

DOI: 10.5846/stxb201709231715

马晓哲, 王雅晴, 刘昌新, 朱永彬, 王铮, 余方琳. 碳税政策对农业土地利用变化及其碳排放的影响. 生态学报, 2019, 39(5): - .
Ma X Z, Wang Y Q, Liu C X, Zhu Y B, Wang Z, Yu F L. Effect of carbon tax policy on agricultural land use change and its carbon emission. Acta Ecologica Sinica, 2019, 39(5): - .

碳税政策对农业土地利用变化及其碳排放的影响

马晓哲^{1,2}, 王雅晴³, 刘昌新², 朱永彬², 王 铮^{2,4,*}, 余方琳⁵

1 河南大学环境与规划学院, 开封 475004

2 中国科学院科技战略咨询研究院, 北京 100190

3 中国科学院生态环境研究中心, 北京 100085

4 华东师范大学地理信息科学教育部重点实验室, 上海 200241

5 黄河文明传承与现代文明建设河南省协同创新中心, 开封 475001

摘要: 农业生态系统具有碳源和碳汇的双重特征, 其在减缓气候变化中的重要性已得到国际社会的广泛认可。相较于技术手段的创新, 碳税、补贴等经济手段被认为是较为简单、可行、易出台的碳排放减缓政策。本文采用气候变化综合评估模型-GOPer-GC 模型, 构建国际碳税情景, 模拟分析了 2008 年至 2050 年碳税政策的实施对全球各区域农业土地利用变化及碳排放的影响。模拟结果表明, 情景 2 和情景 3 中全球农业土地利用变化累计碳排放分别达到 49.6 GtC 和 23.1 GtC, 明显低于基准情景的累计排放量 51.9 GtC。这说明, 实施碳税政策后, 相较于将碳税收入用作一般性财政收入, 将碳税收入补贴至农业部门在一定程度上减缓农业碳排放。此外, 林业部门获取更多的碳税补贴时, 多数区域农业土地利用变化碳排放规模大幅减少, 主因是耕地变为林地、草地变为林地面积的增加。情景 3 中, 中国的碳汇量较其他情景显著增加, 主要来自耕地变为林地、草地变为林地, 累计碳汇量分别达到 1.7 和 3.7 GtC。因此, 对于中国、美国、印度等大部分区域来说, 碳税收入更多地补贴至林业部门有利于在整体上减缓农业碳排放, 而欧盟、日本、东亚、马来西亚、印度尼西亚、俄罗斯、东欧地区, 碳税收入平均补贴至种植业、畜牧业和林业反而具有相对更好的减排效果。

关键词: 碳税; 农业; 土地利用变化; 碳排放; GOPer-GC 模型

Effect of carbon tax policy on agricultural land use change and its carbon emission

MA Xiaozhe^{1,2}, WANG Yaqing³, LIU Changxin², ZHU Yongbin², WANG Zheng^{2,4,*}, YU Fanglin⁵

1 The College of Environment and Planning of Henan University, Kaifeng 475004, China

2 Institutes of Science and Development, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China

3 Research Center for Eco-Environmental Sciences, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100085, China

4 Key Laboratory of Geographic Information Science, Ministry of Education, East China Normal of University, Shanghai 200241, China

5 Collaborative Innovation Center on Yellow River Civilization Heritage and Modern Civilization Construction, Kaifeng 475001, China

Abstract: Agricultural ecosystems can act not only as a carbon source, but also as a carbon sink. Its importance in mitigating carbon emission has been widely recognized by the international community. Compared with advanced technologies, carbon tax, subsidies, and other economic measures are considered to be relatively simple and feasible to govern climate change. Based on integrated assessment model GOPer-GC (Governance and development policy simulator on global climate model), we constructed international carbon tax scenarios and simulated their effects on agricultural land

基金项目: 国家自然科学基金(41701632); 国家重点研发计划(2012CB955804, 2016YFA0602700)

收稿日期: 2017-09-23; **网络出版日期:** 2018-00-00

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: wangzheng@casipm.ac.cn

cover and its carbon emissions from 2008 to 2050. The simulation results showed that cumulative carbon emission due to global agricultural land use change in scenarios 2 and 3 was 49.6 and 23.1 GtC, respectively, which were significantly lower than that in the baseline scenario. This indicated that instead of carbon tax income as a general revenue, carbon tax income as a subsidy for the agricultural sector can reduce carbon emissions of the agricultural land use change. Additionally, the subsidy policy, considering that the forestry sector gets more carbon tax income than farming and animal husbandry sector, significantly reduces carbon emission due to land use change, mainly due to the increase in the conversion of crop land and grassland to woodland. China's carbon sinks, contributed from the conversion of crop land and grassland to woodland, increased obviously in scenario 3. In this scenario, converting cropland and grassland to woodland in China contributed 1.7 GtC and 3.7 GtC of carbon sink respectively. Therefore, for most regions, such as China, the United States and India, increasing the subsidy of the forestry sector will be an effective way to mitigate agricultural carbon emission due to land use change. In the EU, Japan, East Asia, Malaysia, Indonesia, Russia, and Eastern Europe, the same subsidy in crops, livestock, and forestry resulted in a relatively obvious reduction in emission.

Key Words: carbon tax; agriculture; land use change; carbon emission; GPer-GC model

在全球气候治理进程中,碳税政策被视为减缓碳排放的有效措施之一,成为应对气候变化的有力手段^[1-5]。在碳税政策研究中,农业部门由于其碳源和碳汇的双重特征,得到了学者的广泛关注。目前,已有多位学者开展了农业部门碳税政策的相关研究^[6-11]。施正屏、徐逢桂研究结果表明,将碳税补贴至农业部门和个人所得税是最佳的碳税财政转移支付政策^[12]。LIU 和 WU 关注了在中国开征碳税对农业非二氧化碳温室气体排放的影响^[13]。Tang 模拟分析了碳税政策对西澳大利亚南部地区农业碳排放和农民收入的影响^[14]。Frank 指出较高的碳税总体上具有减排效应,却会导致贫困地区农产品消费价格的上涨^[15]。毫无疑问,这些研究对农业部门征收碳税做出了有价值的贡献,也为农业部门应对气候变化提供了决策参考,但以上研究较多关注特定区域农业部门生产环节的碳减排,未能涉及农业土地利用变化的碳排放,更未能从全球尺度上就改变农业土地利用、增加农业碳汇提出政策建议,这对全球气候治理决策的贡献有限。

事实上,在全球气候治理中,随着工业减排空间逐渐减小,发挥农业的增汇潜力,利用耕地、森林、草地等进行固碳,成为减缓气候变化的重要举措之一^[16]。《京都议定书》、《哥本哈根协定》和《巴黎气候协定》相继确定了造林、再造林活动在气候治理中的重要性,并鼓励缔约方为减少毁林和森林退化采取积极行动和奖励措施。气候行动追踪组织(climate action tracker)将阻止森林砍伐、减少林业和土地利用变化碳排放作为实现《巴黎气候协定》的十大行动之一^[17]。中国相继出台的《应对气候变化国家方案》、《中国国家自主贡献》,也将增加草地面积、实施植树造林、退耕还林还草作为增加生态系统碳汇的重要举措。然而,通过改变土地覆被的方式实现农业增汇需要大量的资金支持和政策倾斜,尽管当前针对农业的国际公共融资水平有了显著上升,但融资规模仍然相对较小。

