

DOI: 10.5846/stxb201601180120

吴金凤, 王秀红. 农地利用碳强度及可持续性动态变化——以山东省平度市为例. 生态学报, 2017, 37(9): - .

Wu J F, Wang X H. Dynamic changes in the carbon intensity and sustainability of farmland use: A case study in Pingdu County, Shandong Province, China. Acta Ecologica Sinica, 2017, 37(9): - .

## 农地利用碳强度及可持续性动态变化 ——以山东省平度市为例

吴金凤<sup>1,2</sup>, 王秀红<sup>1,\*</sup>

1 中国科学院地理科学与资源研究所, 陆地表层格局与模拟院重点实验室, 北京 100101

2 中国科学院大学, 北京 100049

**摘要:** 本文以中国东部山东省平度市为案例区, 通过识别重要的农地利用碳排放源和构建碳排放测算体系, 包括农用化学物质投入间接碳排放、耗能碳排放、氮肥施用后导致的土壤直接 N<sub>2</sub>O 释放、秸秆燃烧碳排放和牲畜养殖 CH<sub>4</sub> 和 N<sub>2</sub>O 排放, 测算了 1995—2013 年农地利用的碳排放量; 结合农产品产值分析了农地利用碳强度变化特征, 结合农作物碳吸收分析了农地利用的碳可持续指数的变化规律。研究得出: (1) 1995—2013 年平度年均碳排放量的次序是: 农资投入 22.50 万 t > 牲畜养殖 17.41 万 t > 秸秆燃烧 6.62 万 t, 其中秸秆燃烧碳排放呈逐年增加态势, 而农资投入和畜牧养殖均呈逐年减少趋势。(2) 平度农地利用碳强度变化结果表明, 农产品产值增加速度超过农地利用碳排放速度, 单位产值碳排放已从 1995 年的 1.24 t/元降至 2013 年的 0.35 t/元。(3) 碳可持续性指数变化特征表明, 平度农地利用过程中碳吸收大于碳排放, 且碳可持续性指数以年均 7.12% 速率增长, 故平度农作物生产期的碳吸收能够完全消纳农地利用过程中所产生碳排放。该研究不仅为中小尺度以及我国东部区域的农地利用碳排放及可持续发展提供科学依据, 而且有益于推进我国农业的碳减排, 并为国际全球环境变化人文因素计划中 LUCC、碳循环等重大问题的研究提供基本素材。

**关键词:** 农地利用; 碳排放; 碳吸收; 可持续性

## Dynamic changes in the carbon intensity and sustainability of farmland use: A case study in Pingdu County, Shandong Province, China

WU Jinfeng<sup>1,2</sup>, WANG Xiuhong<sup>1,\*</sup>

1 Key Laboratory of Land Surface Pattern and Simulation, Institute of Geographic Sciences and Natural Resources Research, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China

2 University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

**Abstract:** During 1995—2013, the carbon emissions for farmland uses in Pingdu County (in Shandong Province, China) were calculated by selecting the main sources of emissions and establishing a measurement system for the sources, including indirect carbon emissions for agrochemical inputs, direct N<sub>2</sub>O emissions for N fertilization, carbon emissions for energy consumption and straw burning, and CH<sub>4</sub> and N<sub>2</sub>O emissions for livestock farming. The changes in carbon intensity were calculated based on the changes in agricultural output value, and the changes in the carbon sustainability index were calculated based on the carbon emissions of the main sources and carbon absorption by the main crops. The results were as follows: (1) The order of annual mean carbon emissions was agrochemical materials (22.50 ten thousand tons) > livestock farming (17.41 ten thousand tons) > straw burning (6.62 ten thousand tons). The carbon emissions for straw burning

**基金项目:** 国家自然科学基金项目“东西部土地集约利用变化及其生态风险的对比研究”[41371531(2014-2017)]

**收稿日期:** 2016-01-18; **网络出版日期:** 2016-00-00

\* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: wangxh@igsrr.ac.cn

showed an increasing trend, whereas the emissions from the other sources showed a decreasing trend. (2) The increasing rate for the agricultural output value exceeded that of total carbon emissions, with the carbon emissions per agricultural output value decreasing from 1.24 t/Yuan in 1995 to 0.35 t/Yuan in 2013 (annual average decrease of 0.0459 t/Yuan). (3) The carbon sustainability index had an annual average increasing rate of 7.12%. This trend indicated that the carbon absorption by crops was greater than the carbon emissions from the farmland processes. Overall, this study not only provides an understanding of carbon emissions and a scientific basis for sustainable development of farmland in small-or medium-scale regions in eastern China, but it also promotes the reduction of agricultural carbon emissions in China. In addition, this study could provide basic information for the investigation of Land-Use and Land-Cover Change and Carbon Cycle of International Human Dimensions Programme on Global Environmental Change.

**Key Words:** farmland use; carbon emissions; carbon absorption; sustainability

土地利用/土地覆盖变化(LUCC)、全球碳循环是国际全球环境变化人文因素计划下的重大环境问题。在国家和社会的资助下,我国已在 LUCC、碳循环等多个领域做了诸多有益探讨<sup>[1]</sup>。如刘纪远等对中国 LUCC 有很深入的研究,通过土地覆盖动态模型、区域分析模型和随机过程模型等进行变化研究以及大量算法程序开发和试验,揭示了中国 20 世纪 80 年代末到 90 年代末 LUCC 的特点<sup>[2-4]</sup>。陈广生等全面地综述了全球和区域水平的 LUCC 格局以及 LUCC 对陆地生态系统碳储存和碳通量的影响,评述了 LUCC 引起生态系统碳循环改变的研究方法,同时指出该领域研究中的几点问题和今后的发展方向<sup>[5]</sup>。这些重要研究为我国在资源、环境和经济战略问题上的宏观决策、参与联合国气候变化框架公约谈判等提供了科学依据和技术支持。

