

山东省农业净碳汇时空演化特征分析

吕斯涵, 张小平

(西北师范大学地理与环境科学学院, 兰州 730070)

摘要: 基于农地利用、水稻种植、畜禽养殖、秸秆焚烧 4 大方面 25 类主要碳源和 17 类主要农作物碳汇, 测算了山东省 2000—2015 年及全省 17 个地级市 2000 年、2007 年、2015 年的农业碳排放量和碳汇量, 在此基础上计算出农业净碳汇量和净碳汇强度, 并对其时空演化特征进行分析。结果表明, 2000—2015 年间山东省农业净碳汇总量和净碳汇强度均呈上升趋势, 分别增长 33.05% 和 39.14%, 农业发展的碳效应以碳汇为主, 减排增汇效果明显; 农业净碳汇量区域差异明显且随时间的变化呈扩大趋势, 存在净碳汇量持续增长型、波动增长型、波动下降型和持续下降型 4 种类型区; 农业净碳汇强度区域差异较明显, 亦随时间变化呈扩大趋势, 存在净碳汇强度持续增长型和波动下降型 2 种类型区; 基于空间分布特征, 将各地级市净碳汇量和净碳汇强度分别划分为低、较低、中、较高和高 5 个等级区, 2000—2015 年间净碳低汇区空间分布格局相对稳定, 其他 4 个等级区发生了较大幅度的变化, 净碳高汇区向鲁西地区集中, 净碳较高汇区向鲁东南地区分布; 净碳汇强度空间分布格局发生了较大幅度的变化, 净碳汇高强度区由鲁中向鲁西和鲁西南地区扩展, 净碳汇较高强度区由鲁中向鲁东南地区扩展。

关键词: 农业; 净碳汇; 时空演化; 山东省

中图分类号: F323; X196

文献标识码: A

文章编号: 1009-2242(2019)02-0227-08

DOI: 10.13870/j.cnki.stbcxb.2019.02.036

Spatial-temporal Characteristics of Agricultural Net Carbon Sink in Shandong Province

LÜ Sihan, ZHANG Xiaoping

(College of Geography and Environmental Sciences, Northwest Normal University, Lanzhou 730070)

Abstract: Based on the 25 categories of the major carbon resources from four aspects including agricultural land use, rice planting, livestock and poultry breeding and straw burning and the 17 categories of major crops carbon sink species, this study calculated the carbon emissions and carbon sink in Shandong Province from 2000 to 2015, and also calculated those of 17 prefecture-level cities in 2000, 2007 and 2015. Then, the agricultural net carbon sink and the intensity of net carbon sink were calculated, and the characteristics of spatial-temporal evolution were analyzed. The results showed that the amount of agricultural net carbon sink and net carbon sink intensity in Shandong province from 2000 to 2015 showed the upward trend, with the increase of 33.05% and 39.14% respectively. Carbon sink was the main carbon effect in agricultural development, and the effect of reduce emission on the increased carbon sink was obvious. The regional difference of agricultural net carbon sink was obvious and showed a trend of expansion with time, and there were four types of regions: “continuous increase”, “fluctuant increase”, “fluctuant decrease” and “continuous decrease”. The regional difference of agricultural net carbon sink intensities was obvious and also showed a trend of expansion with time, and there were two types of regions: “continuous increase” and “fluctuant decrease”. Based on spatial distribution features, the net carbon sink and net carbon sink intensities of each city were divided into five grades: lowest, lower, medium, higher and highest, from 2000 to 2015. The spatial distribution pattern of lowest net carbon sink area was relatively stable, while the other four grades of areas changed greatly. The highest net carbon sink areas were concentrated in the west of Shandong

收稿日期: 2018-10-17

资助项目: 国家自然科学基金项目(41161028)

第一作者: 吕斯涵(1993—), 男, 硕士研究生, 主要从事区域环境与生态产业研究。E-mail: 599201260@qq.com

通信作者: 张小平(1967—), 女, 教授, 硕士生导师, 主要从事区域环境与生态产业研究。E-mail: xzp296@163.com

Province, and the higher net carbon sink areas in the southeast. The spatial distribution pattern of net carbon sink intensities changed greatly, the highest intensity areas of net carbon sink expanded from the middle to the west and southwest of Shandong Province, and the higher intensity areas from the middle to the southeast.

Keywords: agriculture; net carbon sink; spatial-temporal evolution; Shandong Province

2013 年 9 月 29 日 IPCC(联合国政府间气候变化专门委员会)在第 5 次评估报告中明确指出,过去 130 年全球已升温 0.85°C ,而人类活动极有可能是 20 世纪中期以来全球气候变暖的主要原因^[1]。气候变化已深刻触及农业与粮食安全、能源资源安全和公共卫生安全,甚至威胁到人类的生存与发展,并由此成为人类持续关注和研究的重大全球性环境问题^[2]。为此,核查人为活动的碳排放源,有效控制碳排放是减缓气候变化的有效途径之一。由于农业生产活动的广泛性和普遍性,使其成为温室气体的第二大排放源^[3],尤其是随着电力、化石能源、农用物资的使用量逐年递增,农业碳排放量也在持续增长;另一方面,由于农业是生物质生产的基础产业^[4],农作物通过光合作用吸收大气中的 CO_2 ,使农地生态系统具有强大的碳汇功能。农业活动具有的碳源和碳汇双重属性也引起了国内外学者的普遍关注。国外学者关注的重点主要为不同国家之间农业碳汇/碳源的比重变化^[5-6],农业碳汇/碳源的影响因素分析^[7-8]以及不同耕作方式引起的碳排放量的变化等方面^[9-10]。我国学者也进行了相关研究,成果集中在对农业碳源、碳汇现状的估算以及影响因素的分析等方面^[11-14],对农业净碳汇的研究相对较少,且大多是从宏观层次上基于全国范围的省域比较研究^[15-16],也有学者^[17]从微观层次上对全国范围县域农业净碳汇时空分布格局进行了系统的测算和分析,而从中观层次上对省域范围的系统研究还未展开。考虑到净碳汇研究对于指导区域农业现代化过程中的减排增汇以及低碳化发展的重要作用,因此,基于省域层面的进一步研究意义重大。

