

# 果蔬冷链物流碳排放测算及控制

胡百灵<sup>1</sup>, 赵子琪<sup>2</sup>, 姚冠新<sup>3</sup>(博士生导师)

**【摘要】**通过构建数学模型测算我国果蔬冷链物流2007~2016年的碳排放量,并采用边际分析的经济学方法比较碳税和碳排放权交易两种控排方法的优劣。结果表明:果蔬冷链物流碳排放量逐年增加,最高可达410.10万吨,这不利于实现我国2020年的碳减排目标。耦合政策控制碳排放量效果最佳,即:短期内边际收益变化率比较稳定,果蔬冷链物流领域适合采用价格引导的碳税控排政策;长期来看,边际成本曲线整体呈现稳定的趋势,碳排放权交易政策更符合未来的发展。

**【关键词】**低碳经济; 果蔬冷链物流; 碳排放测算; 碳税; 碳排放权交易

**【中图分类号】** F326.1

**【文献标识码】** A

**【文章编号】** 1004-0994(2019)05-0119-6

## 一、问题提出及文献综述

果蔬的易腐易蚀、分散性及难储存等特点,导致果蔬需要全程冷链,果蔬自身也会进行光合作用,且生产端投入的生产资料易对环境造成污染,较其他产品产生了更多的碳排放,因此果蔬冷链物流低碳发展对我国实现节能减排目标、保障绿色有机果蔬供给具有重大意义。中国碳排放交易网数据显示,排在前三位的排碳行业为工业、农业和交通运输业,我国碳减排以工业为主,对农业及交通运输业虽有涉及,但并没有强有力的措施来监管和控制果蔬冷链物流的碳排放,这与我国在哥本哈根会议上承诺的“到2020年单位GDP二氧化碳强度减少40%~45%”的目标还有很大差距。因此,本文以果蔬冷链物流为研究对象,通过数学模型测算果蔬生产、配送等物流、仓储加工环节的碳排放量,并分析碳税及碳排放权交易的利弊,获得基于我国国情的控制碳排放的方法。

针对果蔬物流的独特性,学者们大多从果蔬冷链物流的碳足迹和低碳对果蔬冷链物流的影响两方面进行研究。Carlsson-Kanyama<sup>[1]</sup>认为果蔬冷链物流碳排放主要来源于运输和仓储环节,最多的时候可分别达到39%和47%,与本文观点一致,测算果蔬

物流碳足迹的方法主要有生命周期法、系数相乘法、能源转换法等。但研究控制果蔬冷链物流碳排放的文献相对较少,大多学者都是从国家角度分析减排方法的优劣。崔军<sup>[2]</sup>认为碳税是推动国家低碳发展的有力工具,应早日纳入国家政策体系;刘云泽<sup>[3]</sup>认为环境日益恶劣,在全球化的背景下,中国征收碳税既可以节能减排,又可以增加国际竞争力,提升自身形象。另一部分学者结合发达国家的碳减排经验,提出采用碳排放权交易的方式控排,并认为建立碳排放权交易市场是未来的主要方式之一,对减少温室气体带来的危害、提升能源利用效率具有非常重要的作用,目前已有部分地区在试行,未来有望在全国普遍开展<sup>[4,5]</sup>。本文在比较分析上述两种控排方法的基础上,提出了基于我国国情的碳减排策略。

## 二、果蔬冷链物流碳排放测算

果蔬冷链物流是指以水果蔬菜为对象,通过果蔬生产、包装、运输、装卸、仓储加工、配送等环节最终将其送达消费者手中的过程。本文从果蔬类农产品碳排放较多的生产环节、配送环节、仓储环节对果蔬冷链物流碳排放进行测算,通过搜集研究数据及参考相关文献构建数学模型。并根据计算结果分析

