

# 基于碳循环的农业净碳排与农业经济的脱钩分析

庞容, 吕志强, 朱金盛, 庆旭瑶, 邓睿

(重庆工商大学, 重庆 400067)

**摘要:**综合农业碳循环过程中碳源和碳汇的双重特征,结合面板数据分析方法,测算全国 2000—2011 年各区域农业净碳排;通过构建脱钩指数分析模型和判定标准,以“脱钩”来衡量区域农业净碳量与经济增长的脱钩程度,分析二者的脱钩状态和演化趋势,以期研究区域农业经济增长与农业净碳量的脱钩关系及内在机理。结果表明:2000—2011 年全国各省市总的农业净碳量显著递增,碳排量从 2000 年的 23 730.44 万 t 增加到 2011 年的 56 177.24 万 t,对应年份的碳汇量从 46 118.20 万 t 增加到 56 845.85 万 t。期间,农业碳排总量年均增长 12.40%,农业碳汇总量年均增长 2.10%,空间上,东部沿海发达城市的净碳量高于全国平均水平;从农业经济的地域分布和阶段特征来看,各省市农业经济增长率差异明显且后期农业经济增长率明显低于前期;近 10 年来,农业经济增长与净碳排放整体处于弱相对脱钩状态,弹性值为  $0 \leq e < 1$ 。对比 2000—2005 年、2006—2011 年两时期的脱钩,可以看出实现相对弱脱钩的省域数量逐年增加,约占到全国省域总数的 90%,呈现出地区脱钩程度差距逐渐缩小的趋势,后期较前期实现了更为协调的发展。

**关键词:**碳循环;净碳排;农业经济;脱钩

**中图分类号:**F323

**文献标识码:**A

**文章编号:**1005-3409(2015)05-0253-07

## Decoupling of Agricultural Net Carbon Emissions and Agricultural Economy Based on the Carbon Cycle

PANG Rong, LÜ Zhiqiang, ZHU Jinsheng, QING Xuyao, DENG Rui

(Chongqing Technology and Business University, Chongqing 400067, China)

**Abstract:** Taking carbon source and carbon sink into consideration in the process of the agricultural carbon cycle, we measured the regional agricultural net carbon during the period from 2000 to 2011. Based on the decoupling index model and evaluation criteria, we also measured the decoupling degree, explored the decoupling relationship and the internal mechanism between the regional agriculture net carbon and the economic growth. The results indicated that the total agricultural net carbon significantly increased in China during the period from 2000 to 2011. The carbon dioxide emissions increased from 237.30 million tons to 561.77 million tons, and the carbon sink capacity increased from 461.18 million tons to 568.46 million tons, correspondingly. Agricultural carbon emissions grew at the annual rate of 12.40%, meanwhile, total agricultural carbon sinks grew at the annual rate of 2.10%. The net carbon of the developed cities of eastern coast was higher than the national average level, and the agricultural economic growth rate was obviously different among different regions. The agricultural economic growth rate during the period from 2006 to 2011 was obviously lower than the period from 2000 to 2005. In the recent 10 years, it showed the weak decoupling between regional agriculture net carbon and the economic growth with the elasticity value of  $0 \sim 1$ . The number of provinces that had the weak decoupling increased year by year, nearly accounting for the 90% of the whole provinces in China during the period from 2006 to 2011.

**Keywords:** carbon cycle; net carbon emissions; agricultural economy; decoupling

收稿日期:2014-09-26

修回日期:2014-10-29

**资助项目:**重庆市社会科学规划培育项目(2014PY63);国家自然科学基金项目(41101155,41301351);重庆市教委科技项目(KJ1400623);教育部人文社科项目(12XJCZH005);重庆市高等学校青年骨干教师资助计划(2011);重庆工商大学研究生“创新型科研项目”(yjscxx2015-41-23)

**第一作者:**庞容(1990—),女,安徽六安人,在读硕士生,研究方向为环境遥感、资源环境经济与农村可持续发展。E-mail:434622375@qq.com

**通信作者:**吕志强(1978—),男,山东莱芜人,博士,副教授,主要从事 3S 应用、环境遥感、资源环境经济与农村可持续发展研究。E-mail:lvzhiqiang@ctbu.edu.cn

农业作为国民经济的基础,是主要的温室气体来源,已有的研究表明,我国农业温室气体总排放量占全国排放量的 17% 左右<sup>[1]</sup>。农业源排放的 CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub> 分别占人为温室气体排放量的 21%~25%, 57%<sup>[2]</sup>。在能源高效与低碳生产的双重约束下转变农业净碳排与经济发展之间的“脱钩”状态成为重中之重,实现农业低碳化发展成为近期研究的热点<sup>[3]</sup>。经济合作与发展组织(OECD)将“脱钩”定义为阻断经济增长和资源消耗、环境污染之间的链接,是经济增长与环境冲击的耦合关系处于破裂状态<sup>[4]</sup>。脱钩理论实质上反映了经济增长与资源消耗、环境压力的非同步变化状况。一般以脱钩指数来表示二者关系的阻断。脱钩指数(Decoupling Index, DI)是指一定时期内某种资源(例如碳石资源)消耗量变化的速度、或某种污染物(例如 SO<sub>2</sub>)排放量变化的速度与经济规模变化的速度(例如 GDP 增长率)的比值<sup>[5]</sup>,它反映了碳排放变化对于经济变化的敏感程度。各省份在实现 GDP 增长时,碳生产率随之同向或反向变化且变化幅度差异明显,从而造成人均 GDP 和碳生产率之间的相关关系动态变化<sup>[6]</sup>。