山东省作为我国的农业大省,是全国重要的农产品生产基地,其耕地面积约占全国总耕地面积的 6.17%,位居全国第 3。主要农作物有小麦、玉米、红薯、大豆、谷子、高粱、棉花、花生等。近年来,山东省通过加大农业基础设施建设和实施科技兴农政策,农业标准化生产与产业化经营稳步推进。2015 年农业增加值 2 900.8 亿元,较上年增长 4.7%;牧业(主要包括牛、羊、猪、兔、家禽)增加值 1 043.7 亿元,较上年增长 3.1%;粮食总产量 4 712.7 万 t,比上年增长 2.5%,实现了粮食产量“十三连增”的喜人成绩^[18]。同时,随着农业的快速发展和农业现代化水平的提高,化肥、农药等物资的投入不断增加,农业环境污染问题突出,耕地质量下降,农药、化肥有效利用率低,

不可降解塑料地膜残留严重,养殖污染和环境压力越来越大,农业温室气体排放增长等问题^[19-21],对山东省农业的可持续发展造成了一定的制约。目前在全省倡导低碳经济的大背景下,如何实现农业的减排增汇是山东省低碳农业发展的有效途径之一。因此本文以山东省为例,测算了 2000—2015 年间山东全省及 17 个地级市的农业系统碳源、碳汇,在此基础上分别计算出相应的净碳汇总量和净碳汇强度,分析了山东省农业净碳汇时空演化特征,以期对山东省农业的低碳发展提供实证依据。

1 研究方法 with 数据来源

对于农业生产过程中碳源、碳汇的形成机理以及测算依据,相关学者已进行了较为全面的阐释^[13,17],本文不再赘述。对于山东省农业净碳汇量的测算,本文根据山东省农业生产的实际状况确定具体的碳源项和碳汇组成,然后根据 IPCC^[3]提供的相关方法核算其碳源量、碳汇量,在此基础上计算得出农业净碳汇量。

1.1 农业碳源量测算

由于农业生产活动的交互性、循环性,给农业碳源的核算带来了一定的困难。因此,目前关于农业生产碳排放的测算体系尚未形成较为统一的认知,一般是按照农业生产过程中具体活动方式进行加总核算。考虑到山东省农业数据的时效性与可获得性,本文将从 4 个方面测算农业碳源:一是农地利用活动导致的碳排放^[22];二是水稻种植过程中所产生的碳排放^[23-24];三是畜禽养殖过程中释放的碳排放^[24-27];四是秸秆露天焚烧产生的碳排放^[28-29]。我国学者田云等^[11,15,30]、陈罗焯等^[16-17]先后基于以上框架对不同区域农业碳排放进行测算;外国学者 Johnson^[31]、美国密苏里大学相关研究^[30]也曾根据此研究框架对美国农业温室气体进行测算,这些研究过程对本文构建的农业碳源测算体系具有一定启示作用,也能说明该测算体系较为合理,可操作性较强,已能大致代表农业活动的主要碳源。具体计算步骤为:

1.1.1 农地利用碳排放 农地利用碳排放是指在农业生产活动中直接或间接导致的温室气体排放。其碳排放主要源于 3 个方面:一是农用物资(化肥、农药、农膜、柴油)在投入使用过程中直接或间接产生的碳排放;二是农业灌溉活动耗费电能所导致的间接碳排放;三是农地翻耕引起土壤表层破坏所导致的有机碳排放。根据这 3 个方面的分析,农地利用碳排放测

算公式可表述为:

$$E_{\text{农地}} = \sum T_i \times \delta_i \tag{1}$$

式中: $E_{\text{农地}}$ 为农地碳排放总量(kg); T_i 为第*i*类农地利用碳源的量(kg); δ_i 为第*i*类农地利用碳源的碳排放系数(kg C/kg)或(kg C/hm²),见表 1。

表 1 农地利用活动主要碳源碳排放系数

碳排放源	碳排放系数	数据参考来源
化肥	0.8956	ORNL(美国橡树岭国家实验室)
农药	4.9341	ORNL(美国橡树岭国家实验室)
农膜	5.18	IREEA(南京农业大学农业资源与生态环境研究所)
柴油	0.5927	IPCC(联合国气候变化政府间专家委员会)
灌溉	266.48	段华平等 ^[32]
翻耕	3.126	IABCAU(中国农业大学农学与生态环境研究所)

注:数据来源根据相关研究成果整理所得。化肥、农药、农膜的单位为 kg C/kg,灌溉、翻耕碳排放系数的单位为 kg C/hm²。

1.1.2 水稻 CH₄ 排放 水稻生长周期内 CH₄ 排放率因其种植品种、种植季节而异,山东省水稻大多属于中季稻(单季晚稻、冬水田和麦茬稻),其 CH₄ 排放系数(21 g/m²)参考闵继胜等^[24]的研究成果。另外需要说明的是,本文中 CH₄ 排放量(即水稻与畜禽的排放)折算成碳排放量是依照 IPCC 第 4 次评估报告^[3],1 t CH₄ 所引发的温室效应相当于 25 t CO₂ (约合 6.818 2 t 碳)所产生的温室效应,即 1 t CH₄ = 6.818 2 t 碳。水稻 CH₄ 排放计算公式为:

$$E_{\text{水稻}} = \sum T_j \times \delta_j \tag{2}$$

式中: $E_{\text{水稻}}$ 为水稻碳排放总量(kg); T_j 为稻田面积(hm²); δ_j 为水稻 CH₄ 排放系数(kg C/hm²)。

1.1.3 畜禽养殖碳排放 畜禽养殖也会带来大量的碳排放,尤其是牛、羊等反刍动物在生命活动中肠道发酵和粪便管理所引起的 CH₄ 排放,计算公式为:

$$E_{\text{畜禽}} = \sum T_k \times \delta_k \tag{3}$$

式(3)中: $E_{\text{畜禽}}$ 为畜禽碳排放总量(kg); T_k 为第*k*类畜禽平均饲养量,山东省主要畜禽有牛、羊、猪及兔、家禽等(头); δ_k 为第*k*类畜禽呼吸和肠道发酵、粪便管理的 CH₄ 排放系数(kg/(head·a))(表 2)。