**【基金项目】** 国家自然科学基金项目(项目编号:71773104); 江苏省社会科学基金重点项目(项目编号:16GLA004); 全国旅游职业教育教学指导委员会科研项目(项目编号:LZW201706)

碳税及碳排放权交易在果蔬冷链物流碳排放控制方面发挥的作用,以期找到一种最合适的方式来解决果蔬冷链物流碳排放过多的问题。

1. 生产环节碳汇量  $C_{种}$ 。果蔬生产环节的碳汇量又称为净排放量,果蔬在种植过程中会产生碳排放,但又能吸收一部分碳,故净碳排放量为两者差值。

(1) 果蔬生长环节碳排放  $C_e$ 。包括六个部分:农用化肥产生的碳排放  $C_{e1}$ ;施用农药产生的碳排放  $C_{e2}$ ;使用农膜产生的碳排放  $C_{e3}$ ;农用机械燃烧柴油碳排放  $C_{e4}$ ;翻耕果蔬土地产生的氧化亚氮排放  $C_{e5}$ ;果蔬灌溉引起的碳排放量  $C_{e6}$ 。各碳排放源产生

的碳排放量由使用量及其系数相乘得到。可得:

$$C_e = C_{e1} + C_{e2} + C_{e3} + C_{e4} + C_{e5} + C_{e6} \\ = \sum_{i=1}^4 H_{1i} A_i + H_2 B + H_3 E + 1.4 L_{ij} + H_5 D + H_6 F \quad (1)$$

化肥有磷肥、氮肥、钾肥和复合肥四种,以  $H_{1i}$  表示不同化肥的用量(t),  $i=1, 2, 3, 4$ ;  $H_2$  为农药使用量(kg);  $H_3$  为农膜使用量(t);  $L_{ij}$  表示农机运作距离,根据种植面积( $km^2$ )计算,为叙述方便,计算方法见第2小节;  $H_5$  为果蔬种植面积( $km^2$ );碳排放系数分别为 A、B、D、E、F;  $H_6$  为果蔬有效灌溉面积( $km^2$ )。相对的碳排放系数值见表1。

表1 不同操作对应的碳排放系数

$A_i$ (kgCE/10kt)				B(kgCE/kg)	D(kgCE/ $km^2$ )	E(kgCE/t)	F(kgCE/ $km^2$ )
磷肥	钾肥	氮肥	复合肥				
0.1651	0.1203	0.8575	0.3810	4.9373	5.180	312.6	20.476
每吨化肥产生 $A_i$ kg 碳				每kg农药产生 Bkg 碳	翻耕 $1km^2$ 产生 Dkg 碳	每t农膜产生 Ekg 碳	浇灌 $1km^2$ 产生 Fkg 碳

(2) 果蔬生长环节吸收的碳量  $C_a$ 。根据孟成民等<sup>[6]</sup>的观点,在种植果蔬时果蔬本身也能吸收一部分碳,吸收的碳源总量与果蔬产量、经济系数、碳吸收率有密切关系,如下式:

$$C_a = \sum_{i=1}^J C_{ai} = \sum_{i=1}^J \sigma_i \frac{y_i}{\theta_i} \quad (2)$$

其中: $i$ 表示水果蔬菜的种类,假设总共有 $J$ 种,  $i=1, 2, \dots, J$ ;  $C_{ai}$ 为第 $i$ 种果蔬生长环节吸收的碳量;  $\sigma_i$ 是 $i$ 果蔬利用光合作用合成单位重量有机物所吸收的碳,即碳吸收率(kgCE/t);  $y_i$ 为 $i$ 果蔬的经济产量(t);  $\theta_i$ 为其经济系数。果蔬碳吸收率及经济系数如表2所示。

表2 果蔬碳吸收率及经济系数

	碳吸收率 $\sigma_i$	经济系数 $\theta_i$
水果(1)	0.450	1.750
蔬菜(2)	0.450	9.500

综上,  $C_{种} = C_e - C_a$  可以表达为:

$$C_{种} = \sum_{i=1}^4 H_{1i} A_i + H_2 B + H_3 E + 1.4 L_{ij} + H_5 D + H_6 F \\ - \sum_{j=1}^2 \sigma_j \frac{y_j}{\theta_j} = \sum_{i=1}^4 H_{1i} A_i + 4.9373 H_2 + 5.18 H_3 + 1.4 L_{ij} + \\ 312.6 H_5 + 20.476 H_6 - \sum_{j=1}^2 \sigma_j \frac{y_j}{\theta_j} \quad (3)$$