从研究方法来看,脱钩评价方法主要有变化量综合分析法、脱钩指数法、弹性分析法、基于完全分解技术的脱钩分析方法、IPAT 模型法、描述统计分析法、计量分析法和差分回归系数法等<sup>[7]</sup>。从研究领域来看,国内关于脱钩理论的研究主要集中于资源环境<sup>[8-10]</sup>、能源消耗<sup>[5,11]</sup>、环境压力<sup>[4,12-13]</sup>、耕地占用<sup>[14-15]</sup>、建设用地扩张<sup>[16]</sup>、碳排放与经济关系研究<sup>[17-18]</sup>等领域,大量的研究都是根据绝对脱钩和相对脱钩制定不同的评判区间,脱钩评判标准尚未达成一致。科学构建脱钩评价模型和实现评判标准的标准化是未来脱钩理论研究的热点。

本文选取 2005 年为分隔点,将研究期划分为两个时段,对比 2000—2005 年、2006—2011 年两个时段区域农业净碳量的空间变化特征及区域低碳竞争力的时空演化。首先综合考虑农业碳循环过程中碳源和碳汇的双重特征,测算区域净碳量,对各省市农业碳排效应所呈现特征的成因进行简要探讨。同时,在借鉴已有脱钩理论研究成果的基础上,构建脱钩评价模型和判定标准;以“脱钩”来衡量区域碳量与经济增长的脱钩关系和程度,分析二者的脱钩状态和演化趋势。以期基于脱钩分析合理调整农业生产方式,促进低碳农业发展。

## 1 数据来源

受统计数据缺失的影响,本研究选择除港、澳、台

地区外的 31 个省市自治区为基础研究单元,数据来源于《中国农村统计年鉴》和分省统计年鉴,另有部分数据来自于各地区统计公报。为避免统计推断结果的偏倚或者错误,数据收集过程中对基础数据不断核实与检查,保证了数据录入的准确性。受统计口径差异的影响,个别数值会有缺失或在不同数据源中不一致,按统计软件中常用的缺失错误值处理方法予以了处理补充。其中经济数据按 1990 年不变价格进行处理。

## 2 研究方法

本研究考虑了农业碳循环的双重特征,分别计算农业碳排和碳汇,得到区域净碳量。另外,通过构建农业低碳化评价指标体系,得到区域间的低碳竞争力,进而对区域的碳排放效率进行比较。

### 2.1 农业净碳量的测算

我国农业的土地利用类型主要为耕地和园地,本研究只考虑主要途径的碳排放(主要是农地利用、水稻、牲畜带来的碳排放)和碳吸收(园地植被、农作物生长过程中光合作用带来的碳吸收),农业净碳量为农业生产过程中碳排放当量与作物生育期碳吸收当量的差值。

(1) 农业碳排放效应测算。鉴于农业碳排放源头多种多样,在参考宋德勇<sup>[19]</sup>、张秀梅<sup>[20]</sup>、黄贤金<sup>[21]</sup>等构建的碳排放公式的基础上,构建农业碳排放公式如下:

$$E=\sum E_i=\sum T_iC_i \tag{1}$$

式中: $E$ ——农业碳排放总量; $E_i$ ——各类碳源碳排放量; $T_i$ ——各碳排放源的量; $C_i$ ——各碳排放源的碳排放系数。

参照刘华军<sup>[22]</sup>对农地利用碳排放的研究,本研究的化肥、农药、薄膜、柴油、翻耕的碳排系数如表 1 所示,考虑到并非所有的电力消耗都导致碳排放,借鉴冉光和等<sup>[23]</sup>的做法,对电力的 CO<sub>2</sub> 排放系数乘以 0.75,以反映火电占全国电力供应的比重。

表 1 各类指标农业碳排放系数

指标	系数	指标	系数
化肥/(kg·hm <sup>-2</sup> )	0.8956	翻耕/(kg·hm <sup>-2</sup> )	312.6
农药/(kg·hm <sup>-2</sup> )	4.9341	牛/[kg/(头·年)]	80
薄膜/(kg·hm <sup>-2</sup> )	5.18	羊/[kg/(头·年)]	5.5
柴油/(kg·hm <sup>-2</sup> )	0.5927	水稻/(kg·hm <sup>-2</sup> )	3.823×10 <sup>5</sup>
电力/[kg·(kW·h) <sup>-1</sup> ]	0.86	—	—

稻田是温室气体 CH<sub>4</sub> 的重要排放源之一,本研究将参照国内外学者<sup>[3,24-28]</sup>所测算的水稻田 CH<sub>4</sub> 排放,结合实际考虑冬灌对甲烷排放的影响,确定稻田的 CH<sub>4</sub> 排放系数。依据 2007 年 IPCC 第 4 次评估报告,1 t 的 CH<sub>4</sub> 所引发的温室效应相当于 25 t 的 CO<sub>2</sub>

(约合 6.82 t 的 C)所产生的温室效应,为统一计量单位,稻田碳排放系数变为 3.136 g/(m·d);同时,鉴于水稻生长周期介于 120~150 d,统一取中位值,以 130 d 为准(表 1)。

牲畜养殖尤其是反刍动物养殖是 CH<sub>4</sub> 产生的又一重要源头,主要包括两方面,一是肠道发酵所引起的甲烷排放,二是粪便管理系统中的甲烷排放。在我国牛、羊这两种反刍动物是导致甲烷产生的主要牲畜,结合田云等<sup>[29]</sup>的研究,确定碳排系数(表 1)。

(2) 农业碳汇效应测算。农业生产过程中的碳汇效应是主要农作物生长生命周期中的碳吸收,碳吸收是指作物光合作用形成的净初级生产量,即生物产量,公式如下:

$$C=\sum_{i=1}^kC_i=\sum_{i=1}^kc_iY_i(1-r)/HI_i \tag{2}$$

式中: C——农作物碳吸收总量; C<sub>i</sub>——某种农作物的碳吸收量; k——农作物种类数; c<sub>i</sub>——作物通过光合作用合成单位有机质所需吸收的碳; Y<sub>i</sub>——作物的经济产量; r——作物经济产品部分的含水量; HI<sub>i</sub>——作物经济系数。各类农作物、园地植被的碳吸收率与经济系数主要引自韩召迎等<sup>[30]</sup>的研究成果,本文取主要农作物经济系数、碳吸收率的平均值分别为 0.44,0.45。

