

# 区域农田生态系统碳足迹时空差异分析 ——以江苏省为案例

韩召迎, 孟亚利, 徐 娇, 吴 悠, 周治国\*

(南京农业大学/农业部南方作物生理生态重点实验室, 南京 210095)

**摘要:**以江苏省为案例,应用江苏省1995—2009年化肥用量、农药消耗量、灌溉面积、农机燃料用量、农膜用量、耕地面积、农作物产量等数据,测算了区域农田生态系统碳吸收、碳排放及碳足迹的变化动态,以及在各地市的分布特征。结果表明,近15 a来,江苏省农作物碳吸收总量和碳吸收强度呈“V”字形变化,变化范围分别为 $2.9336 \times 10^4 \sim 3.8969 \times 10^4 \text{ t} \cdot \text{a}^{-1}$ 和 $6.04 \sim 7.71 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ 。农业投入碳排放呈逐渐上升趋势,由 $727.2 \times 10^4 \text{ t} \cdot \text{a}^{-1}$ 增长至 $882.7 \times 10^4 \text{ t} \cdot \text{a}^{-1}$ ,同时碳排放强度从 $1.43 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ 上升到 $1.88 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ ,增长了31.5%,化肥排放始终占据主导地位。农田生态系统碳足迹呈现波动增长,变化在 $13.68 \times 10^5 \sim 17.56 \times 10^5 \text{ hm}^2 \cdot \text{a}^{-1}$ 之间,占同期耕地面积的比重达到27.0%~36.1%,碳生态盈余呈明显减少趋势,变化在 $36.99 \times 10^5 \sim 32.22 \times 10^5 \text{ hm}^2 \cdot \text{a}^{-1}$ 之间。各地市之间碳足迹存在明显差异,空间分布格局为由北向南递减。

**关键词:**农田生态系统;碳足迹;碳吸收;碳排放;区域

中图分类号:X820.2 文献标志码:A 文章编号:1672-2043(2012)05-1034-08

## Temporal and Spatial Difference in Carbon Footprint of Regional Farmland Ecosystem —Taking Jiangsu Province as a Case

HAN Zhao-ying, MENG Ya-li, XU Jiao, WU You, ZHOU Zhi-guo\*

(Key Laboratory of Crop Physiology & Ecology in Southern China, Ministry of Agriculture, Nanjing Agricultural University, Nanjing 210095, China)

**Abstract:** In this paper, the dynamic changes and spatial distribution characters of carbon absorption, carbon emission, and carbon footprint of farmland ecosystem were estimated based on the statistical data of consumption amount of chemical fertilizer, pesticide, plastic film, fuel used by agricultural machine, and irrigated area, arable land area, and crop yield from 1995 to 2009 in Jiangsu Province and different regions. The results showed that the dynamic of crop carbon absorption amount shaped like a "V", decreased first and then increased in last 15 years, changing from  $2.9336 \times 10^4 \text{ t} \cdot \text{a}^{-1}$  to  $3.8969 \times 10^4 \text{ t} \cdot \text{a}^{-1}$ . Carbon absorption intensity varied in the range of  $6.04 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$  to  $7.71 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ . During the period, both of total carbon emission amount and emission intensity from agricultural inputs showed the rising trends from  $727.2 \times 10^4 \text{ t} \cdot \text{a}^{-1}$  up to  $882.7 \times 10^4 \text{ t} \cdot \text{a}^{-1}$  and from  $1.43 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$  up to  $1.88 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ , respectively. And the carbon emissions from chemical fertilizer had been the most important carbon emission source in all agricultural inputs, but the carbon emission from agricultural machine kept a fastest growing. Carbon footprint of farmland ecosystem increased slowly with a fluctuation range of  $13.68 \times 10^5 \text{ hm}^2 \cdot \text{a}^{-1}$  to  $17.56 \times 10^5 \text{ hm}^2 \cdot \text{a}^{-1}$ , accounting for 27.0% to 36.1% of cultivated land area, while carbon ecological surplus showed a trend of decrease during the period. There were obvious differences between the regions in Jiangsu, and the spatial distribution appeared that the southern regions were usually less than the north regions. The estimates presented here are based on limited evidence and parameters, and have an uncertainty associated with them, further studies are need.

**Keywords:** farmland ecosystem; carbon footprint; carbon absorption; carbon emission; region

发展低碳经济作为应对气候变化、促进可持续发展的一项战略选择,正日益受到国际社会的高度关

注。碳足迹是由生态足迹<sup>[1]</sup>衍生而来的概念,是指人类在日常生活和经济活动中所直接和间接排放的CO<sub>2</sub>(或温室气体)总量<sup>[2-3]</sup>,已被广泛用作衡量人类碳排放对大气环境影响的一个新测度指标。碳足迹研究也成为当今国内外生态学界的新兴研究热点之一,内容涉及碳足迹概念内涵、计算方法、不同尺度和领域的实例分析,以及与社会经济影响因素的关系<sup>[4-6]</sup>。总体而

收稿日期 2011-08-25

基金项目:公益性行业(农业)科研专项(200903003),江苏高校优势学科建设工程资助项目

作者简介:韩召迎(1973—),男,江苏徐州市人,博士研究生,主要从事农业生态与生态经济的研究。

通讯作者:周治国 E-mail:zgiscott@njau.edu.cn

言,现有碳足迹的研究在产业部门方面主要集中于工业、建筑业、交通等能源消费密集行业<sup>[7-8]</sup>,而将农业或农田系统作为一个整体进行全过程碳足迹核算尚不多见。

