) 时, 销售商在协调后所获得的利润低于协调前的利润, 这样销售商将缺乏提供此风险补偿契约的动力. 这意味着销售商所设计的单位产品风险补偿虽然可以实现供应链的协调, 但在不利天气超过一定程度时会降低销售商自身的利润. 因此, 客观上存在进一步创新的需求, 为保证风险补偿机制的有效执行, 下面探讨可使双方均能得到 Pareto 改进的合理转移支付区间. 有如下结论.

定理 3 在销售商所设计的风险补偿机制下, 若农产品生产商向销售商提供的转移支付 T 满足

$$T_{\min} = \gamma(\eta_p, w) Q(x, w) - \Delta\pi_{r1} \leq T \leq \Delta\pi_{p1} + \gamma(\eta_p, w) Q(x, w) = T_{\max}, \quad (27)$$

则双方均能实现 Pareto 改进, 其中 $\Delta\pi_{r1} = \pi_{r1}(x_c^*) - \pi_{r1}(x_d^*)$, $\Delta\pi_{p1} = \pi_{p1}(x_c^*) - \pi_{p1}(x_d^*)$.

证明 当 $\pi_{p2}^* = \pi_c^* - \pi_{r1}^*$ 时, 生产商抽取供应链协调后增加的所有利润而销售商的利润协调前后相同, 由式(1),(14)和式(24)整理得 $T = \gamma(\eta_p, w)Q(x, w) - [\pi_{r1}(x_c^*) - \pi_{r1}(x_d^*)]$, 当转移支付低于此值时, 销售商的利润低于协调前的利润, 因此合理转移支付的下界为 $T_{\min} = \gamma(\eta_p, w)Q(x, w) - \Delta\pi_{r1}$, 此时生产商抽走了供应链协调后所增加的利润; 类似地进行分析可得转移支付的上界为 $T_{\max} = \Delta\pi_{p1} + \gamma(\eta_p, w)Q(x, w)$, 其中 $\Delta\pi_{p1} = \pi_{p1}(x_c^*) - \pi_{p1}(x_d^*)$, 此时销售商抽走了协调后增加的所有利润.

若使双方均实现 Pareto 改进, 须使区间 $[T_{\min}, T_{\max}]$ 非空. 由于 $T_{\max} - T_{\min} = \pi_c(x_c^*) - (\pi_{p1}(x_d^*) + \pi_{r1}(x_d^*))$, 结合定理 1 中 2) 的分析可知 $T_{\max} - T_{\min} > 0$. 证毕.

由定理 3 可知, 当转移支付在合理的区间范围内, 可使生产商与销售商达到双赢的局面, 这保证双方均能获得相对稳定的收益, 从而增强了农产品供应连的稳健性. 此外, 在实现 Pareto 改进的状态下风险补偿机制可在双方间任意分配协调后所增加的利润, 而具体分配额依据双方的讨价还价能力.

定理 2 和定理 3 是在相同的天气指数下进行的供应链协调分析, 从证明分析过程中可以看出不利天气的影响不会改变式(24)和式(27)的函数关系, 并且无论在集中决策还是分散决策下同一地区的农产品生产商与销售商将面临着相同的天气指数, 从而由以上分析可以得到如下结论.

推论 3 在销售商所设计的与天气指数和农产品生产商的风险厌恶度相关的风险补偿协调机制下, 不利天气的影响不会改变农产品供应链的协调状态.

由推论 3 可发现, 面对不可控不利天气的影响, 可通过设计有效可行的协调机制来激励风险厌恶的生产商选择投入系统最优的农资水平, 这在一定程度上保障了农产品的稳定供应.

5 数值仿真

为了进一步说明所设计的风险补偿协调机制的有效性, 本节将通过数值仿真作进一步的分析. 以我国某地区某一农产品在生产中遭遇暖冬² ($w \in (\bar{w}, \overline{\bar{w}})$) 的不利天气为例进行分析. 依据文中描述构造不利天气影响下的产出为 $Q = Q_0 x^\alpha k^{\beta(w-\bar{w})}$, $0 < \alpha < 1, \beta < 0, k > 1$; 市场需求 D 在区间 $[A, B]$ 上服从均匀分布; 市场收购价格 ω 在区间 $[L, U]$ 上服从均匀分布. 相关参数的具体赋值如表 1.