2.2 农业净碳排放与经济发展的脱钩分析模型

本文在借鉴 OECD 脱钩指数法和 Tapio 脱钩弹性系数法<sup>[31]</sup>的基础上,结合国内有关学者对脱钩理

论分析模型的改进和评价结果,构建适用于农业净碳排放与经济发展的脱钩评价模型。

用农业净碳排的变化率除以农业经济总收入的变化率来表示农业净碳排放量的经济增长弹性,基于弹性系数分析改进的地质公园脱钩评价模型为:

$$e_{(co_2,GDP)}=(\Delta C/C_0)/(\Delta GDP/GDP_0) \tag{3}$$

式中: e<sub>(co<sub>2</sub>,GDP)</sub>——经济发展与净碳排量之间的脱钩弹性指标; ΔC——当年净碳排量与基期年净碳排量差值; ΔGDP——当年农业 GDP 与基期年农业 GDP 差值; C<sub>0</sub>——基期年净碳排放量; GDP<sub>0</sub>——基期年 GDP。

关于脱钩分析的时间尺度方面,由于存在经济增长与能源消费变化的滞后关系,分时段进行脱钩分析更为恰当,一般采用 3 a 或 5 a<sup>[17]</sup>。

参考盖美<sup>[10]</sup>、赵兴国<sup>[32]</sup>等关于区域经济增长与资源环境压力脱钩程度的判定标准,制定农业净碳排量与经济增长脱钩状态的判定标准。农业经济增长与农业净碳排量常常呈现耦合同步变化状态,因此将“耦合”引入到脱钩状态中;本文假设农业经济总收入呈逐年增加的趋势(ΔTTI>0);当 ΔTTI=ΔEEPI 时,脱钩状态处于临界状态,故以脱钩弹性值等于 1 作为划分脱钩与耦合的临界值;根据脱钩弹性值的大小,划分为相对脱钩状态(0≤e<1)、临界状态、耦合状态(e≥1)。由于各省份大多落在相对脱钩区域,其中将相对脱钩状态(0≤e<1)值域区间平均 4 等分,以 0.25 作为界线值将其划分为Ⅰ,Ⅱ,Ⅲ,Ⅳ 4 种细微状态,以便更加准确地判定每个时期的脱钩状态(表 2)。

表 2 脱钩程度的判定标准

脱钩状态	ΔC	ΔGDP	e	说明
绝对脱钩	<0	>0	<0	经济较快增长,净碳排量下降,可持续发展
相对脱钩	I	>0	>0	0≤e<0.25
	II	>0	>0	0.25≤e<0.5
	III	>0	>0	0.5≤e<0.75
	IV	>0	>0	0.75≤e<1
临界状态	>0	>0	1	经济增长速率等于农业净碳排增长速率
耦合	>0	>0	e≥1	净碳排增长快于经济增长,处于耦合状态;脱钩指数越大表示生态环境压力越大,可持续性越弱

为了消除指标量纲或指标测度量级的不同而造成的影响,需要对各指标的原始数据进行无量纲化处理。目前关于消除数据量纲影响的方法,主要有相对化处理方法、函数化处理方法、标准化处理方法 3 种。本研究采用极差标准化方法,同时根据指标对各自系统贡献的正负效应,需将指标体系中的指标分为正向指标和负向指标两类,分别进行无量纲处理。其计算公式为:

$$x'_{ij}=\begin{cases} [x_{ij}-\min(x_{ij})]/[\max(x_{ij})-\min(x_{ij})] & \text{正向指标} \\ [\max(x_{ij})-x_{ij}]/[\max(x_{ij})-\min(x_{ij})] & \text{负向指标} \end{cases} \tag{4}$$

式中: x<sub>ij</sub>——第 i 个系统的第 j 个指标的值(i=1,2,⋯,n;j=1,2,⋯,n); max(x<sub>ij</sub>), min(x<sub>ij</sub>)——指标 x<sub>ij</sub> 的最大值和最小值。

3 结果与分析

3.1 各省(市、区)农业净碳排放的时间特征及其影响因素分析

3.1.1 各省(市、区)农业净碳排放结果分析 由图 1 可知,2000—2011 年全国各省(市、区)的净碳量呈显著递增的趋势,净碳量由-22 387.00 万 t 增加到

—668.61 万 t。从碳循环总量的变化来看,净碳排量从 2000 年的 23 730.44 万 t 增加到 2010 年的 56 177.24 万 t,对应年份的碳汇量从 46 118.20 万 t 增加到 56 845.85 万 t。期间,农业净碳排总量年均增长 12.40%,农业碳汇总量年均增长 2.10%,农业碳汇量上升幅度远小于净碳排下降幅度,造成农业净碳量持续增加。净碳量持续增加的主要原因是化肥、电力、机械化作业大幅度投入农业生产,其中化肥的使用量由 2000 年的 3 713.87 万 t 增加到 2011 年的 5 108.68 万 t,电力碳排由 15 701.88 万 t 增加到 46 051.07 万 t,机械使用量由 266.89 万 t 增加到 284.87 万 t。研究期内的农业 GDP 由 15 124.51 亿元增加到 23 847.11 亿元,由此可以看出,我国的农业经济增长是以增加农业碳排为前提。因此,要实现低碳农业发展,各区域应调整农业生产方式,保证低碳农业投入下的高效益产出。从碳排、碳汇、净碳量年际变化的拟合曲线可以看出,农业生产过程中碳排放当量与作物生育期碳吸收当量的差值逐年缩小,到 2011 年农业碳排和碳汇量几乎相等,如这一发展趋势得不到有效控制,那么农业系统的碳汇作用将会进一步削弱,有可能会吸纳不了农业生产过程中的碳排量,那么对区域碳排(农业部分和非农业部分)吸纳的整体能力则会显著降低。因此要保证区域农业碳循环甚至区域碳循环良性发展,一方面需要在满足农业生产资料必须投入量的前提下降低区域的碳排,另一方面需要通过农业结构调整,进一步巩固农作物的碳汇效应。