农地利用既是 LUCC 也是全球碳循环研究的一个重要内容,但从世界上已经或正在进行的有关 LUCC 的研究项目来看,我国农地利用研究目前仍较多的集中在区域尺度上农地利用变化、空间特征、集约程度等方面<sup>[6-8]</sup>;而并未深入研究农地利用过程中所导致碳排放变化以及引发的环境问题。与此同时,有关农业生产碳排放研究成果均是以中国作为实证研究对象,或是兼顾国家、省域层面对我国农业碳排放的时空变化与结构特征进行分析<sup>[9-11]</sup>,包括农地利用碳排放、农业能源碳排放、畜禽养殖碳排放以及农作物在全生育期的碳吸收对农地利用过程中碳排放的消纳。这些研究成果的取得不仅极大地丰富了我国农业碳排放问题的研究体系,而且也识别了中小尺度农业主要碳排放源和碳吸收主体以及碳排放的测算奠定了坚实基础。因此,基于已有的研究基础,本文选取了东部地区山东省最大的农业县级市,平度市作为案例区域,从农地集约利用评价入手,依据区域农地利用现状及农产品生长全过程,识别重要的农地利用碳排放源和碳吸收主体,针对性地构建农地利用碳排放测算体系,测算并把握碳可持续指数的变化规律。研究中小尺度以及典型区域的农地利用碳强度及可持续性动态变化特征,可推进农地利用的碳减排,也可为我国东部地区农业可持续发展的提供科学依据,同时为国际全球环境变化人文因素计划中 LUCC、碳循环等重大问题研究提供基础素材。

## 1 研究区概况

平度市位于我国东部沿海地区,是山东省最大的县级行政区,地理坐标为 119°31'30"—120°19'13"E, 36°28'15"—37°02'46"N,土地面积约  $3.17 \times 10^5 \text{ hm}^2$ ,2013 年总人口约 138.1 万人,其中农业人口占 87.04%。因其北部有大泽山脉穿过,故平度境内地形是由东北向西南呈伞形倾斜<sup>[12]</sup>。北部地面高程均在 100 m 以上,西部是丘陵区,一般地面高程在 50—100 m 左右,中部、东南部为平原,高程多在 20—50 m 之间,西南部高程多在 10 m 以下。2013 年全市耕地面积仍最大,约占土地面积的 70%,种植的主要农作物包括小麦、玉米、棉花、花生和蔬菜<sup>[13]</sup>。

## 2 数据来源与研究方法

### 2.1 数据来源

化肥、农田灌溉面积、农作物播种面积、农产品产出及产值数据均源于《2000—2013 年青岛统计年鉴》和

《1996—2013 年山东统计年鉴》,农药和农膜数据在山东省平度市土壤肥料工作站调研获得。其中化肥是指氮肥、磷肥、钾肥、复合肥折纯量施用量。农产品产出数据,包括主要粮食作物产量:小麦、谷子、玉米、高粱、地瓜、大豆、其它粮食作物;主要经济作物产量:棉花、花生、烟叶、蔬菜;也包括牲畜养殖年末存栏量:奶牛、非奶牛、马、驴、骡、猪、山羊、绵羊、家禽。本文给出的产值是按可比价格计算的农业和畜牧业总产值,其可比价格指数出自《1996—2013 年中国农村统计年鉴》。

## 2.2 农业生产碳排放的测算方法

### 2.2.1 农资投入碳排放

本文核算的农资投入碳排放主要涉及两个方面:一是农用化学物质投入间接碳排放,包括化肥、农药、农膜;二是农地灌溉和耕作耗能所引起的碳排放。

化肥原料的开采、运输、制造和产品的包装成型等都隐含着碳排放。不同种类、阶段化肥碳排放系数也存在很大的不同,本文采用陈舜等<sup>[14]</sup>的研究结果,中国平均水平氮磷钾肥制造的碳排放系数分别为 2.116 kgC/kgN、0.636 kgC/kgP<sub>2</sub>O<sub>5</sub>、0.180 kgC/kgK<sub>2</sub>O,计算农地化肥投入间接碳排放。

目前生产农药的原料主要是原油和天然气,Lal 等<sup>[15]</sup>根据不同的生产工艺和原料分别测算并得到了生产除草剂、杀虫剂和杀菌剂 3 种类型的农药隐含的碳排放系数的范围,本研究结合我国农药的使用特点和已有的农业生产过程中农药投入碳排放研究<sup>[16]</sup>,取 6.00 kgC/kg 作为农药碳排放系数,进而测算农地利用农药投入间接碳排放。与化肥和农药一样,农膜生产全过程也都离不开碳排放,但是有关我国农膜生产过程中碳排放量的研究很少,因此本文取黄祖辉等<sup>[17]</sup>对农业生产资料有限公司的调研结果,农膜全生命周期隐含 CO<sub>2</sub> 排放为 9.44 tCO<sub>2</sub>/t,即碳排放为 2.58 kgC/kg 作为农地利用农膜投入间接碳排放系数。

由于难于区别大农业能源利用在种植业中的分配,又由于国内没有灌溉耗能和耕作耗能的实验数据,因此绝大部分相关研究利用国外文献的相关试验数据。本研究采用有重要影响的 Dubey, Lal (2009) 和 West T O, Marland G (2002) 的相关研究成果<sup>[16,18]</sup>,其中灌溉耗能碳排放当量为 25.00 kgC/hm<sup>2</sup>,耕作耗能为 31.06 kgC/hm<sup>2</sup>。