本文借鉴闵继胜等^[24]的计算方法,在实际计算中将其年均饲养量进行调整。其中,对于出栏率大于或等于 1 的畜禽如猪、羊、兔和家禽等(本文中牛的出栏率小于 1),其年均饲养量根据出栏量进行调整,即:

$$T_k = \text{Days_alive}_k \times \frac{N_k}{365} \tag{4}$$

式中: T_k 为第*k*种畜禽年平均饲养量(head); Days_alive_k 为第*k*种畜禽的平均生命周期,猪、羊、兔和家禽分别为 200^[25],210^[25],105^[26],55 天^[25]; N_k 为第*k*

种畜禽年平均出栏量(head)。

当出栏率小于 1 时,畜禽的年平均饲养量根据年末存栏量进行调整,即:

$$T_k = (L_{kt} + L_{k(t-1)}) / 2 \tag{5}$$

式中: T_k 为第*k*种畜禽年平均饲养量(head); L_{kt} 、 $L_{k(t-1)}$ 分别表示第*k*种畜禽第*t*年年末存栏量和第*t*年年末存栏量(head)。

表 2 主要畜禽品种对应的碳排放系数

单位:kg/(head·a)		
碳源	肠道发酵排放系数	粪便管理排放系数
牛	47	1
猪	1	4
羊	5	0.16 ^①
兔	0.254	0.08
家禽	0	0.02

注:①指取山羊和绵羊的平均数。数据来源于 IPCC(联合国气候变化政府间专家委员会)。

1.1.4 秸秆焚烧碳排放 秸秆焚烧产生 CO、CO₂ 气体,其排放系数参考曹国良等^[28]的研究成果,分别为 92,151 5 g/kg,计算公式为:

$$G = M \times R \times W \tag{6}$$

式中: G 为秸秆焚烧碳排放总量(kg C); M 为农作物秸秆产量(kg); R 为秸秆焚烧系数; W 为碳排放系数。

农作物秸秆产量估算公式:

$$M = V_p \times S_g \tag{7}$$

式中: M 为农作物秸秆产量; V_p 为农作物经济产量(kg); S_g 为草谷比即农作物秸秆产量与农作物经济产量之比;谷草比系数主要参考毕于运等^[29]的研究成果:小麦 1.1,水稻 0.9,玉米 1.2,谷子 1.6,高粱 1.6,豆类 1.5,薯类 0.5,花生 0.8,油菜 1.5,棉花 9.2,芝麻 2.2。另外,麻类 1.7参考中国农村能源行业协会数据。

1.2 农业碳汇量测算

本文所涉及的农业碳汇专指农作物生长全生命周期中的碳吸收,即农作物光合作用形成的净初级生产量(生物产量),其估算方法根据田云等^[15]的研究成果:

$$C_t = \sum_{i=1}^k C_i = \sum_{i=1}^k c_i \times Y_i \times (1-r) / HI_i \tag{8}$$

式中: C_t 为农作物生育期碳吸收总量(t); C_i 为某种农作物的碳吸收量(kg); k 为农作物种类数; c_i 为作物通过光合作用合成单位有机质所需吸收的碳(kg); Y_i 为作物的经济产量(kg); r 为作物经济产品部分的含水量(%); HI_i 为作物经济系数(表 3)。

1.3 农业净碳汇量测算

农业净碳汇量是指农业生产活动所引发的碳汇量与碳排放量的差值。为进一步分析山东省农业净碳汇时空演化特征,引入农业净碳汇强度指标。由于不受总量基数的影响,农业净碳汇强度更能反映全

省各地区的农业生产技术水平和净碳效应,有助于进行区域间的比较,从而制定差别化的农业低碳路径。具体计算公式为:

$$C_{\text{净}} = C_t - E_t \quad (9)$$

$$E_t = E_{\text{农地}} + E_{\text{水稻}} + E_{\text{畜禽}} + G \quad (10)$$

$$C_{\text{强}} = C_{\text{净}} / S_{\text{耕}} \quad (11)$$

式中: $C_{\text{净}}$ 为农业净碳汇量(t); C_t 为农作物生育期碳吸收总量即碳汇量(t); E_t 为农业生产活动中碳源总量(t); G 为秸秆焚烧碳排放量(t); $S_{\text{耕}}$ 为耕地面积(hm^2); $C_{\text{强}}$ 为农业净碳汇强度(t/hm^2),是农业净碳汇量与耕地面积的比值。

表 3 主要农作物经济系数和碳吸收率^[15]

农作物	经济系数	含水量/%	碳吸收率	农作物	经济系数	含水量/%	碳吸收率
稻谷	0.45	12	0.414	油菜籽	0.25	10	0.450
小麦	0.40	12	0.485	棉花	0.10	8	0.450
玉米	0.40	13	0.471	麻类	0.36	15	0.450
谷子	0.42	12	0.450	甜菜	0.70	75	0.407
高粱	0.35	12	0.450	烟叶	0.55	85	0.450
豆类	0.34	13	0.450	蔬菜	0.60	90	0.450
薯类	0.70	70	0.423	瓜类	0.70	90	0.450
花生	0.43	10	0.450	其他	0.40	12	0.450