随着学界对碳税政策的不断深入和实际推进,人们发现,碳税收入可被用于政府财政收入、抵扣消费税和生产税、作为生产投入的补贴等^[12,18-20]。根据发达国家经验,在出现气候融资瓶颈时,碳税还可以成为应对气候变化公共资金的来源,通过财政转移支付或补贴的形式为减缓气候变化做出进一步的贡献^[21]。基于以上的现实和观点,在全球应对气候变化的背景下,农业部门融资水平有限的问题使其成为碳税转移支付的必要对象^[22-23]。因此,将碳税收入作为农业土地投入的补贴,能否改变农业土地利用格局、实现农业增汇,本文试图就此问题展开研究,这对农业部门应对气候变化具有重要的研究价值和参考意义,也是对碳税收入使用方式的一种探索。鉴于此,本文采用了气候变化综合评估模型——全球气候治理与发展政策模拟系统(governance and development policy simulator on global climate, GPer-GC),构建国际碳税情景,模拟分析将碳税收入作为农业土地投入的补贴,对农业土地利用变化碳排放的影响,为全球气候治理提供决策参考。

1 模型与数据

1.1 GOPer-GC 模型

评估碳税政策对农业土地利用变化及其碳排放的影响,关键是将碳税政策的影响从经济系统传导至农业部门,为此本文采用 GOPer-GC 模型作为研究工具。这是因为 GOPer-GC 模型是一个面向全球治理的气候变化综合评估模型,既包含了经济模块,也包含了土地利用变化模块,很好地满足了本文的研究需求,模型的总体框架如图 1 所示^[24]。

首先,GOPer-GC 模型的经济模块是以美国普渡大学的 GTAP(global trade analysis projet)模型为基础构建的全球多区域多部门动态 CGE(computable general equilibrium)模型。在确保经济均衡发展的前提下,该模型能够很好地模拟国民经济体系中各部门间的相互影响。经济模块中还引入了碳税机制,通过征税前后的价格变化将碳税影响引入模型之中,可以有效地模拟碳税的征收对经济体系的冲击,这很好地满足了本文评估碳税政策影响的需求。

其次,GOPer-GC 模型中引入了农业地租机制,加入了土地利用变化模块,实现了对农业土地利用变化的模拟。该模块中,农业覆被包括耕地、草地、林地 3 种类型,农业土地利用变化包含农用地非农化、农用地覆被类型的相互转化两个部分,其中,农用地覆被类型的相互转换又可细分为草地变为林地、草地变为耕地、耕地变为林地、耕地变为草地、林地变为耕地、林地变为草地等六种类型。基于该模块可以得到农业土地利用的面积变化,然而要得到土地利用变化导致的碳排放数据,还需要将农业土地利用变化与碳排放结合起来。为此,GOPer-GC 模型中引入了 AEZ-EF 模型^[25]。AEZ-EF 模型将全球划分为多个区域,并将各区域土地细分到 18 个类型的农业生态区(agricultural ecology zone),可用于估算基于农业生态区的土地利用变化碳排放。至此,GOPer-GC 模型中农业土地利用变化碳排放的估算可以表达为:

$$C_{lu,aez,r} = Q_{lu,aez,r} \cdot CE_{lu,aez,r} \quad (1)$$

式中, $C_{lu,aez,r}$ 是区域 r 农业生态区 aez 中农业土地利用变化类型 lu 造成的碳排放, lu 包含林地变为耕地、林地变为草地、耕地变为林地、耕地变为草地、草地变为耕地、草地变为林地和农用地非农化七种类型; $Q_{lu,aez,r}$ 为区域 r 农业生态区 aez 中土地利用变化 lu 的面积; $CE_{lu,aez,r}$ 为区域 r 农业生态区 aez 中土地利用变化 lu 的碳排放系数,该系数取值见于 Plevin、Gibbs 等^[25]。以上是 GOPer-GC 模型的概括介绍,关于 GOPer-GC 模型的详细说明见文献[24]。

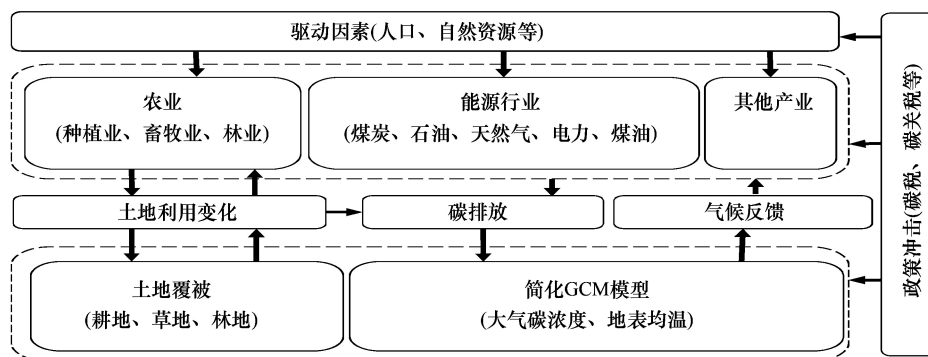


图 1 模型总体框架图

Fig.1 Framework of the GOPer-GC model

GCM, 全球气候模型 global climate model; GOPer-GC model, 全球气候治理与发展政策模拟系统 governance and development policy simulator on global climate

1.2 数据来源及说明

本文的基础数据源自 GTAP 第八版数据库,它提供了 2007 年全球宏观经济、农业土地覆被、碳排放等数

据,包含了全球 134 个区域和 57 个产业部门。依据 AEZ-EF 模型和研究需要,本文重新整合了 GTAP 数据库,将全球 134 个区域整合为 19 个国家和地区,分别是美国、欧盟、巴西、加拿大、日本、中国、印度、中美洲及含加勒比海地区(简写为中美洲)、南美洲、东亚其他地区(简写为东亚)、马来西亚和印度尼西亚(简写为马来和印尼)、东南亚其他地区(简写为东南亚)、南亚、俄罗斯、东欧、其他欧洲国家、中东和北非地区、亚撒哈拉地区、大洋洲。另外,本文将 57 个产业部门整合为 14 个部门,分别是种植业、畜牧业、林业、渔业、煤、石油、天然气、石油制品、电力、制造业、矿业、建筑业、运输业、服务业。其中,农业土地利用部门包含种植业、畜牧业、林业。区域和部门整合的详细情况见参考文献[24]。

2 碳税政策情景设置

以 2007 年为基年,本文模拟了无减排措施下全球 19 个区域 2008 年至 2050 年的宏观经济发展和碳排放状况,并设定该模拟结果为基准情景。为了分析全球尺度上碳税政策对农业土地利用变化碳排放的影响,本文构建了 3 个碳税政策情景。这 3 个情景均对企业厂商、私人住户、政府三类经济主体从消费环节征税,并将碳税政策情景的起征时间统一虚拟为 2016 年。由于本文的主要目的在于评估不同的碳税收入补贴方案对农业土地利用变化及其碳排放的影响,不同碳税税率的影响差异不在研究范围内,因此本文的 3 个碳税政策情景将采用统一的碳税税率。关于碳税税率的设定,最优碳税税率的上限和下限分别为 3 美元和 95 美元每吨二氧化碳^[26],刘宇等将碳税税率设定为 100 元人民币每吨碳,因此本文将全球各区域的碳税税率统一设定为 15 美元每吨碳^[20]。