### 2.2.2 氮肥施用直接 N<sub>2</sub>O 释放

氮肥施用会产生大量 N<sub>2</sub>O,与温室气体相比,N<sub>2</sub>O 具有增温潜势大、滞留时间长等特点。《2006 年 IPCC 国家温室气体清单指南》<sup>[19]</sup>和《省级温室气体清单编制指南》<sup>[20]</sup>给出了山东农地 N<sub>2</sub>O 直接排放因子为 0.0057 kgN<sub>2</sub>O-N/kgN。为了测算区域农地利用的碳强度,本研究依据 IPCC 第四次评估报告(2007)测算值 1 tN<sub>2</sub>O = 81.27 tC,将 N<sub>2</sub>O 都折算成碳当量。

### 2.2.3 秸秆燃烧碳排放

秸秆系数是作物田间秸秆产量与经济产量的比值,故秸秆产量依据经济产量和秸秆系数测算得到。又依据秸秆收集系数、秸秆燃烧率<sup>[21-23]</sup>和主要农作物秸秆含碳量平均值为 0.24<sup>[24]</sup>,可以获得单位经济产量秸秆燃烧碳排放量(表 1)。已有研究给出了青岛市秸秆资源利用情况,其中生活燃料 16.5%、焚烧 3.1%<sup>[25]</sup>,因此研究将平度市的秸秆燃烧率设定为 19.6%。

表 1 秸秆燃烧碳排放

Table 1 Carbon emission of straw burning

项目 Item	小麦 Wheat	谷子 Cereal	玉米 Corn	高粱 Sorghum	地瓜 Sweet potato	大豆 Soybean	其它粮食作物 Other grain	棉花 Cotton	花生 Peanut	烟叶 Tobacco
秸秆系数 Coefficient of straw	1.39	2.13	0.96	2.32	0.42	1.36	1.60	2.61	0.89	0.71
秸秆收集系数 Collection coefficient of straw	0.89	0.89	0.91	0.91	0.95	0.95	0.90	0.91	0.95	0.95
秸秆燃烧碳排放 Carbon emission of straw	0.058	0.089	0.041	0.099	0.019	0.061	0.068	0.112	0.040	0.032

### 2.2.4 牲畜养殖 CH<sub>4</sub>和 N<sub>2</sub>O 排放

畜牧业养殖是农业生产活动中 CH<sub>4</sub>、N<sub>2</sub>O 排放的重要源头,其中农业生产所产生的 GHG 排放,有 38%是源自于畜牧业养殖<sup>[26]</sup>,主要包括动物肠道发酵 CH<sub>4</sub>排放和粪便 CH<sub>4</sub>、N<sub>2</sub>O 排放。IPCC<sup>[19]</sup>界定了畜牧业养殖温室气体排放源和排放因子,《省级温室气体清单编制指南》<sup>[20]</sup>计算给出了我国不同动物在不同区域下肠道发酵 CH<sub>4</sub>排放系数和粪便管理 CH<sub>4</sub>和 N<sub>2</sub>O 排放系数<sup>[27-29]</sup>(表 2)。同理,为了方便后文碳排放量的分析,本研究依据 IPCC 第四次评估报告(2007)可知 1 tCH<sub>4</sub>=6.82tC,1 tN<sub>2</sub>O=81.27 tC,将 CH<sub>4</sub>和 N<sub>2</sub>O 都折算成碳当量。

表 2 畜牧业养殖 CH<sub>4</sub>和 N<sub>2</sub>O 排放系数(kg/(头·年))

Table 2 CH<sub>4</sub> and N<sub>2</sub>O emission coefficients of the different types of livestock and poultry

项目 Item	奶牛 Dairy cattle	非奶牛 Cattle	马 Horse	驴 Donkey	骡 Mule	猪 Pig	山羊 Goat	绵羊 Sheep	家禽 Poultry
动物肠道发酵 CH <sub>4</sub> 排放 CH <sub>4</sub> emission from animal digestive tract	89.70	67.90	18.00	10.00	10.00	1.00	9.40	8.70	/
粪便 CH <sub>4</sub> 排放 CH <sub>4</sub> emission from animal excretion	8.33	3.31	1.64	0.90	0.90	5.08	0.28	0.26	0.02
粪便 N <sub>2</sub> O 排放 N <sub>2</sub> O emission from animal excretion	2.065	0.846	0.33	0.188	0.188	0.175	0.113	0.113	0.007

### 2.3 农作物生长期碳吸收的测算方法

农作物碳吸收,指农作物通过光合作用吸收 CO<sub>2</sub>,释放 O<sub>2</sub>,形成的生物产量的过程。由于农作物生物产量和经济产量间存在一定关系,因此可以通过经济产量计算作物的生物产量,进而推算出作物含碳量,即作物在生长季的碳吸收量。农作物生长期碳吸收的计算公式如下:

$$S_c = \sum_i C_d \quad (1)$$

$$C_d = C_f \times D_w \quad (2)$$

$$D_w = Y_w \times (1 - r) \div H_i \quad (3)$$

式中,  $S_c$  为农作物生长期的碳吸收量,  $C_d$  为作物  $i$  的碳储量,  $C_f$  为作物  $i$  合成单位有机质(干重)所需要吸收的碳,  $Y_w$  为作物  $i$  的经济产量,  $D_w$  为作物  $i$  的生物产量(总干物质),  $H_i$  为作物  $i$  的经济系数,  $r$  为作物经济产品部分的含水率。主要农作物经济系数和碳吸收率<sup>[30-31]</sup>表 3。

表 3 主要农作物经济系数、含水率和碳吸收率

Table 3 Economic coefficient, moisture content ratio and carbon absorption ratio of major crops