2007~2016年我国蔬菜播种面积( $kkm^2$ )约占农作物总种植面积( $kkm^2$ )的12.3%,水果约占

7.36%,蔬菜每年平均产量为68925.19万吨,水果每年平均产量为23293.979万吨。果蔬生产环节的碳排放量如表3所示,表中细节数据以水果为例。

2. 配送环节碳排放  $C_{配}$ 。由汽车动力能源碳排放  $C_1$  和制冷能源碳排放  $C_2$  构成。即:

$$C_{配} = C_1 + C_2 \quad (4)$$

根据相关研究<sup>[7]</sup>,  $C_1$  可表示为:

$$C_1 = \sum_{i=1}^4 E_i \eta_i \omega_i \quad (5)$$

其中: $E_i$ 为配送过程中各能源消耗量;  $\eta_i$ 为各能源的标准煤转化系数;  $\omega_i$ 为能源 $i$ 的碳排放系数(kg- $CO_2$ /kg);  $i=($ 煤炭,柴油,汽油,天然气)。以百公里耗油30L、燃烧柴油的福田奥铃M4冷链车为例,取 $\omega_1=3.1$ ,  $\eta_1=1.4571$ ,可得 $C_1=0.3 \times 3.1 \times 1.4571 L_{ij}$ ,  $L_{ij}$ 为配送点 $i$ 与 $j$ 之间的距离。 $C_2$ 可表示为:

$$C_2 = V_1 \times (t_j - t_i) + V_2 \times (t_{j2} - t_{j1}) \quad (6)$$

其中: $V_1$ 表示冷藏车车厢体热负荷(kcal/h);  $V_2$ 表示开关门的热负荷(kcal/h);  $t_j - t_i$ 为配送点 $i$ 与 $j$ 之间的时间差(h);  $t_{j2} - t_{j1}$ 为到达配送点 $j$ 装卸货的时间长(h)。冷藏车或冷冻车车厢热负荷  $V_1$  可表示为:

$$V_1 = (1+a) \times 10^{-4} \times R \times S \times \Delta T \quad (7)$$

其中: $a$ 为常数;  $R$ 表示热传导率[kcal/(h· $m^2$ · $^{\circ}C$ )];  $S = \sqrt{S_1 S_2}$ 表示制冷范围的平均表面积( $m^2$ ),  $S_1$ 为车箱体外表面积,  $S_2$ 为车箱体内表面积,  $\Delta T$ 为车内外温度差。冷藏冷冻车装卸货开关门时产生的热负荷

表 3

我国 2007~2016 年果蔬生产环节碳排放量

	2016 年	2015 年	2014 年	2013 年	2012 年	2011 年	2010 年	2009 年	2008 年	2007 年
磷肥(10kt)	61.09	62.05	62.22	61.13	60.99	60.29	59.30	58.71	57.41	56.89
钾肥(10kt)	46.88	47.27	47.25	46.18	45.46	44.54	43.16	41.53	40.13	39.27
氮肥(10kt)	170.05	173.81	176.11	176.21	176.63	175.27	173.23	171.48	169.49	169.07
复合肥(10kt)	162.44	160.13	155.72	151.43	146.46	139.48	132.37	125.02	118.39	110.62
农药量(10kt)	13.20	13.12	13.30	13.26	13.29	13.15	12.94	12.58	12.31	11.94
农膜量(10kt)	19.25	19.16	18.99	18.35	17.54	16.89	15.99	15.31	14.77	14.26
农机运作距离(wkm)	323.241	319.135	326.868	308.0466	302.2842	294.5806	287.4418	277.3737	267.2830	260.7311
种植面积(km <sup>2</sup> )	129815.5	128166.7	131272.4	123713.5	121399.3	118305.5	115438.5	111395.1	107342.6	104711.3
浇灌面积(km <sup>2</sup> )	49421.66	48482.23	47501.44	46716.13	45993.01	45397.95	44416.13	43616.10	43035.39	41597.25
产量(10kt)	28351.09	27375	26142.24	25093.04	24056.84	22768.18	21401.41	20395.51	19220.19	18136.29
水果碳排放(10kt)	64.540	64.359	65.501	65.357	65.511	64.931	63.943	62.181	60.965	59.271
蔬菜碳排放(10kt)	116.518	115.646	117.099	116.555	116.486	115.094	112.982	109.762	107.352	104.183