农田生态系统是陆地生态系统的重要组成部分,不同于城市和森林、草地等生态系统,既是重要的碳源亦是碳汇,但对于其是净碳源还是碳汇的问题尚存在争议。一些学者<sup>[9-11]</sup>认为,农业活动及其相关过程是重要的温室气体排放源而非碳汇,对全球CO<sub>2</sub>的吸收贡献不大,而更多研究者倾向于农田具有巨大的碳汇量<sup>[12-14]</sup>。目前农田碳汇研究已从研究农田土壤的碳汇效应向研究整个农田生态系统的净碳汇效应转移<sup>[12-17]</sup>,并出现以碳足迹表征农田生态系统的碳流变化及其与生态承载力的比较,如段华平等对中国农田生态系统碳足迹的分析<sup>[18]</sup>,但这方面的研究总体上还较缺乏。江苏省是经济大省,也是农业大省,耕地占全省土地面积的40%以上,以江苏省为区域案例,定量分析其农田碳足迹变化特征及其影响因素,为区域碳排放清单提供基础,对制定农业减排增汇政策及管理措施也具有指导意义。

## 1 农田碳足迹概念界定与核算方法

### 1.1 农田碳足迹概念界定

尽管碳足迹近年来被广泛应用,但是其内涵并不完全一致,使得计算结果出入较大。为此,首先需要明确碳足迹内涵。目前国内外碳足迹基本上有两种涵义:一是指某种活动引起的(或某种产品生命周期内积累的)直接或间接的CO<sub>2</sub>排放量或温室气体转化的CO<sub>2</sub>等价物排放量;二是指吸收化石燃料燃烧排放的CO<sub>2</sub>所需的生产性土地面积,可看作生态足迹的一部分,即化石能源的生态足迹。简单地讲,前者指碳排放量(tC),后者指碳排放的占地面积(hm<sup>2</sup>)。

本文从生态足迹的内涵与特色出发,认为第二种定义更便于与区域生态承载力的比较以及与其他生态足迹组分的合并,因此,明确农田碳足迹为吸收农田生产投入引起的直接或间接的化石燃料燃烧排放的CO<sub>2</sub>排放量所需的生产性土地面积,由农田各项投入碳排放量与单位农田面积的碳吸收能力相比得到。

### 1.2 农田生产投入碳排放计算

农田生态系统为一个开放的生态经济复合系统,主要受人为因素调控。从碳循环角度而言,农田生产经营过程也是碳的输入输出过程,为使系统保持碳素收支平衡并维持较高的碳生产力水平,必须通过多种

途径投入化肥、农药、机械燃油、电力及人力等大量物质和能量,以补偿产品输出后所出现的亏损,而这些过程都需要碳成本——化石能源的消耗,并释放CO<sub>2</sub>影响大气环境。

农田投入碳排放总量(E)包括化肥、农药、农膜、农机、灌溉等投入在生产、运输及使用过程中的直接或间接的碳释放,其计算式表示为:

$$E = \sum E_i = \sum Q_i \times \gamma_i \quad (1)$$

其中  $E_i$  为各项生产投入的碳排放量  $\mu\text{C} \cdot \text{a}^{-1}$ ;  $Q_i$  为各项投入的数量(包括氮磷钾各类化肥用量  $\mu$ 、农机柴油用量  $\mu$ 、农药用量  $\mu\text{g}$ 、灌溉面积  $\mu\text{m}^2$ 、农膜用量  $\mu$ );  $\gamma_i$  为各项投入的碳排放系数。

农药、柴油、磷肥和钾肥的碳排放系数因缺乏国内的研究数据,直接引用美国学者 West<sup>[19]</sup>的研究结果,系依据上世纪90年代中期美国化肥、农药等生产与运输过程中化石燃料能源的消耗情况计算而来的,这也是目前国内外相关研究引用较多的,分别为农药(主要指杀虫剂)4.93 kg C·kg<sup>-1</sup>、柴油 0.592 7 kg C·kg<sup>-1</sup>、磷肥 165.09 kg C·t<sup>-1</sup>、钾肥 120.28 kg C·t<sup>-1</sup>。而氮肥的碳排放系数,来自逯非等<sup>[20]</sup>根据我国2004年氮肥生产能耗特点(以煤为主)及其CO<sub>2</sub>排放研究结果,按照IPCC推荐的方法估算得出我国生产1t氮肥的碳排放量为1.740 tC。灌溉碳排放系数为20.476 kg C·hm<sup>-2</sup><sup>[21]</sup>,是用我国2004—2008年平均火电系数对原有碳排放系数修订而来。农膜 5.18 kg C·kg<sup>-1</sup><sup>[21]</sup>。

### 1.3 农田作物碳吸收计算

农田作物碳吸收就是指作物光合作用形成的净初级生产量,即生物产量,计算式表示如下:

$$C = \sum_i^k C_i = \sum_i^k c a_i \cdot Y_i \cdot (1 - w c_i) / H I_i \quad (2)$$

式中  $C$  为区域农田作物碳吸收总量  $\mu\text{C} \cdot \text{a}^{-1}$ ;  $C_i$  为某种作物的碳吸收量  $\mu\text{C} \cdot \text{a}^{-1}$ ;  $k$  表示区域农作物种类数;  $c a_i$  为作物通过光合作用合成单位有机质所需吸收的碳;  $Y_i$  为作物的经济产量  $\mu \cdot \text{a}^{-1}$ ;  $w c_i$  为作物经济产品部分的含水量%;  $H I_i$  为作物经济系数。粮食作物和经济作物的碳吸收率与经济系数主要引用王修兰<sup>[22]</sup>资料(表1)。蔬菜、瓜类等园艺作物由于缺乏分类产量统计详细资料,并且也难以查找到每种园艺作物的经济系数资料,只能根据文献<sup>[23-24]</sup>粗略估算,而其碳吸收率则取常见值0.450(表1)。

### 1.4 农田土壤碳固定与碳呼吸计算

农田土壤有机碳固定和碳呼吸由于缺少逐年的

表1 主要农作物经济系数、含水量和碳吸收率

Table 1 Economic coefficient, water content, and C absorption rate of major crops

作物	经济系数	含水量/%	碳吸收率
小麦	0.40	12	0.485
稻谷	0.45	12	0.414
玉米	0.40	13	0.471
豆类	0.34	13	0.450
油菜籽	0.25	10	0.450
花生	0.43	10	0.450
棉花	0.10	8	0.450
薯类	0.70	70	0.423
甘蔗	0.50	50	0.450
蔬菜	0.60	90	0.450
瓜类	0.70	90	0.450
其他作物	0.40	12	0.450