项目 Item	小麦 Wheat	谷子 Cereal	玉米 Corn	高粱 Sorghum	地瓜 Sweet potato	大豆 Soybean	其它粮 食作物 Other grain	棉花 Cotton	花生 Peanut	烟叶 Tobacco	蔬菜 Vegetable
经济系数 $H_i$ Economic coefficient	0.40	0.40	0.40	0.35	0.70	0.34	0.40	0.10	0.43	0.55	0.60
含水率 $r$ Moisture content ratio	0.12	0.12	0.13	0.12	0.70	0.13	0.12	0.08	0.10	0.85	0.90
碳吸收率 $C_f$ Carbon absorption ratio	0.49	0.45	0.47	0.45	0.42	0.45	0.45	0.45	0.45	0.45	0.45

### 2.4 农地利用碳强度及碳可持续性指数

农地利用碳排放涉及许多过程、方面和内容,本研究把它分类为农资投入碳排放、氮肥施用土壤 N<sub>2</sub>O 释放、秸秆燃烧碳排放和牲畜养殖 CH<sub>4</sub>和 N<sub>2</sub>O 排放,其总值设为  $E_c$ 。农地碳吸收主要是农作物碳吸收,设为  $S_c$ 。单位产值的碳排放,即碳强度  $Q = E_c/V$ ,式中,  $V$  为农业产值和畜牧业产值的和;同时为了使各年的产值具有可比性,研究根据当地可比价格指数计算出了以 1995 年不变价格的产值。

农业生产实际是一个碳排-碳汇动态变化过程,故农地利用应该强调碳减排,注重碳增汇,关注可持续农业发展的模式。基于农地利用碳排放和碳吸收,本文引用国外学者 Lal R 提出了碳可持续性指数( $I$ )<sup>[15]</sup>,分析研究区农地利用碳可持续指数的变化特征,其计算公式为

$$I = (S_c - E_c) / E_c \quad (4)$$

### 3 研究结果与分析

#### 3.1 平度农地集约利用变化

随着人口的增加,在有限的土地上,尤其是面临着耕地的不断减少趋势,为了保证区域农作物的产量,增加化肥、农药等农用化学物质投入以及提高机械化程度已成为了必要手段。测算表明从 1995 年到 2013 年平度主要农作物产量从 201.27 万 t 增加到 397.88 万 t,年平均增长率达 4%;与此同时,耕地面积从 172412 hm<sup>2</sup> 减少到 165364 hm<sup>2</sup>,年平均减少率为 0.24%。单位耕地面积的投入强度变化表明,平度在研究时段的农业机械投入强度年均增长速率最大,为 7.52%;农用化学物质投入和有效灌溉强度均次之,分别为 0.19%、0.52%;而劳动力投入强度呈现减少的趋势,年均减少率达 2.37%(图 1)。

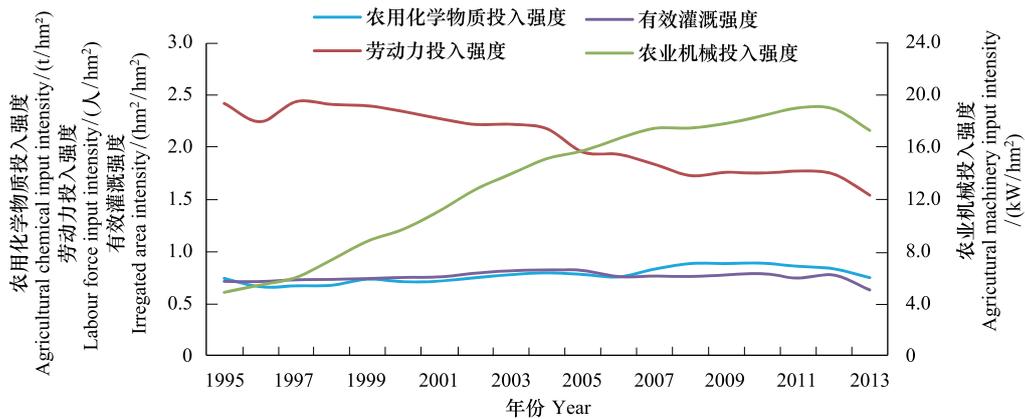


图 1 平度农地集约利用投入强度变化

Fig.1 Change in input intensity of farmland intensive use in Pingdu

通过产量与耕地面积、农资投入、乡村人数、劳动力、机械总动力和有效灌溉面积的 Pearson 相关性分析和显著性检验,可以得出,在置信度(双侧)为 0.05 时,产量与农资投入量、乡村人数、机械总动力呈现显著的正相关(表 4)。同时它们的年均增长率变化表明,农资投入量和机械总动力的年均增长率都大于产量,分别为 0.56%、7.85%;乡村人数年均增长率也达到了 0.15%,虽然小,但不容忽视,因为增加农作物产量,最基本的目的是满足区域人口的物质需求。

表 4 平度产量与相关因子的 Pearson 相关性分析

Table 4 Pearson correlation analysis of yield with other related factors in Pingdu

变量 Variable	项目 Item	耕地面积 Cultivated area	农资投入量 Agricultural material input	乡村人数 Rural population	劳动力 Labor force	机械总动力 Machinery total power	有效灌溉面积 Irrigated area
产量 Yield	Pearson 相关性 Pearson correlation	-0.451	0.722 *	0.641 *	-0.947 *	0.992 *	-0.163
	显著性 Significance	0.053	0.000	0.003	0.000	0.000	0.505

