

北京市农田生态系统碳足迹及碳生态效率的年际变化研究

田志会^{1,2,3}, 马晓燕^{1,2,3}, 刘瑞涵^{4*}

(1.北京农学院园林学院, 北京 102206; 2.北京乡村景观规划设计工程技术研究中心, 北京 102206; 3.城乡生态环境北京实验室, 北京 102206; 4.北京农学院经管学院, 北京 102206)

摘要:近年来,由于北京城市功能的疏解以及郊区城市化进程的加快,使北京市农田生态系统受到了较大的冲击。本文以北京农田生态系统作为研究对象,对2004—2012年农田生态系统的碳汇、碳源、碳足迹以及碳生态效率的年际变化进行了研究,以明确其在北京城市发展中的功能与地位,为北京市健康持续发展及产业布局提供理论依据。结果表明:北京农田生态系统碳汇总体呈增加趋势,年递增幅度为2.8%,年平均碳蓄积量为105.82万t,决定其碳汇功能的主要因素是粮食作物中玉米与小麦的经济产量及种植面积。北京农田生态系统的年均碳排放量为27.6万t,基本呈现逐年降低的趋势,年均递减1.3%,决定碳排放量的主要因素为农业化学品中氮素化肥的施用量。北京市农田生态系统年均碳足迹为5.71 hm²,呈逐年降低的趋势,年递减率为5.5%,处于碳生态盈余状态,但是由于近年北京市耕地面积的减少,碳生态盈余量呈下降趋势;北京农田生态系统的碳生态效率较高,年均均为3.854 kg C·kg⁻¹ CE,农业生产处于较高的持续状态。

关键词:北京市;农田生态系统;碳足迹;碳生态效率;碳源;碳汇

中图分类号:X820.3

文献标志码:A

文章编号:2095-6819(2015)06-0603-10

doi: 10.13254/j.jare.2015.0101

Interannual Variations of the Carbon Footprint and Carbon Eco-efficiency in Agro-ecosystem of Beijing, China

TIAN Zhi-hui^{1,2,3}, MA Xiao-yan^{1,2,3}, LIU Rui-han^{4*}

(1.Department of Landscape Design & Forestry, Beijing University of Agriculture, Beijing 102206, China; 2.Beijing Engineering Research Center of Rural Landscape Planning and Design, Beijing 102206, China; 3.Beijing Laboratory of Urban and Rural Ecological Environment, Beijing 102206, China; 4.Department of Economics and Management, Beijing University of Agriculture, Beijing 102206, China)

Abstract: Suburban farmland ecosystems are known to be affected by intensive land use/cover change (LUCC) during the process of urbanization in Beijing. We investigated inter-annual changes in carbon sequestration, source, footprint, and eco-efficiency from 2004 to 2012 in the agro-ecosystem of suburban Beijing. Our findings indicated that: (1) Carbon sink increased 2.8 percent annually and the average annual carbon storage amount was 1 058 200 t, with food crops constituting the highest proportion at 80.4% of carbon storage in farmland ecosystems, of which maize contributed 68.5% as the largest constituent; (2) Carbon emission in the system showed a gradually decreasing trend, with agricultural chemicals as significant contributors. The annual average carbon emission was 276 000 tons in the Beijing farmland ecosystem, and decreased approximately 1.3 percent per year. The largest amount of carbon emissions came from agricultural chemicals at 85.4%, of which nitrogen fertilizer was the biggest contributor at 83.7%; (3) The carbon footprint also showed a decreasing trend along with an ecological surplus of carbon. The average carbon footprint was 5.71 hm² in the Beijing farmland ecosystem with decreasing rate at 5.5% annually; however, the carbon surplus showed a downward trend due to reduction in the amount of arable land; (4) Finally, the increasing carbon sink capacity led to higher carbon eco-efficiency, with an annual average of 3.854 kg C·kg⁻¹ CE, carbon sequestration was greater than the amount of carbon released. In summary, the agro-ecosystem in suburban Beijing has sustained a relatively high carbon eco-efficiency, and agricultural production continues to have high sustainability potential.

Keywords: Beijing; agro-ecosystem; carbon footprint; carbon eco-efficiency; carbon source; carbon sink

收稿日期:2015-04-10

基金项目:“粮经作物产业技术体系北京市创新团队”建设专项(BFCIC-13);北京市属高等学校创新团队建设与教师职业发展计划项目(IDHT20150503);科研基地建设科技创新平台项目(PXM2015_014207_000010);城乡生态环境北京实验室建设项目(PXM2015_014207_000014)

作者简介:田志会(1968—),女,天津宝坻人,博士,副教授,主要从事生态学方面的研究工作。E-mail: tzhui@126.com

*通信作者:刘瑞涵 E-mail: ruihanliu@163.com

CO₂ 是一种重要的温室气体,对温室效应贡献率最大,为 55%,由温室效应导致的全球变暖已经成为全世界关注的焦点问题。农作物和所有绿色植物一样,光合作用时要吸收 CO₂ 释放 O₂,具有强大的固定 CO₂ 释放 O₂ 的能力,对减少温室效应以及人类的生存和发展有着重要的意义。因此,农业生产所形成的农业碳库是陆地生态系统碳库的重要组成部分之一,随着大气 CO₂ 浓度的不断升高和全球变暖趋势的不断增强,农业碳库在全球碳平衡中的作用也得到了更多地重视^[1]。农田生态系统具有固碳周期短、蓄积量大的特点。但是,农田生态系统与其他陆地生态系统不同,农田生态系统为开放系统,在农业生产活动中,伴随着物质与能量的输入过程,如农用化学品(肥料、农药等)的施用、农田耕作、灌溉以及农产品加工等过程中农业机械的使用,都伴随着碳排放过程,因此农田生态系统又可作为碳源,据研究农业对全球变暖的贡献为 20%^[2]。前人在关于碳源/汇的研究工作较多^[1-7],已有较为成熟的方法。