数据资料,只能根据年平均值估算其总量,所以此项单列出来。虽然国内在农田土壤固碳方面的研究成果较多,但因气候、土壤、种植制度、管理方式等影响而存在较大差异。本文主要依据韩冰等<sup>[14]</sup>和金琳等<sup>[25]</sup>通过对全国多个定位试验站过去20a的长期观测数据进行全面分析的研究结果,其中前者指出长期施用化肥和施用有机肥情况下土壤固碳速率平均分别为 $0.380 \text{ tC} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ 和 $0.316 \text{ tC} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ ,后者分析则得出长期施用化肥、施用有机肥、无机有机配施情况下土壤固碳速率平均分别为 $0.129$ 、 $0.545 \text{ tC} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ 和 $0.889 \text{ tC} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ 。本文经综合平均将土壤年均固碳速率确定为 $0.452 \text{ tC} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ 。

土壤呼吸碳释放,即土壤有机质分解和根呼吸,这方面的定量研究很少。本文主要参考李洁静等<sup>[16]</sup>在江苏苏州太湖地区长期不同施肥处理下水稻-油菜轮作系统的研究(每年氮磷钾化肥施用量分别为 $427.5$ 、 $45$ 、 $84 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ ,鲜猪粪 $16.8 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$ ),以及陈义等<sup>[26]</sup>在浙江台州长期施用有机肥配合氮肥(每年施用鲜猪厩肥 $16.5 \sim 49.5 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$ 和尿素 $\text{N} 165 \sim 330 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ )对滨海水稻土 $\text{CO}_2$ 释放的研究,将土壤年均碳呼吸大致取值为 $0.670 \text{ tC} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ 。

### 1.5 农田生态系统碳足迹计算

根据前面的定义,农田生态系统碳足迹由农田生态系统碳排放总量与单位面积碳吸收的比值形成,可用下式表示:

$$CEF = ECE/NEP \quad (3)$$

$$ECE = E + ES \quad (4)$$

$$NEP = (C + CS)/A \quad (5)$$

式中,CEF为农田生态系统碳足迹 $\text{hm}^2 \cdot \text{a}^{-1}$ ;ECE是农田生态系统碳排放总量 $\text{t} \cdot \text{a}^{-1}$ ,包括农田投入碳排放量(E)和土壤呼吸碳释放量(ES);NEP为农田系统单位面积的碳吸收能力 $\text{t} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ ;C为作物碳吸收量 $\text{t} \cdot \text{a}^{-1}$ ;CS为土壤碳固定量 $\text{t} \cdot \text{a}^{-1}$ ;A为耕地面积, $\text{hm}^2$ 。

将农田碳足迹与区域生态承载力(耕地面积)比较,如果前者大于后者,表现为碳生态赤字;反之,则表现为碳生态盈余,碳盈余量的大小即为耕地面积与农田碳足迹面积的差值。

### 1.6 数据来源

以上计算所需的化肥用量、农药消耗量、灌溉面积、农机燃料量、农膜用量、耕地面积、农作物种植面积、农作物产量等统计数据资料均来自《江苏省统计年鉴》(1995—2009)和同期各地市的统计年鉴。

## 2 结果与分析

### 2.1 农田作物碳吸收时空变化

#### 2.1.1 江苏全省农田作物碳吸收时序变化

江苏省农田作物碳吸收总量近15a的变化大体呈先下降后上升的“V”形趋势(图1),变化范围为 $2.933.6 \times 10^4 \sim 3.896.9 \times 10^4 \text{ t} \cdot \text{a}^{-1}$ ,2003年处于低谷,较最高时期(1997年)减少了24.7%。相应地,单位面积碳吸收强度也呈现出与碳吸收总量一致的变化趋势,变化范围在 $6.04 \sim 7.71 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ 。碳吸收水平从1999至2003年的大幅降低,主要原因是粮食播种面积的下降,而粮食播种面积的下降一方面与耕地面积的下降有直接的关系,另一方面是农业结构调整、生态退耕等农业政策实施的结果<sup>[27]</sup>。2003后的恢复性增长,主要是政府对粮食生产的扶持力度加大、价格提高等因素的刺激,使粮食播种面积增加和单产水平提高,使在耕地面积继续下滑的情况下,农田生态系统的碳汇水平得以恢复提升。在此期间全省耕地面积持续缩减,15a共减少37.36万 $\text{hm}^2$ 。

不同作物的碳吸收量差异较大(图2),主要粮食作物水稻和小麦的碳吸收量,远大于其他作物,其中水稻碳吸收量占全省碳吸收总量的比重常年保持在40%左右,变化不大,其次为小麦碳吸收量,约占20%~30%,波动较大,二者合计约占60%~70%。其他作物中蔬菜瓜类虽然面积与产量近年来增加不少,棉花下降较多,但占比均在10%以下,对全省碳吸收总量影响不会太大。显然,水稻和小麦的碳吸收量在全省碳吸收总量中居于绝对主导地位,其变动情况对全省碳

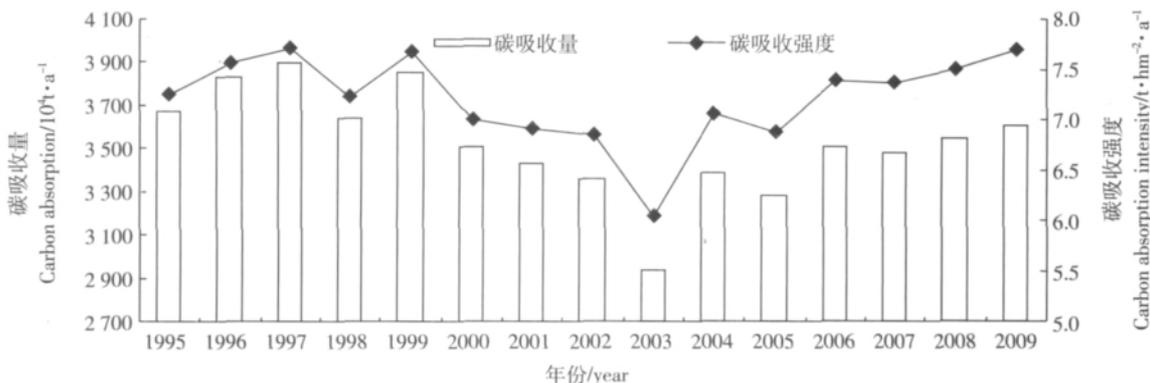


图 1 农作物碳吸收量和碳吸收强度变化(江苏)

