

引用格式:邓明君,邓俊杰,刘佳宇. 中国粮食作物化肥施用的碳排放时空演变与减排潜力[J]. 资源科学, 2016, 38(3):0534-0544. [Deng M J, Deng J J, Liu J Y. On the space-time evolution of carbon emissions and reduction potential in Chinese grain crop fertilizer application[J]. *Resources Science*, 2016, 38(3):0534-0544]. DOI: 10.18402/resci.2016.03.16

# 中国粮食作物化肥施用的碳排放时空演变与减排潜力

邓明君, 邓俊杰, 刘佳宇

(湖南科技大学 商学院/两型社会与生态文明协同创新中心, 湘潭 411201)

**摘要:**研究区域农作物化肥施用的碳排放趋势演进规律与减排潜力对于合理制定农业碳减排政策具有重要意义。基于“全国农产品成本收益资料汇编”、“中国统计年鉴”和农业部“小麦、玉米、水稻三大粮食作物区域大配方与施肥建议”中各地区的三大粮食作物产量、化肥投入类型及其数量等数据,采用碳排放系数法,测算并分析2005-2013年中国三大粮食作物化肥施用碳排放时空演变与碳减排潜力。结果表明:①江苏、安徽、宁夏、甘肃和山西的玉米,湖北、陕西和宁夏的小麦,辽宁、山东、江苏、浙江、陕西和湖南的水稻,其化肥施用的单位产品碳排放量下降明显;②黑龙江、吉林和新疆的玉米,云南和河南的小麦,吉林、广西和云南的水稻,其化肥施用的单位产品碳排放量不降反升;③与测土配方施肥情形相比,在2013年,江苏、陕西、湖北、贵州、广西和云南的玉米,山西、内蒙古、陕西、甘肃、宁夏、新疆、河北、四川、云南和江苏的小麦,湖南、江苏、海南、安徽、云南、广东和广西的水稻,其化肥施用的单位产品碳排放量偏高;④全国玉米化肥施用碳减排潜力约574万t CE,集中在黑龙江、辽宁、吉林、山东、内蒙古、陕西、云南、贵州和广西;⑤全国小麦化肥施用碳减排潜力约475万t CE,集中在河北、江苏、山东和河南;⑥全国水稻化肥施用碳减排潜力约206万t CE,集中在湖南、广东、广西、江苏和江西。最后,结合实地调查,本文提出应在粮食作物化肥施用碳减排潜力大的区域,通过政策激励和市场化运作,提高测土配方施肥技术推广的效应。

**关键词:**粮食作物;化肥施用;单位产品碳排放量;时空演变;碳减排潜力

DOI: 10.18402/resci.2016.03.16

## 1 引言

农业碳排放仅占中国温室气体排放总量的16%~17%<sup>[1]</sup>,但其所拥有的减排潜力以及由此带来的正外部效应却不应低估<sup>[2]</sup>。农业碳排放源有农业投入品使用、农业能源耗费、农业废弃物处理、稻田甲烷排放、土壤氧化亚氮的直接排放、动物尤其是反刍动物养殖带来的碳排放<sup>[3-5]</sup>。世界粮农组织(FAO)的相关研究表明,传统集约农业中75%的二氧化碳(CO<sub>2</sub>)来自化肥、饲料及燃料<sup>[6]</sup>。黄祖辉等采用分层投入产出一生命周期评价法研究浙江省农业系统碳足迹,发现隐含在农用能源和农业工业投入品生产过程中的碳排放不容忽视,化肥(氮肥)生

产、运输、施用过程中引致的碳排放在整个农业系统碳排放中所占比重最大<sup>[7]</sup>。史磊刚等在系统评价了华北平原冬小麦-夏玉米两熟种植模式的碳足迹,发现在其碳足迹构成中的化肥、电能、柴油、种子和农药分别占总量的61.76%、25.03%、7.44%、4.75%和1.02%,氮肥使用量和电能消耗量均与碳足迹呈正相关<sup>[8]</sup>。王才军等研究表明,近15年,重庆农业生产中化肥使用导致的碳排放在整个农业投入的碳排放中始终占据绝对大的比重<sup>[9]</sup>。尧波等的研究表明,江西省农业碳排放总量从2000年的230.85万t增长到2010年的290.51万t,不同年份农业碳排放均主要源于化肥施用与农业机械使用<sup>[10]</sup>。张广胜

收稿日期:2015-05-26;修订日期:2015-10-15

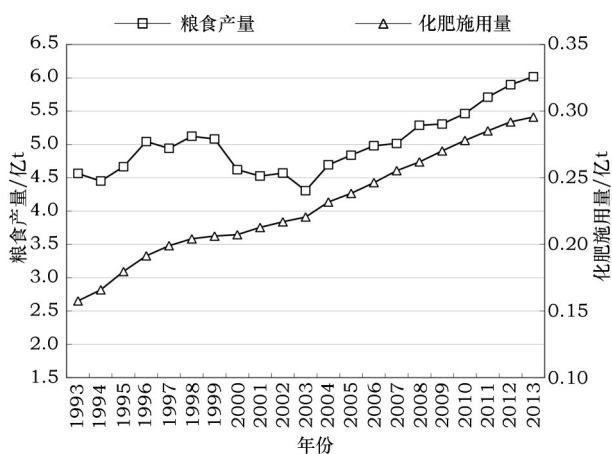
基金项目:国家社会科学基金重大项目(11&ZD043);国家级大学生创新创业训练计划项目(教高司函[2014]58号201410534012);湖南省教育厅优秀青年基金项目(15B092)。

作者简介:邓明君,男,湖南宜章人,副教授,主要研究方向为绿色农业发展研究。E-mail:410241665@qq.com

2016年3月

等分析了中国农业碳排放总量、结构和效率的变动特征,结果表明,氮肥在化肥中的比重与农业碳排放强度呈长期稳定的正向关系,且其影响程度明显高于其他的变量因素。鉴于化肥施用对农业碳排放的影响,农业碳减排应在控制氮肥施用和降低能源消耗上采取措施,在控制氮肥施用方面,可考虑以测土配方施肥技术的推广应用为核心,继续推广氮肥减施、精准施肥、水肥一体化和缓释肥、长效肥、硝化抑制剂等减排技术和新型肥料<sup>[11]</sup>。实际上,中国从2005年就开始推广该技术,农业部发布了一系列测土配方施肥技术推广通知和扶持政策,如“测土配方施肥技术规范(2011年修订版)”和“小麦、玉米、水稻三大粮食作物区域大配方与施肥建议(以下简称三大粮食作物施肥建议)”。然而,从图1可以看出:1993–2013年,中国粮食作物播种面积基本维持在11 000万 $\text{hm}^2$ 左右,粮食种植的化肥施用量增速是粮食产量增速的2.29倍,单位产出的化肥投入边际效益以年均1.75%的速度降低。那么,多年的测土配方施肥技术推广是否显著降低了中国各地区三大粮食作物化肥施用的单位产品碳排放量?各地区三大粮食作物科学施肥的碳减排潜力还有多大?这些问题都非常值得学界研究。