目前关于农田生态系统碳源/汇的研究,已经从单纯的论述农田生态系统碳源/汇的作用,转向了以碳足迹综合表征农田生态系统的碳流变化^[8-10],并与生态承载力比较,以反映农田生态系统的碳生态盈余情况。碳足迹是由生态足迹衍生而来的概念,是指吸收化石燃料燃烧排放的 CO₂ 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,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^[8]。农田碳足迹是指人类在农田上进行生产活动形成的碳流量^[9],即吸收农田生产性投入而引起的直接或间接化石燃料燃烧所排放的 CO₂ 量所需要的生产性土地面积。“碳效率”概念源于经济领域,指碳经济效率。美国二氧化碳信息分析中心定义碳经济效率为每一美元国内生产总值所引起的二氧化碳排放量^[11]。碳作为农业生产系统中的一种重要资源,其效率是指投入单位数量碳所产出的经济产量和经济价值等有效价值量,提高碳效率是农业节能减排的重要途径之一。Canadell 等^[12]研究表明,人类活动过程中碳效率的降低是大气中 CO₂ 浓度增加的一个重要原因。Burney 等^[13]指出通过提高农业中的碳效率,可以增加农业的碳汇能力。碳效率包含碳的生产效率、碳的经济效率和碳的生态效率。有关农田生态系统碳足迹、碳生态效率的研究国内外学者开展了大量的工作。韩召迎等^[8]以江苏省为例,进行了农田生态系统碳足迹的时空变化研究。刘巽浩等^[9]等综合近 10

年来国内外农田生态系统碳足迹研究成果,形成了适合中国的碳足迹方法论,并利用 1952—2012 年 60 年的全国性农田生态系统碳流分析和现代高效农田的案例进行了验证,得出近 60 年来农田作物具有净固碳作用,尽管农业集约化程度不断提高,但全国农田生态系统碳效率保持正平衡状态,虽然农田化学品投入增加,农田生态系统内碳汇作用仍大于碳源作用。史磊刚等^[14]以河北吴桥县为例,对华北平原主要作物生产的碳效率进行了研究,表明夏玉米生产的碳综合效率最高、棉花次之、冬小麦最低。

本文以北京农田生态系统作为研究对象。北京郊区自 20 世纪 90 年代以后,开始进入城市化的快速发展阶段,随着北京城市建设的迅猛发展,城市产业和功能开始向郊区扩散,在郊区城市化的过程中,伴随着各类不同性质的农用地转化为城市建设用地,自 2012 年北京市又启动了大规模的平原造林工程,使位于郊区的农田生态系统受到了强烈的冲击,必然会造成农田生态系统生态服务功能的减少甚至丧失,在此背景之下,本文在前人研究的基础上,对近年来北京农田生态系统碳源/汇的变化、碳足迹的变化、碳生态盈余情况以及碳生态效率的变化规律进行研究,明确农田生态系统在北京城市发展中的功能与地位,以期为北京郊区可持续健康发展以及产业结构布局提供理论依据,其发展模式将会对同类型的大都市发展具有引领和借鉴意义。

1 材料与方法

1.1 数据来源

北京 2004—2012 年的农作物产量、播种面积、农业机械总动力、机耕面积、机收面积、机播面积以及有效灌溉面积等农业统计数据均来自于各年份的《北京统计年鉴》。北京 2004—2008 年耕地面积来自于各年份的《北京统计年鉴》,北京 2009—2012 年的耕地面积来自于北京市农业局。北京 2004—2012 年的农药使用量、化肥使用量、农用塑料薄膜使用量及农用柴油使用量等农业统计数据均来自于各年份的《中国统计年鉴》。

1.2 农田生态系统碳蓄积的计算

生态系统固定 CO₂ 释放 O₂ 的物质量的计算方法,主要依据的是植物光合作用原理,当植物进行光合作用时,利用太阳能吸收水分固定大气中的 CO₂ 释放 O₂,将生成的有机物质储存在自身组织中,因此,可根据农田生态系统生物量的数据,估算出农田生态

系统固定 CO₂ 的物质质量,这是目前估算生态系统固定 CO₂ 的物质质量用得较多的方法。农田生态系统生物量的计算方法,采用作物经济产量与经济系数比值而得到。计算方法如下:

$$M_c = \sum C_i \cdot Y_i \cdot (1 - W_i) / HI_i \tag{1}$$

式中,*i* 为作物种类;*M_c* 为农田生态系统碳蓄积量,t·a⁻¹; *Y_i* 为作物的经济产量,t·a⁻¹; *W_i* 为作物经济产品部分的含水量,%; *HI_i* 为作物经济系数; *C_i* 为碳吸收率,作物合成单位有机干物质所吸收的碳。*W_i*、*HI_i*、*C_i* 见表 1^[3-6,8,10,15]。

表 1 北京市主要农作物的经济系数、经济产量中的
含水率、碳吸收率

Table 1 Economic coefficient, water content of economic yield,
and C absorption rate of major crops in Beijing

农作物种类	经济系数	作物经济产量中的含水率/%	碳吸收率
稻谷	0.5	12	0.414
冬小麦	0.5	12.5	0.485
玉米	0.53	13.5	0.471
薯类	0.75	13.3	0.423
大豆	0.3	12.5	0.45
棉花	0.4	8.3	0.45
油料	0.45	9	0.45
药材	0.4	15	0.45
蔬菜	1	90	0.45
瓜类及草莓	0.7	90	0.45

1.3 农田生态系统碳排放量的计算

农田生态系统的碳排放可归结为 3 大类:(1)农用化学品使用,主要包括化肥、农药和农膜;(2)农业生产燃料动力,主要包括农用机械用电、农产品加工用电和农用机械柴油消耗的间接碳排放量;(3)农田耕作、灌溉。计算方法如下:

$$E = \sum Q_k \cdot \gamma_k \tag{2}$$

式中,*E* 为农田生态系统的碳排放总量,t·a⁻¹; *k* 为各项生产性投入;*Q* 为各项生产性投入的数量值(主要包括:氮、磷、钾、复合肥用量、农药用量、农膜用量、农

机柴油用量),t·a⁻¹;机耕、机收、机播面积、灌溉面积,hm²·a⁻¹;农业机械总动力,kW·a⁻¹);*γ* 为各项投入的碳排放系数,见表 2^[5,8,16-18]。