Figure 1 Changes of crop carbon absorption amount and intensity in Jiangsu Province

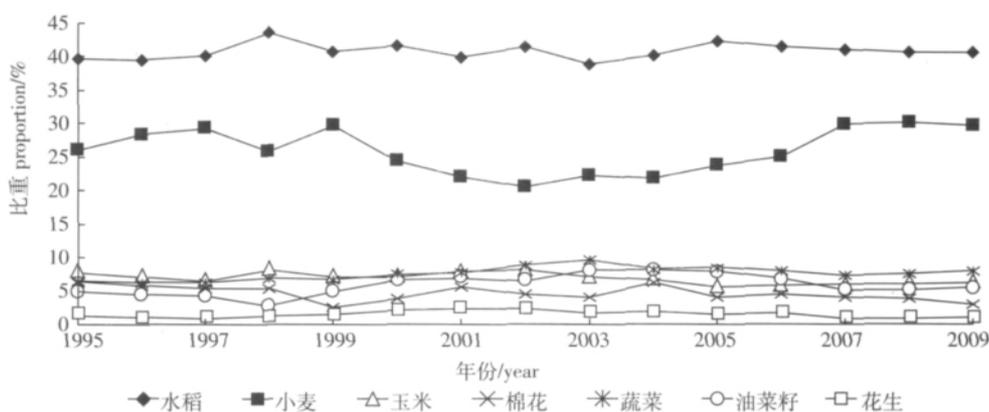


图 2 农田作物碳吸收比重变化(江苏)

Figure 2 Proportions of carbon absorption of main crops in Jiangsu Province

吸收量趋势影响举足轻重。从碳吸收强度来说,水稻具有显著高于旱作的生产力,可以固定更多的碳,许多学者一致认为水田比旱地更有利于促进土壤有机碳积累,固碳潜力十分突出<sup>[25]</sup>。因此,稳定稻田面积对于江苏省农田生态系统的固碳减排、发展低碳高效农业,也是一项有效措施。

### 2.1.2 江苏省各地市农作物碳吸收差异

江苏省不同地市的农田作物碳吸收总量差异较

大(图 3),总体分布特点是北部地区普遍高于中部地区,中部地区又高于南部地区,最高的盐城市与最低的无锡市之间相差 8.7 倍,这主要与各地市的耕地面积大小有关。而碳吸收强度则以中部地区为最高,其次为北部,最低在南部,最大的泰州市( $10.20 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ )与最小的南京市( $5.14 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ )之间相差约 2 倍。碳吸收强度主要与作物单产水平的高低有关,位于中部的江苏省里下河平原近年来已成为江苏粮食

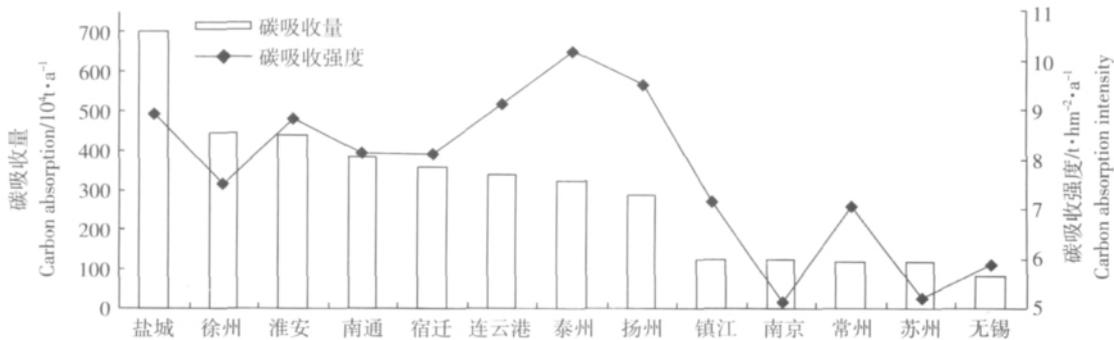


图 3 江苏省各地市农作物碳吸收总量和碳吸收强度(2009)

Figure 3 The regional comparisons of crop carbon absorption amount and intensity in 2009

生产的集中地区。

### 2.2 农田投入碳排放时空变化

#### 2.2.1 江苏全省农田投入碳排放时序变化

与农田碳吸收变化趋势不同,江苏省农田投入碳排放呈逐渐增长趋势(图4),碳排放总量从1995年的 $727.2 \times 10^4 \text{ t} \cdot \text{a}^{-1}$ 增长到2009年的 $882.7 \times 10^4 \text{ t} \cdot \text{a}^{-1}$ ,增幅为15.5%;碳排放强度从 $1.43 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ 上升到 $1.88 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ ,涨幅为31.5%。这说明随着化肥和农机等农业投入量的增加,农田碳排放强度也在逐年提高,虽然与碳吸收强度相比,碳排放强度较低,不及碳吸收强度的1/3,但其增速较快,已超过碳吸收的增长幅度,所以不容忽视。

在农田投入碳排放中(图5),化肥施用的碳排放占最大部分,年均约占总排放量的50%,其次为农业机械作业的排放,占28%,再次为灌溉占12%,而农膜农药所占比重较小,合占不足10%。各投入项中化肥的碳排放放在1995—1999年期间增加较快,之后保持平稳;农业机械、农药农膜碳排放呈明显上升趋势,尤其是农业机械增长了55.2%。因此,从碳排放总量的占有份额和增长的速度来看,江苏省农田碳排放量的控制主要在化肥和农业机械碳排放增长方面。