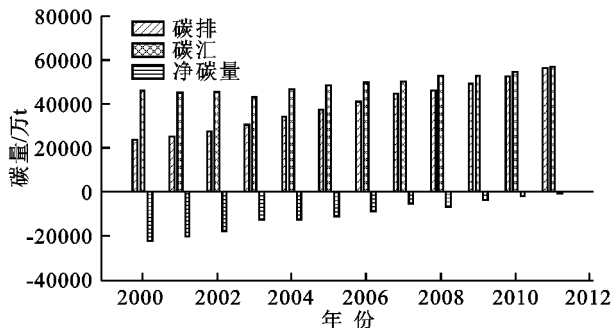


图1 2000—2011年全国各省(市、区)农业碳量

3.1.2 农业净碳排量影响因素分析 选定9个碳源指标:农药碳排( $N_1$ )、薄膜碳排( $N_2$ )、机械碳排( $N_3$ )、电力碳排( $N_4$ )、化肥碳排( $N_5$ )、翻耕碳排( $N_6$ )、水稻碳排( $N_7$ )、牛的饲养带来的碳排( $N_8$ )、羊的饲养( $N_9$ )带来的碳排;碳汇体系中选取农作物种植( $N_{10}$ )、园地( $N_{11}$ )的碳汇量,分析造成碳量变化的各指标贡献程度。

从两时期各指标对碳量贡献程度变化来看(图2),电力碳排对碳量的影响程度后期较前期贡献程度增大,其他几项指标变化趋势基本吻合。从两时期各指标的碳排、碳汇量来看,各指标对碳量贡献程度差异

明显:在碳排指标中,电力碳排、化肥碳排量最大,远远高于其他几项碳排指标,表明其对净碳量影响最大,成为阻碍低碳农业发展的最大因素,造成部分省份成为高碳化的农业生产。为了实现农业低碳化生产,应降低火电占全国农业电力供应的比重,提高水电、核电的使用以减少碳排放。此外,降低化肥使用强度,提高其利用效率也是农业低碳化生产的重要措施。总之,低碳化农业应以节肥、节药为突破口,推广应用节约型农业技术;在碳汇指标中,农作物固碳量对净碳量的贡献最大,单位面积园地固碳量较农作物固碳作用明显,但由于园地的面积远小于耕地面积,因此,园地总的固碳量对净碳量贡献不大明显。而农作物固碳效果在各指标中最强,农作物固碳总量大大降低了区域碳。

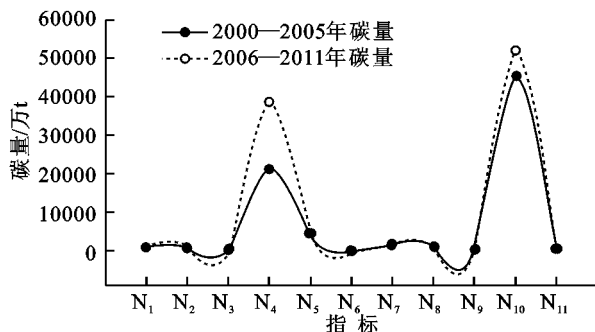


图2 2000—2011年分时段各指标的农业碳量

### 3.2 农业净碳排量空间分布

由图3可以看出,净碳量具有较大的区域差异,从地域分布来看,东北三省、内蒙古、华中及西南等粮食主产区净碳量较低,碳汇量远远高于其碳源量。北京、天津、河北、上海、江苏、浙江、福建和广东等经济发达城市碳源量要大于其碳汇量,年均净碳量较大,高于全国平均水平。这一现象主要是因为上述区域的经济以二、三产业为主,工业的快速扩张加剧了农地的流失,导致可利用农地较少,农作物播种面积难以得到保障;另一方面,由于东部沿海发达地区的农业机械化程度较高,农地集约化利用带来农地投入的增加,即化肥、农药和薄膜等农用物资的高强度使用,从而引起更多的碳排放。

从两个时段的比较可以看出:2000—2005年北京、天津、上海、江苏、浙江、福建和广东7个省份的碳汇量远小于其碳源量;由图2可知,农作物固碳量对其区域农业净碳量的贡献最大,经济发达的城市农作物种植比重小,造成农作物固碳量少继而导致其碳排量冗余。较2000—2005年相比,2006—2011年北京、天津、上海、江苏、浙江、广东等省市净碳量依然为正值,即碳源量大于其碳汇量。此外,河北、辽宁两省净碳量由负值增长为正值,碳源量大于其碳汇量,表明农业生

产的碳汇功能未能抵消其农业生产过程中产生的碳排,近几年由于城市化进程加快,大量农业用地被工业、建筑用地占用,种植业面积大大缩减。虽然政府采取一系列措施减少农业碳排,但其农作物碳汇总量下降幅度远大于农业碳排减少量,造成农业碳排放量大量冗余。四川、湖南、安徽、河南、山东、黑龙江等农业大省净碳量都较少,说明粮食主产区农作物播种面积大,

其固碳量相应较大,进而也证实了农作物固碳效应对净碳总量有着至关重要的贡献。其中,2006—2011 年全国各省净碳量的空间分布与近 10 年来的年均净碳量空间分布基本一致,说明近几年来全国各省农业平稳发展,东部沿海发达地区城市化基本饱和,建设用地大量占用农用耕地的情况有所好转。为实现农业低碳化发展,政府仍需采取一系列农业碳减排措施。