1.4 农田生态系统碳足迹的计算

农田生态系统碳足迹是农田生态系统碳排放总量与单位面积碳吸收量的比值,当农田碳足迹大于区域生态承载力(耕地面积)时,表现为碳生态赤字;反之,当农田碳足迹小于区域生态承载力(耕地面积)时,则表现为碳生态盈余,其碳盈余量为耕地面积与农田碳足迹面积的差值^[8]。

1.5 农田生态系统碳的生态效率的计算

作物生产中碳的生态效率^[14]的计算方法,采用作物通过光合作用固定在体内的碳量与碳投入量的比值,是评估农业生产可持续性的指标之一,其单位是 kg C·kg⁻¹ CE。当碳的生态效率值小于 1 时,说明农业生产投入的碳量大于农田生态系统的固碳量,则农田生态系统是碳源,碳的生态效率值越接近 0,碳排放强度越大,对空气中温室气体的贡献就越大,则农业生产的可持续性越低,当碳的生态效率大于 1 时,说明农田生态系统的固碳量大于碳投入量,则农田生态系统为碳汇,当碳的生态效率数值越大时,则农田生态系统的碳汇能力越强,农业生产可持续性程度越高。

2 结果与分析

2.1 北京市农田生态系统碳汇功能

2.1.1 北京市农田生态系统碳蓄积量的变化

北京农田生态系统 2004—2012 年碳蓄积量的动态变化表现为 2008 年的碳蓄积量最高,2008—2012 年碳蓄积量呈现为减少的趋势(图 1),但是与 2004 年相比,2012 年农田生态系统的碳蓄积量仍然增加了 25.4%,年递增幅度为 2.8%。北京农田生态系统年平均碳蓄积量为 105.82 万 t。

图 2 为 2004—2012 年北京农田生态系统单位面积碳蓄积量的变化,农田生态系统单位耕地面积的碳蓄量年均均为 5.03 t·hm⁻²,以年递增 8.3%的幅度逐年增加,这与北京市农田生态系统较高的复种指数以及较高的生产力水平不无关系,根据计算 2004—2012 年

表 2 农田生态系统碳排放源转换系数

Table 2 Conversion coefficient of carbon emission of agricultural eco-system

	化肥/kg·t ⁻¹				农药/ kg·kg ⁻¹	农膜/ kg·kg ⁻¹	农机柴油/ kg·kg ⁻¹	农业灌溉/ kg·hm ⁻²	农业机械总动力/ kg·kW·h ⁻¹	机耕、机播、机收/ kg·hm ⁻²
	氮肥	磷肥	钾肥	复合肥						
碳排放系数	1 740	165.09	120.28	380.97	4.93	5.18	0.592 7	20.476	0.18	16.47

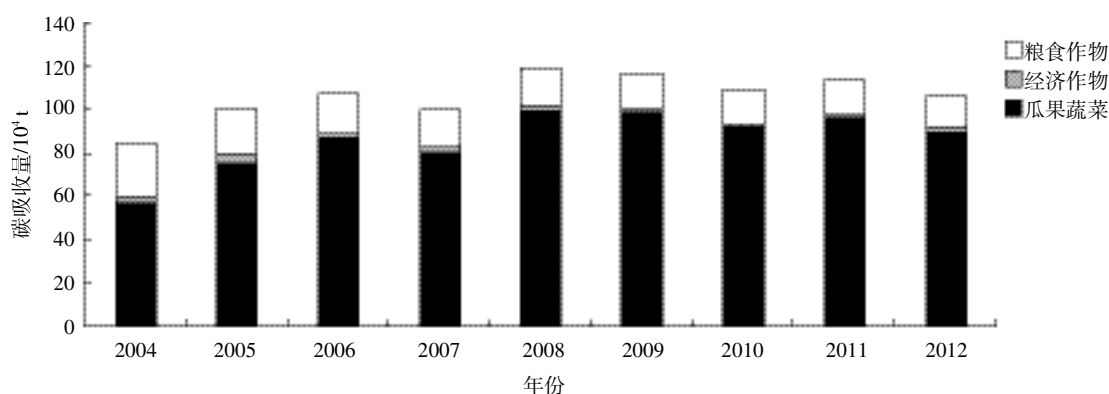


图 1 2004—2012 年北京农田生态系统碳吸收变化

Figure 1 The interannual changes of the carbon sequestration of Beijing farmland ecosystem from 2004 to 2012

北京农田生态系统的复种指数平均为 1.4, 呈逐渐增加的趋势(图 2)。但单位播种面积的碳蓄积量变化不显著(图 2), 年均碳蓄积量为 $3.60 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$ 。根据已有研究结果, 北京果园生态系统^[12]年均碳蓄积量为 $3.0 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$, 可见农田生态系统不论是单位耕地面积还是单位播种面积的碳蓄积量均高于果园生态系统。

近年来北京农田生态系统中粮食作物的碳蓄积比例增加较为显著(表 3), 已由 2004 年的 66.5% 增加到 2012 年的 84.6%, 增幅达 27.3%, 年递增 3%, 经济作物以及瓜果蔬菜的碳蓄积比例均呈现逐年降低趋

势, 且降低幅度较大。从北京农田生态系统碳蓄积比例的均值(2004—2012)年的分布情况可知(表 3), 粮食作物碳蓄积量所占比例最大, 为 80.4%, 起主导作用, 蔬菜瓜果、经济作物两者之和仅为 19.6%, 可见粮食作物在北京农田生态系统碳蓄积方面贡献最大。

2.1.2 北京市粮食作物碳蓄积量变化

由以上分析可知, 北京农田生态系统中粮食作物的碳蓄量占 80.4%, 起主导作用, 因此, 我们针对 2004—2012 年北京农田生态系统中粮食作物碳蓄积量的变化以及各类粮食作物的比例分布变化进行了研究, 结果见图 3、表 4。