注:数据来自《中国统计年鉴》。

表示为:

$$V_2 = \gamma \cdot (0.54V + 3.22) \cdot 10^{-4} \cdot \Delta T \quad (8)$$

其中:V 表示车厢体积。 $\gamma$  是车厢门开关频次系数,开门频次分为 5 个等级:不开门时, $\gamma=0.25$ ;1 小时内开 1~2 次门, $\gamma=0.5$ ;1 小时内开 2~3 次门, $\gamma=1$ ;每多开一次, $\gamma$  增加 0.5,以此类推可得到  $\gamma$  的值。

冷链车车厢外表面积为  $5995 \times 2340 \times 3350 \text{mm}$ ,外表面积  $S_1$  为  $8390.11 \text{m}^2$ ,车厢内表面为  $4085 \times 2100 \times 2100 \text{mm}$ ,内表面积  $S_2$  为  $3872.4 \text{m}^2$ ,则制冷范围的平均表面积  $S = \sqrt{S_1 S_2} = 5700 \text{m}^2$ ,体积为  $18014.85 \text{m}^3$ ,冷藏车厢由专门的玻璃钢材料制成,钢的热传导率一般在  $41.9 \sim 58.6 (\frac{\text{kcal}}{\text{h} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{C}})$  之间,取平均值 50.3 作为其热传导率,车厢开门频次系数  $\gamma=0.5$ ,则:

$$C_{\text{配}} = 0.13 \times 3.1 \times 1.4571 L_{ij} + V_1 \times (t_j - t_i) + V_2 \times (t_j - t_{j1}) = 1.4 L_{ij} + 28.671 \Delta T (t_j - t_i) + 0.486 \Delta T (t_j - t_{j1}) \quad (9)$$

《2017~2022 年中国冷链物流产业竞争格局及发展趋势研究报告》中的数据显示,目前我国冷链物流的比例在逐年增加,果蔬、肉类、水产品冷链流通率分别达到 5%、15%、23%,冷藏运输率分别达到 15%、30%、40%,冷链物流的规模快速增长。截至 2016 年年底,我国冷库总量达到 4015 万吨(约为 10037 万立方米),国内冷藏车年度销量为 2.61 万辆,冷藏车保有量超过 11 万辆。果蔬最适宜的保存温度为  $0 \sim 10^\circ\text{C}$ ,为计算方便,取中间值  $5^\circ\text{C}$  作为车厢内温度,车厢外温度随时间和地区变化较大,取平均值  $20^\circ\text{C}$ ,因此  $\Delta T = 15^\circ\text{C}$ 。我国 2007~2016 年果蔬配送环节碳排放量如表 4 所示。

表 4

我国 2007~2016 年果蔬配送环节碳排放量

	2016 年	2015 年	2014 年	2013 年	2012 年	2011 年	2010 年	2009 年	2008 年	2007 年
冷藏车辆(辆)	26113	19846	20673	14100	8542	6208	5587	3600	4522	3083
配送距离(wkm)	238686	182573	188734	127718	79748	56546	49512	31459	38772	10676
配送时间(h)	3978	3043	3146	2129	1329	942	825	524	646	178
装卸时间(h)	16219620	15885165	15322158	14790754	14240985	13604677	12975123	12332898	11769081	11188249
配送碳排放量(10kt)	118.45	115.96	111.86	107.93	103.89	99.23	94.63	89.93	85.83	81.57

数据来源:根据《中国产业信息网》及计算得到。

**3. 仓储环节碳排放  $C_{\text{仓}}$ 。**仓储是果蔬类农产品物流的重要环节和各环节的衔接点,果蔬从采摘到消费者手中,至少 40% 的时间是在静止冷冻(藏)储存中。仓储除了储存的基本功能,还包括进货、包装、入库、捡货、出库等功能,是一个动态流通的中转站,除了供自己及特定情况使用,还负责对外出售。因