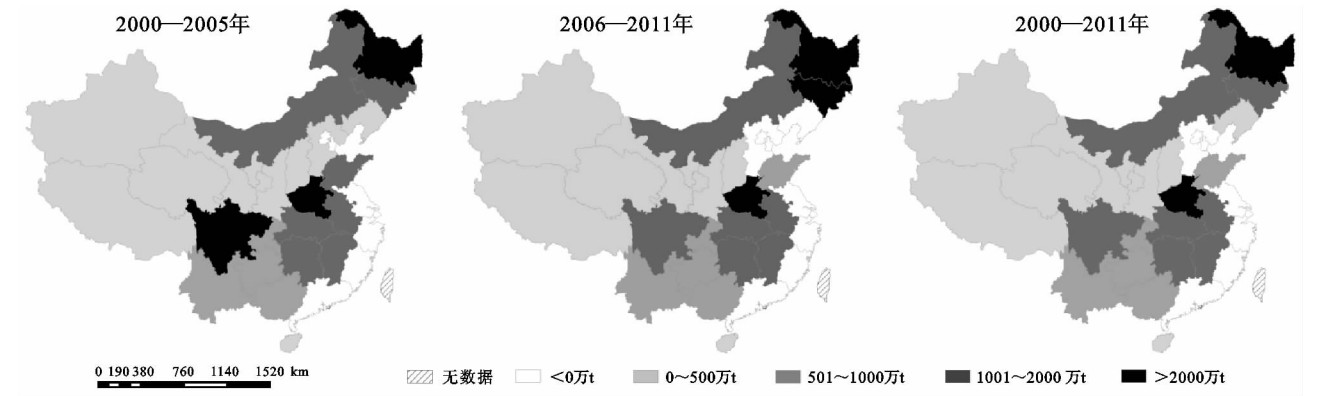


图 3 各省市农业净碳排量空间分布变化

3.3 我国农业经济与净碳排量脱钩演变分析

2000—2011 年各省市农业 GDP 增长率差异明显(表 3),广东、上海、江苏、浙江、福建等东部沿海发达城市农业 GDP 增长率较大,从各省市分时段农业 GDP 增长率来看,2000—2005 年黑龙江、吉林、辽宁、内蒙古、河北、湖南、广西、四川、宁夏、新疆等地农业 GDP 增长率达到 0.8 以上。

这一时期由于国内经济形势好转以及 2004 年中央一号文件颁布的“两减免、三补贴”政策极大地解放了农村生产力,增强了农民的生产积极性,农业生产水平得到较大提高,种植业总产值实现了较快增长,随着城市化进程的加快,建设用地占用大量耕地,农业种植面积得不到保证;较前期而言,后期农业 GDP 增长率明显低于前期。

表 3 各省市分时段农业 GDP 增长率

区域	2000—2005 年	2006—2011 年	2000—2011 年	区域	2000—2005 年	2006—2011 年	2000—2011 年
北京	0.47	0.13	0.27	湖北	0.69	0.19	0.14
天津	0.77	—0.08	0.04	湖南	0.80	0.18	0.18
河北	0.80	0.28	0.50	广东	0.59	0.33	0.64
山西	0.60	0.09	0.13	广西	0.87	0.15	0.10
内蒙古	0.93	0.29	0.27	海南	0.63	0.21	0.29
辽宁	0.85	0.63	0.52	重庆	0.72	0.28	0.32
吉林	0.84	0.20	0.17	四川	0.86	0.14	0.14
黑龙江	1.21	0.23	0.15	贵州	0.48	0.21	0.33
上海	0.15	0.68	1.81	云南	0.68	0.26	0.20
江苏	0.47	0.41	1.25	西藏	0.41	0.02	0.15
浙江	0.44	0.43	0.95	陕西	0.68	0.18	0.19
安徽	0.46	0.25	0.27	甘肃	0.73	0.19	0.15
福建	0.44	0.40	0.78	青海	0.76	0.10	0.07
江西	0.61	0.27	0.23	宁夏	0.90	0.12	0.11
山东	0.74	0.12	0.27	新疆	0.82	0.30	0.30
河南	0.79	0.32	0.28				

通过公式(3)计算的各省市脱钩弹性值来划分,2000—2011 年全时间段内农业经济增长与农业净碳排放量之间整体处于相对脱钩状态,即呈现农业净碳排放随着农业经济增长逐年上升,但农业经济增长快于净碳排放增长率,可持续性较强;这一时期经济增长虽快

于净碳排放增长率,但仍难以摆脱对碳排放增长的依赖,与实现绝对脱钩还有一定的差距。同时,区域内部也存在一定的弹性差异,依据脱钩状态判定标准的划分来精确判定各省份的脱钩状态,上海、江苏均落在耦合区域,辽宁、河北、广东落在相对脱钩Ⅲ区域,

浙江、福建落在相对脱钩Ⅳ区域。从空间分布上看,脱钩弹性值较大的省份均集中在东部沿海地区,这可能归咎于工业经济规模的扩大和产业结构调整,限制了东部沿海地区农业经济的发展。随着工业化的快速发展,农业机械化覆盖面遍及全国,未来我国经济与农业碳排放相对脱钩发展趋势在一定时期内仍将持续,未来在保证经济增长的同时,减缓碳排放绝对量的增长速率,从而实现绝对脱钩状态。其余省份均落在 $0 \leq e < 0.5$  值域间, $e$  值越小脱钩越显著,说明农业经济增长与农业碳排放的协调可持续发展。

从两时期各地区弹性值来看,2000—2005 年上海、江苏、浙江、福建、广东均落在耦合区域,脱钩弹性值 $e \geq 1$ ,反映这些农业碳排增长快于经济增长率,处于耦合状态;脱钩指数越大表示生态环境压力越大,可持续性越弱。其余全国各省均落在相对脱钩区域( $0 \leq e < 1$ ),其中,北京、天津、黑龙江、吉林、湖北、广西、青海、宁夏均落在相对脱钩Ⅰ区域,山西、内蒙古、安徽、江西、河南、湖南、重庆、四川、云南、西藏、陕西、甘肃、新疆落在相对脱钩Ⅱ区域,辽宁、贵州、海南、河北、山东弹性值在 0.5 以上,落在相对脱钩Ⅲ、Ⅳ区域。2006—2011 年除天津的脱钩弹性值为负值,全国各省份弹性值均在相对脱钩区域( $0 \leq e < 1$ )。其中,仅上海、辽宁弹性值在 0.5 以上,落在相对脱钩Ⅲ区域,其他区域弹性值均在 0.5 以下,约占到全国省域总数的 90%。这表明地区层面上实现更高层次的脱钩省域数量较前一时间段上升较快,并且呈现出地