北京 2004—2012 年粮食作物蓄积量总体趋势是波动性上升(图 3), 2008 年粮食作物的蓄积量最高, 达 98.8 万 t, 2004—2012 年碳蓄积量的增幅达 60.5%, 年递增 6.7%。2004—2012 年各类粮食作物碳蓄积比例变化(表 4), 稻谷、冬小麦、薯类和大豆都呈现出减少的趋势, 只有玉米呈现出显著的增长趋势, 已经由 2004 年的 59.7% 增加到 2012 年 71.9%, 增幅达 20.3%, 年递增 2.3%。

从各类粮食作物碳蓄积比例 2004—2012 年的均值可知, 玉米在各类粮食作物中碳蓄积量最大, 所占比例达 68.5%, 其次为冬小麦, 所占比例为 27.2%, 玉米和小麦 2 种作物的碳蓄积量所占比例就已经达到了 95.7%。其他各类粮食作物如薯类、稻谷和大豆所

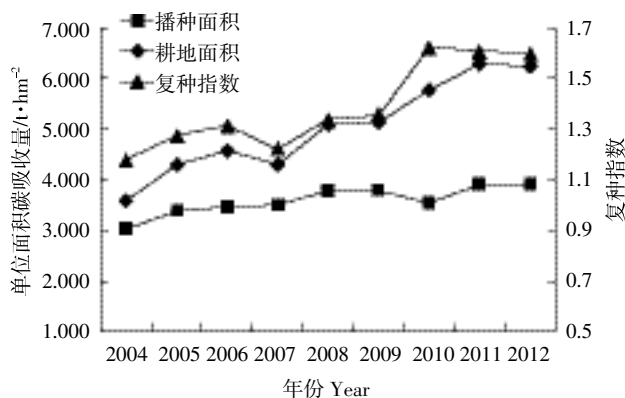


图 2 2004—2012 年北京农田生态系统单位面积的碳蓄积量的变化

Figure 2 The interannual changes of the per area carbon absorption of Beijing farmland ecosystem from 2004 to 2012

表 3 2004—2012 年农田生态系统碳蓄积的比例分布变化

Table 3 The interannual changes of the proportion carbon absorption of Beijing farmland ecosystem from 2004 to 2012

各农田生态系统碳蓄积比例/%	2004 年	2005 年	2006 年	2007 年	2008 年	2009 年	2010 年	2011 年	2012 年	均值
粮食作物	66.5	75.2	81.0	79.8	83.9	84.2	83.8	84.7	84.6	80.4
经济作物	4.4	3.4	2.3	2.4	2.0	1.7	1.6	1.3	1.4	2.3
瓜果蔬菜	29.1	21.4	16.7	17.8	14.1	14.1	14.6	14.0	14.0	17.3

占比例均较低。因此,在北京农田生态系统中,粮食作物中的玉米和小麦对大气中 CO₂ 的吸收起主导作用。

2.2 北京市农田生态系统碳排放量

2.2.1 北京市农田生态系统碳排放量变化

2004—2012 年北京市农田生态系统的碳排放总量呈现出逐步降低的趋势(图 4),从 2004 年的 29.01 万 t 已降低到 2012 年 25.66 万 t,降低幅度达 11.6%,年均递减 1.3%。其中燃料动力的碳排放量降低幅度最大,达 43.9%,其次为农用化学品的碳排放量,降低幅度为 6.3%,碳排放量降低幅度最小的为耕作灌溉,仅为 3.1%。

虽然北京市农田生态系统碳排放总量呈现出逐年降低的趋势,但是,单位耕地面积的碳排放量确呈现出逐年增加趋势(图 5),2004 年单位耕地面积的碳排放量为 1.23 t·hm⁻²,到 2012 年升高到 1.52 t·hm⁻²,增幅为 23.4%,因此,降低单位耕地面积的碳排放量,仍然是农业生产中亟待解决的问题。由于北京地区农田生态系统的复种指数较高,平均为 1.4,因此,北京市农田生态系统的单位播种面积的碳排放量为逐年减少的趋势。

2004—2012 年农田生态系统碳排放比例分布的变化情况,见表 5,农用化学品和耕作灌溉的碳排放

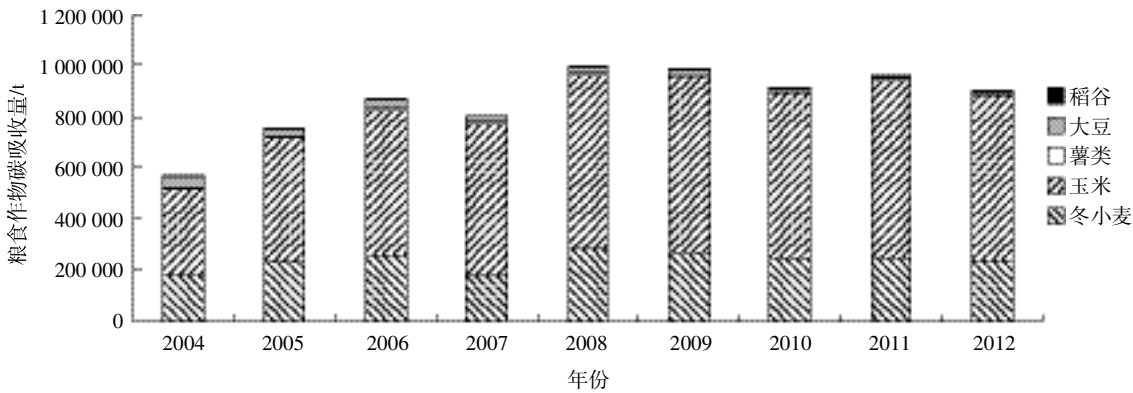


图 3 2004—2012 年粮食作物的碳蓄积量

Figure 3 The interannual changes of carbon absorption of the food crops from 2004 to 2012

表 4 2004—2012 年北京市各类粮食作物的碳蓄积比例变化(%)

Table 4 The interannual changes of the carbon absorption proportion of food crops from 2004 to 2012(%)