关于碳税收入的使用方式,情景 1 中碳税收入全部作为区域财政收入,用来改善区域的收支状况,最终被用于居民消费、政府支出或者储蓄。考虑到农业部门的碳汇功能,本文在情景 2 和情景 3 中设定,自开征碳税后区域碳税总收入的 30% 返还至该区域的农业部门(种植业、畜牧业、林业),用于这些部门土地投入税的补贴,期望通过补贴的方式达到增汇的目的。情景 2 中,每个区域 30% 的碳税总收入在种植业、畜牧业和林业间平均分配。根据 Plevin 和 Gibbs 等^[25]和马晓哲等^[27],耕地、草地和林地的碳储存能力有所差别,林地的固碳能力最强,草地次之,耕地相对较弱,因此在情景 3 中设定林业部门获得较多的碳税收入,即碳税总收入的 15%。种植业同粮食生产密切相关,在世界人口增多的背景下,为了确保种植业正常发展,本文在情景 3 中返还至种植业的补贴相对较多,为碳税总收入的 14%,而畜牧业的补贴相对较少,为碳税总收入的 1%。为了清晰说明三个碳税政策的不同,现将其汇总于表 1。

表 1 碳税政策情景

Table 1 Scenarios of carbon tax policies

情景 Scenarios	碳税政策 Carbon tax policy
情景 1 Scenario 1	全部作为一般性财政收入
情景 2 Scenario 2	碳税总收入的 30% 用于农业部门补贴,70% 作为一般性财政收入,其中,30% 的碳税总收入平均分配至种植业、畜牧业、林业
情景 3 Scenario 3	碳税总收入的 30% 用于农业部门补贴,70% 作为一般性财政收入,其中,碳税总收入的 14% 补贴给种植业,1% 补贴给畜牧业,15% 补贴给林业

3 碳税政策对农业土地利用变化的影响

基准情景及碳税政策情景下,全球农业覆被面积的模拟结果见表 2。基准情景全球农业覆被面积在模拟期间整体上呈下降趋势,以年均 1.9 Mha 的速度转化为非农业用地,主要表现为草地和林地面积的下降,这与联合国粮农署公布的草地、林地面积变化趋势一致。如表 1 所示,受碳税政策的影响,全球农业土地覆被面积较基准情景有所差异。情景 1 中,全球农用地面积较基准情景略有下降,非农化面积略有有所增。情景 2 中全球农业覆被面积较基准情景和情景 1 显著增长,2050 年的全球农业覆被面积在基准情景的基础上增加 4.5 个百分点,主要表现为草地和林地面积的增长。这是因为畜牧业和林业中土地的产出弹性相对较小,补贴政

策对土地投入的拉动作用较强。当种植业、畜牧业、林业在情景 2 中获取相同的补贴时,土地要素倾向于流入畜牧业和林业,导致草地和林地面积增加。情景 3 中,农业部门获取的补贴总额与情景 2 保持一致,但种植业、林业、畜牧业间的分配比例有所差异,补贴更偏重于种植业和林业。补贴政策对种植业土地增长的拉动作用相对较弱,因此情景 3 中全球农业覆被的增幅略小于情景 2。整体来看,将碳税收入作为一般性财政收入会在一定程度上加速全球农用地的非农化,而将碳税收入补贴至农业部门则会带来农业覆被面积的显著增加。补贴金额相同的情况下,相较于耕地,草地和林地面积的增加更为明显。

表 2 全球农业覆被面积 (Mha)

Table 2 Area of global agricultural land cover

土地覆被类型 Land cover type	基准情景 Baseline scenario		情景 1 Scenario 1	情景 2 Scenario 2	情景 3 Scenario 3
	2008 年	2050 年	2050 年	2050 年	2050 年
	耕地 Cropland	1546.6	1624.0	1620.9	1574.0
草地 Grassland	2709.8	2609.2	2607.5	2903.3	2641.1
林地 Woodland	1676.1	1597.3	1595.4	1613.2	1839.0
合计 Total	5932.6	5830.5	5823.9	6090.5	6059.3

区域农业覆被面积的模拟结果如表 3 所示。基准情景中,大部分区域的农用地存在非农化趋势,农业覆被面积在模拟期间有所下降,大洋洲农用地非农化的趋势尤为显著,至 2050 年大洋洲农用地面积较基年下降 26%。与多数地区不同,中国和东南亚的农用地面积在基准情景中呈现增长趋势,这与联合国粮农署公布的农业土地面积变化趋势一致。受碳税政策的冲击,大部分区域的农用地面积在情景 1 中较基准情景减少,在情景 2 和情景 3 中较基准情景有所增加,这归因于补贴政策对农业用地投入的拉动作用。然而情景 3 中多数区域的农业覆被面积低于情景 2,这与补贴政策对种植业土地投入的拉动作用相对较弱有关。

表 3 区域农业覆被面积 (Mha)

Table 3 Area of regional agricultural land cover

土地覆被类型 Land cover type	基准情景 Baseline scenario		情景 1 Scenario 1	情景 2 Scenario 2	情景 3 Scenario 3
	2008 年	2050 年	2050 年	2050 年	2050 年
	美国 The United States	628.2	624.7	624.4	630.1
欧盟 European Union	337.0	314.9	313.8	364.1	365.9
巴西 Brazil	389.2	358.2	358.1	360.2	359.5
加拿大 Canada	158.4	163.4	163.3	164.4	164.5
日本 Japan	22.4	22.0	22.1	22.5	22.5
中国 China	563.3	662.1	658.1	789.0	787.0
印度 India	200.1	200.7	199.8	201.5	201.2
中美洲 Central American	188.9	177.1	177.1	178.0	177.7
南美洲 South American	424.3	437.2	437.2	440.0	439.3
东亚 East Asia	99.2	88.8	89.2	100.1	94.0
马来和印尼 Malaysia and Indonesia	112.8	112.1	112.1	112.1	112.1
东南亚 Southeast Asia	155.5	180.0	180.0	180.1	180.1
南亚 South Asia	92.4	94.7	94.5	98.4	95.7
俄罗斯 Russia	470.0	467.0	467.3	502.7	490.4
东欧 Eastern Europe	441.7	433.8	433.5	446.2	439.8
其他欧洲国家 Other European countries	30.5	31.0	31.0	31.1	31.2
中东和北非地区 Middle East and North Africa	184.4	184.9	184.9	187.1	186.9
亚撒哈拉地区 Sub-Saharan	1137.9	1058.8	1058.4	1060.3	1058.9
大洋洲 Oceania	296.4	219.1	219.0	222.5	222.3

全球农业覆被类型相互转换的累计面积如图 2 所示。总体来看,全球耕地、草地、林地的相互转换在基准情景和碳税政策情景中均以草地变为耕地、林地变为耕地为主,其余四种类型的累计面积相对较少。基准情景中,全球草地变为耕地、林地变为耕地在模拟期间的累计面积分别达到 137.5 Mha 和 91.7 Mha,这与全球耕地面积增加、草地和林地面积下降的总体趋势一致;林地变为草地、草地变为林地的累计面积相对较少,分别达到 34.7 Mha 和 29.9 Mha,而耕地变为草地、耕地变为林地的累计面积远远小于其他四种类型。由图 2 可知,情景 1 中六种类型的累计面积较基准情景的变化甚微,在 $(-1, 1)$ Mha 之间,可见将碳税作为一般性财政收入对全球农业覆被类型的相互转化影响较小。情景 2 中,全球林地变为草地、耕地变为草地、耕地变为林地的累计面积显著增加,分别较基准情景增加 53、42、18 Mha,这进一步说明了补贴规模相同的情况下,土地更倾向于流入畜牧业和林业。这也是情景 2 中草地变为耕地、草地变为林地累计面积下降的主要原因。情景 3 中,由于种植业和林业获取的补贴数额相对较多,草地变为耕地、草地变为林地呈现出增长趋势,累计面积较其他情景显著增加,其中草地变为林地的增加尤为显著,较基准情景增加 112 Mha。