表 1 参数表
Table 1 Parameters

Q_0	α	β	A	B	$\bar{w}$	c_p	L	U	k	p
1 000	0.50	-1	500	1 500	-4.2	200	0	4	e	4.1

结合表 1 的参数值并运用 MATLAB7.0 软件进行运算并绘出图 1 至图 4 来做进一步分析. 由图 1 可发现, 在农产品生产商风险厌恶度一定 ($\eta_p = 0.9$) 的情形下, 集中式与分散式决策下最优农资投入水平均随暖冬不利天气的加剧而降低, 这与推论 1 的论证相一致. 此外, 分散式决策下生产商的最优农资投入水平随保底收购价格的增大而增大. 从图 1 中还可发现, 存在双重边际效应, 即分散式决策下的最优农资投入水平低于集中式决策下的最优农资投入水平, 这与定理 1 中 1) 的结论相一致.

图 2 说明在不利天气一定 ($w = -1.5$) 的情形下, 分散决策时生产商的最优农资投入水平随风险厌恶度的降低而减小, 即生产商越惧怕风险则投入的农资水平越低, 并且风险厌恶下最优农资投入水平低于风险中性下最优农资投入水平, 这与定理 1 中 1) 的论证相一致. 从图 2 还可发现, 虽然销售商提高保底价格在一定程度上可激励生产商提高农资投入水平, 但农产品生产商风险厌恶的特性依然会加剧双重边际效应.

由图 1 和图 2 的分析可知, 不利天气与生产商风险厌恶的特性均会降低农资投入水平并会进一步降低供应链系统利润, 因此, 需要设计合理的机制来协调供应链以提高农资投入并使双方均能得到 Pareto 改善.

²某年某一区域整个冬季 (全国范围冬季为上年 12 月到次年 2 月) 的平均气温高于常年值 (自 2002 年开始我国根据 WMO 的规定起用 1971 至 2000 年 30 年平均值 -4.2℃ 作为常年值) 时, 称该年该区域为暖冬.

图3说明,在转移支付一定($T = 120$)的情形下,生产商所增加的利润随风险补偿额的增加而增大,销售商所增加的利润随风险补偿额的增大而减小.图3还说明在转移支付一定的情形下,存在一个合理的单位产品风险补偿区间 $\gamma \in [2.986, 3.624]$,可以实现农产品供应链的完美协调.

图4说明了,当单位产品风险补偿一定($\gamma = 3.0$)时,生产商与销售商在风险补偿机制下所增加的利润均为转移支付的线性函数,生产商所增加的利润随转移支付的增大而降低,销售商所增加的利润随转移支付的增大而增大.由图4还可发现,存在一个合理的 $T \in [98.240, 151.015]$ 可使生产商与销售商实现双赢.

图3和图4说明风险补偿机制可实现农产品供应链的完美协调,这验证了所设计机制的有效性.结合定理2和定理3发现,在协调状态下当生产商具有较低的风险厌恶度时可获得较高的补偿从而获得较高利润.