1.4 空间格局演化分析

对全省范围内不同地区间农业净碳汇量、净碳汇强度进行分析比较,有助于从中观层面制定差别化的减排增汇政策。本文选取 2000 年、2007 年、2015 年为研究期间的代表年份,计算出山东省 17 个地级市的农业净碳汇量、净碳汇强度,然后对农业净碳汇量及净碳汇强度进行分级处理,并利用 ArcGis 10.2 软件制作各地级市农业净碳汇量、净碳汇强度的空间格局演化图,进一步对农业净碳汇变化进行比较分析。

1.5 数据来源与处理

本文所需的原始数据资料(农用物资、翻耕面积、灌溉面积、水稻种植面积、畜禽出栏量和存栏量、农作物经济产量等)主要来自于 2001—2016 年《山东省统计年鉴》和《山东省农村统计年鉴》。其中化肥为折纯量,农用柴油、农药、农膜数据以当年实际使用量为准;翻耕面积为当年农作物耕地面积;灌溉面积为当年有效灌溉面积;农作物产量以当年实际情况为准。牛、猪、羊、兔、家禽的数量参考各年出栏情况进行适当地修正。

2 结果与分析

2.1 农业净碳汇时序变化特征

根据前文中已给出的相关公式,测算了 2000—2015 年山东省农业生产活动产生的碳排放量、碳汇量,在此基础上计算出其农业净碳汇总量、净碳汇强度,结果见图 1。

由图 1 可知,在 2000—2015 年间,山东省农业净碳

汇总量总体呈波动上升趋势,由 2000 年的 $3\,088.30 \times 10^4 \text{t}$ 增加到 2015 年的 $4\,108.89 \times 10^4 \text{t}$,增长了 33.05%,年均递增 1.92%。其中,碳汇量由 2000 年的 $4\,977.95 \times 10^4 \text{t}$ 增加到 2015 年的 $5\,958.91 \times 10^4 \text{t}$,增长了 19.71%,年均递增 1.21%。主要碳汇为小麦、玉米和蔬菜,年均分别占到 37.63%、32.75%和 12.05%,总和占比高达 82.43%,而且呈增长态势;碳排放量由 2000 年的 $1\,889.66 \times 10^4 \text{t}$ 增至 2015 年的 $2\,089.48 \times 10^4 \text{t}$,增长了 10.57%,年均递增 0.67%。主要碳源为土地利用(以化肥和农膜为主)和秸秆焚烧,年均分别占到 43.51%和 35.08%,总和占比达 78.59%。可见,农业生产碳汇量增速明显快于碳排放量的增速,说明山东省农业在减排增汇方面成效显著。

进一步分析发现,农业净碳汇总量在 16 年内经历了 3 个不同阶段的变化,即下降期—快速增长期—缓慢增长期。第 1 阶段下降期为 2000—2002 年,净碳汇总量从 $3\,088.30 \times 10^4 \text{t}$ 下降到 $2\,654.35 \times 10^4 \text{t}$,下降 14.10%。这一时期山东省农业现代化水平稳步提升,除灌溉、翻耕面积以及秸秆焚烧量略有下降外,化肥、农药、农膜、柴油等消费量明显增加,养殖业规模也在不断扩大^[33],导致碳排放量波动增长。而受农作物种植面积、种植结构调整的变化以及自然灾害的影响^[34-35],近 3 年粮食总产量显著减少,尤其是小麦、水稻、玉米、高粱、谷子、豆类等作物产量减少直接导致农业碳汇量的大幅下降,由此导致该阶段农业净碳汇总量也处于下降态势;第 2 阶段快速增长期为 2003—2008 年,净碳汇总量从 2002 年的最低点 $2\,654.35 \times 10^4 \text{t}$ 持续增长到 2008 年的 $3\,702.98 \times 10^4 \text{t}$,年均增长率达 5.64%。在此期间,山东省积极响应中央颁布的惠农型“一号文件”,粮食产量连续增长,尤其是小麦、玉米、水稻等三大粮食作物产量持续上升,使碳汇量以年均 3.16% 的速度增长。而就碳排放而言,虽然秸秆焚烧导致的碳排放在持续增加,土地利用和水稻种植也造成碳排放的波动上升,但上升幅度较小,而养殖业尤其是牛由于受规模大幅下降的影响(由 2003 年的 1 009.93 万头逐渐缩小至 2008 年 628.05 万头,减少 37.81%),其碳排放则下降至 2008 年的最低点 $347.41 \times 10^4 \text{t}$,使碳排放总量总体呈现出波动、缓慢增长的态势,其年均增长率仅为 0.66%。相比碳汇量的高速增长,最终导致农业净碳汇总量的快速增长;第 3 阶段缓慢增长期为 2009—2015 年,净碳汇总量从 2009 年的 $3\,721.54 \times 10^4 \text{t}$ 增长到 2015 年的 $4\,108.89 \times 10^4 \text{t}$,年均增长率 1.66%。该阶段恰好处于“十二五”期间,山东省生态农业建设长足发展,全省规模以上生态循环农业基地达到 60 多万 hm^2 。在全国率先启动耕地质量提升计划^[36],在调整种植

结构的同时,主要作物如小麦、玉米、谷子等产量持续增长,促使农业碳汇量波动上升,年均增长率为1.43%。而受边际效应递减和农药、化肥、农膜等农资利用效率提高的共同影响,农地利用碳排放呈波动下降状态。受养殖结构调整的影响,虽然牛、羊的规模总体下降而其他畜禽的规模增加较快,导致养殖业碳排放波动增长,但增长幅度较小。稻田和秸秆焚烧导致的碳排放变化不大,总体上使农业碳排放总量呈波动下降态势,最终导致农业净碳汇总量缓慢增长,且在2015年达到最大值。

从总体变化趋势来看,2000—2015年间,山东省农业发展的碳效应以碳汇为主、碳排放为辅,且变幅较小,导致农业净碳汇总量的变化主要受碳汇的影响而使其变化趋势与碳汇基本一致(图1)。