此,仓储环节低碳对整个物流低碳有重要作用。

果蔬仓储是指配送中心或第三方果蔬使用专用储存仓库对果蔬进行冷冻(藏),与冷藏车配送不同的是冷库面积更大,需要大型的制冷设备和照明设备,存储时间更长,碳排放可能是配送车的几十倍甚至几百倍。其碳排放主要来源于:机械设备、制冷设备、

照明设备产生的能源碳排放;腐烂果蔬及堆积过密产生的多余碳排放。当然,果蔬有一定的吸碳能力。

(1)能源碳排放 $C_{能}$ 。包括:冷库制冷产生的碳排放;叉车、堆垛机、传动带等仓库工具产生的碳排放;照明、灭菌灯等产生的碳排放。由于果蔬仓库都是固定式的,所以照明灯能源消耗以电能为主,我国电能的碳排放系数为 $1.483\text{kgCO}_2/\text{kwh}$ 。

$$C_{能}=C_2+1.4L_{总}+1.483\times E \quad (10)$$

其中: $C_2$ 是冷库制冷产生的碳排放; $L_{总}$ 是仓库叉车、堆垛机运行的总路程; $E$ 表示照明、杀菌等消耗的电能(kwh)。

(2)腐烂果蔬的碳排放 $C_{废}$ 。周转不及时及订货策略不当会形成多余的库存,部分果蔬因过密的堆垛造成空气不流通,影响制冷效果,导致果蔬因腐烂而被填埋、焚烧或堆肥。废弃的果蔬处理都会造成碳排放。根据康友才<sup>[8]</sup>的研究,废弃果蔬碳排放可以采用如下公式计算:

$$C_{废}=0.73M_{废}\times\varphi\times(1-OX) \quad (11)$$

$$\varphi=CH_4\times DOC\times DOC_N\times N \quad (12)$$

其中: $M_{废}$ 表示因腐烂变质而被弃埋的果蔬质

量; $OX$ 为氧化因子,其在废弃物管理非常精细的国家可以取值为0.1,在尚不完善的我国暂且不计入计算,取值为0; $\varphi$ 表示甲烷生产潜力,由甲烷修正因子 $CH_4$ 、可降解的有机碳的比例 $DOC$ 、经异化的可降解的有机碳比例 $DOC_N$ 、甲烷在腐烂果蔬填埋气体中的比例 $N$ 相乘得到。根据IPCC对发展中国家的建议缺省值,上述变量值可分别取0.4,1,0.77,0.5。因此:

$$C_{废}=M_{废}\times 0.112 \quad (13)$$

仓储过程果蔬的碳吸收能力为 $\sum_{i=1}^2\sigma_i\frac{y_i}{\theta_i}$ ,所以仓储碳排放为:

$$C_{仓}=C_{能}+C_{废}-\sum_{i=1}^2\sigma_i\frac{y_i}{\theta_i}=C_2+1.4L_{总}+1.483\times E+M_{废}\times 0.112-\sum_{i=1}^2\sigma_i\frac{y_i}{\theta_i} \quad (14)$$

由于仓库机械运行距离没有完整的统计数据,但是《中国统计年鉴》中有关于仓储板块的能源消耗量,包括电力及柴油等使用,因此本文以统计年鉴数据对仓储碳排放进行计算,结果如表5所示。

表5 我国2007~2016年果蔬仓储环节碳排放量

	2016年	2015年	2014年	2013年	2012年	2011年	2010年	2009年	2008年	2007年
冷库开放时间(h)	162196200	158851650	153221580	147907545	142409850	136046775	129751230	123328980	117690810	111882495
能源消耗	398226	38317	36336	34819	31524	28535	26068	23691	22917	21959
废弃果蔬质量(吨)	297359700	291228025	280906230	271163832.5	261084725	249419087.5	237877255	226103130	215766485	205117907.5
配送碳排放量(10kt)	118.45	115.96	111.86	107.93	103.89	99.23	94.63	89.93	85.83	81.57