各农田生态系统碳蓄积比例	2004 年	2005 年	2006 年	2007 年	2008 年	2009 年	2010 年	2011 年	2012 年	均值
稻谷	0.7	0.4	0.4	0.3	0.2	0.2	0.2	0.1	0.1	0.3
冬小麦	30.7	30.2	29.5	21.7	28.1	26.7	26.5	25.2	26.1	27.2
玉米	59.7	64.0	64.9	73.8	68.3	70.3	71.1	72.6	71.9	68.5
薯类	1.9	1.4	1.5	1.8	0.9	0.8	0.7	0.7	0.7	1.1
大豆	7.0	4.0	3.8	2.4	2.5	2.0	1.5	1.5	1.3	2.9

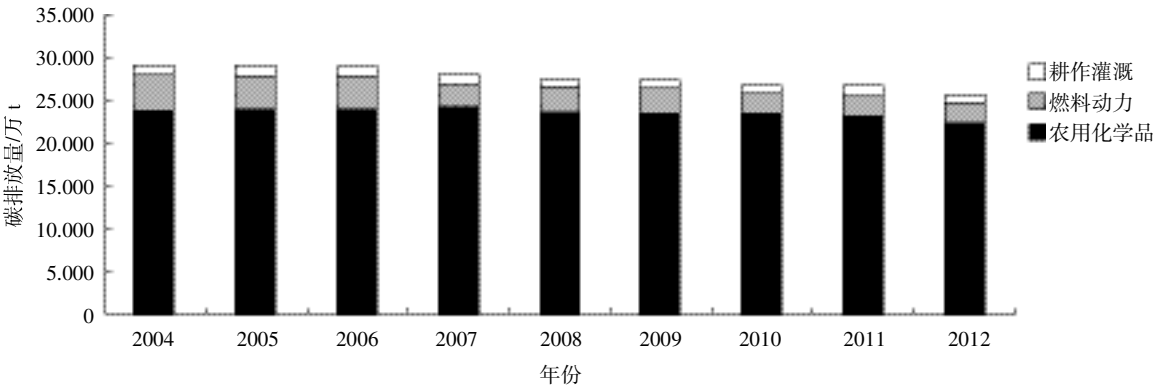


图 4 2004—2012 年北京市农田生态系统碳排放量的变化

Figure 4 The interannual changes of the carbon emissions of Beijing farmland ecosystem from 2004 to 2012

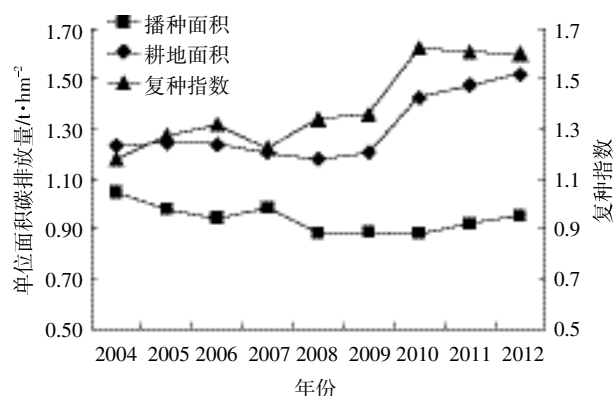


图 5 2004—2012 年北京市农田生态系统单位面积碳排放量变化
Figure 5 The interannual changes of the per area carbon emissions of Beijing farmland ecosystem from 2004 to 2012

所占比例均呈现逐年增高趋势,其中农用化学品碳排放所占比例已经由 2004 年的 82.0% 升高到 2012 年的 86.9%,增幅达 6%。虽然,燃料动力碳排放所占比例呈现逐年减少的趋势,其减少幅度为 36.5%,但是,因燃料动力碳排放农田生态系统总排放量中所占比例较低,因此,对减少农田生态系统的碳排放量所起作用较小。

北京市农田生态系统碳排放量比例均值(2004—2012 年)分布,见表 5。北京农田生态系统的碳排放量中,农业化学品的碳排放所占比例最大,为 85.4%,燃料动力以及耕作灌溉的碳排放量均较低,分别为 10.9% 和 3.7%,因此,对于北京市农田生态系统的碳排放量起主导作用的是农用化学品的用量,所以,减少农用化学品的使用是发展低碳农业的主导方向。

2.2.2 北京市农田生态系统中农用化学品碳排放量变化

由于北京农田生态系统中农用化学品的碳排量

占 85.4%,直接决定着农田生态系统碳排放总量的变化,因此,我们针对 2004—2012 年北京农田生态系统中农用化学品的碳排放量的变化以及各类农用化学品所占的比例分布变化进行了研究,结果如图 6、表 6 所示。

由图 6 可知化肥和农药的碳排放量呈现出逐年降低的趋势,化肥和农药的碳排放量的降幅分别为 13.3% 和 27.8%,农膜的碳排放量呈增加趋势,增幅为 26.9%。表 6 为 2004—2012 年农用化学品碳排放量的比例的变化,可知,化肥和农药的碳排放量比例呈逐年降低趋势,降幅分别为 7.5% 和 23.0%,而农膜的碳排放比例呈现出逐年增加趋势,增幅为 35.4%。

从北京市农田生态系统中农用化学品的碳排放比例均值(2004—2012 年)的分布情况可知(表 6),化肥的碳排放量所占比例最大为 63.5%,其次为农膜,其碳排放量所占比例为 27.6%,农药碳排放量所占比例

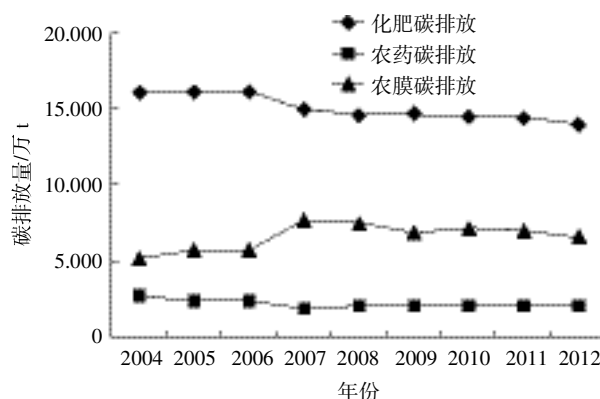


图 6 2004—2012 年北京市农田生态系统
农用化学品的碳排放量变化

Figure 6 The interannual changes of the carbon emissions of agrochemicals of Beijing farmland ecosystem from 2004 to 2012