\*. 在 0.05 的水平(双侧)上显著相关。

#### 3.2 平度农地利用碳排放

从 1995 年到 2013 年,平度农地利用过程中农资投入所产生的间接碳排放的波动较小。如图 2 所示,从

数值上可知,碳排放是从 1995 年的 19.05 万 t 减少到 2013 年的 18.71 万 t,减少了 0.34 万 t,年平均减少率为 0.01%。其中农用化学物质投入所产生的间接碳排放是农地灌溉和耕作耗能的 15 倍,各自年均碳排放分别为 17.71 万 t、1.15 万 t;农用化学物质碳排放的变化趋势与农资投入总碳排放的一致,都呈现减少的趋势,其变化率为-0.02%,耗能碳排放却呈现增加的趋势,且年均增长率相对较大,为 0.36%。

测算农资投入对农地利用间接碳排放的贡献比例表明,氮肥贡献最大,1995—2013 年年均贡献率可达 56.29%,其次是农膜 15.66%>磷肥 10.08%>农药 8.61%,钾肥、灌溉耗能和耕作耗能贡献相对较小,其值分别为 3.27%、1.67%、4.42%。与农地利用碳排放绝对量不同,各农资投入所产生间接碳排放年均变化率差异也很大。农膜的年均增长率最大,达 12.79%,其次是钾肥 2.17%>磷肥 1.02%>耕作耗能 0.60%。尽管氮肥对农地利用碳排放贡献最大,但是从 1995 年开始氮肥投入所产生的间接碳排放已逐年减少,年均减少率为 1.78%,与此同时,农药和灌溉耗能也呈现负的增长,其值分别为-1.22%、-0.21%。

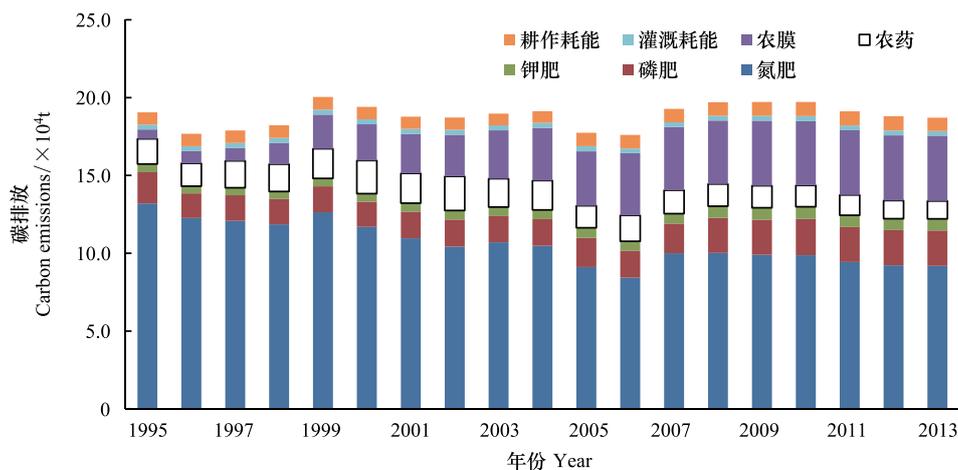


图 2 平度农资投入所产生的碳排放

Fig.2 Carbon emissions for agrochemical inputs in Pingdu

表 5 给出了 1995—2013 年秸秆燃烧碳排放、氮肥施用直接  $N_2O$  释放(简称氮肥  $N_2O$  释放)、牲畜养殖  $CH_4$  和  $N_2O$  排放,比较可知(1)秸秆燃烧碳排放波动较大,但是整体上表现为增加趋势,其均值为 6.62 万 t,大于 1995 年的 6.09 万 t,年均增长率也相对较大,为 1.72%。(2)氮肥  $N_2O$  释放是逐年减少的,其均值为 0.0449 万 t,年均减少率为 1.78%,将其换算成碳排放当量,其均值为 3.65 万 t。(3)畜牧业养殖  $CH_4$  和  $N_2O$  排放较大,然而其中动物肠道发酵  $CH_4$  排放和粪便  $N_2O$  排放也呈现负增长,其年均变化率分别-8.53%、-2.66%,相对较大;然而粪便  $CH_4$  排放仍在持续增加,年均增长率为 0.75%,将其折算成畜牧业碳排放当量,可知均值为 17.41 万 t,年均变化率为-5.54%。

### 3.3 平度农地利用碳吸收

从 1995 年到 2013 年平度农作物生长期碳吸收呈现增加的趋势,已从 135.43 万 t 增加到 182.53 万 t,年均增长率达 2.06%(表 6)。就粮食和经济作物而言,其均呈现增加趋势,但是粮食作物生长期碳吸收远大于经济作物,比例达到了 5.00,其均值分别 124.53 万 t、31.30 万 t。就各作物对碳吸收的贡献而言,玉米最大达 39.34%,小麦为 38.84%次之,经济作物中花生为 10.33%,蔬菜为 9.02%也相对较大,其它作物贡献都较小,不超过 1.20%。

### 3.4 平度农地利用碳强度及可持续性

研究测算得到了 1995 年到 2013 年的单位产值碳排放,并对其进行曲线拟合,发现指数曲线拟合最佳,决定系数  $R^2$  最大为 0.9729(图 3),可知碳强度变化是由快到慢的一个过程,从数值上来分析,碳强度每年平均减少 0.0459 t/元,从 1995 年的 1.24 t/元降至 2013 年的 0.35 t/元,减少了 0.89 t/元。同时从图 3 的碳强度变化趋势可知,自 2007 年开始,曲线与 X 轴越来越接近平行,即碳强度是逐渐趋近于一个定值的,这个值既能