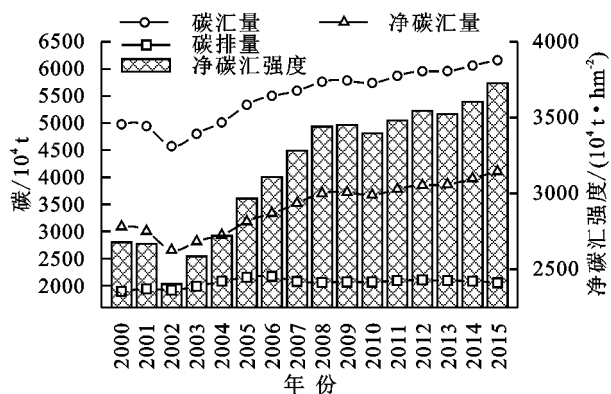


图1 2000—2015年山东省农业碳排放量、碳汇量、净碳汇量及净碳汇强度

与农业净碳汇总量变化相似,山东省农业净碳汇强度亦呈现波动上升趋势(图1)。农业净碳汇强度从2000年的2 678.11 kg/hm²增加到2015年的3 726.35 kg/hm²,增长39.14%,年均递增2.23%。说明山东省的农业技术水平在不断提高,减排增汇效果明显,低碳农业呈良好发展态势。其变化过程同样经历下降期(2000—2002年)—快速增长期(2003—2008年)—缓慢增长期(2009—2015年)3个阶段的变化。究其原因,在这3个发展阶段中,山东省的耕地面积变化不大,因此,农业净碳汇强度的变化主要受净碳汇总量变化的影响。需要特别指出的是,2002年山东省发生了严重的干旱灾害,年降水量仅为417.38 mm,为1949年以来同期降水最少的年份^[37]。受种植面积调整和自然灾害的双重影响,农作物产量尤其是粮食作物如小麦、玉米、谷子等产量大幅下降,导致2002年其碳汇量、净碳汇总量和净碳汇强度都达到最低值。

2.2 农业净碳汇空间变化特征

2.2.1 农业净碳汇量空间差异及分布特征 由图2可知,山东省农业净碳汇量区域差异明显。在2001年、2007年和2015年菏泽市、德州市和聊城市的农业净碳

汇量一直较高。其中,菏泽市农业净碳汇量均为最高值,分别为 361.87×10^4 , 496.60×10^4 , 567.92×10^4 t;而威海市、日照市、东营市和莱芜市的农业净碳汇量一直较低,其中莱芜市的净碳汇量均为最低值,分别仅为 29.39×10^4 , 21.48×10^4 , 23.13×10^4 t。造成农业净碳汇量区域差异的主要原因与农作物种植规模及农业技术水平有关。相关研究^[20,38]表明,农作物的碳汇作用远大于其碳源作用,而且随种植规模呈扩大趋势。菏泽市、德州市和聊城市位于山东省鲁西平原地区,农业生产条件较好,是山东省小麦、玉米等粮食和蔬菜产业发展的重点区域,农作物种植面积较大,尤其是菏泽市,属全省种植面积最大的地区;而威海市、日照市、东营市和莱芜市虽然农业生产条件优越,但农作物种植规模处于最小之列,莱芜市位列倒数第一,使得农作物所产生的碳汇量差距巨大。就碳排放而言,虽然菏泽市、德州市和聊城市由于秸秆焚烧和畜禽养殖所导致的碳排放较高,但其影响远小于农作物种植在碳汇方面的影响,加之农业技术水平的影响,导致农业净碳汇量区域差异明显。

与2000年相比,2015年菏泽等15个地区的净碳汇量均有不同程度的增加,其中增幅最大的是德州市,增幅高达79.19%,年均增长率为3.97%;其次为聊城市和菏泽市,分别增长65.18%和56.94%,年均增长率分别为3.40%和3.05%;而莱芜市和威海市的净碳汇量则呈下降态势,分别下降21.30%和9.25%,年均增长率分别为-1.58%和-0.65%,导致全省农业净碳汇量的区域差异扩大,两极分化态势更加突出。

基于各地市净碳汇量的时序变化特征(图2),可将全省划分为净碳汇量持续增长型、波动增长型、波动下降型和持续下降型4种类型区。持续增长型即净碳汇量随时间序列呈稳定增长态势,涉及的地区较多,包括青岛、东营、潍坊、济宁、泰安、临沂、德州、聊城、滨州、菏泽等10个地区。其净碳汇量持续增长的原因在于,这些地区主要农作物产量在逐年增长,从而提升了碳汇水平;另一方面加大了农业技术的推广应用,畜禽粪便处理率、秸秆综合利用率普遍提高,有效减少了农业碳排放。同时,农药、化肥、农膜利用率也在不断提高,避免了大量要素投入浪费增加的碳排放;波动增长型即净碳汇量总体处于增长态势,但随时间序列存在起伏,代表型地区包括济南、淄博、枣庄、烟台、日照5个地区。分析发现这5个地区农作物种植规模的波动上升引发了碳汇量及相应的碳排放量的波动变化,但碳汇量的变化幅度大于碳排放量,导致净碳汇量的波动上升;波动下降型即净碳汇量总体上处于下降态势,但随时间序列存在起伏,代表型地区只有莱芜市。这与莱芜市农业结构调整(畜

禽养殖规模扩大)和主要农作物种植规模波动有关;持续下降型即净碳汇量随时间序列呈稳定下降态势,代表型地区只有威海市。其净碳汇量持续下降的原因主要与农作物种植规模下降以及农业和农作物种植结构的调整有关。