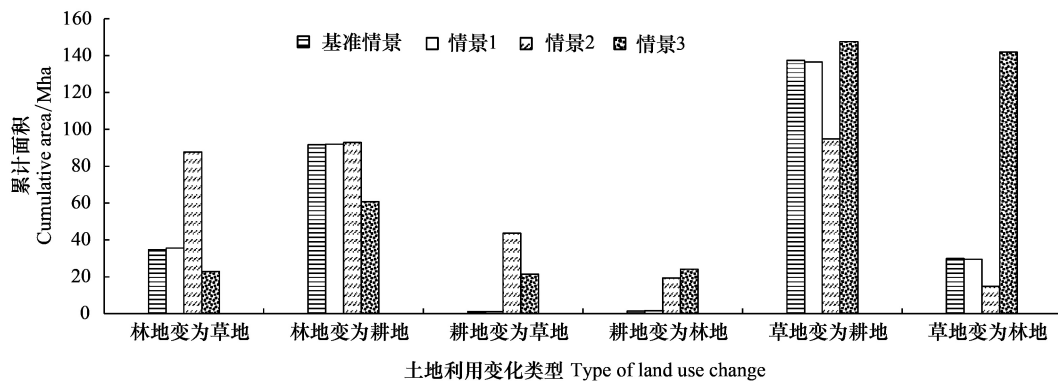


图 2 全球农业覆被类型转换累计面积

Fig.2 Cumulative area of global agricultural land cover conversion

基准情景中农用地覆被类型转化存在较大的区域差异,如表 4 所示。基准情景中,欧盟、巴西、南美洲、俄罗斯以林地变为草地、林地变为耕地为主;印度、中美洲、南亚、东欧以林地变为耕地、草地变为耕地为主;美国、加拿大、日本、马来和印尼、东南亚以林地变为耕地为主;东亚、中东和北非地区、亚撒哈拉地区、大洋洲以草地变为耕地为主;中国以草地变为耕地、草地变为林地为主;其他欧洲国家则以草地变为林地为主。

受碳税政策的冲击,区域覆被类型转换累计面积较基准情景有明显变化,如表 5 所示。情景 1 中,各区域土地覆被变化的累计面积与基准情景保持一致或略有变动,碳税政策对区域农业覆被类型相互转换的影响较小。情景 2 中,多数区域林地变为耕地、草地变为耕地、草地变为林地的累计面积较基准情景下降,耕地变为草地、耕地变为林地的累计面积略有增加。这与情景 2 中全球耕地面积减少、林地草地面积增加的变化趋势相一致。其中,中国新增 42.9 Mha 和 42.5 Mha 的耕地分别转化草地和林地,可见碳税补贴政策也是对中国退耕还林还草政策的一种推动。相较于其他情景,情景 3 中多数区域林地变为草地、林地变为耕地的累计面积减少,这直接导致多数区域林地面积的增长。尽管情景 3 中大部分区域耕地变为草地、耕地变为林地的累计面积较基准情景增加,但较情景 2 略有下降,这说明了种植业补贴增多对耕地面积的增长发挥了拉动作用。情景 3 中,草地变为耕地、草地变为林地的累计面积较基准情景增加,这与畜牧业获取的补贴数额相对较少有关。其中,南美洲、巴西、中国、俄罗斯草地变为耕地的累计面积增长显著,分别较基准情景增长 31.8、18、17.2 Mha 和 16.7 Mha。

总体来看,将碳税作为一般性财政收入对全球大部分区域土地覆被的格局影响微弱,多数区域农业土地利用变化仍以土地的非农化为主。当碳税收入补贴至农业部门时,全球农业覆被面积整体上显著增长,可见补贴政策促进了全球农用地面积的增加,一定程度上遏制了土地的非农化趋势。当种植业、畜牧业、林业获取

相同的补贴额度时,耕地变为草地和林地的累计面积增加,土地倾向于流向畜牧业和林业;当补贴政策向林业倾斜时,耕地和草地变为林地的累计面积增加,由此可见,部门间补贴额度的差异会对种植业、畜牧业、林业的土地分配格局产生显著的影响。

表 4 基准情景全球农业覆被类型转换累计面积 (Mha)

Table 4 Cumulative area of regional agricultural land cover conversion in baseline scenario

区域 Region	林地变为草地 Woodland converted to grassland	林地变为耕地 Woodland converted to cropland	耕地变为草地 Cropland converted to grassland	耕地变为林地 Cropland converted to woodland	草地变为耕地 Grassland converted to cropland	草地变为林地 Grassland converted to woodland
美国 The United States	3.33	9.10	0.00	0.00	2.41	0.05
欧盟 European Union	5.06	12.09	0.02	0.00	0.80	0.00
巴西 Brazil	5.54	15.69	0.00	0.00	3.49	0.00
加拿大 Canada	0.83	9.27	0.00	0.00	0.69	0.00
日本 Japan	0.06	0.39	0.00	0.00	0.02	0.00
中国 China	0.00	0.00	0.39	0.99	22.87	17.23
印度 India	0.00	2.87	0.01	0.01	3.03	0.65
中美洲 Central American	1.16	4.92	0.00	0.00	2.86	0.21
南美洲 South American	3.31	2.67	0.00	0.00	1.62	0.27
东亚 East Asia	0.31	1.18	0.00	0.00	5.77	0.33
马来和印尼 Malaysia and Indonesia	0.26	1.89	0.02	0.03	0.07	0.00
东南亚 Southeast Asia	0.46	6.34	0.00	0.00	0.00	0.00
南亚 South Asia	0.15	1.81	0.00	0.00	1.57	0.02
俄罗斯 Russia	13.20	6.48	0.00	0.00	1.92	0.84
东欧 Eastern Europe	0.15	2.78	0.00	0.00	6.39	0.96
其他欧洲国家 Other European countries	0.04	0.15	0.00	0.00	0.07	0.72
中东和北非地区 Middle East and North Africa	0.06	0.08	0.00	0.00	2.10	0.14
亚撒哈拉地区 Sub-Saharan	0.67	12.54	0.00	0.00	39.62	7.66
大洋洲 Oceania	0.10	1.41	0.71	0.42	42.19	0.85