表 5 2004—2012 年北京市农田生态系统碳排放比例的变化(%)

Table 5 The interannual changes of the carbon emissions proportion of Beijing farmland ecosystem from 2004 to 2012(%)

各农田生态系统碳排放比例	2004 年	2005 年	2006 年	2007 年	2008 年	2009 年	2010 年	2011 年	2012 年	均值
农用化学品	82.0	82.8	83.2	87.0	86.8	85.4	87.2	87.0	86.9	85.4
燃料动力	14.4	13.4	13.2	9.6	9.8	10.9	8.8	9.0	9.1	10.9
耕作灌溉	3.6	3.8	3.6	3.4	3.3	3.7	4.0	4.0	4.0	3.7

表 6 2004—2012 年农用化学品碳排放量比例的变化(%)

Table 6 The interannual changes of the carbon emissions proportion of agrochemicals from 2004 to 2012(%)

各农用化学品碳排放比例	2004 年	2005 年	2006 年	2007 年	2008 年	2009 年	2010 年	2011 年	2012 年	均值
化肥	67.3	66.8	66.8	61.3	60.9	62.6	61.5	61.9	62.2	63.5
农药	11.2	9.7	9.7	7.5	8.1	8.5	8.4	8.3	8.6	8.9
农膜	21.5	23.6	23.6	31.2	31.0	29.0	30.0	29.8	29.2	27.6

例最低,为 8.9%。因此,化肥和农膜的碳排放量的多少直接决定农用化学品的碳排放量,并最终决定农田生态系统的碳排放量。虽然,化肥的碳排放量所占比例呈减小趋势,但降幅较低,为 7.5%,而农膜碳排放量所占比例呈增加趋势,且增幅较大,为 35.4%,尽管农药的碳排放量所占比例有 23.0%的降幅,但其在农用化学品的总排放量中所占比例较小,因此,农药的碳排放量的减少对降低农用化学品的碳排放量所起作用较小。应着重考虑减少化肥和农膜的碳排放量,减少化肥和农膜的使用量。

2.2.3 北京市农田生态系统中化肥碳排放量变化

由以上分析可知,北京农田生态系统中化肥的碳排放量占 63.5%,直接决定着农用化学品的碳排放量,并最终决定农田生态系统碳排放总量的变化,因此,我们针对 2004—2012 年北京农田生态系统中化肥的碳排放量的变化以及各类化肥品种所占的比例分布变化进行了研究,结果如图 7、表 7。

从北京市化肥碳排放总量的年变化趋势来看,见图 7,2004—2012 年是逐年减少的,化肥碳排放量已经从 2004 年的 159 993.75 t 减少到 2012 年的 138 715.44 t,减少幅度为 13.3%,年递减率为 1.5%。表 7 为北京市各类化肥碳排放量比例的变化趋势,2004—2012 年氮肥和磷肥的碳排放比例都呈现出逐

年减少的趋势,氮肥和磷肥的碳排放比例已经分别从 2004 年的 85.7%和 1.3%减少到 2012 年的 81.4%和 0.9%,降幅分别为 5.1%和 26.8%;钾肥和复合肥的碳排放量呈现逐年增加的趋势,钾肥和复合肥的碳排放比例已经分别从 2004 年的 0.5%和 11.3%增加到 2012 年的 0.6%和 15.7%,增幅分别为 3.3%和 3.9%。

北京市近年来(2004—2012 年)化肥碳排放量的年平均分布比例见表 7,氮肥碳排放量所占比例最高,为 83.7%,其次为复合肥,为 13.3%,磷、钾肥的碳排放比例相对较低,分别为 1.1%和 0.5%。虽然氮肥的碳排放量呈现逐年减少的趋势,但是,其降幅较小,只有 5.1%,因此,与其在北京农田生态系统化肥的碳排放 83.7%的比例相比,对化肥碳排放的减少程度较少。因此,应加强农田生态系统配方施肥的进程,尽量减少氮肥的施用量。

2.3 北京市农田生态系统碳足迹研究

图 8 为北京市农田生态系统 2004—2012 年碳吸收量、碳排放量以及净碳汇的变化,可见北京市农田生态系统净碳汇(即农田生态系统碳吸收总量与碳排放总量的差值)与碳吸收总量的变化趋势一致,2008 年最高,总体呈上升趋势。

图 9 为北京市农田生态系统 2004—2012 年碳足迹的变化,可知,农田生态系统的碳足迹呈逐年降低

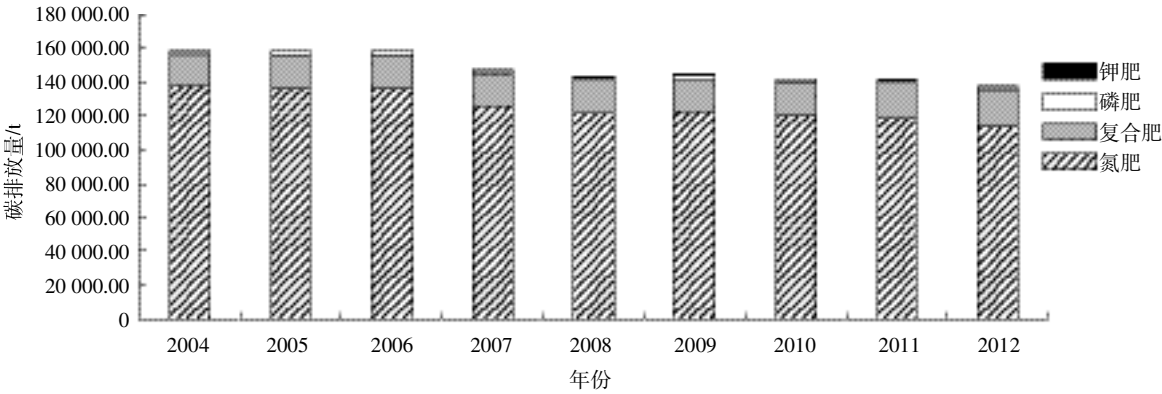


图 7 2004—2012 年北京市农田生态系统化肥施用引起的碳排放变化

Figure 7 The interannual changes of the carbon emissions of chemical fertilizers from 2004 to 2012