国内多数农业碳排放研究或单独考虑国家层面,或国家、省级行政区域兼顾,对中国农业碳排放



注:数据来源《中国统计年鉴》及作者整理计算(其中粮食作物施肥占农业化肥施用的50%<sup>[12]</sup>)。

图1 1993–2013年中国粮食作物单位面积产量与化肥施用量情况

Figure 1 Grain per unit area yield and fertilizer use in China from 1993 to 2013

现状、时空特征的把握也随着研究的深入而不断趋于准确。但是,在进行区域比较时,集中于单纯的农业碳排放绝对量(如总量、强度)比较,虽可操作性强,却易受农业生产规模或农作物复种指数的影响<sup>[13]</sup>。目前,反映农业碳排放效率的指标有农业碳排放强度和农业碳排放密度,其中农业碳排放强度指平均每万元农业GDP所产生的碳排放量,农业碳排放密度指平均每公顷播种面积上所产生的碳排放量<sup>[14]</sup>。以上这些指标难以比较中国各地区农作物化肥施用的单位产品碳排放量的差异。为此,本文提出核算分析中国三大粮食作物化肥施用的单位产品碳排放量时空演变,并以科学施肥为标准进一步测算中国各地区三大粮食作物化肥施用的碳减排潜力,为中国进一步推广测土配方施肥技术提供参考依据。

## 2 研究方法数据来源

### 2.1 粮食作物化肥施用的单位产品碳排放量测算方法

本文采用排放系数法,在参考李波<sup>[14]</sup>等学者的碳排放公式构建方法基础上,本文构建了粮食作物实际化肥施用单位产品碳排放量测算公式(1):

$$EA_{ijh} = (N_{ijh} \cdot C_n + P_{ijh} \cdot C_p + K_{ijh} \cdot C_k) / Y_{ijh} \quad (1)$$

式中  $EA_{ijh}$  为第  $i$  年  $j$  地区每公斤  $h$  类粮食作物实际化肥施用的碳排放量( $\text{kgCE/kg}$ );  $N_{ijh}$ 、 $P_{ijh}$  和  $K_{ijh}$  分别为第  $i$  年  $j$  地区  $h$  类粮食作物种植的每亩氮、磷和钾化肥实际折纯施用数量;  $C_n$ 、 $C_p$  和  $C_k$  分别为氮、磷和钾化肥的碳排放系数;  $Y_{ijh}$  为第  $i$  年  $j$  地区  $h$  类粮食作物的平均亩产量。

### 2.2 粮食作物化肥施用的碳减排潜力测算方法

碳减排潜力测算分两步实现:

第一步测算出2013年实际亩产量的各地区各类粮食作物科学施肥的单位产品碳排放量,测算方法见公式(2):

$$EG_{jh} = (NG_{jh} \cdot C_n + PG_{jh} \cdot C_p + KG_{jh} \cdot C_k) / YG_{jh} \quad (2)$$

式中  $EG_{jh}$  为科学施肥情形下,  $j$  地区每公斤  $h$  类粮食作物化肥施肥的碳排放量( $\text{kgCE/kg}$ );  $NG_{jh}$ 、 $PG_{jh}$  和  $KG_{jh}$  分别为科学施肥情形下,第  $j$  地区  $h$  类粮食种植的每亩氮、磷和钾肥建议施肥量;  $YG_{jh}$  为  $j$  地区  $h$  类

粮食为科学施肥情形下的区间亩产量平均值。

第二步,依据科学施肥单位产品碳排放量相对实际施肥单位产品碳排放量的减少量,以及各地区各类粮食的总产量,测算各地区各类粮食作物化肥施用的碳减排潜力,测算方法见公式(3):

$$PE_{jh} = T_{jh}(EA_{jh} - EG_{jh}) \quad (3)$$

式中  $PE_{jh}$  为科学施肥情形下,第  $j$  地区  $h$  类粮食种植化肥施用的碳减排潜力(万 tCE);  $T_{jh}$  为 2013 年第  $j$  地区  $h$  类粮食作物的总产量,  $EA_{jh}$  为 2013 年  $j$  地区每公斤  $h$  类粮食作物实际化肥施用的碳排放量。基于三大粮食作物施肥建议的施肥标准,如果地区相关粮食作物化肥施用的碳减排潜力结果如果为负数,则应用该地区的作物区域配方与施肥建议或农业部的“2015 年春季主要作物科学施肥技术指导意见”的施肥标准进行测算,由于只有个别省份发布了省级三大粮食作物区域配方与施肥建议,对于没有省级建议的,该地区相关粮食作物化肥施用的碳减排潜力以零计算。

### 2.3 数据来源及处理

本文的所有数据来源为:

(1)氮磷钾肥碳排放因子。其中,氮、磷和钾化肥制造过程的碳排放系数借鉴陈舜等最近完成的中国氮磷钾肥制造温室气体排放系数估算<sup>[15]</sup>。关于氮肥施用的  $N_2O$  排放,IPCC 已设定 N 应用的排放因子为  $0.0125\text{kgN}_2\text{O}-\text{N}/\text{kgN}$ ;胡小康等研究氮肥管理对夏玉米土壤  $\text{CH}_4$  和  $\text{N}_2\text{O}$  排放影响的结果表明:氮肥施用量  $300\text{kgN}/\text{hm}^2$ 、 $250\text{kgN}/\text{hm}^2$  和  $185\text{kgN}/\text{hm}^2$  情况下  $\text{N}_2\text{O}-\text{N}$  排放导致的温室效应分别为  $1\ 621.29\text{kgCO}_2/\text{hm}^2$ 、 $1\ 095.82\text{kgCO}_2/\text{hm}^2$  和  $786.72\text{kgCO}_2/\text{hm}^2$ <sup>[16]</sup>。农田 N 应用包括氮肥和有机肥施用,因此,胡小康等的研究结果更适合中国三大粮食作物种植氮肥施用的  $\text{N}_2\text{O}$  排放,取其研究的平均值,氮肥施用释放  $\text{N}_2\text{O}$  导致的碳排放因子为  $1.276\text{kgCE}/\text{kg}$ 。最终,各种化肥的碳排放系数确定为:氮肥  $3.392\text{kgCE}/\text{kg}$  ( $2.116 + 1.276$ )<sup>[17]</sup>,磷肥  $0.636\text{kgCE}/\text{kg}$ ,钾肥  $0.180\text{kgCE}/\text{kg}$ 。

(2)2005–2013 年中国各地区三大粮食作物的每亩产量和每亩的化肥投入种类及数量来源于《全国农产品成本收益资料汇编(2006–2014)》<sup>[18]</sup>。

表 1 复混肥中氮磷钾肥的折算方式

化肥种类	有效成分含量%			每 100kg 实物 量折纯量/kg
	氮(N)	磷( $\text{P}_2\text{O}_5$ )	钾( $\text{K}_2\text{O}$ )	
二铵	17	47	0	64
三元素复合肥	11	24	13	48
混配肥	10	17	3	30