满足产值较大,同时又能使碳排放较低,是区域农业发展所需要的较理想的单位产值碳强度。

表 5 秸秆燃烧碳排放、氮肥和畜牧业碳排放当量(万 t)

Table 5 Carbon emission of straw burning, carbon equivalent emissions of N fertilizer and livestock and poultry farming(Ten thousand tons)

年份 Year	氮肥 N fertilizer			畜牧业 Livestock farming			碳排放当量 Carbon emission equivalent
	秸秆燃烧碳排放 Carbon emission of straw burning	N <sub>2</sub> O 释放 N <sub>2</sub> O emission	碳排放当量 Carbon emission equivalent	动物肠道 发酵 CH <sub>4</sub> 排放 CH <sub>4</sub> emission from animal digestive tract	粪便 CH <sub>4</sub> 排放 CH <sub>4</sub> emission from livestock's excretion	粪便 N <sub>2</sub> O 排放 N <sub>2</sub> O emission from livestock's excretion	
1995	6.09	0.0559	4.54	3.24	0.403	0.0574	29.53
1997	5.46	0.0511	4.16	2.28	0.312	0.0437	21.26
1999	6.36	0.0535	4.35	2.70	0.403	0.0542	25.54
2001	5.25	0.0464	3.77	2.69	0.412	0.0555	25.67
2003	5.22	0.0453	3.68	1.89	0.361	0.0476	19.23
2005	7.21	0.0386	3.13	1.24	0.324	0.0359	13.55
2007	6.94	0.0423	3.44	0.79	0.294	0.0277	9.67
2009	7.99	0.0419	3.40	0.65	0.370	0.0300	9.39
2011	8.34	0.0399	3.24	0.57	0.396	0.0295	8.99
2013	7.66	0.0389	3.16	0.54	0.415	0.0309	9.01
均值 Mean	6.62	0.0449	3.65	1.69	0.369	0.0418	17.41
年均变化率 Average annual change rate	1.72%	-1.78%	-1.78%	-8.53%	0.75%	-2.66%	-5.54%

表 6 平度农作物生长期碳吸收(万 t)

Table 6 Carbon absorption during crop's growing period in Pingdu(Ten thousand tons)

年份 Year	粮食作物 Grain crops							经济作物 Economic crops					总和 Total
	小麦 Wheat	谷子 Cereal	玉米 Corn	高粱 Sorghum	地瓜 Sweet potato	大豆 Soybean	其它粮 食作物 Other grain	棉花 Cotton	花生 Peanut	烟叶 Tobacco	蔬菜 Vegetable		
1995	55.10	0.13	51.06	0.37	0.65	1.64	2.80	111.74	3.38	14.67	0.00	5.63	23.68
1997	58.64	0.02	38.09	0.14	0.42	1.16	1.51	99.96	0.83	11.51	0.04	7.69	20.07
1999	56.97	0.01	55.23	0.18	0.50	1.63	1.72	116.25	1.42	17.11	0.01	9.68	28.22
2001	46.52	0.02	45.90	0.12	0.25	1.10	0.12	94.03	1.23	17.40	0.01	14.27	32.90
2003	43.56	0.03	47.28	0.12	0.27	1.09	0.12	92.45	2.04	18.49	0.01	17.57	38.11
2005	66.22	0.00	68.84	0.13	0.18	1.21	0.02	136.60	1.55	16.50	0.01	15.25	33.31
2007	61.89	0.01	69.13	0.09	0.12	0.76	0.01	132.01	1.72	16.08	0.01	17.53	35.33
2009	74.98	0.00	78.87	0.01	0.06	0.32	0.01	154.24	1.84	15.63	0.00	16.36	33.83
2011	76.74	0.00	87.67	0.01	0.05	0.25	0.01	164.72	1.62	13.50	0.00	17.90	33.02
2013	72.28	0.00	77.70	0.00	0.03	0.11	0.00	150.12	1.36	13.06	0.00	17.99	32.41
均值 Mean	60.52	0.02	62.13	0.13	0.24	0.94	0.55	124.53	1.67	15.54	0.01	14.07	31.30
贡献率 Contribution rate	38.84%	0.01%	39.34%	0.09%	0.18%	0.67%	0.41%	79.54%	1.10%	10.33%	0.01%	9.02%	20.46%

与碳强度不同,碳可持续发展指数是由农地利用碳排放和碳吸收共同决定的,它既强调碳减排,也注重增汇和碳储。从图 4 可知,平度的农地利用碳可持续性指数大于 1,即农作物生产期的碳吸收能够完全消纳农地利用过程中所产生碳排放,且此指数一直在变大。其中 1995 年至 2005 年以及 2008 年至 2013 年是缓慢增长的阶段,而 2005 年至 2008 年是快速增长阶段,从 1995 年至 2013 年碳可持续发展指数已由 1.28 增加到 3.74,年均增长率为 7.12%。