数据来源:根据《中国统计年鉴》计算得到。

### 三、果蔬冷链物流碳排放控制研究

我国果蔬冷链物流碳排放量从2007年的321.57万吨增长到2016年的410.10万吨,碳排放量平均每年增长9.84万吨;2008年碳排放增长率为4.06%,而2016年碳排放增长率达到1.43%,碳排放增长率平均每年下降0.29%,虽然每年的增长率在逐渐下降,但总量在不断增加。因此,要想在2020年达到节能减排的目标,必须对果蔬冷链物流领域采取有效的控制措施。

我国控制碳排放的方法可分为征收碳税、碳排放权交易和两者结合三种。征收碳税主要是通过调控价格来控制碳排放,而碳排放权交易是通过市场机制管控数量来控制碳排放。本文基于两种控制方法耦合,以经济学知识为研究背景,分析两种方法的成本收益曲线,并根据我国果蔬冷链物流的实际

发展情况,为果蔬冷链物流碳排放控制提供参考。

1. 基于征收碳税(CTI)的碳排放量控制方法。碳税是针对化石能源燃烧、有机物腐烂变质、未按规定生产等产生的二氧化碳征收的税,果蔬冷链物流所要征收的碳税环节主要包括运输配送产生的二氧化碳、仓储产生的二氧化碳及使用化肥等农资品产生的二氧化碳。征收碳税的理论基础主要有四种,分别是:生产与消费端自身利益与环境保护冲突的环境负外部性理论;为改善社会效益与环境保护利益的不一致性,重新分配环境资源,将环境外部性转化为内部的庇古税理论;利用价格杠杆促使企业向保护环境面改进发展的污染者付费原则;认为征收碳税既可以减少环境污染又可以增加政府收入,有利于资源再分配的双重红利理论。

2. 基于碳排放权交易(CTII)的碳排放量控制

方法。碳排放权交易采用固定碳排放额的方式,通过市场机制对碳排放权进行自由交易,有偿排放二氧化碳等温室气体,以达到控制碳排放进而减少环境污染的目的。我国的碳排放权交易目前还属于自愿市场,只在北京、上海、广州等地试行。与碳税的理论基础不同,碳排放权交易主要依赖于科斯定理,其认为环境是大家的共有财产,应秉持公平分配的原则,针对固定配额之外的碳排放像商品一样交易,以此惩罚重污染户,奖励开发新能源的企业或个人。

3. 两种控制方法耦合的实际应用。耦合政策又称复合政策,即将碳税与碳排放权交易结合使用的减排手段,其共同点是目标一致,都是为了减少碳排放量。区别在于:碳税通过政府来调控企业等主体行为,使之朝着降低碳排放、保护环境、减少生产成本的目 标发展;碳排放权交易通过市场机制对社会资源进行分配。上述两种方法的优缺点见表6。

	碳 税	碳排放权交易
优点	碳减排成本低,只增加税种,且收税价格相对透明、稳定,有利于企业进行成本预算,税收反过来可以鼓励企业节能减排	虽然增加了生产成本,但可以通过创新出售多余碳量获得额外收益,还能推动企业不断改革创新,且企业主动参与性较高,易于推行
缺点	企业易将碳减排成本转嫁在消费者头上,不利于总目标的达成	需要构建交易平台,涉及的参与主体较多,价格随市场变化大,控制成本高

由于两种方法各有优劣,基于我国碳减排发展现状,选择耦合政策来控制果蔬冷链物流的碳排放。此外,还应继续普及国家“双创”的政策,同时提升农户、生产合作社、流通加工企业及消费者的低碳意识。

根据经济学分析,如果政府、果蔬物流企业等之间不存在博弈,且信息完全透明对称,则无论使用碳税还是碳交易效果都一样。然而现实中两者并非信息对称,政府往往从长远的社会利益考虑,站在顶层设计方针政策,而企业则会在政策背景下根据自身利益来设定最优生产计划,因此使用碳税还是碳交易的社会影响就存在差异。

经济学中用MSB表示边际社会效益,MAC表示边际控制成本,S表示产量减少量,企业的边际社会效益与边际控制成本曲线呈相反的走势,两条线相交的点即O点,表示社会效益最大。应用在果蔬冷链物流碳减排控制中,该点之前表示控制碳排放的成本每增加一单位,社会效益就会增加一单位,只