注:资料来源“化肥折纯量计算参考表”(http://www.docin.com/p-302188891.html)。

(3)2005–2013 年中国各地区三大粮食作物的总产量数据来源于《中国统计年鉴(2006–2014)》<sup>[19]</sup>。

(4)依据化肥折纯量计算参考,本文将复混肥中的磷酸二铵、三元复合肥和混配肥折算成氮、磷、钾肥(折算系数见表 1)。

(5)科学施肥情形下,各地区三种粮食作物种植的每亩氮磷钾建议施肥数量来源于农业部办公厅印发的三大粮食作物施肥建议或者部分省份公开的“作物配方肥配方推荐与施肥指导意见”,其中,玉米分为东北春玉米区、华北夏玉米区、西北春玉米区和西南玉米区,小麦分为东北春麦区、西北麦区、华北冬麦区、长江中下游冬麦区和西南麦区,水稻分为东北单季稻区、长江流域单双季稻区、江南华南单双季稻区、西南高原山地单季稻区和其它稻区<sup>[20]</sup>。各省份与对应的种植区如表 2 所示。

## 3 结果与分析

### 3.1 中国三大粮食作物化肥施用的单位产品碳排放量时空演变

#### 3.1.1 2005–2013 年中国玉米化肥施用的单位产品碳排放量时空演变

如图 2 所示:①四大玉米区化肥施用的平均单位产品碳排放量,东北春玉米区的最小,西南玉米区的最大;②单位产品碳排放量小于  $0.09\text{kgCE}$  的区域从 2005 年的黑龙江、吉林和新疆演变为 2013 年的黑龙江、河北、河南和山西,单位产品碳排放量大于  $0.15\text{kgCE}$  的区域从 2005 年的江苏、云南、广西、湖北、安徽、陕西和宁夏演变为 2013 年的贵州、云南、广西和湖北;③东北春玉米区化肥施用的单位产品碳排放量,黑龙江和吉林上升明显,吉林增长近 20%,辽宁经历了波浪式演变,最终比 2005 稍有下降;④华北夏玉米区化肥施用的单位产品碳排放



2016年3月

表2 三种粮食种植省份与所属区域对照

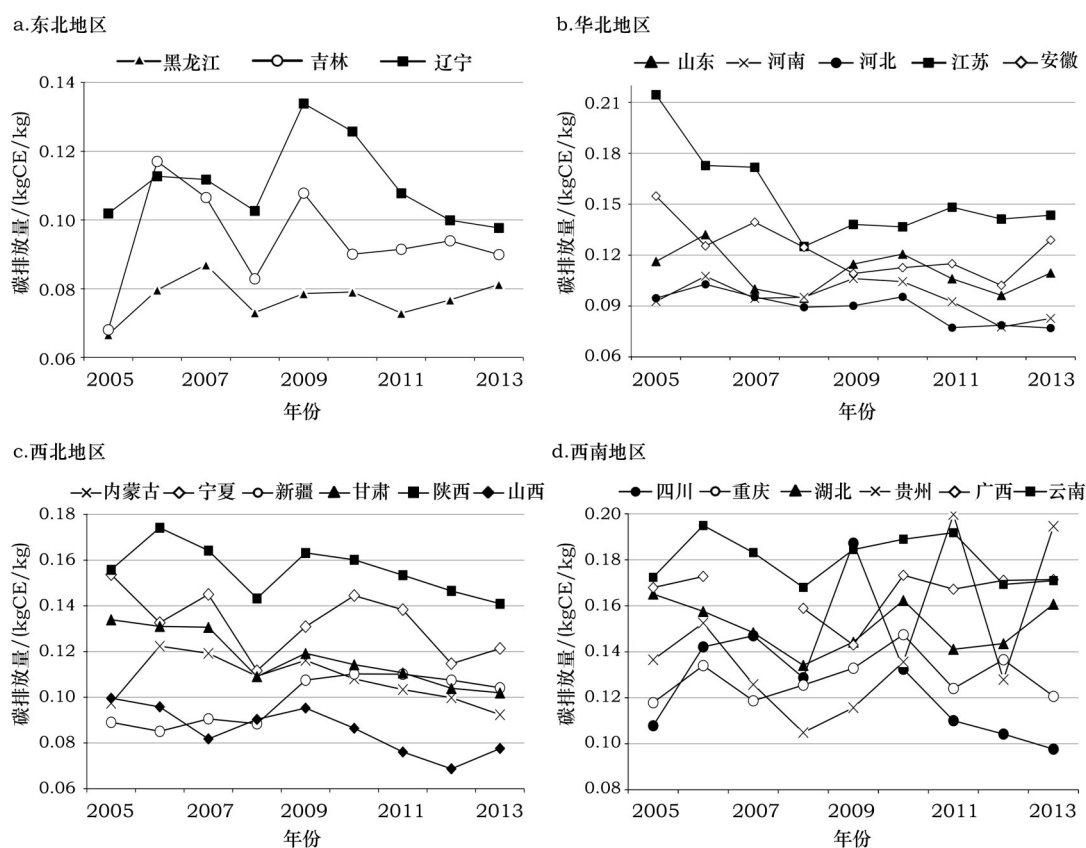
Table 2 Comparisons between growing provinces and planting regions

省份	玉米种植所属种植区	省份	小麦种植所属种植区	省份	水稻种植所属种植区
黑龙江	I-1 东北冷凉春玉米区	内蒙古自	I 东北春麦区	黑龙江	I-1 东北寒地单季稻区
吉林	I-1 东北冷凉春玉米区	治区	II-1 西北雨养旱作麦区	吉林、辽宁	I-2 东北吉辽内蒙古单季稻区
	I-2 东北半湿润春玉米区		II-2 西北灌溉麦区		
	I-3 东北半干旱春玉米区				
辽宁	I-4 东北温暖湿润春玉米区	河北	II-1 西北雨养旱作麦区	内蒙古	I-1 东北寒地单季稻区
			III-1 华北灌溉冬麦区	自治区	I-2 东北吉辽内蒙古单季稻区
内蒙古	I-3 东北半干旱春玉米区	河南	II-1 西北雨养旱作麦区	湖南	II-2 长江中游单双季稻区
自治区	III-1 西北雨养旱作春玉米区		III-1 华北灌溉冬麦区		III-1 江南丘陵山地单双季稻区
	III-2 北部灌溉春玉米区		III-2 华北雨养冬麦区		IV 西南高原山地单季稻区
河北	I-4 东北温暖湿润春玉米区		IV 长江中下游冬麦区	河南、安徽	II-2 长江中游单双季稻区
	II-1 华北中北部夏玉米区				
	III-1 西北雨养旱作春玉米区				
山东	II-1 华北中北部夏玉米区	陕西	II-1 西北雨养旱作麦区	山东、江苏	II-3 长江下游单季稻区
			III-1 华北灌溉冬麦区		
河南	II-1 华北中北部夏玉米区		V 西南麦区	浙江	II-3 长江下游单季稻区
	II-2 华北南部夏玉米区				III-1 江南丘陵山地单双季稻区
	IV-2 西南山地丘陵玉米区				
陕西	II-1 华北中北部夏玉米区	江苏、安徽	III-2 华北雨养冬麦区	湖北	II-1 长江上游单季稻区
	III-1 西北雨养旱作春玉米区、		IV 长江中下游冬麦区		II-2 长江中游单双季稻区
	III-2 北部灌溉春玉米区				
	IV-2 西南山地丘陵玉米区				
江苏、安徽	II-2 华北南部夏玉米区	黑龙江	I 东北春麦区	广东	III-1 江南丘陵山地单双季稻区
					III-2 华南平原丘陵双季稻区
山西	III-1 西北雨养旱作春玉米区	山西	II-1 西北雨养旱作麦区	江西	II-2 长江中游单双季稻区
			III-1 华北灌溉冬麦区		III-1 江南丘陵山地单双季稻区
宁夏	III-1 西北雨养旱作春玉米区	宁夏、甘肃	II-1 西北雨养旱作麦区	云南	IV 西南高原山地单季稻区
	III-2 北部灌溉春玉米区		II-2 西北灌溉麦区		
甘肃	III-1 西北雨养旱作春玉米区	新疆、青海	II-2 西北灌溉麦区	海南	III-2 华南平原丘陵双季稻区
	III-2 北部灌溉春玉米区				
	III-3 西北绿洲灌溉春玉米区				
新疆	III-3 西北绿洲灌溉春玉米区	山东	III-1 华北灌溉冬麦区	广西	III-2 华南平原丘陵双季稻区
					IV 西南高原山地单季稻区
四川	IV-1 四川盆地玉米区	四川、	V 西南麦区	陕西、重庆	II-1 长江上游单季稻区
	IV-2 西南山地丘陵玉米区	贵州、云南			
	IV-3 西南高原玉米区				
湖北、	IV-2 西南山地丘陵玉米区			福建	III-1 江南丘陵山地单双季稻区
湖南、广西					III-2 华南平原丘陵双季稻区
贵州	IV-2 西南山地丘陵玉米区	湖北、	IV 长江中下游冬麦区	贵州、	II-1 长江上游单季稻区
	IV-3 西南高原玉米区	湖南、		四川、	IV 西南高原山地单季稻区
云南、重庆	IV-3 西南高原玉米区	江西、浙江		新疆、宁夏	V 其它