#### 2.2.2 江苏省各地市农田投入碳排放差异

江苏省当前农田投入碳排放空间分布特点与作物碳吸收的空间分布相似(图6),均表现为由北部向

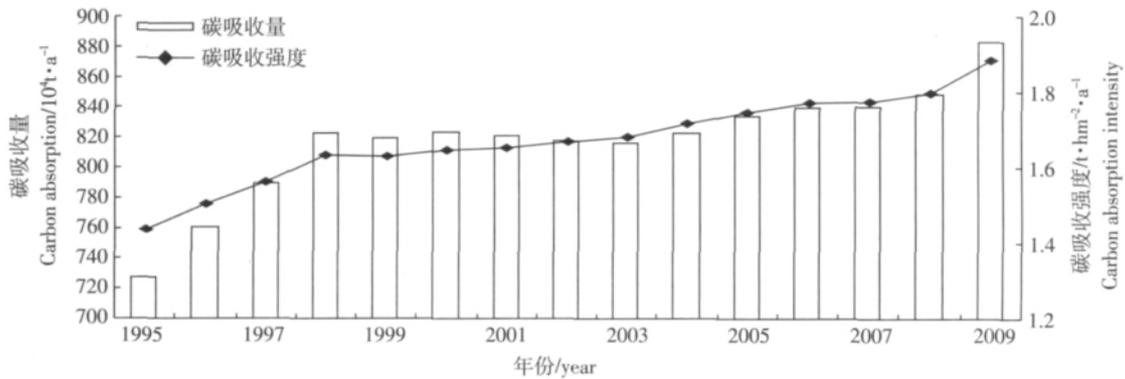


图4 农田投入碳排放量及其强度变化趋势(江苏)

Figure 4 Changes of the amount and intensity of carbon emission form energy inputs in Jiangsu Province

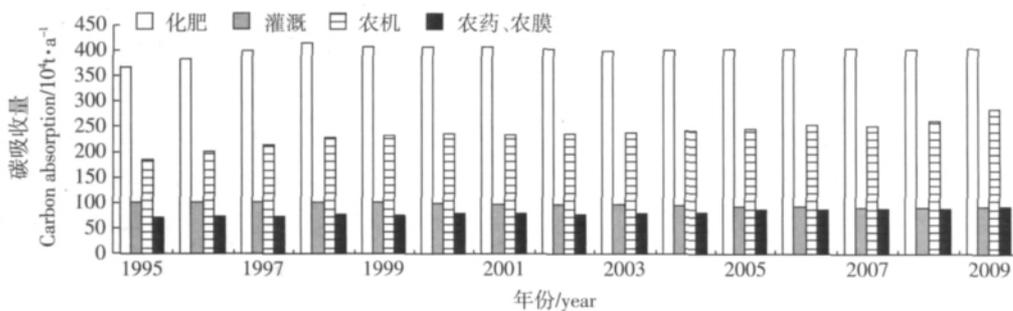


图5 各项农田投入的碳排放比较(江苏)

Figure 5 Comparisons of carbon emission amount among different inputs in Jiangsu Province

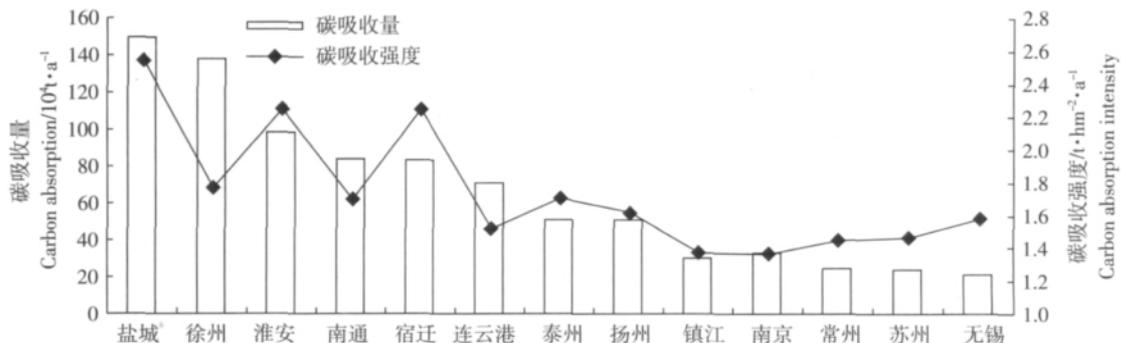


图6 江苏省各地市农田投入碳排放量和碳排放强度(2009)

Figure 6 Regional comparisons of carbon emission amount and intensity in Jiangsu in 2009

南部递减的分布格局,最大和最小的地区分别为徐州( $150.0 \times 10^4$  t)和无锡( $21.5 \times 10^4$  t)相差6.98倍。而碳排放强度的空间分布与碳吸收强度有所不同,最高是北部的徐州( $2.54 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ ),最小的是南京( $1.37 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ ),相差1.86倍,并非碳吸收强度最高的中部地区碳排放强度最大,说明北部的一些地区农田投入水平高,但投入效率较低。

### 2.3 农田生态系统碳足迹

从表2可知,1995至2009年期间,全省农田生态系统的净碳汇变化与作物碳吸收量变化趋势相近,2003年最低。全省农田碳足迹呈先升高后略有降低的变化趋势,范围在 $136.8 \times 10^4 \sim 175.6 \times 10^4 \text{ hm}^2 \cdot \text{a}^{-1}$ 之间,占同期耕地面积的比重达到27.0%~36.1%,即农田生产排放的 $\text{CO}_2$ 需要全省约1/3的耕地来消纳。各地市农田碳足迹分布格局与碳排放基本一致(图略),为北部高南部低,徐州最高( $27.85 \times 10^4 \text{ hm}^2 \cdot \text{a}^{-1}$ )、南京最低( $4.04 \times 10^4 \text{ hm}^2 \cdot \text{a}^{-1}$ ),相差6.89倍,分别占耕地面积的47.2%和16.7%。虽然全省各年和各地市农田生态系统均处于碳生态盈余状态,但由于耕地面积的缩减,碳生态盈余呈明显的下降趋势。