表 7 2004—2012 年各类化肥的碳排放比例(%)

Table 6 The interannual changes of the proportion carbon emissions of chemical fertilizers from 2004 to 2012(%)

各类化肥碳排放比例	2004 年	2005 年	2006 年	2007 年	2008 年	2009 年	2010 年	2011 年	2012 年	均值
氮肥	85.7	84.7	84.7	84.0	83.8	83.4	83.2	82.5	81.4	83.7
磷肥	1.3	1.2	1.2	1.2	1.2	1.1	1.0	1.0	0.9	1.1
钾肥	0.5	0.5	0.5	0.6	0.6	0.6	0.6	0.6	0.6	0.5
复合肥	11.3	12.4	12.4	12.9	13.1	13.6	13.8	14.5	15.7	13.3

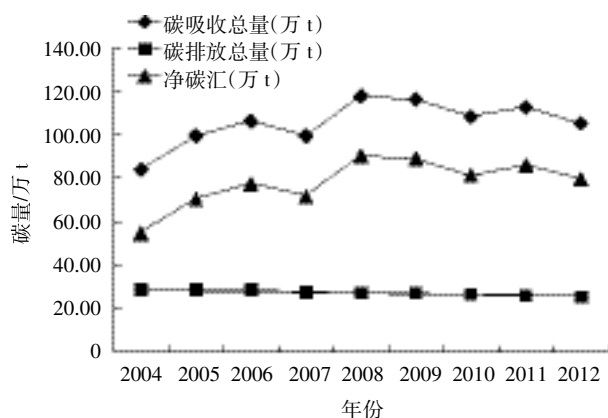


图 8 北京市农田生态系统 2004—2012 年碳吸收量、碳排放量以及净碳汇的变化

Figure 8 The interannual changes of carbon uptake, carbon emissions, and net carbon sink of Beijing farmland ecosystem from 2004 to 2012

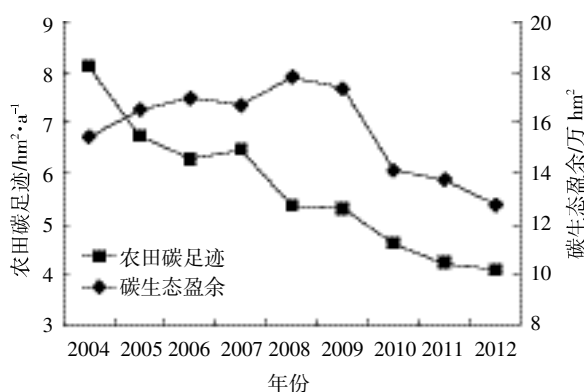


图 9 北京市农田生态系统 2004—2012 年碳足迹的变化

Figure 9 The interannual changes of carbon footprint of Beijing farmland ecosystem from 2004 to 2012

的趋势,已由 2004 年的 $8.13 \text{ hm}^2 \cdot \text{a}^{-1}$ 降低到 2012 年的 $4.11 \text{ hm}^2 \cdot \text{a}^{-1}$,降幅为 49.5%,年递减率为 5.5%。虽然北京市农田生态系统碳足迹的降幅较大,达 49.5%,但是,北京市农田生态系统的碳足迹占同期的耕地面积的比重降低幅度却相对较小,仅仅由 2004 年的 34%降低到 2012 年的 24%,降幅为 29.5%,到 2012 年北京市农业生产排放的 CO_2 仍然需要北京市 24% 的耕地面积来进行消纳。

利用农田碳足迹与区域生态承载力(耕地面积)进行比较,当区域生态承载力大于农田碳足迹时,说明农田生态系统仍然处于生态盈余状态,通过计算,北京市农田生态系统均处于生态盈余状态,但是由于近年北京市耕地面积的减少,生态盈余量呈下降趋势,见图 9。

2.4 北京市农田生态系统碳效率变化

图 10 北京市农田生态系统 2004—2012 年碳生态效率的变化,可知 2008 年碳生态效率最高为 $4.32 \text{ kg C} \cdot \text{kg}^{-1} \text{ CE}$,多年平均为 $3.854 \text{ kg C} \cdot \text{kg}^{-1} \text{ CE}$,北京农田生态系统碳生态效率变化的总体趋势是逐年增加,已经从 2004 年的 $2.9 \text{ kg C} \cdot \text{kg}^{-1} \text{ CE}$ 增加到 2012 年的 $4.12 \text{ kg C} \cdot \text{kg}^{-1} \text{ CE}$,增幅为 41.8%,年递增 4.6%。由以上分析可知,北京农田生态系统的碳生态效率较高,其固碳量大于碳投入量,碳汇能力较强,农业生产拥有较高的持续状态。

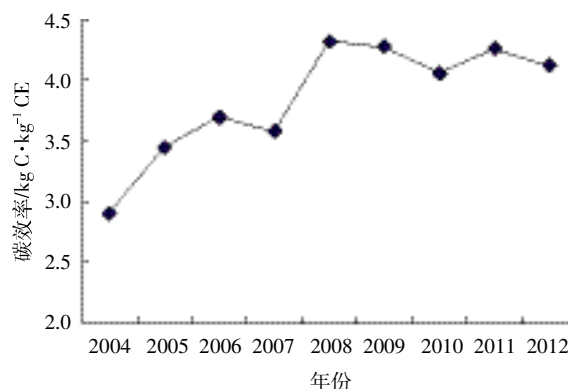


图 10 北京市农田生态系统 2004—2012 年碳生态效率的变化

Figure 10 The interannual changes of carbon eco-efficiency of Beijing farmland ecosystem from 2004 to 2012