注:作者根据农业部《小麦、玉米、水稻三大粮食作物区域大配方与施肥建议(2013)》中的三大粮食作物亚区分结果整理制作。

量,所有地区的均有下降,江苏和安徽下降明显,但其碳排放量还是过高;⑤西北春玉米区化肥施用的单位产品碳排放量,宁夏、甘肃和山西有较大下降,

且山西的碳排放量达到黑龙江的水平,新疆有所上升;⑥西南玉米区化肥施用的单位产品碳排放量,除四川和重庆,其它地区的碳排放量均过高,而贵



注:广西2007年缺数据。

图2 中国玉米化肥施用的单位产品碳排放量时空演变趋势

Figure 2 Space-time evolution of carbon emission per unit product of maize fertilizer application in China

州波动幅度大,2013年成为全国碳排放量最大的省份,四川经历了波浪式演变,最终成为西南玉米区碳排放量最小的地区。

### 3.1.2 2005–2013年中国小麦化肥施用的单位产品碳排放量时空演变

如图3所示:单位产品碳排放量小于0.12kgCE的区域从2005年的黑龙江和河南演变为2013年的黑龙江、湖北、四川和安徽,单位产品碳排放量大于0.18kgCE的区域从2005年的宁夏、内蒙古和陕西演变为2013年的内蒙古、宁夏、山西和云南;②所有麦区中单位产品碳排放量下降明显的区域是宁夏、陕西和湖北,上升明显的区域是云南和河南;③2013年,单位产品碳排放量最高地区内蒙古(0.238kgCE)是最低地区黑龙江(0.088kgCE)的2.7倍;④2013年,河南、山东、四川和安徽的单位产品碳排放量趋同,在0.12kgCE附近;⑤2013年,西北麦区,陕西、甘肃和新疆的单位产品碳排放量基本趋

同(在0.16kgCE附近),宁夏和山西趋同(在0.185kgCE附近),单位产品碳排放量过高。

### 3.1.3 2005–2013年中国水稻化肥施用的单位产品碳排放量时空演变

如图4所示:单位产品碳排放量小于0.08kgCE的区域从2005年的黑龙江、吉林和重庆演变为2013年的黑龙江、重庆和陕西,单位产品碳排放量大于0.11kgCE的区域从2005年的山东、江苏、河南、辽宁、内蒙古、海南、广东、浙江、宁夏和广西10个地区演变为2013年的江苏、山东、海南、宁夏和广西5个地区;②单位产品碳排放量下降明显的区域是辽宁、山东、江苏、浙江、陕西和湖南,上升明显的区域是吉林、广西和云南;③单位产品碳排放量的变动区间,东北单季稻区由“0.068~0.123kgCE”降到“0.057~0.097kgCE”,长江流域单双季稻区由“0.080~0.177kgCE”降到“0.077~0.120kgCE”,江南和华南单双季稻区由“0.099~0.129kgCE”降到“0.088~0.114

2016年3月

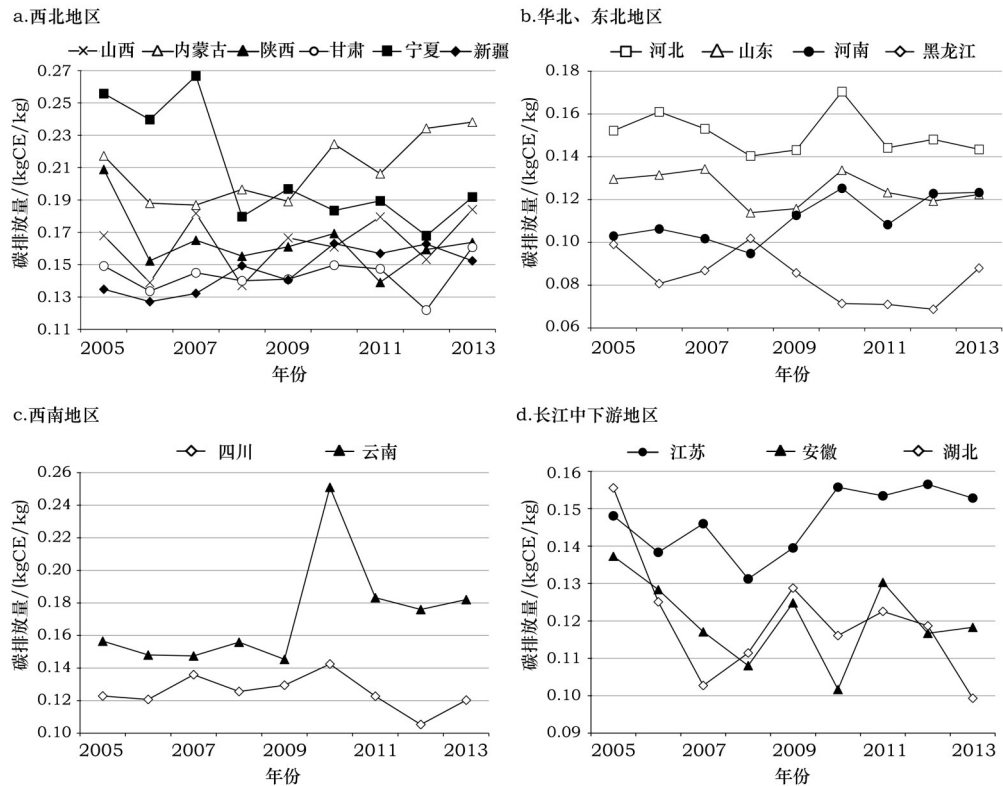


图3 中国小麦化肥施用的单位产品碳排放量时空演变趋势

Figure 3 Space-time evolution of carbon emission per unit product of wheat fertilizer application in China