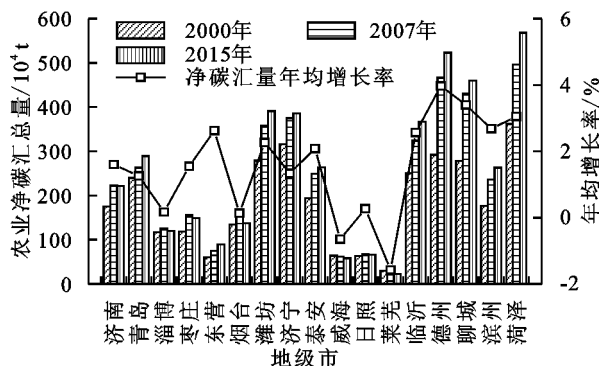


图2 山东省17个地级市农业生产净碳汇量及变化趋势

为了更直观地反映山东省农业净碳汇量的空间分布特征,依据绝对数量差异,并结合区间分布特点将全省17个地级市的净碳汇量划分为5个等级区,即净碳汇量大于 400×10^4 t的地区为净碳高汇区,净

碳汇量为 $300 \times 10^4 \sim 400 \times 10^4$ t的地区为净碳较高汇区,分布在 $200 \times 10^4 \sim 300 \times 10^4$ t的地区为净碳中汇区,处在 $100 \times 10^4 \sim 200 \times 10^4$ t的地区为净碳较低汇区,净碳汇量小于 100×10^4 t的地区为净碳低汇区。

从空间分布格局(图3)来看,2000—2015年间,全省净碳低汇区分布格局始终没有发生转变,一直由威海市、日照市、东营市和莱芜市独占,其他4个级别/types在2000—2007年间都发生了较大幅度的变化,近1/2(8个)的地区分别进入到较高级别的区域。其中净碳高汇区从无到有(菏泽市、德州市、聊城市),2个地区(临沂市、潍坊市)由净碳中汇区进入到净碳较高汇区,3个地区(泰安市、滨州市、济南市)由净碳较低汇区进入净碳中汇区,使全省逐渐向净碳较高汇区演化。而从2007—2015年,全省净碳汇量空间分布格局没有发生任何变化。

总体上,从2000—2015年全省净碳汇量空间分布格局发生了一定的集聚现象,净碳高汇区集中分布在鲁西地区,净碳较高汇区集中分布在鲁东南地区,其他3个级别的净碳汇区分布较为分散。

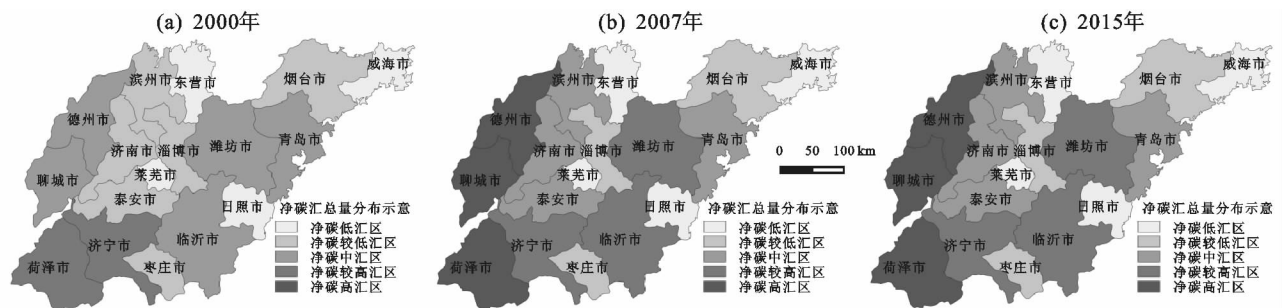


图3 2000年、2007年、2015年山东省农业生产净碳汇总量分布示意

2.2.2 农业净碳汇强度空间差异及分布特征 由图4可知,山东省农业净碳汇强度区域差异较明显,且随时间变化呈现扩大态势。2001年农业净碳汇强度最大的是淄博市,为 3594.78 kg/hm^2 ,最小的是烟台市,为 2054.14 kg/hm^2 ,两者之间的差值为 1540.64 kg/hm^2 ;2007年农业净碳汇强度最大的是德州市,为 4483.80 kg/hm^2 ,最小的是莱芜市,为 2345.25 kg/hm^2 ,两者之间的差值为 2138.55 kg/hm^2 ;2015年农业净碳汇强度最大的任然是德州市,为 5103.41 kg/hm^2 ,最小的是威海市,为 2621.57 kg/hm^2 ,两者之间的差值为 2481.84 kg/hm^2 。由此可见,在2000—2015年间,农业净碳汇强度的区域差异越来越大。基于各地市净碳汇强度的时序变化特征(图4),可将全省划分为净碳汇强度持续增长型和波动下降型2种类型区。持续增长型类型区包括德州市等16个地区。2000—2015年间其净碳汇强度均有不同程度的增加,其中增幅最大的是德州市和聊城市,增幅分别高达74.89%和59.64%,年均增长率分别为3.80%和3.17%;而莱芜市是唯一属于波动下降型的

地区,下降幅度为7.95%,年均增长率为-0.55%。

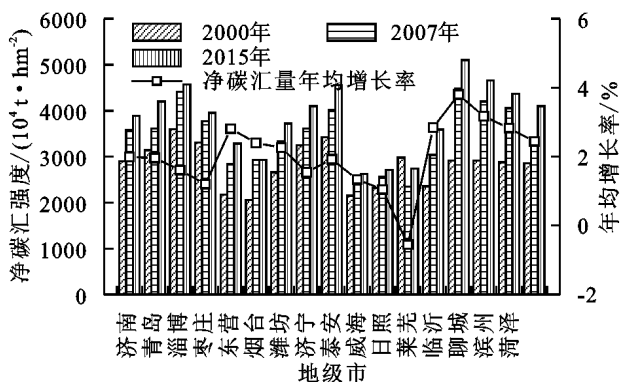


图4 山东省17个地级市农业生产净碳汇强度及变化趋势

为了便于区域之间的比较,依据绝对数量差异,并结合区间分布特点将全省17个地级市的净碳汇强度划分为5个等级区,即净碳汇强度大于 4000 kg/hm^2 的地区为净碳汇高强度区,处在 $3500 \sim 4000 \text{ kg/hm}^2$ 的地区为净碳汇较高强度区,分布在 $3000 \sim 3500 \text{ kg/hm}^2$ 的地区为净碳汇中强度区,处在 $2500 \sim 3000 \text{ kg/hm}^2$ 的地区为净碳汇较低强度区,小于 2500 kg/hm^2 的地区为净碳