5 碳税政策对农业土地利用变化碳排放的影响

全球农业土地利用变化碳排放的模拟结果如图 3 所示。基准情景中,全球农业土地利用变化在模拟期间整体上发挥碳源的作用,其年碳排放量呈减少趋势,累计碳排放 51.9 GtC (1GtC = 10^9 tC),其中 61%来自农用地非农化,39%来自耕地、草地、林地的相互转换。由此可见,农用地的非农化是农业土地利用变化碳排放的主要排放源,这与罗上华等^[28]、姜群鸥等^[29]、王克强^[30]等的观点一致。基准情景中,全球农用地非农化造成的碳排放累计达到 31.9 GtC,其次就是林地变为耕地,模拟期间累计排放二氧化碳 16.8 GtC,这一方面是因为森林转变为耕地的碳排放系数较大,另一方面则与转换面积较多有关。基准情景中,林地变为草地、草地变为耕地的碳排放规模相对较小。需要注意的是,全球草地转换为耕地的累计面积大于林地转换为耕地,但前者的累计碳排放明显小于后者,这与草地转化为耕地碳排放系数较小有关。耕地变为林地、耕地变为草地、草地变为林地均属于碳吸收的土地利用变化类型,这三种类型的累计碳汇量在基准情景中相对较小,其中草地被林地取代的碳汇量较多,达到 3.1 GtC,这是因为草地转换为林地的面积相对较多,累计达到 30 Mha,而耕地变为林地、耕地变为草地的面积相对较少,故碳汇总量也很有限。

碳税政策冲击下,全球农业土地利用变化碳排放较基准情景表现出不同的变化趋势。由图 3 可知,情景 1 中全球农业土地利用变化累计碳排放与基准情景相比并无明显变化,该情景中非农化碳排放仍然占据主导地位,累计排放 32.2 GtC,略高于基准情景。由此可知,将碳税收入作为一般性财政收入会在一定程度上加速

表 5 区域农业覆被相互转换累计面积较基准情景变化量 (Mha)
Table 5 Change of cumulative area of regional agricultural land cover conversion

区域 Region	林地变为草地 Woodland converted to grassland			林地变为耕地 Woodland converted to cropland			耕地变为草地 Cropland converted to grassland			耕地变为林地 Cropland converted to woodland			草地变为耕地 Grassland converted to cropland			草地变为林地 Grassland converted to woodland		
	情景 1 Scenario 1	情景 2 Scenario 2	情景 3 Scenario 3	情景 1 Scenario 1	情景 2 Scenario 2	情景 3 Scenario 3	情景 1 Scenario 1	情景 2 Scenario 2	情景 3 Scenario 3	情景 1 Scenario 1	情景 2 Scenario 2	情景 3 Scenario 3	情景 1 Scenario 1	情景 2 Scenario 2	情景 3 Scenario 3	情景 1 Scenario 1	情景 2 Scenario 2	情景 3 Scenario 3
美国 The United States	0.19	7.58	3.23	-0.02	0.08	-1.5	0	0.79	0.75	0	0	0	0.09	-0.45	0.36	0	0	1.4
欧盟 European Union	0.38	-0.4	-1.64	0.2	-1.88	-3.12	0	0.86	3.37	0	0.46	1.55	0	-0.01	0.33	0	0	0.07
巴西 Brazil	-0.04	4.21	-2.26	0	-2.16	-9.4	0	0.27	0	0	0	0	0.02	-1.94	7.91	0	0.01	17.97
加拿大 Canada	0	0.91	0.85	-0.02	-0.31	-0.48	0	0.23	0.3	0	0.1	0.15	0.01	-0.12	-0.12	0	0	0
日本 Japan	0	-0.03	-0.04	-0.01	-0.19	-0.19	0	0.04	0.04	0	0.18	0.23	0	0	0	0	0	0
中国 China	0	0	0	0	0	0	0.02	42.91	5.07	0.13	42.45	17.38	-0.28	-16.24	-6.85	-0.05	-9.03	17.19
印度 India	0	0.07	0.1	-0.07	-0.42	-0.7	0.06	0.31	0.2	0.08	0.88	0.43	-0.53	-1.09	-0.53	0.07	-0.56	0.21
中美洲 Central American	0.17	3.23	-1.16	0.03	-1.6	-3.6	0	0.04	0	0	0.32	0.04	-0.02	-0.66	2.59	-0.01	-0.11	5.88
南美洲 South American	0.1	0.93	-3.26	0.03	-1.35	-2.14	0	3.46	0	0	0	0	0	-0.07	2.41	0	0	31.8
东亚 East Asia	0	-0.1	-0.16	-0.01	-0.69	-0.37	0	4.64	0.77	0	0.51	0.1	-0.3	-1.56	-1.76	-0.05	-0.22	0.31
马来和印尼 Malaysia and Indonesia	0.01	0.03	-0.17	0.01	-0.71	-0.64	0	0.77	-0.01	0	1.95	-0.01	0	-0.04	0.08	0	0	0.31
东南亚 Southeast Asia	0.01	-0.27	-0.27	0	-4.2	-4.19	0	2.05	0.01	0	13.57	0.53	0	0	9.24	0	0	8.33
南亚 South Asia	-0.01	0.16	-0.14	-0.03	-0.13	-0.72	0	0.02	0	0	0.02	0	-0.02	-0.3	0.55	0	0	0.2
俄罗斯 Russia	-0.02	0.51	-6.43	-0.05	-2.09	-1.3	0	2.85	0	0	6.48	0	-0.09	-1.41	-0.11	-0.16	-0.83	16.71
东欧 Eastern Europe	0	1.33	0	0	-0.22	-0.57	0	5.2	0.02	0	1.59	0.12	0.1	-3.74	-2.48	0.03	-0.79	6.46
其他欧洲国家 Other European Countries	0	-0.02	-0.02	0	0	0	0	0.06	0	0	0.07	0	0	-0.01	0	0	-0.08	0.37
中东和北非地区 Middle East and North Africa	-0.01	-0.02	-0.02	-0.01	-0.03	-0.03	0	13.51	9.8	0	0.56	2.13	0	-0.84	-0.83	0.01	-0.05	-0.05
亚撒哈拉地区 Sub-Saharan	0.04	17.49	-0.34	0.15	6.66	-1.45	0	0	0	0	0	0	0.07	-13.5	0.61	-0.29	-5.43	4.03
大洋洲 Oceania	0	0	0	0.03	-0.46	-0.48	0	-0.02	-0.04	0.02	-0.03	-0.06	0.01	-2.58	-1.22	-0.01	0.71	0.78

全球农用地的非农化,导致农业土地利用变化碳排放略有增加。情景 2 中,全球农业土地利用变化在模拟期间仍然发挥碳源的作用,但农用地非农化的累计碳排放明显减少,全球土地利用变化累计碳排放也随之降低,达到 49.6 GtC。情景 2 中,全球林地变为草地的累计碳排放显著增加,而草地变为林地的累计碳吸收规模仅为情景 1 的一半,这与林地变为草地累计面积的增加、草地变为林地累计面积的减少直接相关。此外,情景 2 中耕地变为草地、耕地变为林地的碳吸收规模较基准情景和情景 1 显著增强,由此可见,农业部门土地投入的补贴政策对农业土地利用碳排放起到了抑制作用。情景 3 中,全球农业土地利用变化碳排放较其他情景显著降低,并于 2047 年由碳源转变为碳汇,至 2050 年固定吸收二氧化碳 0.14 GtC,模拟期间累计碳排放量显著降低,达到 23.1 GtC,较基准情景减少 28.8 GtC。情景 3 中,耕地、草地、林地的相互转换总体上开始发挥碳汇的作用,模拟期间累计吸收固定二氧化碳 3.2 GtC,这是情景 3 全球农业土地利用变化碳排放远小于其他情景的主要原因。该情景中,由于土地补贴向林业部门倾斜,草地变为林地的累计面积明显增多,其累计碳汇量在情景 3 中达到 16.7 GtC,使全球农业土地利用变化在模拟后期开始发挥碳汇的作用。