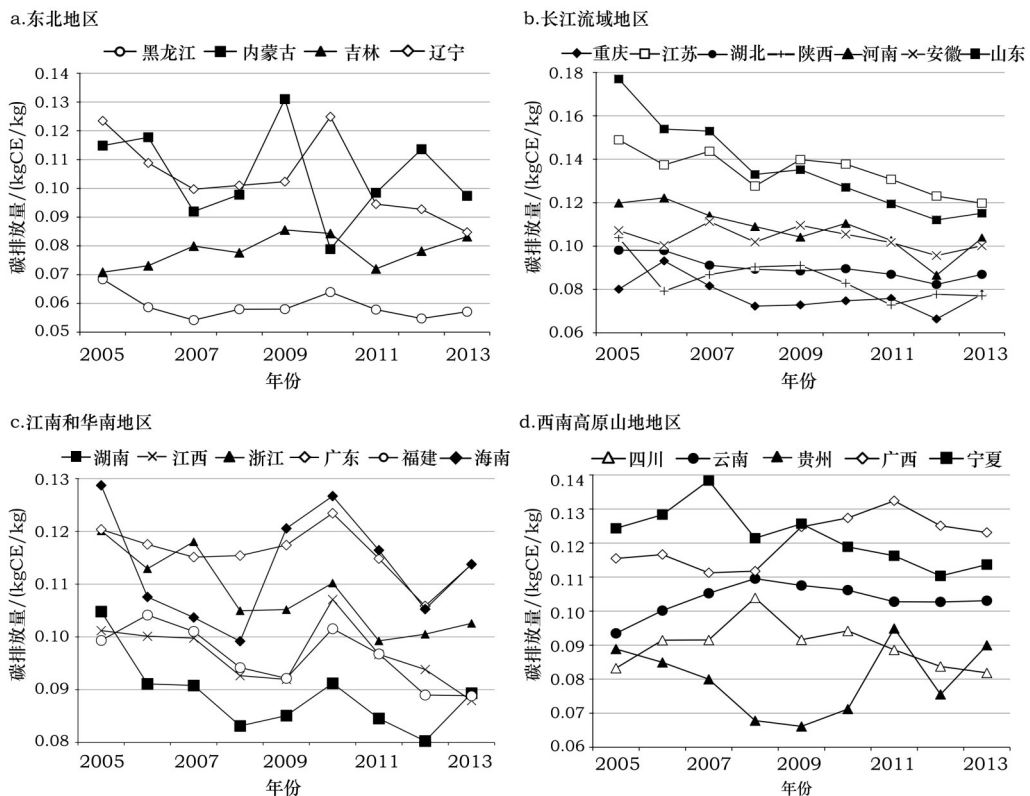


图4 中国水稻化肥施用的单位产品碳排放量时空演变趋势

Figure 4 Space-time evolution of carbon emission per unit product of rice fertilizer application in China

kgCE”,西南高原山地单季稻和其它稻区基本处于“0.082~0.124kgCE”;④单位产品碳排放量波动幅度较大的区域是内蒙古、辽宁、江西、海南和贵州。

### 3.2 中国三大粮食作物化肥施用的碳减排潜力测算

首先,在三大粮食作物施肥建议中,查找产量水平能够达到2013年各地区粮食作物实际亩产量的施肥建议和推荐配方,基于公式(2)计算科学施肥情形下各地区粮食作物化肥施用的单位产品碳排放量。然后,基于公式(3)计算科学施肥情形下中国各地区粮食作物化肥施用的总碳减排潜力。

#### 3.2.1 中国玉米、小麦化肥施用的碳减排潜力

如图5a所示:①每公斤玉米化肥施用碳减排潜力大的地区,有贵州、广西、云南、湖北、陕西和江苏;②2013年,每公斤玉米化肥实际施用的碳排放量与科学配方施肥指导下化肥施用的碳排放量接近的地区,有河南、河北和山西;③全国玉米化肥施

用碳减排潜力大的区域有黑龙江、辽宁、吉林、山东、内蒙古、陕西、云南和贵州,其碳减排潜力总和占全国玉米化肥施用碳减排潜力总量(约574万tCE)的75.57%。

如图5b所示:①每公斤小麦化肥施用碳减排潜力大的地区,有内蒙古、云南、山西、陕西、宁夏、甘肃、新疆、江苏、河北和四川;②2013年,每公斤小麦化肥实际施用的碳排放量与科学配方施肥指导下化肥施用的碳排放量接近的地区仅有湖北;③全国小麦种植区碳减排潜力大的区域有河北、江苏、山东和河南,其碳减排潜力总和占全国小麦化肥施用碳减排潜力总量(约475万tCE)的61.33%。