汇低强度区。

从空间分布格局来看(图5),2000—2015年间,全省净碳汇强度空间分布格局发生了较大幅度的变化。净碳汇高强度区从无到有,而且数量呈增长趋势,即由2000年的0个增加到2007年的5个(滨州市、德州市、淄博市、聊城市、泰安市),进一步增加到2015年的8个(滨州市、德州市、淄博市、聊城市、泰安市、青岛市、济宁市、菏泽市);净碳汇较高强度区由2000年1个(淄博市)变化为2007年的4个(济南市、青岛市、枣庄市、济宁市),2015年其数量并没有发生变化,仍为4个,但具体地区发生了改变(济南市、枣庄市、潍坊市、临沂市);净碳汇中强度区数量逐渐减少,由2000年的4个(青岛市、济宁市、枣庄市、泰安市)减少到2007年的3个(潍坊市、临沂市、菏泽市),进一步减少到2015年的1个(东营市);净碳汇

较低强度区数量先减后增,由2000年的7个(济南市、潍坊市、莱芜市、德州市、聊城市、滨州市、菏泽市)减少到2007年的3个(东营市、烟台市、日照市),2015年又增加到4个(烟台市、威海市、日照市、莱芜市);净碳汇低强度区数量逐渐减少,由2000年的5个(东营市、烟台市、威海市、日照市、临沂市)减少到2007年的2个(威海市、莱芜市)进一步减少到2015年的0个。总体上净碳汇高强度区和较高强度区数量呈增加态势而净碳汇中强度区及以下级别的区域数量呈下降趋势,说明山东省全省的农业技术水体整体上呈上升态势,农业低碳化效应逐渐显现。

进一步分析发现,从2000—2015年,净碳汇高强度区由鲁中向鲁西和鲁西南地区扩展,且集聚现象明显(鲁东的青岛市除外),净碳汇较高强度区由鲁中向鲁东南地区扩展。

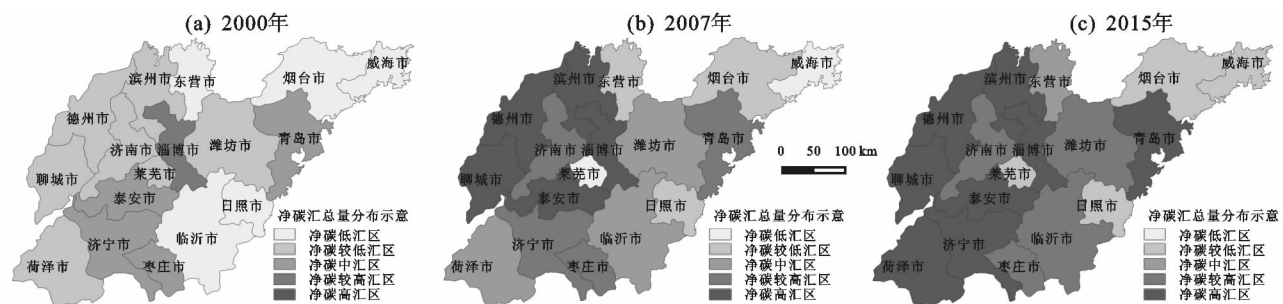


图5 2000年、2007年、2015年山东省农业生产净碳汇强度等级示意

3 结论

2000—2015年间山东省农业净碳汇总量和净碳汇强度呈波动上升趋势,分别经历了下降期—快速增长期—缓慢增长期3个不同的变化阶段,农业碳汇量增速明显快于碳排放量的增速,农业发展的碳效应以碳汇为主,农业减排增汇效果明显;山东省农业净碳汇量区域差异明显,且随时间变化呈扩大趋势,各地市净碳汇量的时序变化表现为持续增长型、波动增长型、波动下降型和持续下降型4种类型区,菏泽市、德州市和聊城市农业净碳汇量较高而威海市、日照市、东营市和莱芜市的农业净碳汇量较低。净碳高汇区、净碳较高汇区向农业生产条件较好,农作物种植面积较大的鲁西和鲁东南地区集中;山东省农业净碳汇强度区域差异较明显,亦随时间变化呈扩大趋势,各地市净碳汇强度的时序变化存在持续增长型和波动下降型2种类型区,其中净碳汇强度增幅最大的是德州市和聊城市,而莱芜市是唯一属于波动下降型的地区。净碳汇高强度区从无到有,数量呈增长趋势,且其由鲁中向鲁西和鲁西南地区扩展,集聚现象明显,说明山东省的农业技术水体整体上呈上升态势,农业低碳化效应逐渐显现。

农业生产的碳源/碳汇问题不仅是环境问题,也

是发展问题,涉及生态、经济、技术、结构等多个方面。山东省作为我国的农业大省,对其农业净碳汇的时空变化研究更具现实性和广泛的示范性,有助于从省域层面辨识农业生产中净碳汇的变化趋势及区域差异和空间分布,为山东省低碳农业的发展及差别化的区域减排增汇对策提供基本的理论依据。

参考文献:

- [1] IPCC. Climate change 2013: The physical science basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change[M]. Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA: Cambridge University Press, 2013.
- [2] 孙傅,何霄嘉. 国际气候变化适应政策发展动态及其对中国的启示[J]. 中国人口·资源与环境, 2014, 24(5): 1-9.
- [3] IPCC. Climate change 2007: Mitigation of climate change contribution of working group iii to the fourth assessment report of the intergovernmental panel on climate change[M]. Cambridge: United Kingdom, Cambridge University Press, 2007: 63-67.
- [4] 谢淑娟,匡耀求,黄宁生. 中国发展碳汇农业的主要路径与政策建议[J]. 中国人口·资源与环境, 2010, 20(12): 46-51.
- [5] Fearnside P M, Lmbrozio B R. Soil carbon changes from