为了进一步考察农田碳足迹随时间变化与碳吸收之间的关系,从碳投入成本角度反映农田生产效率,本文提出碳足迹效率的概念,将其定义为农田碳吸收总量与碳足迹的比值,表示单位农田碳足迹所形成的碳吸收量,此值越大,表明碳足迹效率越大,反

表2 1995—2009年区域农田碳足迹变化(江苏)

Table 2 Carbon footprint of farmland ecosystem in Jiangsu Province from 1995 to 2009

年份	净碳汇/ $10^4 \text{ t} \cdot \text{a}^{-1}$	碳足迹/ $10^4 \text{ hm}^2 \cdot \text{a}^{-1}$	碳盈余/ $10^4 \text{ hm}^2 \cdot \text{a}^{-1}$	碳足迹效率/ $\text{t} \cdot \text{hm}^{-2}$	碳足迹占 耕地比例/%
1995	2 840.2	138.2	368.8	28.25	27.3
1996	2 967.2	136.8	369.4	29.73	27.0
1997	3 004.1	138.0	367.6	29.95	27.3
1998	2 710.7	150.8	352.9	25.66	29.9
1999	2 930.1	142.1	360.3	28.75	28.3
2000	2 580.3	155.0	345.8	24.10	31.0
2001	2 507.9	156.8	340.7	23.36	31.5
2002	2 433.9	157.2	333.3	22.79	32.1
2003	2 017.2	175.6	310.2	17.99	36.1
2004	2 460.9	152.4	327.2	23.67	31.8
2005	2 352.9	157.1	320.9	22.31	32.9
2006	2 566.9	147.4	326.9	25.27	31.1
2007	2 541.2	148.2	324.9	24.97	31.3
2008	2 596.2	146.2	325.7	25.73	31.0
2009	2 626.3	146.7	322.2	26.06	31.3

之,则表明碳足迹效率越小。表2的计算结果显示,江苏省农田碳足迹效率主要受碳吸收影响,近15a呈“V”形波动,以2003年最低,总体有所下降,变化范围为 $29.95 \sim 17.99 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$ 。

以上指标较一致地反映出江苏现代农业产生的碳排放对环境的压力已相当大,使农田生态系统发挥生态屏障、接纳工业和城镇生活碳排放的能力受到较大限制。因此,今后还需要在保障农田碳吸收增加的同时,有效控制农田生态系统碳排放与碳足迹的增长。采用合理有效的农业技术和管理措施,如推广有机无机配施、秸秆还田、保护性耕作、测土配方施肥等,在农业源温室气体减排增汇方面具有重要的作用<sup>[25-29]</sup>。许多长期定位试验研究均一致认为,有机无机配施和秸秆还田,既可有效增加作物产量,提高土壤有机碳含量、促进土壤碳固定,又可减少来自能源利用的碳排放,有机无机配施的净碳汇量甚至达到单施化肥的2~3倍<sup>[15-16]</sup>。另外,利用作物秸秆、畜禽粪便和专用能源作物等生物质能源替代化石燃料,也是目前国际上重视的一项减排农业措施<sup>[28]</sup>。

### 3 讨论

本文采用系数法,从碳循环角度初步分析了1995—2009年江苏省区域农田生态系统的碳排放、碳吸收、碳足迹及碳足迹效率的时空变化。由于国内相关基础研究较为薄弱,核算结果尚存在一定的不确定性。首先,农田各项投入的碳排放系数 $\gamma_i$ 本质上均为变量,随作物类型、地区和时间等发生变化<sup>[19]</sup>,但限于目前我国这方面研究的缺乏,本文农药、柴油、磷钾肥的碳排放系数引自美国上世纪90年代的研究数据,两国在能源结构、农资生产工艺以及农田管理方式等方面存在的差异势必会造成一定的误差。遑非等<sup>[20]</sup>根据我国情况计算出来的氮肥碳排放系数 $1.740 \text{ t C} \cdot \text{t}^{-1}$ 高于West的 $0.8575 \text{ t C} \cdot \text{t}^{-1}$ <sup>[19]</sup>两倍之多,因而实际的碳排放系数以及由此计算出来的碳排放总量也将更大些。

其次,在农田作物碳吸收方面,地处经济发达地区的江苏省,园艺作物包括设施园艺作物种植增长迅速。但目前的统计年鉴缺乏园艺作物种植面积和产量的详细分类统计,使其碳吸收总量及其构成变化的估计受到影响。另外,作物经济系数虽然较为稳定,但随着品种类型的更新换代,也会发生变化,如超级稻的经济系数已到达0.60以上,而目前计算使用的经济系数普遍偏低,致使作物碳吸收量可能被低估。最后,

土壤碳固定与呼吸速率的取值方面,现有研究结果受种植制度、土壤、气候等因素影响存在较大的不一致,而土壤呼吸的定量研究很少,有的研究甚至认为土壤碳固定与碳呼吸大致抵消,或认为土壤呼吸很小可以忽略不计<sup>[18]</sup>。这方面的不确定性也可能成为影响核算结果的精确度的一个原因。

上述涉及到的不确定性问题,也说明了开展更多深入细致研究的必要性,包括符合国情的碳排放系数推算、作物经济系数测定、园艺作物产量的分类调查、不同条件下的土壤呼吸速率研究、不同管理方式的碳足迹效应比较研究等等,以便为区域碳排放清单提供更多、更准确的数据资料。