区脱钩程度差距逐渐缩小的趋势。

从两时期各地区脱钩程度空间分布(图 4)来看,2000—2005 年各省份脱钩状态区域分布较为分散,上海、江苏、浙江、福建、广东均落在耦合区域,这些耦合区域均集中在东部沿海地区,说明这一时期东部沿海地区农业经济增长面临着巨大的碳减排压力。这可能是由于经济发达地区进行产业结构调整,第二、第三产业在国民经济中的所占比重较大,农业发展在一定程度上受到限制,使得农业经济与农业碳排放呈现较低程度的脱钩;西部、西北部大部分地区虽落在相对脱钩区域,但其弹性值接近临界值,与实现绝对脱钩还有很大的差距;东北省域、华中、西南大片区域弹性值较小,脱钩最为显著,实现了较高度度的脱钩。2006—2011 年脱钩显著区域呈现空间均衡态势,区域差异明显缩小,上海、江苏、浙江、福建等东部沿海地区,较前一时期实现了由耦合状态向相对脱钩的转变;河北、内蒙古、安徽、山东、海南、重庆、西藏、陕西、新疆等中西部地区弹性值均达到 0.4 以下,实现了较高度度的脱钩发展,导致这一变化主要是因为 2004 年中央一号文件颁布的“两减免、三补贴”政策极大地解放了农村生产力,增强了农民的生产积极性,农业生产水平得到较大提高,种植业总产值实现了较快增长;而农业的复苏也带动了农业生产原料需求的增加,进而使得农业碳排放增速回升,但农业科技的进步以及循环农业模式的不断推广,也使得该阶段农业碳排放增速逐步放缓,从而实现了较高度度的脱钩发展。

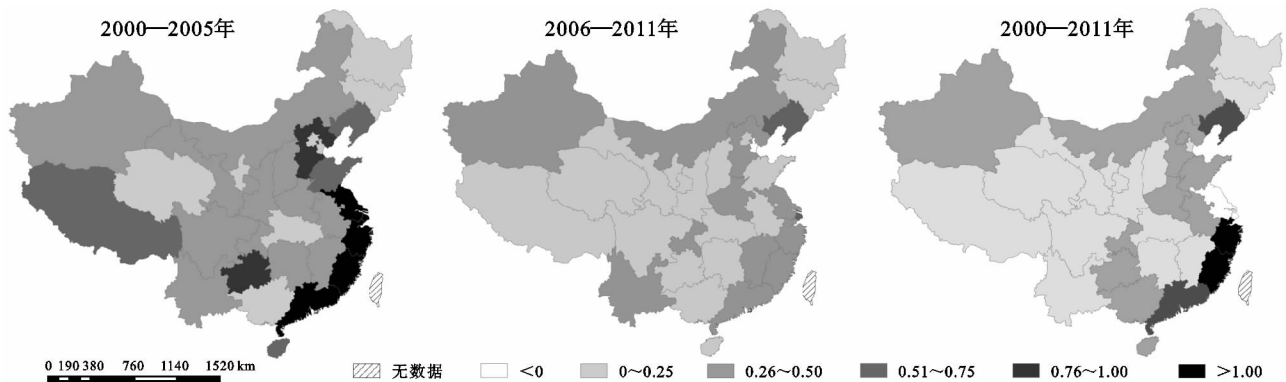


图 4 各时间段农业 GDP 与农业净碳排放脱钩的弹性值区域差异

## 4 结论与讨论

### 4.1 结论

(1) 测算结果显示,近些年来全国各省(市、区)总的净碳量显著递增。从碳循环总量的变化来看,碳排放量从 2000 年的 23 730.44 万 t 增加到 2011 年的 56 177.24 万 t,对应年份的碳汇量从 46 118.20 万 t 增加到 56 845.85 万 t。期间,农业碳排总量年均增长 12.40%,农业碳汇总量年均增长 2.10%,农业碳汇量

上升幅度远小于碳排下降幅度,造成农业净碳量持续增加;从年际变化来看,农业生产过程中碳排放当量与作物生育期碳吸收当量的差值逐年缩小,可以预测未来农业碳排放量将高于农业碳汇量,作物生育期碳吸收量不能完全抵消农业整个生产过程中的碳排放量。

(2) 横向来看,净碳量空间分布区域差异明显,东北三省、内蒙古、华中及西南等粮食主产区年均净碳量较小。从省域碳量空间分布看,北京、天津、河北、上海、江苏、浙江、福建、广东等东部沿海发达城市

年均净碳量高于全国平均水平;从各时段来看,后期较前期年均区域差异变化较大,2006—2011年全国各省净碳量的空间分布与近10年来的年均净碳量空间分布基本一致。

(3) 以农业总产值来分析经济增长与农业净碳排放的脱钩关系,采用不同时间尺度会有不同的结果。鉴于经济增长与能源消费变化的滞后关系,年份尺度放宽到时期尺度进行脱钩分析。2000—2011年期间,全国大部分省市农业经济与农业净碳量处于相对脱钩状态,弹性值主要集中在  $0 \leq e < 1$ ,但脱钩区域内部各省市脱钩程度差异较大。其中,2000—2005年上海、江苏、浙江、福建、广东等东部沿海地区弹性值  $e \geq 1$ ,处于耦合状态,表明这些沿海发达城市农业净碳增长快于经济增长,农业生态环境碳排压力大,可持续性较弱。2006—2011年除天津的脱钩弹性值为负值,全国各省份弹性值均在相对脱钩区域( $0 \leq e < 1$ ),弹性值在0.5以下的省份,约占到全国省域总数的90%。较前一时间段来看,地区层面上实现更高层次的脱钩省域数量逐年增多,实现了较高层次的脱钩发展,可见我国在发展低碳农业方面取得了一定成效。大部分地区后期较前期脱钩更为显著,脱钩显著区域呈现空间均衡态势,区域差异明显缩小。