#### 3.2.2 中国水稻化肥施用的碳减排潜力

(1)中国早稻化肥施用的碳减排潜力。如图6a所示:①每公斤早稻化肥施用碳减排潜力大的地区,有广西、安徽和广东;②2013年,每公斤早稻化

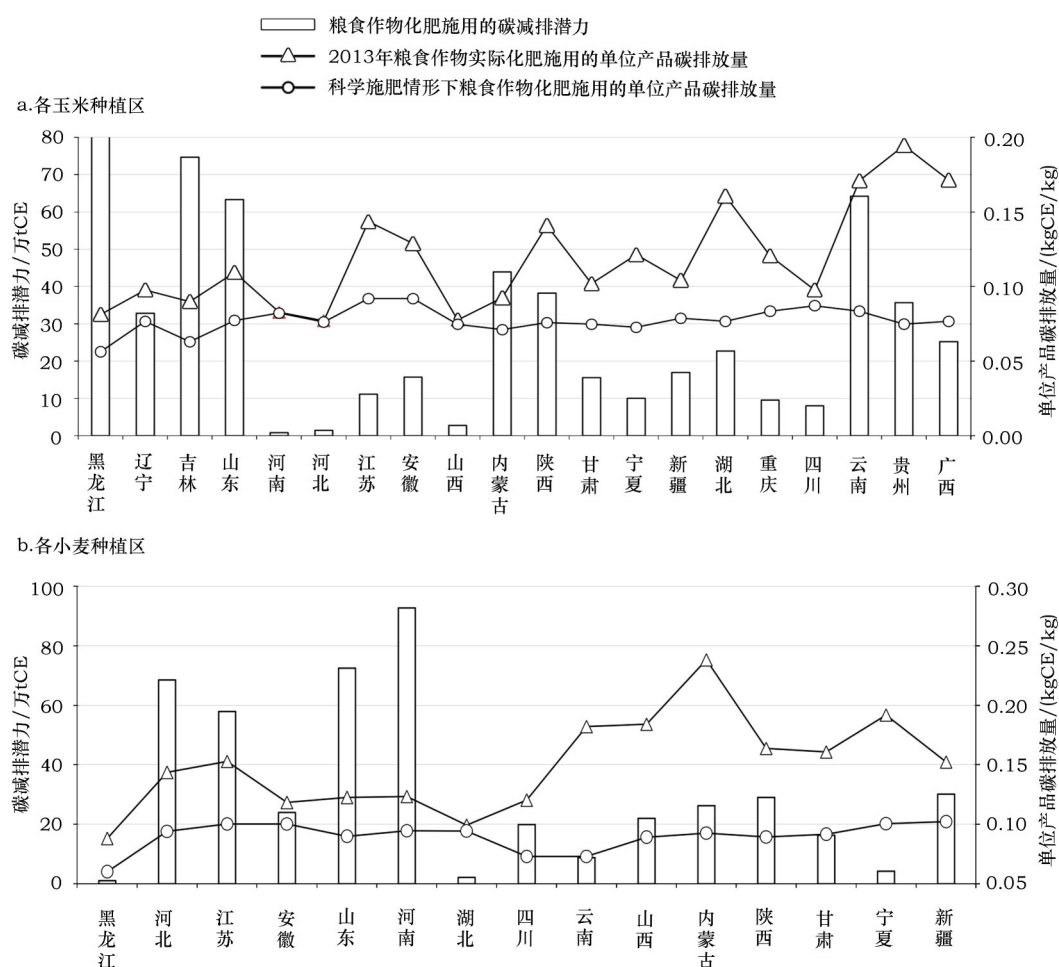
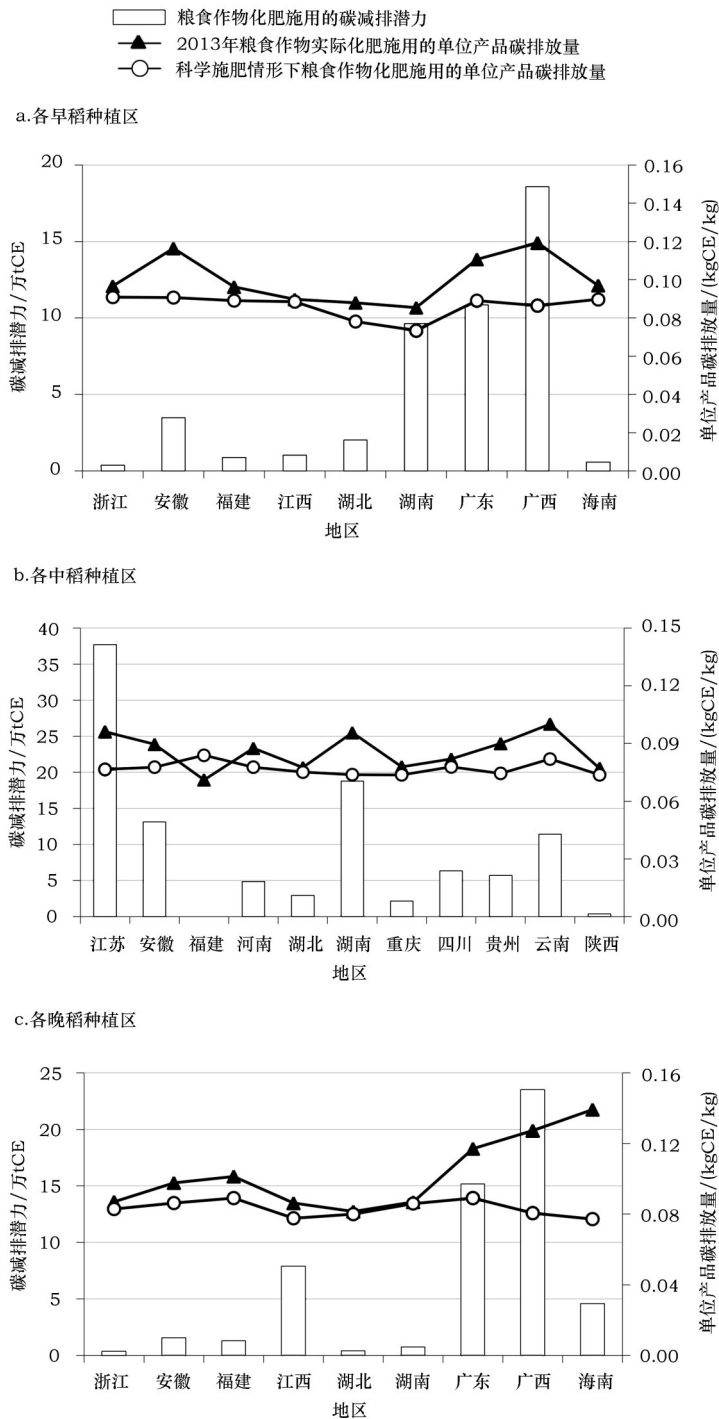


图5 中国各玉米、小麦种植区化肥施用的碳减排潜力

Figure 5 Carbon reduction potential of maize fertilizer application in Chinese maize and wheat -growing areas



2016年3月



注:江苏和浙江采用农业部“2015年春季主要作物科学施肥技术指导意见”的施肥标准,湖南采用“湖南省2015年主要农作物推荐施肥量表”的施肥标准,江西采用“江西省2015年主要作物科学施肥技术指导意见”的施肥标准,其它地区采用农业部三大粮食作物区域大配方与施肥建议。因未获得福建省科学施肥技术指导意见,将其中稻化肥施用碳减排潜力设为零。

图6 中国各水稻种植区化肥施用的碳减排潜力

Figure 6 Carbon reduction potential of maize fertilizer application in Chinese season rice-growing areas

肥实际施用的碳排放量与科学配方施肥指导下化肥施用的碳排放量接近的地区有江西,不过,除广西、安徽和广东以外的地区差距比较小,反映了早稻化肥施用基本合理;③全国早稻种植区碳减排潜力大的区域有广西、广东和湖南,其总和占全国早稻化肥施用碳减排潜力总量(约47万tCE)的82.57%。

(2)中国中稻化肥施用的碳减排潜力。如图6b所示:①每公斤中稻化肥施用的碳减排潜力大的地区,有江苏、湖南和云南;②2013年,每公斤中稻化肥实际施用的碳排放量与科学配方施肥指导下化肥施用的碳排放量接近的地区有湖北、重庆、四川和陕西;③全国中稻种植区碳减排潜力大的区域有江苏、安徽、湖南和云南,其总和占全国中稻化肥施用碳减排潜力总量(约103万tCE)的78.60%;④福建地区中稻种植的化肥施用产出率很高,单位产品化肥施用的碳排放量优于农业部区域大配方下的碳排放量。

(3)中国晚稻化肥施用的碳减排潜力。如图6c所示:①每公斤晚稻化肥施用碳减排潜力大的地区,有海南、广西和广东;②2013年,每公斤晚稻化肥实际施用的碳排放量与科学配方施肥指导下化肥施用的碳排放量接近的地区有湖南、湖北和浙江;③全国晚稻种植区碳减排潜力大的区域有广西、广东和海南,其总和占全国晚稻化肥施用碳减排潜力总量(约56万tCE)的69.85%。

## 4 结论与讨论

### 4.1 结论

本文的测算结果表明:

(1)中国历时9年的测土配方施肥技术推广,对部分区域三大粮食作物种植化肥施用的单位产品碳排放量下降有一定作用:①宁夏、甘肃、山西、江苏和安徽的玉米;②宁夏、陕西和湖北的小麦;③辽宁、山东、江苏、浙江、陕西和湖南的水稻。

(2)2013年不少地区三大粮食作物种植化肥施用的单位产品碳排放量与科学施肥



情形下的排放还有一定差距:①贵州、广西、云南、湖北、陕西和江苏的玉米;②内蒙古、云南、山西、陕西、宁夏、甘肃、新疆、江苏、河北和四川的小麦;③广西、安徽和广东的早稻,江苏、湖南和云南的中稻,海南、广西和广东的晚稻。

(3)2005–2013年,也出现了不少地区三大粮食作物种植化肥施用的单位产品碳排放量异常上升的情况:①黑龙江、吉林和贵州的玉米;②云南和河南的小麦;③吉林、广西和云南的水稻。

(4)理论上中国三大粮食作物化肥施用碳减排潜力大的区域为:①黑龙江、辽宁、吉林、山东、内蒙古、陕西、云南和贵州的玉米;②河北、江苏、山东和河南的小麦;③广西、广东、安徽、湖南和云南的水稻。这些碳减排潜力较大的区域,将是未来中国在三大粮食作物种植中深入推广测土配方施肥技术的区域选择依据。

## 4.2 讨论

(1)依据“中国统计年鉴2014年”中历年来农用作物化肥施用量的事实数据,从中国三大粮食作物化肥施用的碳减排潜力测算结果来看,从某种程度上反映了中国推行的一系列测土配方施肥技术推广政策的节肥减排效果不明显。Cannell<sup>[21]</sup>、European Climate Change Programme<sup>[22]</sup>和 Freibauer<sup>[23]</sup>的研究表明:农业实际碳减排潜力远远低于技术碳减排潜力,实际减排受到生化原理和价格影响外,还受到制度、教育、社会和政治等多因素约束<sup>[24]</sup>。

(2)结合作者组织的对全国部分地区农户、土肥站和湘潭地区化肥生产企业的调查,以及分析相关文献,发现:①中国测土配方施肥技术推广的面太广,重点不明确,导致政府补贴力度小,且补贴对象错位,补贴经费几乎都给了各级农业局,难以激励测土配方施肥技术推广试点企业、肥料经销商和农民;②测土配方施肥技术推广存在市场瓶颈,因测土配方肥的工艺复杂、配方多、用量少和需定点做包装袋而导致肥料成本上升,农民对测土配方肥的效果心中也存有疑问和不想更新种植技术而不轻易使用测土配方肥;③基层推广体制不健全,由于体制、经费等原因导致基层技术服务人员的工作积极性不强,影响测土配方施肥技术的推广普及。

(3)本文建议对当前测土配方施肥技术推广机

制进行创新,集中资源,以三大粮食作物化肥施用碳减排潜力大的区域作为测土配方施肥技术推广的重点,由政府制定并执行科学的政策制度,鼓励化肥生产企业主动与重点区域三种粮食作物农民专业合作社对接,减少中间环节,最终通过市场化运作持续提高测土配方施肥技术推广的效应。

## 参考文献(References):

- [1] 田云,张俊飏,李波. 中国农业碳排放研究:测算、时空比较及脱钩效应[J]. 资源科学, 2012, 34(11): 2097–2105. [Tian Y, Zhang J B, Li B. Agricultural carbon emissions in China: Calculation, spatial-temporal comparison and decoupling effects [J]. *Resources Science*, 2012, 34(11): 2097–2105.]
- [2] 田云,张俊飏. 中国农业碳排放研究回顾、评述与展望[J]. 华中农业大学学报(社会科学版), 2014, (2): 23–27. [Tian Y, Zhang J B. Research review, comment and prospect of China's agricultural carbon emissions[J]. *Journal of Huazhong Agricultural University (Social Sciences Edition)*, 2014(2): 23–27.]
- [3] 赵其国,钱海燕. 低碳经济与农业发展思考[J]. 生态环境学报, 2009, 18(5): 1609–1614. [Zhao Q G, Qian H Y. Low carbon economy and thinking of agricultural development[J]. *Ecology & Environmental Sciences*, 2009, 18(5): 1609–1614.]
- [4] 李迎春,林而达,甄晓林. 农业温室气体清单方法研究最新进展[J]. 地理科学进展, 2007, 22(10): 1076–1080. [Li Y C, Lin E D, Zhen X L. Advances in methods of agricultural greenhouse gas inventories[J]. *Advances in Earth Science*, 2007, 22(10): 1076–1080.]
- [5] 李胜利,金鑫,范学山,等. 反刍动物生产与碳减排措施[J]. 动物营养学报, 2010, 22(1): 2–9. [Li S L, Jin X, Fan X S, et al. Ruminant production and carbon emission reduction measures[J]. *Chinese Journal of Animal Nutrition*, 2010, 22(1): 2–9.]
- [6] Food and Agriculture Organization. Organic Agriculture and Climate Change[EB/OL]. (2009–01–10) [2015–05–15]. <http://www.fao.org/organicag/oa-specialfeatures/oa-climatechange/en/>.
- [7] 黄祖辉,米松华. 农业碳足迹研究—以浙江省为例[J]. 农业经济问题, 2011, (11): 40–47. [Huang Z H, Mi S H. Research on agricultural carbon footprint-taking Zhejiang province for example [J]. *Problems of Agricultural Economy*, 2011, (11): 40–47.]
- [8] 史磊刚,陈阜,孔凡磊,等. 华北平原冬小麦-夏玉米种植模式碳足迹研究[J]. 中国人口·资源与环境, 2011, 21(9): 93–98. [Shi L G, Chen F, Kong F L, et al. The carbon footprint of winter wheat-summer maize cropping pattern on north china plain[J]. *China Population Resources & Environment*, 2011, 21(9): 93–98.]
- [9] 王才军,孙德亮,张凤太. 基于农业投入的重庆农业碳排放时