基准情景中,区域农业土地利用变化累计碳排放的模拟结果见图 4 和表 6。由图 4 可知,全球大部分地区的农业土地利用变化会造成二氧化碳的排放,而中国的农业土地利用变化则是一个碳吸收的过程,发挥碳汇的作用,这是因为中国的农用地总面积在基准情景中缓慢增加,且农用地覆被类型转换以碳吸收为主。模拟期间,中国农业土地利用变化累计吸收二氧化碳 1.2 GtC,以草地变为林地造成的碳汇为主。如图 4 所示,农业土地利用变化碳排放较多的区域有亚撒哈拉地区、巴西、大洋洲、欧盟、中美洲地区,其中,亚撒哈拉地区、大洋洲、欧盟、中美洲地区的农业土地利用变化碳排放以农用地的非农化为主,农用地覆被类型转换的累计碳排放相对较小,巴西的农业土地利用变化碳排放则以农用地覆被相互转换为主。日本、东亚、东欧、其他欧洲

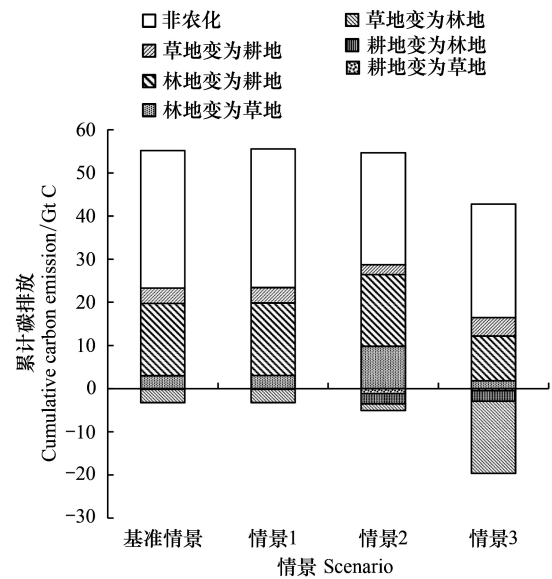


图 3 全球农业土地利用变化累计碳排放

Fig.3 Cumulative carbon emissions of global agricultural land use change

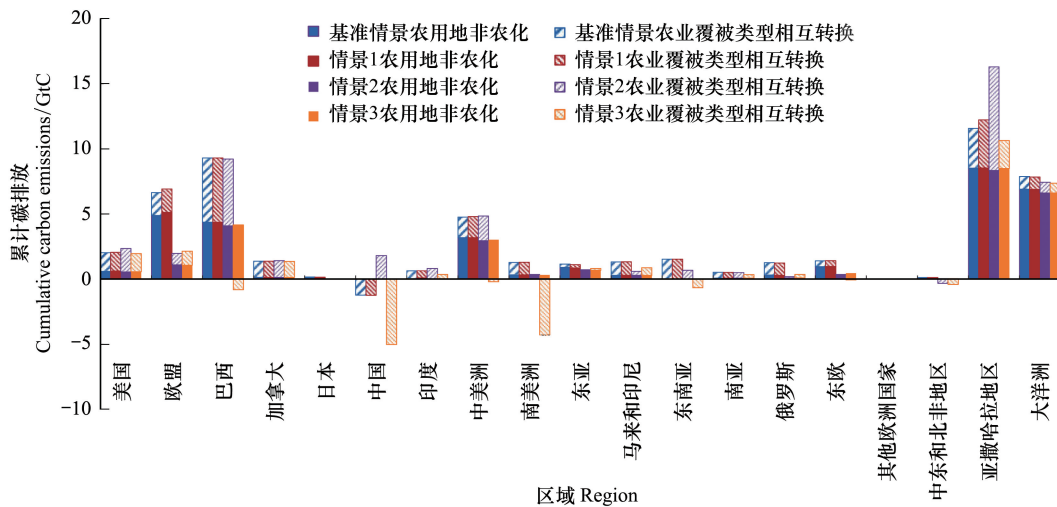


图 4 区域农业土地利用变化累计碳排放

Fig.4 Cumulative carbon emission of regional agricultural land use change

国家以及中东和北非地区的农业土地利用变化碳排放相对有限,且这些地区以农用地非农化的碳排放为主。其中,日本、东欧和其他欧洲国家的农业土地利用变化碳排放较少,主要归因于这些区域的农用地总面积较少。

比较图 4 中基准情景和三种政策情景的区域碳排放结果,可以发现,多数区域的农业土地利用变化碳排放放在情景 1 中最大,这是大部分区域在情景 1 中农用地的非农化加剧、农用地面积下降的直接体现。值得说明的是,中国、印度、加拿大、美国、中美洲、亚撒哈拉地区在情景 2 中的累计碳排放水平最高,这与这些区域在情景 2 中林地变为耕地、林地变为草地的累计面积增加有关,林地面积的减少直接造成农用地土地利用变化碳排放的升高。由此可见,种植业、畜牧业和林业获取相同补贴的碳税政策未能发挥农业碳减排的作用,不利于以上这些区域农业碳排放的减缓。另一方面,大部分区域的累计碳排放规模在情景 3 中最小。其中,中国、南美洲、东南亚的农业土地利用变化在情景 3 中开始发挥碳汇的作用,累计碳排放量为负值,分别累计固定吸收二氧化碳 5.0、3.9 GtC 和 0.6 GtC,这与这些区域林地面积的显著扩张有关。与多数区域不同,欧盟、日本、俄罗斯、东欧、东亚、马来和印尼地区农业土地利用变化累计碳排放的最小值出现在情景 2 中,这是由这些地区耕地变为林地碳汇量的增加、林地变为耕地碳排放量的减少所导致。