## 4.2 讨论

(1) 我国农业的土地利用类型主要为耕地和园地,本研究只考虑主要途径的碳排放(主要是农地利用、水稻、牲畜带来的碳排放)和碳吸收(园地植被、农作物生长过程中光合作用带来的碳吸收),另外研究选用指标多为总量指标,如化肥、农药、农膜、柴油、机械等均采用的是施用或排放总量,没有计算农业生产中实际所消耗的量,电力指标选用的农村电力,未能排除农村生活用电量,农用化肥施用量按折纯法计算,也未进一步区分氮肥与磷肥的碳排放差异,故无法精准细致的分析农业实际碳排放的量。

(2) 本文基于碳循环过程碳源和碳汇的双重特征测算区域净碳量;由于作物的固碳作用,碳汇量大于碳排放量,与田云等<sup>[3]</sup>的研究结果较为一致。其中,在测算农业碳排放时,综合国内外学者的研究成果,科学确定碳排系数,从而对农业碳减排研究做到一定的补充。

(3) 定量评价农业经济增长与净碳量的脱钩状态和程度,对区域调整农业生产方式,发展低碳农业提供依据。本文在借鉴 OECD 脱钩指数法和 Tapio 脱钩弹性系数法的基础上,结合国内有关学者对脱钩理论分析模型的改进和评价结果,构建适用于农业净碳排放与经济发展的脱钩评价模型。在脱钩分析的时间尺度上,一般采用3a或5a,本文选取2005年

为分隔点,将研究期划分为两个时段。

## 参考文献:

- [1] 陈源泉,高旺盛. 中国粮食主产区农田生态服务价值总体评价[J]. 中国农业资源与区划,2009,30(1):33-39.
- [2] 赵荣钦,黄爱民,秦明周,等. 中国农田生态系统碳增汇/减排技术研究进展[J]. 河南大学学报:自然科学版,2004,34(1):60-65.
- [3] 田云,张俊飏. 中国农业生产净碳效应分异研究[J]. 自然资源学报,2013,28(8):1298-1309.
- [4] 彭佳捷,周国华,唐承丽,等. 长株潭城市群环境压力与经济发展脱钩研究[J]. 热带地理,2011,31(3):297-303.
- [5] 王崇梅. 中国经济增长与能源消耗脱钩分析[J]. 中国人口·资源与环境,2010,20(3):35-37.
- [6] 张成,蔡万焕,于同申. 区域经济增长与碳生产率:基于收敛及脱钩指数的分析[J]. 中国工业经济,2013(5):18-30.
- [7] 钟太洋,黄贤金,韩立,等. 资源环境领域脱钩分析研究进展[J]. 自然资源学报,2010,25(8):1400-1412.
- [8] 苑清敏,邱静,秦聪聪. 天津市经济增长与资源和环境的脱钩关系及反弹效应研究[J]. 资源科学,2014,36(5):954-962.
- [9] 赵兴国,潘玉君,赵波,等. 区域资源环境与经济发展关系的时空分析[J]. 地理科学进展,2011,30(6):706-714.
- [10] 盖美,胡杭爱,柯丽娜. 长江三角洲地区资源环境与经济增长脱钩分析[J]. 自然资源学报,2013,28(2):185-198.
- [11] 查建平,唐方方,傅浩. 中国能源消费,碳排放与工业经济增长:一个脱钩理论视角的实证分析[J]. 当代经济科学,2011,33(6):81-89.
- [12] 李孝坤,韦杰. 资源环境压力与经济增长的退耦分析[J]. 重庆师范大学学报:自然科学版,2010,27(1):28-35.
- [13] 吴开亚,刘晓薇,朱勤,等. 安徽省经济增长与环境压力的脱钩关系研究:基于物质流分析[J]. 地域研究与开发,2012,31(4):29-33.
- [14] 张文斌,陈英,张仁陟,等. 基于脱钩分析方法的耕地占用与经济发展的关系研究[J]. 自然资源学报,2013,28(4):560-570.
- [15] 吴仕海,张安明. 重庆市建设占用耕地与经济发展的脱钩研究[J]. 中国农学通报,2012,28(23):139-144.
- [16] 钟太洋,黄贤金,王柏源. 经济增长与建设用地扩张的脱钩分析[J]. 自然资源学报,2010,25(1):18-31.
- [17] 彭佳雯,黄贤金,钟太洋,等. 中国经济增长与能源碳排放的脱钩研究[J]. 资源科学,2011,33(4):626-633.
- [18] 孙耀华,李忠民. 中国各省区经济发展与碳排放脱钩关系研究[J]. 中国人口·资源与环境,2011,21(5):87-92.
- [19] 宋德勇,卢忠宝. 中国碳排放影响因素分解及其周期性波动研究[J]. 中国人口·资源与环境,2009,19(3):18-24.
- [20] 张秀梅,李升峰,黄贤金,等. 江苏省1996年至2007年碳排放效应及时空格局分析[J]. 资源科学,2010,32(4):768-775.