在全球人类活动引起的 CH<sub>4</sub> 和 N<sub>2</sub>O 排放总量中,农业的贡献占到 52%和 84%<sup>[30]</sup>,目前国际上已加强了对农业温室气体排放总量的研究<sup>[28-30]</sup>。本研究主要核算了温室气体 CO<sub>2</sub> 的农田碳排放及碳足迹,至于农田投入过程的 N<sub>2</sub>O 排放和 CH<sub>4</sub> 排放,因相关数据的不完善和为了突出分析碳排放效应而暂未考虑。逯非等<sup>[20]</sup>根据我国氮肥使用的 N<sub>2</sub>O 排放试验研究结果,按照 IPCC 推荐的不同温室气体 100 a 全球增温潜势(GWP)折算温室效应的方法,估算出我国农田施用 1 t 氮肥产生的 N<sub>2</sub>O 排放量相当于 1.59 tC 的碳排放量,几乎与生产氮肥过程中化石燃料燃烧引起的碳排放量(1.74 tC)等量。据张强等<sup>[31]</sup>研究,2007 年全国农田单位耕地面积 N<sub>2</sub>O-N 直接排放的平均值为 2.36 kg·hm<sup>-2</sup>,江苏省更是超过 4.0 kg·hm<sup>-2</sup>,位居前茅。为了应对气候变化,未来不仅要进一步提高 CO<sub>2</sub> 足迹的测算精度,势必还需要加强对 N<sub>2</sub>O 和 CH<sub>4</sub> 足迹的计算和预测。

#### 4 结论

近 15 a 来,江苏省农作物碳吸收总量和碳吸收强度呈“V”字形变化,变化范围分别为 2 933.6×10<sup>4</sup>~3 896.9×10<sup>4</sup> t·a<sup>-1</sup> 和 6.04~7.71 t·hm<sup>-2</sup>·a<sup>-1</sup>,水稻和小麦碳吸收量占全省碳吸收总量年均达到 70%。农业投入碳排放呈逐渐上升趋势,碳排放强度从 1.43 t·hm<sup>-2</sup>·a<sup>-1</sup> 上升到 1.88 t·hm<sup>-2</sup>·a<sup>-1</sup>,增长了 31.5%,增速超过作物碳吸收,化肥排放始终占据主导地位。

农田生态系统碳足迹呈现波动增长,范围在 13.68×10<sup>5</sup>~17.56×10<sup>5</sup> hm<sup>2</sup>·a<sup>-1</sup> 之间,占同期耕地面积的比重达到 27.0%~36.1%,碳生态盈余呈明显减少趋势。各地市农田碳吸收、碳排放和碳足迹大体上均呈现自北部向南部递减的格局,碳足迹以徐州为最高、

南京为最低,两者相差 6.89 倍。全省各地,特别是北部地区应重视农田减排控制,推广有机无机肥配施和秸秆还田、降低肥料用量与提高肥料利用率、稳定稻地面积等固碳减排农业措施,控制碳足迹增速,提高农田生态系统碳汇功能。

#### 参考文献:

- [1] Rees W E. Ecological footprints and appropriated carrying capacity: what urban economics leaves out[J]. *Environment and Urbanization*, 1992, 2: 121-130.
- [2] ETAP. The carbon trust helps UK businesses reduce their environmental impact[R]. 2007.
- [3] GFN. Ecological footprint glossary[R]. Global Footprint Network, Oakland, CA, USA, 2007.
- [4] Marilyn A, Brown F S, Sarzynski A. The geography of metropolitan carbon footprints[J]. *Policy and Society*, 2009, 27: 285-304.
- [5] Giurco D, Petrie J G. Strategies for reducing the carbon footprint of copper: new technologies, more recycling or demand management [J]. *Minerals Engineering*, 2007, 20: 842-853.
- [6] Chen C Z, Lin Z S. Multiple timescale analysis and factor analysis of energy ecological footprint growth in China 1953—2006[J]. *Energy Policy*, 2008, 36 (5): 1666-1678.
- [7] 王 微,林剑艺,崔胜辉,等. 碳足迹分析方法研究综述[J]. *环境科学与技术*, 2010, 33(7):71-77.  
WANG Wei, LIN Jian-yi, CUI Sheng-hui, et al. An overview of carbon footprint analysis[J]. *Environmental Science & Technology*, 2010, 33 (7): 71-77.
- [8] 李 琳,谢高地,曹淑艳,等. 中国生态足迹报告[R]. 中国生态足迹报告, 2010.  
LI Lin, XIE Gao-di, CAO Shu-yan, et al. Report on ecological footprint China [R]. 2010.
- [9] 方精云,郭兆迪,朴世龙,等. 1981—2000 年中国陆地植被碳汇的估算[J]. *中国科学(D 辑)*, 2007, 37(6): 804-812.  
FANG Jing-yun, GUO Zhao-di, PIAO Shi-long, et al. Terrestrial vegetative on carbon sinks in China from 1981 to 2000[J]. *Science in China (Series D)*, 2007, 37(6): 804-812.
- [10] 方 恺,沈万斌,王黎黎,等. 基于能源足迹改进模型的农业区可持续性分析[J]. *地理与地理信息科学*, 2010, 26(6): 66-68.  
FANG Kai, SHEN Wan-bin, WANG Li-li, et al. Sustainability analysis in agricultural area based on modified energy ecological footprint model [J]. *Geography and Geo-Information Science*, 2010, 26(6): 66-68.
- [11] 李 智,鞠美庭,刘 伟,等. 中国 1996 年—2005 年能源生态足迹与效率动态测度与分析[J]. *资源科学*, 2007, 29(6): 54-60.  
LI Zhi, JU Mei-ting, LIU Wei, et al. Dynamic measurement of ecological footprint of energy resources and its economic efficiency in last ten years, China[J]. *Resources Science*, 2007, 29(6): 54-60.
- [12] 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[J]. *生态与农村环境学报*, 2007, 23(2): 1-6.  
ZHAO Rong-qin, QIN Ming-zhou. Temporospacial variation of partial