- conversion of forest to pasture in Brazilian Amazonia[J]. *Forest Ecology and Management*, 1998, 108(1): 147-166.
- [6] US-EPA. Global Anthropogenic non-CO₂ greenhouse gas emissions: 1990—2020 [R]. United States Environmental Protection Agency EPA430-R-06-005, Washington DC, 2006.
- [7] Wood S, Cowie A. A review of greenhouse gas emission factors for fertilizer production [R]. IEA Bioenergy Tas38, 2004.
- [8] Bhat M G, English B C, Turhollow A F, et al. Energy in synthetic fertilizers and pesticides: Revisited [R] ORNL/Sub/90-99732/2. Oak Ridge National Laboratory, Oak Ridge, Tennessee, 1994.
- [9] Lal R. Soil carbon sequestration impacts on global climate change and food security[J]. *Science*, 2004, 304: 1623-1627.
- [10] Lubowski R N, Plantinga A J, Stavins R N. Land-use change and carbon sinks: Econometric estimation of the carbon sequestration supply function[J]. *Journal of Environmental Economics and Management*, 2005, 51(2): 135-152.
- [11] 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.
- [12] 田云, 张俊飏, 尹朝静, 等. 中国农业碳排放分布动态与趋势演进: 基于 31 个省(市、区)2002—2011 年的面板数据分析[J]. *中国人口·资源与环境*, 2014, 24(7): 91-98.
- [13] 田云, 张俊飏, 吴贤荣, 等. 中国种植业碳汇盈余动态变化及地区差异分析: 基于 31 个省(市、区)2000—2012 年的面板数据[J]. *自然资源学报*, 2015, 30(11): 1885-1895.
- [14] 鲁丰先, 张艳, 秦耀辰, 等. 中国省级区域碳源汇空间格局研究[J]. *地理科学进展* 2013, 32(12): 1751-1759.
- [15] 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.
- [16] 陈罗焯, 薛领, 雪燕. 中国农业净碳汇空间集聚与分异[J]. *生态环境学报*, 2015, 24(11): 1777-1784.
- [17] 陈罗焯, 薛领, 雪燕. 中国农业净碳汇时空演化特征分析[J]. *自然资源学报*, 2016, 31(4): 596-607.
- [18] 李明杰, 王国刚, 张红日. 山东省县域粮食生产格局演变及其影响因素[J]. *农业现代化研究*, 2018, 39(2): 248-255.
- [19] 王梁, 赵杰, 陈守越. 山东省农田生态系统碳源、碳汇及其碳足迹变化分析[J]. *中国农业大学学报*, 2016, 21(7): 133-141.
- [20] 王梁, 赵杰, 秦利, 等. 临沂市农田生态系统碳源/汇时空变化及其影响因素分析[J]. *水土保持学报*, 2015, 29(2): 183-187.
- [21] 祁兴芬. 区域农田生态系统正、负服务价值时空变化及影响因素分析: 以山东省为例[J]. *农业现代化研究*, 2013, 34(5): 622-626.
- [22] 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.
- [23] 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]. *地球科学进展*, 2007(10): 1076-1080.
- [24] 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.
- [25] 胡向东, 王济民. 中国畜禽温室气体排放量估算[J]. *农业工程学报*, 2010, 26(10): 247-252.
- [26] 马龙, 顾玮, 魏纯学, 等. 银川市畜禽养殖温室气体排放估算[J]. *农业科学研究*, 2015, 36(4): 1-7.
- [27] 李胜利, 金鑫, 范学珊, 等. 反刍动物生产与减排措施[J]. *动物营养学报*, 2010, 22(1): 2-9.
- [28] 曹国良, 张小曳, 王丹, 等. 秸秆露天焚烧排放的 TSP 等污染物清单[J]. *农业环境科学学报*, 2005, 24(4): 800-804.
- [29] 毕于运, 高春雨, 王亚静, 等. 中国秸秆资源数量估算[J]. *农业工程学报*, 2009, 25(12): 211-217.
- [30] 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.
- [31] Johnson J M F. Agricultural opportunities to mitigate greenhouse gas emissions[J]. *Environmental Pollution*, 2007, 150: 107-124.
- [32] 段华平, 张悦, 赵建波, 等. 中国农田生态系统的碳足迹分析[J]. *水土保持学报*, 2011, 25(5): 203-208.
- [33] 刘洁, 梁红梅, 曾业隆, 等. 基于投入视角的山东省农地利用碳排放与经济发展脱钩研究[J]. *水土保持通报*, 2016, 36(4): 303-308.
- [34] 栾健, 周玉玺. 基于灰色预测模型的山东省粮食灾损量评估及灾害关联度分析[J]. *农业现代化研究*, 2016, 37(6): 1068-1075.
- [35] 栾健, 周玉玺. 自然灾害对山东省粮食生产影响的实证分析[J]. *干旱区资源与环境*, 2016, 30(4): 127-131.
- [36] 山东省农业农村厅. 2015 年山东省农业和农村经济发展报告 [EB/OL]. (2016-01-15) [2018-09-01]. http://sd-njy.sdny.gov.cn/zwgk/sdny/fzlc/201605/t20160519_407479.html
- [37] 韩玮, 韩永红, 杨沈斌. 1961—2011 年山东气候资源及气候生产力时空变化特征[J]. *地理科学进展*, 2013, 32(3): 425-434.
- [38] 田云, 张俊飏, 罗小锋. 中国种植业净碳效益与经济效益协调性区域比较研究[J]. *经济地理*, 2014, 34(3): 142-148.