不过增加的速率逐渐变缓,该点之后,效益就会下滑,因此O点是最佳控制碳排放点,也是最佳收益点。假设控制碳排放收益曲线为 $W(Q)$ ,控制碳排放的成本曲线为 $C(Q)$ ,则成本收益曲线走势如图1和图2所示,其中Q为控制碳排放量。

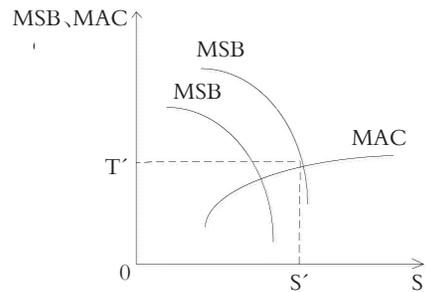


图1 经济学边际成本收益曲线

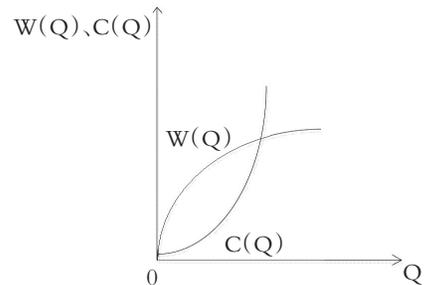


图2 碳排放控制成本收益曲线

控制果蔬冷链物流碳排放时要兼顾企业和社会效益最优,因此要实现收益与成本差值的最大化,基于一些不可预见性因素,将收益和成本函数各增加一个扰动项 $\alpha$ 、 $\beta$ 。控制碳排放的碳排放权交易和碳税的差值记为 $\delta$ ,系统扰动项记为 $\varepsilon$ 。

不确定状态下控制碳排放的最优目标函数如下: $\text{Max}W(Q, \alpha) - C(Q, \beta)$ ,假设以价格为调节手段的碳税最优目标为: $\varphi = \text{Max}W(\bar{Q}, \alpha) - C(\bar{Q}, \beta)$ ,而以市场主导的碳排放权交易最优目标函数为: $\omega = \text{Max}W(\hat{Q}, \alpha) - C(\hat{Q}, \beta)$ ,则 $\delta = [W(\bar{Q}, \alpha) - C(\bar{Q}, \beta)] - [W(\hat{Q}, \alpha) - C(\hat{Q}, \beta)]$ 。

根据Weitzman<sup>[9]</sup>和俞业夔等<sup>[10]</sup>的推导,可得:

$$\delta = \frac{\varepsilon^2 W''}{2C''^2} + \frac{\varepsilon^2}{2C''} = \frac{\varepsilon^2(W'' + C'')}{2C''^2} \quad (15)$$

其中: $W'' < 0, C'' > 0$ 。从上式可知,如果控制碳排放量收益函数曲线的斜率 $|W''|$ 比控制碳排放量成本函数曲线的斜率 $|C''|$ 小,则 $\delta > 0$ ,即 $\varphi > \omega$ ,说明碳税比碳排放权交易更适合中国情境下的碳减排政策。反之,则表明碳排放权交易政策更适合。

短期来看,碳排放权交易市场机制有待完善,国际上关于碳排放的金融衍生产品发展迅速,而我国

还在研究阶段,并未开放;碳配额是根据历史推算法还是 Redhat 软件包管理器(Redhat Package manager, RPM)机制计算,目前没有科学定论;任何市场都要有完善的法律或规章制度保驾护航,我国碳排放权交易还在试行阶段,缺少相应的数据、案例等作为参考依据,也没有成立专门的部门负责监督管理碳排放权交易市场;目前我国碳减排的重点集中在工业,对果蔬类农产品企业和物流等流通企业并未采取强制性措施,果蔬冷链物流领域的边际收益变化率比较稳定,即 $|W''| < |C''|$ ;短期内我国控制碳排放量的边际成本要比边际收益高。因此,近几年果蔬冷链物流领域比较适合通过征收碳税来进行碳减排。