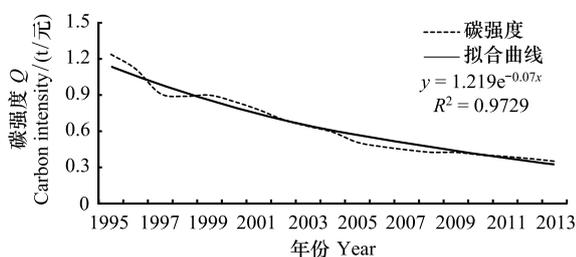


图3 1995—2013年平度单位产值碳排放

Fig.3 Carbon emissions per unit output value over 1995—2013 in Pingdu

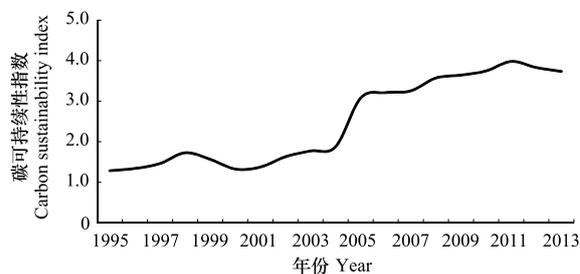


图4 1995—2013年平度碳可持续性指数

Fig.4 Carbon sustainability index over 1995—2013 in Pingdu

#### 4 结论与讨论

农地利用是一个复杂的生态经济过程,碳排放涉及很多方面,本研究计算的是主要农业化学物质投入间接和直接碳排放、秸秆燃烧碳排放和牲畜养殖碳排放当量。从1995年至2013年,平度农地利用碳排放以年均2.21%的速度减少,已从59.28万t,减少到38.54万t;各大类排放年平均碳排放量的次序是农资投入22.50万t>牲畜养殖17.41万t>秸秆燃烧6.62万t,其中除了秸秆燃烧排放处于逐年增长状态,年均变化率为1.72%,其它均是逐年减少的,农资投入为-0.32%、畜牧养殖为-5.54%。然而与平度农地利用碳排放变化趋势与结构不同,赵荣钦等测算的沿海地区包括山东、江苏、浙江等在内的农田化肥生产、农业机械生产使用和灌溉过程等农田生态系统主要途径碳排放<sup>[29]</sup>表明,从1981年到2001年,沿海地区农田生态系统碳排放呈迅速增长趋势,碳排放总量由1981年的1166.4万t上升至2001年的2261.6万t,增长94%,其中化肥生产导致的间接碳排放所占比例较大,且增速较快。田云等对中国农业生产中农用物资、土壤、稻田、牲畜养殖等主要农业源碳排放进行测算的结果<sup>[28]</sup>表明,从1995—2010年中国农业生产的碳排放量以年均1.03%的速率增加,而主要农业源年均碳排放量的次序是畜牧养殖CH<sub>4</sub>和N<sub>2</sub>O排放碳当量>农资投入碳排放>水稻CH<sub>4</sub>碳当量>土壤N<sub>2</sub>O释放碳当量。但是通过对平度、沿海地区和中国农业生产碳排放测算结果表明,在农地利用过程中如果注重提高农地的化肥利用率、优化农资投入结构、改良种子、增加高产值经济作物的占比、加强农地管理等农业生产活动,碳排放未必会增加,反而能够实现区域农地利用碳减排和碳增汇的目标。平度单位产值碳排放从1995年到2007年逐年减小,但是自2007年后,在逐渐趋近于定值,此趋势表明农业生产过程既提高了经济效益,也可完成农业生产碳减排目标,如此“双赢”的结果也未尝不可。

通过测算案例区农地利用碳排放、农作物碳吸收和碳可持续指数可知,平度农地利用过程中的碳吸收是大于碳排放,从1995年至2013年碳可持续发展指数均大于1,且在不断增大,即农作物生产期的碳吸收能够完全消纳农地利用过程中所产生碳排放。相关研究表明,中国农业生产和沿海地区农田生态系统中的碳吸收也能完全消纳农业生产中主要的碳排放,这些结果与平度的一致。

推动节能减排和发展低碳经济已是国际社会的大趋势,正是在这一政治经济背景下,有关碳排放与碳减排的经济学研究日益增加,然而上述测算农业生产碳排放均是以统计资料为主,并且只是对部分碳排放进行了估算,因此难免会存在一定误差。因此,本文认为碳减排的关键还是应该认清楚碳排放源和碳吸收主体、正确估算碳排放和碳吸收系数。虽然我国农业生产碳排放的研究,在空间和结构特征揭示、影响因素阐释等研究内容不断深化<sup>[32-33]</sup>,但是还应该加强基础性研究工作。如农用化学物质中农药和农膜碳排放系数还存模糊性,其今后研究可以借鉴陈舜等给出化肥碳排放的测算方法<sup>[14]</sup>,从生产原料和工艺出发,测算其碳排放。国内农地利用的灌溉和耕作耗能碳排放系数还是借鉴国外的数据,以后应区分时间和地点模拟研究我国农地利用过程中的灌溉和耕作耗能碳排放。有关土壤N<sub>2</sub>O排放,本文仅根据《2006年IPCC国家温室气体清单指南》<sup>[19]</sup>和《省级温室气体清单编制指南》<sup>[20]</sup>,测算了氮肥施用产生的直接N<sub>2</sub>O排放;然而土壤N<sub>2</sub>O排放是受

作物排放、耕地本底排放、肥料释放以及地下水和地表水中  $N_2O$  的排放影响的<sup>[34]</sup>,故作物排放、耕地本底排放还需大量实测探究。此外,我国园地发展迅速,其农业投入也在逐步增加,如何合理估算多年生植物的碳吸收,也是急需解决的问题。