从图 4 可以看出,碳税政策情景中,相较于各区域非农化累计碳排放的变化,农用地各类型转换累计碳排放的波动更为明显。情景 1 中,各区域农业覆被类型转换总体上发挥碳源的作用,其累计碳排放模拟结果见表 6。比较基准情景和情景 1 的模拟结果可以发现,将碳税收入作为一般性财政收入,各区域农业覆被类型转换的碳排放水平较基准情景仅有微小的变动。情景 1 中,世界各区域林地变为耕地、林地变为草地、草地变为耕地的碳排放规模相对较大,尤其是林地变为耕地的累计排放,而耕地变为草地、耕地变为林地、草地变为林地的碳吸收规模相对较小。该情景中,巴西、亚撒哈拉地区、欧盟、中美、东南亚、美国、加拿大农用地覆被类型转换累计碳排放的规模相对较大,其他地区累计碳排放水平相对有限。从表 6 可以发现,巴西农业覆被类型转换累计碳排放规模最大,但较基准情景略有下降,主要表现在林地变为草地累计碳排放的减少。亚撒哈拉地区累计碳排放规模在情景 1 中次之,但较基准情景增长 76 MtC ($1 \text{ MtC} = 10^6 \text{ tC}$),主因是林地变为耕地碳排放的增加、草地变为林地碳汇量的下降。情景 1 中,日本、中东和北非地区、其他欧洲国家覆被类型转化造成的累计碳排放远小于其他地区,较基准情景均有所下降。这与日本、中东和北非地区、其他欧洲国家自身的农业面积较少有关。情景 2 中,日本、中东和北非地区农业覆被类型转换开始发挥碳汇的作用,主要来自耕地向林地和草地的转换,而其他国家(地区)的覆被类型转换在模拟期间整体上仍然是一个碳排放的过程。情景 2 中,多数区域农业覆被类型之间的转换造成二氧化碳的排放,以林地变为耕地、林地变为草地的碳排放为主。该情景下,中国的农业覆被相互转换在模拟期间整体上造成二氧化碳的释放,主要表现在林地变为草地、林地变为耕地碳排放规模的增长,可见种植业、畜牧业、林业获取均等的土地投入补贴会促使中国林地向耕地和草地的转化,进而带来碳排放的增加。情景 3 中,由于补贴至林业部门的碳税收入增加,多数区域的土地利用变化累计碳排放小于 0,达到增汇的目的,如巴西、日本、中国、中美洲、南美洲、东南亚、东欧、其他欧洲国家、中东和北非地区。情景 3 中,所有区域的累计碳排放量较基准情景均有所减少,主要是因为耕地变为林地、草地变为林地累计碳汇量的增加,这与林业部门获取的补贴相对较多有关。该情景下,中国、南美洲的碳汇规模较大,模拟期间农业覆被类型转换总体上累计固定二氧化碳 5007 MtC 和 4272 MtC。其中,中国的碳汇主要来自耕地变为林地、草地变为林地,累计碳汇量分别达到 1666、3724 MtC,较其他情景显著增加。草地变为林地碳汇量的提高促使南美洲农业覆被转换整体上发挥碳汇的作用,其中南美洲草地变为林地累计固碳 4600 MtC,远高于其他情景。

表 6 区域农业土地覆被类型相互转换累计碳排放 (MtC)
Table 6 Cumulative carbon emissions of regional agricultural land cover conversion

区域 Region	林地变为草地 Woodland converted to grassland			林地变为耕地 Woodland converted to cropland			耕地变为草地 Cropland converted to grassland					
	基准情景 Baseline scenario	情景 1 Scenario 1	情景 2 Scenario 2	情景 3 Scenario 3	基准情景 Baseline scenario	情景 1 Scenario 1	情景 2 Scenario 2	情景 3 Scenario 3	基准情景 Baseline scenario	情景 1 Scenario 1	情景 2 Scenario 2	情景 3 Scenario 3
	美国 The United States	236	249	693	473	1136	1132	1085	949	0	0	-23
欧盟 European Union	271	291	231	208	1427	1451	967	1062	0	0	-161	-129
巴西 Brazil	1097	1089	1897	640	3711	3711	3190	1470	0	0	-10	0
加拿大 Canada	65	64	149	132	1156	1153	1147	1102	0	0	-13	-9
日本 Japan	4	4	1	1	57	56	29	29	0	0	-3	-3
中国 China	0	0	1387	0	0	0	1572	0	-10	-11	-124	-128
印度 India	0	0	114	10	597	583	633	444	0	-1	-1	-8
中美洲 Central American	182	209	901	0	1258	1266	883	341	0	0	-5	0
南美洲 South American	414	429	233	7	474	480	296	102	0	0	-174	0
东亚 East Asia	18	18	12	9	119	118	55	84	0	0	-77	-16
马来和印尼 Malaysia and Indonesia	60	63	122	22	977	984	657	643	-2	-2	-74	-1
东南亚 Southeast Asia	76	78	42	31	1439	1439	767	492	0	0	-1	0
南亚 South Asia	20	19	41	1	389	382	360	238	0	0	-1	0
俄罗斯 Russia	388	387	450	213	541	537	372	440	0	0	-76	0
东欧 Eastern Europe	7	7	50	7	326	326	274	259	0	0	-122	0
其他欧洲国家 Other European Countries	1	2	6	0	17	17	17	17	0	0	-3	0
中东和北非地区 Middle East and North Africa	7	6	5	5	11	10	8	8	0	0	-267	-160
亚撒哈拉地区 Sub-Saharan	130	137	3478	66	2891	2924	4133	2556	0	0	0	0
大洋洲 Oceania	13	13	13	13	227	232	161	150	-8	-8	-8	-8

续表

(MiC)	耕地变为林地 Cropland converted to woodland			草地变为耕地 Grassland converted to cropland			草地变为林地 Grassland converted to woodland					
	基准情景 Baseline scenario	情景 1 Scenario 1	情景 2 Scenario 2	情景 3 Scenario 3	基准情景 Baseline scenario	情景 1 Scenario 1	情景 2 Scenario 2	情景 3 Scenario 3	基准情景 Baseline scenario	情景 1 Scenario 1	情景 2 Scenario 2	情景 3 Scenario 3
	美国 The United States	0	0	0	0	60	62	49	73	-4	-4	-4
欧盟 European Union	0	0	-229	-160	61	61	60	85	0	0	0	-3
巴西 Brazil	0	0	0	0	112	113	46	382	0	0	-1	-3292
加拿大 Canada	0	0	-22	-17	20	20	16	16	0	0	0	0
日本 Japan	0	0	-40	-35	2	2	1	1	0	0	0	0
中国 China	-87	-97	-383	-1666	717	708	205	511	-1835	-1829	-838	-3724
印度 India	-2	-15	-2	-95	80	66	47	66	-77	-87	-10	-109
中美洲 Central American	0	0	0	-9	155	153	120	363	-22	-22	-9	-898
南美洲 South American	0	0	-103	-9	93	92	111	228	-34	-34	-331	-4600
东亚 East Asia	0	0	-45	-10	133	127	96	96	-8	-7	-2	-16
马来和印尼 Malaysia and Indonesia	-15	-15	-389	-113	3	3	1	7	0	0	0	-71
东南亚 Southeast Asia	0	0	-138	-10	0	0	0	332	0	0	0	-1392
南亚 South Asia	0	0	-2	0	42	41	36	64	-2	-2	-2	-29
俄罗斯 Russia	0	0	-670	0	54	52	16	53	-33	-28	-3	-442
东欧 Eastern Europe	0	0	-220	-268	149	151	60	90	-42	-43	-7	-388
其他欧洲国家 Other European Countries	0	0	-3	0	2	2	1	2	-17	-17	-8	-28
中东和北非地区 Middle East and North Africa	0	0	-77	0	47	47	28	28	-14	-15	-10	-10
亚撒哈拉地区 Sub-Saharan	0	0	0	-48	949	947	557	975	-903	-865	-222	-1445
大洋洲 Oceania	-56	-59	-52	0	878	877	851	849	-98	-98	-142	-190

正值表示碳排放,负值表示碳吸收

6 总结

本文运用 GPer-GC 模型,模拟了不同的碳税政策对全球各区域农业土地利用变化及其碳排放的影响,得到如下结论:

(1) 无碳税政策情景,即基准情景中,全球农用地总面积在模拟期间呈下降趋势,主要表现为林地和草地的非农化以及森林向耕地的转变,这也是全球多数地区的农业土地利用变化在模拟期间整体上发挥碳源作用的主要原因。由此可见,减缓碳排放政策的制定必须考虑农业土地利用变化碳排放。

(2) 实施碳税政策后,相较于将碳税收入用作一般性财政收入,将碳税收入补贴至农业部门会在一定程度上改变农业土地利用格局,进而发挥农业的减排潜力,实现农业增汇,这为农业部门应对气候变化提供了新思路。