长期来看,随着低碳减排政策的普遍实施和低碳意识的逐渐深入,农业和流通业也将成为工业等重污染行业之后的重点控排对象。只有齐抓共管,才能实现全国乃至全球的环境保护目标;否则,人类生存空间将受到威胁,我国也将因为控排措施不当受到国际舆论压力。我国能源结构近年来不断调整,大到专业的果蔬物流企业,小到果蔬专业合作社及农户,都在实施低碳环保措施,清洁能源及先进技术不断推动企业创新,优化投入产出过程,果蔬冷链物流碳减排的边际成本曲线整体将呈现稳定的趋势,此时的 $|W''| > |C''|$ 。因此,长期来看碳排放权交易比碳税更适合果蔬冷链物流领域发展。

以上分析表明,建立碳排放权交易市场不是一蹴而就的,至少近几年条件还未成熟,但我国降低碳排放的目标是急迫的,因此需要从征收碳税开始,逐渐过渡到碳排放权交易市场,这样既培养了国民的低碳意识,又为建立交易平台准备了时间。

#### 四、结论与展望

本文通过构建数学模型,以我国2007~2016年十年的果蔬冷链物流为研究对象,对碳排放较多的生产环节、配送环节及仓储环节进行碳排放测算,分析征收碳税和实施碳排放的优劣,在此基础上得出适合我国国情的碳减排方法,最终得出以下结论:①2007~2016年我国果蔬冷链物流碳排放逐年增加,最高可达410.10万吨,2015年之前碳排放增长率不断降低,2015年之后却不降反增,说明控制碳排放的方式遇到了瓶颈,亟需找到正确的减排方法。②碳税与碳排放权交易在控制果蔬冷链物流碳排放方面各有优劣,基于经济学成本收益分析,要想实现控制碳排放的成本收益最大化,需要采用耦合政策

控制碳排放。③我国短期内果蔬冷链物流边际收益变化率比较稳定,此时 $|W''| < |C''|$ ,说明前期适合采用碳税控制碳排放。而经过碳税的调整, $\delta < 0$ ,此时 $|W''| > |C''|$ ,我国控制碳排放的条件也更加成熟,此时,适合采用碳排放权交易的方式控排。因此,综合来看,我国果蔬冷链物流碳排放适合采用碳税与碳排放权交易耦合的政策进行控制。

本文还存在以下问题值得进一步研究:①我国常用系数法来测算能源消耗产生的碳排放量,缺乏准确性,果蔬冷链物流碳排放测算方法创新及准确性的后续研究值得商榷。②果蔬冷链物流碳排放控制过程较为复杂,部分目标无法量化,优化果蔬冷链物流碳排放的定量控制将是未来的研究重点。

#### 主要参考文献:

- [1] Carlsson-Kanyama A.. Climate change and dietary choices—how can emissions of greenhouse gases from food consumption be reduced[J]. Food Policy, 1998(3):277~293.
- [2] 崔军. 关于我国开征碳税的思考[J]. 税务研究, 2010(1):41~44.
- [3] 刘云泽. 碳税征收对我国国际竞争力的影响及对策[D]. 大连:东北财经大学,2013.
- [4] 陈波. 中国碳排放权交易市场的构建及宏观调控研究[J]. 中国人口·资源与环境,2013(11):7~13.
- [5] 李挚萍. 碳交易市场的监管机制研究[J]. 江苏大学学报(社会科学版),2012(1):56~62.
- [6] 孟成民,刘清,王建武. 广东省农田生态系统碳源汇时空差异[J]. 广东农业科学,2014(8):198~201.
- [7] 姚冠新,赵子琪,胡百灵. 中国农村物流碳排放与地区经济增长的脱钩趋势研究[J]. 华东经济管理,2017(11):51~56.
- [8] 康友才. 仓储系统低碳性的综合评价体系研究[D]. 成都:西南交通大学,2012.
- [9] Weitzman M. L.. Prices vs. quantities[J]. Review of Economic Studies, 1974(4):477~491.
- [10] 俞业夔,李林军,李文江等. 中国碳减排政策的适用性比较研究——碳税与碳交易[J]. 生态经济,2014(5):77~81.

作者单位:1.江苏大学财务处,江苏镇江212013; 2.江苏大学材料科学与工程学院,江苏镇江212013; 3.扬州大学农学院,江苏扬州225000