2016年3月

- 序特征及减排措施研究[J]. 水土保持研究, 2012, 19(5): 206-209. [Wang C J, Sun D L, Zhang F T. Research on temporal characteristics and reduction policy based on input in Chongqing municipality[J]. *Research of Soil & Water Conservation*, 2012, 19(5): 206-209.]
- [10] 尧波, 郑艳明, 胡丹, 等. 江西省县域农业碳排放的时空动态及影响因素分析[J]. 长江流域资源与环境, 2014, 23(3): 311-318. [Yao B, Zheng Y M, Hu D, et al. Spatial and temporal variations of county based agricultural carbon emissions and associated effect factors in Jiangxi province[J]. *Resources & Environment in the Yangtze Basin*, 2014, 23(3): 311-318.]
- [11] 张广胜, 王珊珊. 中国农业碳排放的结构、效率及其决定机制[J]. 农业经济问题, 2014, 35(7): 18-26. [Zhang G S, Wang S S. Structure, efficiency & determinate mechanism of agricultural carbon emission[J]. *Problems of Agricultural Economy*, 2014, 35(7): 18-26.]
- [12] 朱兆良, 诺斯, 孙波. 中国农业面源污染控制对策[M]. 北京: 中国环境科学出版社, 2006. [Zhu Z L, Nuo S, Sun B. Strategy for Controlling Agricultural Widespread Pollution[M]. Beijing: China Environmental Science Press, 2006.]
- [13] 田云, 张俊飏. 中国省级区域农业碳排放公平性研究[J]. 中国人口·资源与环境, 2013, 23(11): 36-44. [Tian Y, Zhang J B. Fairness research of agricultural carbon emissions between provincial regions in China[J]. *China Population Resources & Environment*, 2013, 23(11): 36-44.]
- [14] 李波, 张俊飏. 基于我国农地利用方式变化的碳效应特征与空间差异研究[J]. 经济地理, 2012, 32(7): 135-140. [Li B, Zhang J B. Study on carbon effects and spatial differences based on changes in China's agricultural land use[J]. *Economic Geography*, 2012, 32(7): 135-140.]
- [15] 陈舜, 逯非, 王效科. 中国氮磷钾肥制造温室气体排放系数的估算[J]. 生态学报, 2015, 35(19): 6371-6383. [Chen S, Lu F, Wang X. Estimation of greenhouse gases emission factors for China's nitrogen, phosphate, and potash fertilizers[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2015, 35(19): 6371-6383.]
- [16] 胡小康, 黄彬香, 苏芳, 等. 氮肥管理对夏玉米土壤 $CH_4$ 和 $N_2O$ 排放的影响[J]. 中国科学: 化学, 2011, 41(1): 117-128. [Hu X K, Huang B X, Su F, et al. Effects of nitrogen management on methane and nitrous oxide emissions from summer maize soil in North China Plain[J]. *Scientia Sinica*, 2011, 41(1): 117-128.]
- [17] 罗文兵, 邓明君, 向国成. 我国棉花种植化肥施用的碳排放时空演变及减排潜力[J]. 经济地理, 2015, 35(9): 149-156. [Luo W B, Deng M J, Xiang G C. Study on the space-time evolution and reduction potential of carbon emission in Chinese cotton planting fertilization[J]. *Economic Geography*, 2015, 35(9): 149-156.]
- [18] 国家发展和改革委员会价格司. 全国农产品成本收益资料汇编(2006-2014)[M]. 北京: 中国统计出版社, 2006-2014. [National Development and Reform Commission Price Department. National Agricultural Product Cost and Income Data Compilation (2006-2014) [M]. Beijing: China Statistics Press, 2006-2014.]
- [19] 中华人民共和国国家统计局. 中国统计年鉴(2006-2014)[M]. 北京: 中国统计出版社, 2006-2014. [National Bureau of Statistics of the People's Republic of China. China Statistical Yearbook (2006-2014) [M]. Beijing: China Statistics Press, 2006-2014.]
- [20] 农业部办公厅. 小麦、玉米、水稻三大粮食作物区域大配方与施肥建议(2013)[EB/OL]. (2013-7-29)[2015-05-15]. [http://www.moa.gov.cn/zwl/m/tzgg/tfw/201307/t20130729\\_3541508.htm](http://www.moa.gov.cn/zwl/m/tzgg/tfw/201307/t20130729_3541508.htm). [Office of the Ministry of Agriculture. Regional Formula of Three Major Food Crops of Wheat, Maize and Rice and Suggestions for Fertilization in the General Department of Agriculture Department (2013) [EB/OL]. (2013-7-29)[2015-05-15]. [http://www.moa.gov.cn/zwl/m/tzgg/tfw/201307/t20130729\\_3541508.htm](http://www.moa.gov.cn/zwl/m/tzgg/tfw/201307/t20130729_3541508.htm).]
- [21] Cannell M G. Carbon sequestration and biomass energy offset: Theoretical, potential and achievable capacities globally in Europe and the UK[J]. *Biomass Bioenergy*, 2003, 24(2): 97-116.
- [22] European Climate Change Programme. Second ECCP Progress Report-Can We Meet Our Kyoto Targets? [R]. (2003-04)[2015-05-26]. [http://ec.europa.eu/clima/policies/eccp/docs/second\\_eccp\\_report\\_en.pdf](http://ec.europa.eu/clima/policies/eccp/docs/second_eccp_report_en.pdf).
- [23] Freibauer A, Rounsevell M, Smith P, et al. Carbon sequestration in the agricultural soils of Europe[J]. *Geoderma*, 2004, 122(1): 1-23.
- [24] 米松华. 我国低碳现代农业发展研究-基于碳足迹核算和适用性低碳技术应用的视角[D]. 杭州: 浙江大学, 2013. [Mi S H. Study on China's Low Carbon Modern Agriculture Development from Views of Carbon Footprint Calculation and Applicable Mitigation Technology Application[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2013.]

# On the space–time evolution of carbon emissions and reduction potential in Chinese grain crop fertilizer application

DENG Mingjun, DENG Junjie, LIU Jiayu

*(School of Business / Two-oriented Society and Ecological Civilization Collaborative Innovation Center,  
Hunan University of Science and Technology, Xiangtan 411201, China)*

**Abstract:** Researching the carbon emissions trend evolution rule and carbon reduction potential in regional crop fertilizer application is of great significance for formulating reasonable agricultural carbon reduction policy. Based on actual outputs and fertilizer inputs and types for three main grain crops in China we used the carbon emissions coefficient method to estimate and analyze the space-time evolution of carbon efficiency and carbon emissions reduction potential in Chinese grain crop fertilizer consumption from 2005 to 2013. We found that the amount of carbon emissions per unit product in the Jiangsu, Anhui, Ningxia, Gansu and Shanxi maize-growing area, Hubei, Shanxi and Ningxia wheat planting and Liaoning, Shandong, Jiangsu, Zhejiang, Shanxi and Hunan rice- growing area decreased significantly. Carbon emissions per unit product in the Heilongjiang, Jilin and Xinjiang maize-growing area, Yunnan and Henan wheat-growing area and Jilin, Guangxi and Yunnan rice-growing area increased. Compared with soil testing and formula fertilization, carbon emissions per unit product were high in 2013 in the Jiangsu, Shanxi, Hubei, Guizhou, Guangxi and Yunnan maize-growing area, Shanxi, Neimenggu, Shanxi, Gansu, Ningxia, Xinjiang, Hebei, Sichuan, Yunnan and Jiangsu wheat-growing area, and Hunan, Jiangsu, Hainan, Anhui, Yunnan, Guangdong and Guangxi rice- growing area. The carbon emission reduction potential of the maize- growing in China is 5.74 million t CE and focuses on Heilongjiang, Liaoning, Jilin, Shandong, Neimenggu, Shanxi, Yunnan, Guizhou and Guangxi. The carbon emission reduction potential of the wheat- growing in China is 4.75 million t CE, focusing on Hebei, Jiangsu, Shandong and Henan. The carbon emission reduction potential of rice-growing in China is 2.06 million t CE, focusing on Hunan, Guangdong, Guangxi, Jiangsu and Jiangxi. Combined with field investigation and analysis we propose potential carbon emission reductions in food crop cultivation through policy incentives and market operations in order to improve the effect of soil testing and fertilizer application technology.

**Key words:** grain crops; fertilizer application; carbon emission per unit produce; space time evolution; carbon mitigation potential