(3) 碳税收入在种植业、畜牧业、林业三个部门间的分配对补贴政策的增汇效果有较大的影响。多数区域中,林业部门获取较多的碳税收入会使农业土地利用变化碳排放大幅减少,如美国、巴西、南亚、亚撒哈拉地区、加拿大、印度、中美洲、南美洲、东南亚、其他欧洲国家、中东和北非地区、大洋洲。因此,在气候治理过程中,加大林业部门土地投入的补贴将成为以上这些区域减缓气候变化、实现增汇的有效措施。

(4) 与多数区域不同,欧盟、日本、东亚、马来和印尼、俄罗斯、东欧地区在碳税收入平均分配的情景下累计碳排放量最小,主要原因是耕地变为林地碳汇量的增加。向林业部门倾斜的补贴政策对这些地区农业土地利用变化碳排放的抑制作用反而较弱,因此,以上这些地区将补贴平均分配至种植业、畜牧业和林业反而具有相对明显的减排效果。

(5) 基准情景中,中国的农用地面积呈现增长趋势,且农业土地利用变化碳排放以草地变为林地造成的碳汇为主。种植业、畜牧业和林业获取相同补贴的碳税政策不利于中国农业碳排放的减缓,因此,中国的碳税补贴政策应充分考虑行业差异,向林业部门倾斜,以此发挥农业部门减缓气候变化的潜力。

以上是本文的研究结论。值得注意的是,本文将农业土地利用变化碳排放限定为土地覆被的变化导致的碳排放,并未将管理措施、耕作方式等对土地利用变化碳排放的影响纳入其中,这是本文存在的不足之处,有待进一步完善。另外,本文旨在研究不同税收使用方式的影响差异,因此设定的碳税政策采用了统一的碳税税率,无法比较税率差异对农业土地利用变化碳排放的影响,这也是本文在研究上的局限,期待下一步的改进。

参考文献 (References):

- [1] Helm D. Economic instruments and environmental policy. *Economic and Social Review*, 2005, 36(3): 205-228.
- [2] 苏明,傅志华,许文,王志刚,李欣,梁强. 碳税的国际经验与借鉴. *经济研究参考*, 2009, (9): 17-23.
- [3] Elliott J, Foster I, Kortum S, Munson T, Pérez-Cervantes F, Weisbach D. Trade and carbon taxes. *The American Economic Review*, 2010, 100(2): 465-469.
- [4] Speck S. Carbon taxation: two decades of experience and future prospects. *Carbon Management*, 2014, 4(2): 171-183.
- [5] 娄峰. 碳税征收对我国宏观经济及碳减排影响的模拟研究. *数量经济技术经济研究*, 2014, 31(10): 84-96, 109-109.
- [6] Schneider U A, McCarl B A. Implications of a carbon-based energy tax for U.S. agriculture. *Agricultural and Resource Economics Review*, 2005, 34(2): 265-279.
- [7] Wise M, Calvin K, Thomson A, Clarke L, Bond-Lamberty B, Sands R, Smith S J, Janetos A, Edmonds J. Implications of limiting CO₂ concentrations for land use and energy. *Science*, 2009, 324(5931): 1183-1186.
- [8] 刘亦文,胡宗义. 农业温室气体减排对中国农村经济影响研究——基于 CGE 模型的农业部门生产环节征收碳税的分析. *中国软科学*, 2015, (9): 41-54.
- [9] 张兴平,朱锦晨,徐岸柳,郭正权,刘珊珊. 基于 CGE 碳税政策对北京社会经济系统的影响分析. *生态学报*, 2015, 35(20): 6798-6805.
- [10] 黄蕊,刘昌新,王铮. 碳税和硫税治理下中国未来的碳排放趋势. *生态学报*, 2017, 37(9): 2869-2879.
- [11] Rautiainen A, Lintunen J, Uusivuori J. Carbon taxation of the land use sector—the economics of soil carbon. *Natural Resource Modeling*, 2017, 30(2): e12126.

- [12] 施正屏, 徐逢桂. 台湾碳税财政支付转移至农业部门之最适策略——基于可计算一般均衡模型 (CGE) 的运用. 台湾农业探索, 2012, (4): 1-10.
- [13] Liu L C, Wu G. The effects of carbon dioxide, methane and nitrous oxide emission taxes: an empirical study in China. *Journal of Cleaner Production*, 2017, 142: 1044-1054.
- [14] Tang K, Hailu A, Kragt M E, Ma C B. The response of broadacre mixed crop-livestock farmers to agricultural greenhouse gas abatement incentives. *Agricultural Systems*, 2018, 160: 11-20.
- [15] Frank S, Havlík P, Valin H, Wollenberg E, Hasegawa T, Obersteiner M. *Carbon Prices, Climate Change Mitigation & Food Security: How to Avoid Trade-Offs?* Wageningen: CCAFS, 2017.
- [16] 贾敬敦, 魏珣, 金书秦. 澳大利亚发展碳汇农业对中国的启示. 中国农业科技导报, 2012, 14(2): 7-11.
- [17] Climate Action Tracker. The ten most important short-term steps to limit warming to 1.5°C. (2016-11-16) [2017-04-20] <https://climateactiontracker.org/publications/the-ten-most-important-short-term-steps-to-limit-warming-to-15c/>
- [18] 高颖, 李善同. 征收能源消费税对社会经济与能源环境的影响分析. 中国人口·资源与环境, 2009, 19(2): 30-35.
- [19] 顾高翔, 王铮. 国际资本流动模式及其国际经济影响模拟研究. 财经研究, 2015, 41(11): 58-70.
- [20] 刘宇, 肖宏伟, 吕郢康. 多种税收返还模式下碳税对中国的经济影响——基于动态 CGE 模型. 财经研究, 2015, 41(1): 35-48.
- [21] 王遥, 刘倩. 气候融资: 全球形势及中国问题研究. 国际金融研究, 2012, (9): 34-42.
- [22] 周义, 覃志豪, 包刚. 气候变化对农业的影响及应对. 中国农学通报, 2011, 27(32): 299-303.
- [23] FAO. *The State of Food and Agriculture 2016: Climate Change, Agriculture and Food Security*. Rome: FAO, 2016.
- [24] 马晓哲. 碳税驱动下的全球气候治理及其对世界宏观经济的影响研究[D]. 北京: 中国科学院大学, 2016.
- [25] Plevin R, Gibbs H, Duffy J, Yui S, Yeh S. *Agro-ecological Zone Emission Factor (AEZ-EF) Model (v47)*. West Lafayette: Purdue University, 2014.
- [26] 曹静. 走低碳发展之路: 中国碳税政策的设计及 CGE 模型分析. 金融研究, 2009, (12): 19-29.
- [27] 马晓哲, 王铮. 土地利用变化对区域碳源汇的影响研究进展. 生态学报, 2015, 35(17): 5898-5907.
- [28] 罗上华, 毛齐正, 马克明, 邬建国. 城市土壤碳循环与碳固持研究综述. 生态学报, 2012, 32(22): 7177-7189.
- [29] 姜群鸥, 邓祥征, 战金艳, 刘兴权. 黄淮海平原耕地转移对植被碳储量的影响. 地理研究, 2008, 27(4): 839-846.
- [30] 王克强. 土地利用变化的碳排放效应研究——兼沂水县实证分析[D]. 雅安: 四川农业大学, 2012.