引起作物水分需求的增加,从而进一步加剧区域农业灌溉需求的不足<sup>[14]</sup>。尤其是在阿勒泰市和福海县的西北部,潜在蒸散量较大且增势最为明显,因此,需要进一步做好农业用水的调配与管理。虽然阿勒泰地区在逐步推进节水灌溉技术,但是近几十年来大水漫灌的耕作现象依然存在,在潜在蒸散量明显增加的情况下,进一步推广节水灌溉技术,提高水资源利用效率,才可以有效地解决农业需水的不足以及水资源的高效、可持续利用。

阿勒泰地区潜在蒸散量的变化是对全球变化的响应,尤其是阿勒泰地区气温和降水的增加<sup>[15]</sup>以及相对湿度减少<sup>[16]</sup>等共同作用的结果,但是对于气象因子在潜在蒸散量变化中的作用以及各因子的贡献度等,这还有待进一步研究。

#### 参考文献:

- [1] Djaman K, Balde A B, Sow A, et al. Evaluation of sixteen reference evapotranspiration methods under Sahelian conditions in the Senegal River Valley[J]. *Journal of Hydrology Regional Studies*, 2015, 3: 139-159.
- [2] Pereira L S, Allen R G, Smith M, et al. Crop evapotranspiration estimation with FAO56: Past and future [J]. *Agricultural Water Management*, 2015, 147: 4-20.
- [3] Kumar R, Jat M K, Shankar V. Methods to estimate irrigated reference crop evapotranspiration: A review [J]. *Water Science & Technology*, 2012, 66(3): 525-535.
- [4] 任庆福, 杨志勇, 李传哲, 等. 变化环境下作物蒸散研究进展[J]. *地球科学进展*, 2013, 28(11): 1227-1238.
- [5] 卓玛兰草, 刘普幸, 张亚宁, 等. 甘肃黄土高原区潜在蒸散量时空变化与成因研究[J]. *水土保持研究*, 2012, 19(1): 70-75.
- [6] 王媛媛, 张勃, 尹海霞. 1961—2010 年陇东参考作物蒸散量时空变化及气候影响因子[J]. *生态学杂志*, 2013, 32(6): 1511-1517.
- [7] 赵璐, 梁川. 近 50 a 来四川省潜在蒸散量变化成因研究[J]. *水土保持研究*, 2014, 21(4): 26-30.
- [8] Some'E B S, Ezani A, Tabari H. Spatiotemporal trends of aridity index in arid and semi-arid regions of Iran[J]. *Theoretical & Applied Climatology*, 2013, 111(1/2): 149-160.
- [9] 杨萍, 刘伟东. 北京地区加密自动气象站数据的质量分析[J]. *气象科技进展*, 2013, 3(6): 27-34.
- [10] 吴燕锋, 巴特尔·巴克, 加依娜古丽·窝扎提汗, 等. 石河子地区近 50 a 霜期的变化特征[J]. *干旱区资源与环境*, 2014, 28(9): 173-178.
- [11] 张晓晓, 张钰, 徐浩杰. 1961—2010 年白龙江流域气温和降水量变化特征研究[J]. *水土保持研究*, 2014, 21(4): 238-245.
- [12] Zafra P G, Llanque F J C. Estimating reference evapotranspiration with atmometers in a semiarid environment[J]. *Agricultural Water Management*, 2009, 96(3): 465-472.
- [13] 王潇潇, 潘学标, 顾生浩, 等. 内蒙古地区参考作物蒸散变化特征及其气象影响因子[J]. *农业工程学报*, 2015, 31(S1): 142-152.
- [14] 周蕊蕊. 中国主要粮食作物需水满足度时空特征分析[D]. 武汉: 华中师范大学, 2014.
- [15] 李立, 魏晓妹, 韩业珍. 基于地统计学的作物需水量空间变异性分析[J]. *水土保持研究*, 2010, 17(1): 239-242.
- [16] 古丽扎提·哈布肯. 近 50 年来新疆阿勒泰地区的气候变化[J]. *干旱区研究*, 2011, 28(2): 268-274.
- [17] 傅玮东, 姚艳丽, 陈洪武. 北疆北部地区春季地表湿润状况特征分析[J]. *中国农业气象*, 2009, 30(2): 223-226.

(上接第 259 页)

- [21] 谭丹, 黄贤金. 我国东、中、西部地区经济发展与碳排放的关联分析及比较[J]. *中国人口·资源与环境*, 2008, 18(3): 54-57.
- [22] 刘华军, 鲍振, 杨骞. 中国二氧化碳排放的分布动态与演进趋势[J]. *资源科学*, 2013, 35(10): 1925-1932.
- [23] 冉光和, 王建洪, 王定祥. 我国现代农业生产的碳排放变动趋势研究[J]. *农业经济问题*, 2011(2): 32-38.
- [24] Schlitz H, Rennenberg H, Seiler W. CH<sub>4</sub> emission from a Chinese rice paddy field[J]. *Acta Meteorologica Sinica*, 1990, 4(3): 265-275.
- [25] Matthews E, Fung I, Lerner J. Methane emission from rice cultivation: Geographic and seasonal distribution of cultivated areas and emissions[J]. *Global Biogeochemical Cycles*, 1991, 5(1): 3-24.
- [26] Cao M, Dent J B, Heal O W. Methane emissions from China's paddyland [J]. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 1995, 55(2): 129-137.
- [27] 韩广轩, 朱波, 江长胜, 等. 川中丘陵区稻田甲烷排放及其影响因素[J]. *农村生态环境*, 2005, 21(1): 1-6.
- [28] 闵继胜, 胡浩. 中国农业生产温室气体排放量的测算[J]. *中国人口·资源与环境*, 2012, 22(7): 21-27.
- [29] 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.
- [30] 韩召迎, 孟亚利, 徐娇, 等. 区域农田生态系统碳足迹时空差异分析: 以江苏省为案例[J]. *农业环境科学学报*, 2012, 31(5): 1034-1041.
- [31] 梁日忠, 张林浩. 1990—2008 年中国化学工业碳排放脱钩和反弹效应研究[J]. *资源科学*, 2013, 35(2): 268-274.
- [32] 赵兴国, 潘玉君, 赵庆由, 等. 科学发展视角下区域经济增长与资源环境压力的脱钩分析: 以云南省为例[J]. *经济地理*, 2011, 31(7): 1196-1201.