**致谢:**由衷地感谢山东平度市土壤肥料工作站的姜晓燕,协助我们完成平度农业生产情况调研并获得了相关研究数据。

#### 参考文献 (References):

- [ 1 ] 刘燕华,葛全胜,张雪芹.关于中国全球环境变化人文因素研究发展方向的思考.地球科学进展,2004,19(6):889-895.
- [ 2 ] 刘纪远,布和敖斯尔.中国土地利用变化现代过程时空特征的研究——基于卫星遥感数据.第四纪研究,2000,20(3):229-239.
- [ 3 ] 刘纪远,刘明亮,庄大方,张增祥,邓祥征.中国近期土地利用变化的空间格局分析.中国科学(D辑),2002,32(12):1031-1040.
- [ 4 ] 刘纪远,张增祥,庄大方,王一谋,周万村,张树文,李仁东,江南,吴世新.20世纪90年代中国土地利用变化时空特征及其成因分析.地理研究,2003,22(1):1-12.
- [ 5 ] 陈广生,田汉勤.土地利用/覆盖变化对陆地生态系统碳循环的影响.植物生态学报,2007,31(2):189-204.
- [ 6 ] 陈瑜琦,李秀彬.1980年以来中国耕地利用集约度的结构特征.地理学报,2009,64(4):469-478.
- [ 7 ] 黎治华,高志强,高炜,施润和,刘朝顺.中国1999-2009年土地覆盖动态变化的时空特点.农业工程学报,2011,27(2):312-322.
- [ 8 ] 姚冠荣,刘桂英,谢花林.中国耕地利用投入要素集约度的时空差异及其影响因素分析.自然资源学报,2014,29(11):1836-1848.
- [ 9 ] 董红敏,李玉娥,陶秀萍,彭小培,李娜,朱志平.中国农业源温室气体排放与减排技术对策.农业工程学报,2008,24(10):269-273.
- [ 10 ] 田云,张俊飏.中国省级区域农业碳排放公平性研究.中国人口·资源与环境,2013,23(11):36-44.
- [ 11 ] Cheng K, Pan G X, Smith P, Luo T, Li L Q, Zheng J W, Zhang X H, Han X J, Yan M. Carbon footprint of China's crop production—an estimation using agro-statistics data over 1993-2007. Agriculture, Ecosystems & Environment, 2011, 142(3/4): 231-237.
- [ 12 ] 李玉军.基于RS与GIS的平度市土地利用时空变化分析[D].济南:山东大学,2008.
- [ 13 ] 于志路,王伟进,庄雪燕.平度市土地利用变化分析及预测.山东理工大学学报:自然科学版,2006,(11):52-55.
- [ 14 ] 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.生态学报,2015,35(19):6371-6383.
- [ 15 ] Lal R. Carbon emission from farm operations. Environment International, 2004, 30(7): 981-990.
- [ 16 ] Dubey A, Lal R. Carbon footprint and sustainability of agricultural production systems in Punjab, India, and Ohio, USA. Journal of Crop Improvement, 2009, 23(4): 332-350.
- [ 17 ] 黄祖辉,米松华.农业碳足迹研究——以浙江省为例.农业经济问题,2011,(11):40-47,111-111.
- [ 18 ] West T O, Marland G. A synthesis of carbon sequestration, carbon emissions, and net carbon flux in agriculture: comparing tillage practices in the United States. Agriculture, Ecosystems & Environment, 2002, 91(1/3): 217-232.
- [ 19 ] 省级温室气体清单编制指南(试行).(2011-05)[2016-01-12].<http://www.doc88.com/p-9819327912648.html>.
- [ 20 ] IPCC 2006. 2006年IPCC国家温室气体清单指南.日本全球环境战略研究所,第四卷:农业、林业和其他土地利用.[2016-01-12].<http://wenku.baidu.com/view/4eb6dad4195f312b3169a5a9.html?from=search>.
- [ 21 ] 王志凤,王倩.山东省农作物秸秆资源及其开发利用.山东农业科学,2006,(6):82-84.
- [ 22 ] 谢光辉,韩东倩,王晓玉,吕润海.中国禾谷类大田作物收获指数和秸秆系数.中国农业大学学报,2011,16(1):1-8.
- [ 23 ] 谢光辉,王晓玉,韩东倩,薛帅.中国非禾谷类大田作物收获指数和秸秆系数.中国农业大学学报,2011,16(1):9-17.
- [ 24 ] 刘丽华,蒋静艳,宗良纲.农业残留物燃烧温室气体排放清单研究:以江苏省为例.环境科学,2011,32(5):1242-1248.
- [ 25 ] 孙亚萍.青岛市农作物秸秆资源综合利用现状及对策.农业环境与发展,2011,28(3):34-36.
- [ 26 ] EPA. Global Anthropogenic Non- $CO_2$  Greenhouse Gas Emissions: 1990-2020. Washington, DC, USA: United States Environmental Protection Agency, 2006.
- [ 27 ] Phetteplace H W, Johnson D E, Seidl A F. Greenhouse gas emissions from simulated beef and dairy livestock systems in the United States. Nutrient Cycling in Agroecosystems, 2001, 60(1/3): 99-102.
- [ 28 ] Crosson P, Shalloo L, O'Brien D, Lanigan G J, Foley P A, Boland T M, Kenny D A. A review of whole farm systems models of greenhouse gas emissions from beef and dairy cattle production systems. Animal Feed Science and Technology, 2011, 166-167: 29-45.
- [ 29 ] 赵荣钦,秦明周.中国沿海地区农田生态系统部分碳源/汇时空差异.生态与农村环境学报,2007,23(2):1-6,11-11.
- [ 30 ] 田云,张俊飏.中国农业生产净碳效应分异研究.自然资源学报,2013,28(8):1298-1309.
- [ 31 ] 韩召迎,孟亚利,徐娇,吴悠,周治国.区域农田生态系统碳足迹时空差异分析——以江苏省为案例.农业环境科学学报,2012,31(5):1034-1041.
- [ 32 ] 韩岳峰,张龙.中国农业碳排放变化因素分解研究——基于能源消耗与贸易角度的LMDI分解法.当代经济研究,2013,(4):47-52.
- [ 33 ] 李波,张俊飏,李海鹏.中国农业碳排放时空特征及影响因素分解.中国人口·资源与环境,2011,21(8):80-86.
- [ 34 ] 王智平.中国农田 $N_2O$ 排放量的估算.农村生态环境,1997,13(2):51-55.