- carbon source/sink of farmland ecosystem in coastal China[J]. *Journal of Ecology and Rural Environment*, 2007, 23(2): 1-6.
- [13] 鲁春霞, 谢高地, 肖玉, 等. 我国农田生态系统碳蓄积及其变化特征研究[J]. *中国生态农业学报*, 2005, 13(3): 35-37.  
LU Chun-xia, XIE Gao-di, XIAO Yu, et al. Carbon fixation by farmland ecosystems in China and their spatial and temporal characteristics[J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2005, 13(3): 35-37.
- [14] 韩冰, 王效科, 逯非, 等. 中国农田土壤生态系统固碳现状与潜力[J]. *生态学报*, 2008, 28(2): 612-619.  
HAN Bing, WANG Xiao-ke, LU Fei, et al. Soil carbon sequestration and its potential by cropland ecosystems in China[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2008, 28(2): 612-619.
- [15] 余喜初, 黄庆海, 李大明, 等. 鄱阳湖地区长期施肥双季稻田生态系统净碳汇效应变化特征[J]. *农业环境科学学报*, 2011, 30(5): 1031-1036.  
YU Xi-chu, HUANG Qing-hai, LI Da-ming, et al. Dynamic of net carbon sink effects and economic benefits in double rice ecosystem under long-term fertilization in Poyang Lake Region[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2011, 30(5): 1031-1036.
- [16] 李洁静, 潘根兴, 张旭辉, 等. 太湖地区长期施肥条件下水稻-油菜轮作生态系统净碳汇效应及收益评估[J]. *应用生态学报*, 2009, 20(7): 1670-1676.  
LI Jie-jing, PAN Gen-xing, ZHANG Xu-hui, et al. An evaluation of net carbon sink effect and cost/benefits of a rice-rape rotation ecosystem under long-term fertilization from Tai Lake region of China[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2009, 20(7): 1670-1676.
- [17] Cao S, Xie G, Zhen L. Total embodied energy requirements and its decomposition in China's agricultural sector[J]. *Ecological Economics*, 2010, 69(7): 1396-1404.
- [18] 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.  
DUAN Hua-ping, ZHANG Yue, ZHAO Jian-bo, et al. Carbon footprint analysis of farmland ecosystem in China[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2011, 25(5): 203-208.
- [19] 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[J]. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 2002, 91: 217-232.
- [20] 逯非, 王效科, 韩冰, 等. 中国农田施用化学氮肥的固碳潜力及其有效性评价[J]. *应用生态学报*, 2008, 19(10): 2239-2250.  
LU Fei, WANG Xiao-ke, HAN Bing, et al. Assessment on the availability of nitrogen fertilization in improving carbon sequestration potential of China's cropland soil[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2008, 19(10): 2239-2250.
- [21] 田云, 李波, 张俊飏. 我国农地利用碳排放的阶段特征及因素分解研究[J]. *中国地质大学学报(社会科学版)*, 2011, 11(1): 59-63.  
TIAN Yun, LI Bo, ZHANG Jun-biao. Research on stage characteristics and factor decomposition of agricultural land carbon emission in China[J]. *Journal of China University of Geosciences (Social Sciences Edition)*, 2011, 11(1): 59-63.
- [22] 王修兰. 二氧化碳、气候变化与农业[M]. 北京: 气象出版社, 1996: 8.  
WANG Xiu-lan. Carbon dioxide, climate change and agriculture[M]. Beijing: Meteorological Press, 1996: 8.
- [23] 刁明, 戴剑锋, 罗卫红, 等. 温室甜椒生长与产量预测模型[J]. *农业工程学报*, 2009, 25(10): 241-246.  
DIAO Ming, DAI Jian-feng, LUO Wei-hong, et al. Model for simulation of growth and yield of greenhouse sweet pepper[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2009, 25(10): 241-246.
- [24] 袁昌梅, 罗卫红, 郇翔, 等. 温室网纹甜瓜干物质分配、产量形成与采收期模拟研究[J]. *中国农业科学*, 2006, 39(2): 353-360.  
YUAN Chang-mei, LUO Wei-hong, XIAN Xiang, et al. Simulation of dry matter partitioning, yield formation and fruit harvest date of greenhouse muskmelon[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2006, 39(2): 353-360.
- [25] 金琳, 李玉娥, 高清竹, 等. 中国农田管理土壤碳汇估算[J]. *中国农业科学*, 2008, 41(3): 734-743.  
JIN Lin, LI Yu-e, GAO Qing-zhu, et al. Estimate of carbon sequestration under cropland management in China[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2008, 41(3): 734-743.
- [26] 陈义, 吴春艳, 水建国, 等. 长期施用有机肥对水稻土 CO<sub>2</sub> 释放与固定的影响[J]. *中国农业科学*, 2005, 38(12): 2468-2473.  
CHEN Yi, WU Chun-yan, SHUI Jian-guo, et al. Emission and fixation of CO<sub>2</sub> from soil system as influenced by long-term application of organic manure in paddy soils[J]. *Chinese Science Bulletin*, 2005, 38(12): 2468-2473.
- [27] 周小萍, 卢艳霞, 陈百明. 中国近期粮食生产与耕地资源变化的相关分析[J]. *北京师范大学学报(社会科学版)*, 2005, 191(5): 122-127.  
ZHOU Xiao-ping, LU Yan-xia, CHEN Bai-ming. Correlation of grain production and cultivation land resources changes in recent China[J]. *Journal of Beijing Normal University (Social Science Edition)*, 2005, 191(5): 122-127.
- [28] Smith K A, Conen F. Impacts of land management on fluxes of trace greenhouse gases[J]. *Soil Use Manage*, 2004, 20: 255-263.
- [29] Schneider U A, McCarl B A. Appraising agricultural greenhouse gas mitigation potentials: effects of alternative assumptions[J]. *Agricultural Economics*, 2006, 35: 277-287.
- [30] Smith P, Martino D, Cai Z C, et al. Greenhouse gas mitigation in agriculture[J]. *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences*, 2008, 363: 789-813.
- [31] 张强, 巨晓棠, 张福锁. 应用修正的 IPCC2006 方法对中国农田 N<sub>2</sub>O 排放量重新估算[J]. *中国生态农业学报*, 2010, 18(1): 7-13.  
ZHANG Qiang, JU Xiao-tang, ZHANG Fu-suo. Re-estimation of direct nitrous oxide emission from agricultural soils of China via revised IPCC2006 guideline method[J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2010, 18(1): 7-13.