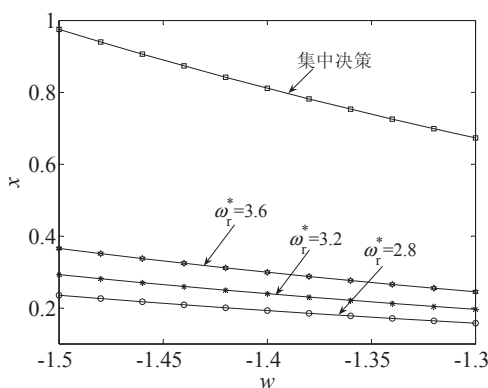


图1 天气指数 w 对农资投入水平 x 的影响

Fig. 1 Adverse weather's impact on agricultural material invest level

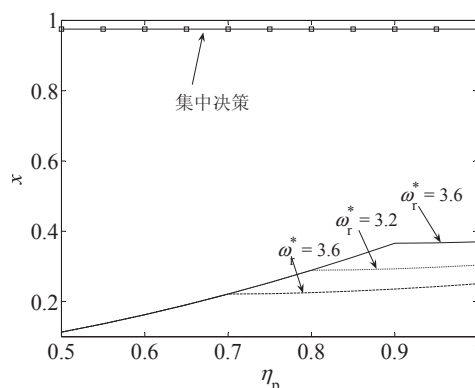


图2 风险厌恶度 η_p 对农资投入水平 x 的影响

Fig. 2 Risk aversion's impact on agricultural material invest level

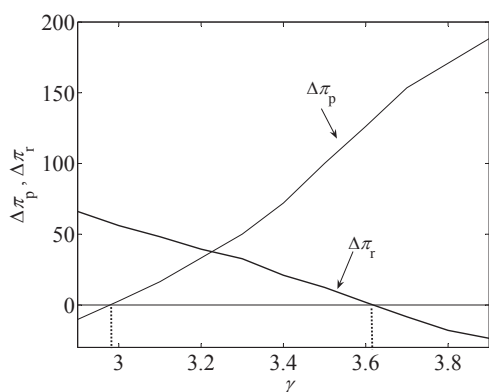


图3 风险补偿 γ 对供应链协调的影响

Fig. 3 Risk aversion's impact on supply chain coordination

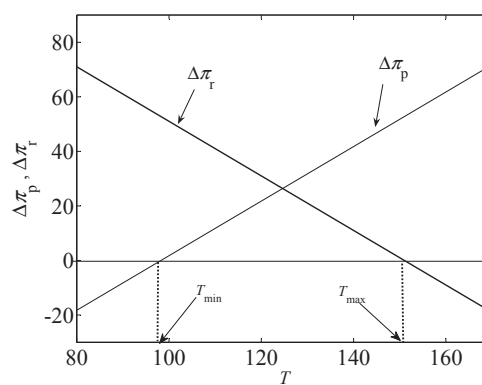


图4 转移支付 T 对供应链协调的影响

Fig. 4 Transfer payment's impact on supply chain coordination

6 结束语

本文针对农产品生产受不利天气和农资投入水平影响的特点,引入CVaR准则,研究由一个风险厌恶的生产商和一个风险中性的销售商组成的农产品供应链系统,分析了供应链失调的原因,基于此设计了与天气指数和风险厌恶度相关的风险补偿机制.研究表明,(1)不利天气影响下生产商的风险厌恶特性加剧了双重边际效应.(2)不利天气降低了农资投入水平和供应链及成员的利润,在单位产品风险补偿机制下可实现供应链协调,但是当不利天气超过一定程度时销售商将遭受损失,基于此通过设计合理的转移支付区间可使协调机制能得到有效执行,这保证双方均能获得相对稳定收益.(3)在风险补偿机制下不利天气的影响不会改变供应链的协调状态并激励生产商投入系统最优的农资投入水平,这在一定程度上降低了不利天气影响保障了农产品的稳定供应并增强了农产品供应连的稳健性.本文是基于完全信息并未考虑缺货损失,对不完全信

息下考虑缺货损失的供应链协调的情形将是进一步有意义的研究方向.

参考文献:

- [1] Regnier E. Doing something about the weather[J]. *Omega: International Journal of Management Science*, 2008, 36(1): 22–32.
- [2] Darby D K, Barker S, Audsley E, et al. A two-stage stochastic programming with recourse model for determining robust planting plans in horticulture[J]. *Journal of the Operational Research Society*, 2000, 51(1): 83–89.
- [3] Mozny M, Tolasz R, Nekovar J, et al. The impact of climate change on the yield and quality of Saaz hops in the Czech Republic[J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2009, 149(6): 913–919.
- [4] Dalla M A, Grifoni D, Mancini M, et al. The influence of climate on durum wheat quality in Tuscany, Central Italy [J]. *International Journal of Biometeorology*, 2011, 55(1): 87–96.
- [5] 金龙, 罗莹, 李永华. 长期天气的人工神经网络混合预报模型研究[J]. *系统工程学报*, 2003, 18(4): 331–336.
Jin Long, Luo Ying, Li Yonghua. Study on mixed prediction model of artificial neural network for long-range weather[J]. *Journal of Systems Engineering*, 2003, 18(4): 331–336. (in Chinese)
- [6] Tirado M C, Clarke R, Jaykus L A, et al. Climate change and food safety: A review[J]. *Food Research International*, 2010, 43(7): 1745–1765.
- [7] 赵霞, 吴方卫. 随机产出与需求下农产品供应链协调的收益共享合同研究[J]. *中国管理科学*, 2009, 17(5): 88–95.
Zhao Xia, Wu Fangwei. Coordination of agri-food chain with revenue-sharing contract under stochastic output and demand[J]. *Chinese Journal of Management Science*, 2009, 17(5): 88–95. (in Chinese)
- [8] Zhao X, Wu F W. Coordination of agri-food chain with revenue-sharing contract under stochastic output and stochastic demand[J]. *Asia-Pacific Journal of Operational Research*, 2011, 28(4): 487–510.
- [9] Chen F Y H, Yano C A. Improving supply chain performance and managing risk under weather-related demand uncertainty[J]. *Management Science*, 2010, 56(8): 1380–1397.
- [10] Lau H S, Lau A H L. Manufacturer's pricing strategy and return policy for a single-period commodity[J]. *European Journal of Operational Research*, 1999, 116(2): 291–304.
- [11] Gan X H, Sethi S P, Yan H M. Coordination of supply chains with risk-averse agents[J]. *Production and Operations Management*, 2004, 13(2): 135–149.
- [12] Choi T M, Li D, Yan H, et al. Channel coordination in supply chains with agents having mean-variance objectives[J]. *Omega: International Journal of Management Science*, 2008, 36(4): 565–576.
- [13] 傅强, 邢琳琳. 基于极值理论和 Copula 函数的条件 VaR 计算[J]. *系统工程学报*, 2009, 24(5): 531–537.
Fu Qiang, Xing Linlin. Calculate the condition VaR by extreme value theory and Copula function [J]. *Journal of Systems Engineering*, 2009, 24(5): 531–537. (in Chinese)
- [14] Rockafellar R T, Uryasev S. Optimization of conditional value-at-risk[J]. *Journal of Risk*, 2000, 2(3): 21–42.
- [15] Rockafellar R T, Uryasev S. Conditional value-at-risk for general loss distributions[J]. *Journal of Banking & Finance*, 2002, 26(7): 1443–1471.
- [16] Yang L, Xu M, Yu G, et al. Supply chain coordination with CVaR criterion[J]. *Asia-Pacific Journal of Operational Research*, 2009, 26(1): 135–160.
- [17] 叶飞, 林强, 李怡娜. 基于 CVaR 的“公司+农户”型订单农业供应链协调契约机制[J]. *系统工程理论与实践*, 2011, 31(3): 450–460.
Ye Fei, Lin Qiang, Li Yina. Supply chain coordination for “company+farmer” contract-farming with CVaR criterion[J]. *Systems Engineering: Theory & Practice*, 2011, 31(3): 450–460. (in Chinese)

作者简介:

但斌(1966—), 男, 重庆人, 博士, 教授, 博士生导师, 研究方向: 物流与供应链管理, Email: danbin@cqu.edu.cn;
伏红勇(1982—), 男, 山东泰安人, 博士生, 研究方向: 物流与供应链管理, Email: fuhongyong.cqu@gmail.com;
徐广业(1983—), 男, 安徽利辛人, 博士生, 研究方向: 物流与供应链管理, Email: xuguangye520@163.com;
陈伟(1983—), 男, 湖北潜江人, 博士生, 研究方向: 供应链管理, Email: cwcwj2004@yahoo.com.cn.