2.5 农田生态系统碳源、碳汇、碳足迹以及碳效率影响因素的回归分析

为进一步探讨影响北京市农田生态系统碳源、碳汇、碳足迹以及碳效率的影响因素,分别以农田碳蓄积量、碳排放量、碳足迹和碳生态效率为因变量,以各作物种类的碳蓄积量、农田碳排放量(农用化学品、农业生产燃料动力、农田耕作、灌溉)、耕地面积、播种面积等为自变量,利用 SPSS Statistics 17.0 软件中的逐步回归方法进行了回归分析。结果如下:

$$y_1 = 67\,942.376 + 0.918x_1 + 1.083x_2 + 3.859x_3 + 0.821x_4 \\ R^2 = 0.997 \quad (3)$$

$$y_2 = 90\,860.598 + 1.178x_5 - 5.728x_6 + 5.819x_7 \\ R^2 = 0.995 \quad (4)$$

$$y_3 = 97\,771.726 - 17.858x_6 + 0.197x_8 - 0.333x_9 - 0.106x_{10} \\ R^2 = 0.999 \quad (5)$$

$$y_4 = 2.623 + 2.671 \times 10^{-6}x_{11} - 0.002x_{12} \\ R^2 = 0.990 \quad (6)$$

式中: y_1 为农田生态系统的碳蓄积量, $\text{万 t} \cdot \text{a}^{-1}$; y_2 为农田生态系统的碳排放量, $\text{万 t} \cdot \text{a}^{-1}$; y_3 为农田生态系统的碳足迹, $\text{hm}^2 \cdot \text{a}^{-1}$; y_4 为农田生态系统的碳生态效率

$\text{kg C} \cdot \text{kg}^{-1} \text{CE}$; x_1 为玉米的碳蓄积量, 万 $\text{t} \cdot \text{a}^{-1}$; x_2 为冬小麦的碳蓄积量, 万 $\text{t} \cdot \text{a}^{-1}$; x_3 为油料的碳蓄积量, 万 $\text{t} \cdot \text{a}^{-1}$; x_4 为蔬菜的碳蓄积量, 万 $\text{t} \cdot \text{a}^{-1}$; x_5 为化肥的碳排放量, 万 $\text{t} \cdot \text{a}^{-1}$; x_6 为机收面积引起的碳排放量, 万 $\text{t} \cdot \text{a}^{-1}$; x_7 为机播面积引起的碳排放量, 万 $\text{t} \cdot \text{a}^{-1}$; x_8 为瓜果蔬菜的碳蓄积量, 万 $\text{t} \cdot \text{a}^{-1}$; x_9 为农膜引起的碳排放量, 万 $\text{t} \cdot \text{a}^{-1}$; x_{10} 为耕地面积, hm^2 ; x_{11} 为粮食作物的碳蓄积量, 万 $\text{t} \cdot \text{a}^{-1}$; x_{12} 为农业机械总动力引起的碳排放量, 万 $\text{t} \cdot \text{a}^{-1}$ 。

影响北京农田生态系统的碳蓄积量主要包括玉米、冬小麦、油料和蔬菜 4 个要素, 它们对碳汇功能贡献的顺序为玉米>冬小麦>油料>蔬菜, 可见粮食作物中的小麦和玉米是影响农田生态系统碳汇功能的主要因素。北京农田生态系统的碳排放量主要受化肥、机收面积、机播面积 3 个因素影响, 它们对农田生态系统碳排放量的贡献顺序为化肥>机收面积>机播面积, 可见减少化肥的施用、减少机播面积增加机收面积可降低北京农田生态系统碳排量的主要因素。公式(5)为碳足迹与各影响因素的逐步回归结果, 共入选 4 个变量, 其贡献顺序为机收面积引起的碳排放量>瓜果蔬菜的碳蓄积量>农膜引起的碳排放量>耕地面积, 降低北京农田生态系统的碳足迹可通过增加机收面积、增加农膜的使用、增加耕地面积、减少瓜果蔬菜的种植实现。影响碳生态效率的因素主要包括 2 个, 粮食作物的碳蓄积量和农业机械总动力引起的碳排放量, 其贡献顺序为: 粮食作物的碳蓄积量>农业机械总动力引起的碳排放量, 增加粮食作物的碳蓄积量减少农业机械总动力引起的碳排放量是增加碳生态效率的主要方式。

3 讨论

本文采用全环式路径的方法对北京农田生态系统的碳足迹和碳生态效率的年际变化进行了研究。农田生态系统中植物碳流的特点表现为固碳与耗碳并存全环式^[9], 此方法可更确切地体现出农田生态系统在固碳与耗碳的作用。但本文对北京市农田生态系统固碳量和碳排放量的估算中也存在一些不确定性因素。

在对农田生态系统碳汇功能计算时, 采用的是传统的利用农作物经济产量和经济系数计算生物量的方法, 虽然作物经济系数比较稳定, 但与其他地区相比北京地区科技水平更发达, 其农田生态系统拥有更高的生产力水平, 因此, 农作物的经济系数会相对偏高, 但由于缺乏针对北京地区农作物的经济系数, 会

使本文对北京地区农田生态系统的碳汇功能低估。农田生态系统不同于自然生态系统, 其生长周期短, 当其处于不同生育期时表现出较大群体差异, 因此结合田间试验, 分析农田生态系统不同生育期其碳汇功能的差异性, 会更有实际意义。

在碳排放量的计算方面, 本文中各投入项的碳排放系数均采用定值, 但农田生态系统中各投入项随作物种类、生育期的不同而发生变化, 导致本文对农田生态系统碳排放量估算的不确定性的增加, 因此, 有针对性地设计田间试验, 根据作物种类、生育期的不同加强碳排放的基础性研究更具有现实意义。在我国目前缺少农田各投入项的碳排放系数研究的情况下, 在碳排放量的估算中, 本文主要参考国外碳排放系数, 但为减少碳排放量的估算的不确定性, 使其更接近实际水平, 本文中氮肥的碳排放系数采用文献[17]中的 $1740 \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{t}^{-1}$, 此系数是逯非等^[17]利用 IPCC 的推荐方法, 根据中国生产氮肥耗能特点推算所得, 更接近我国实际情况; 灌溉碳排放系数采用文献[18]中的 $20.476 \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{hm}^{-2}$, 田云等^[18]考虑到火力发电对化石燃料的需求才导致间接的碳排放, 因此将灌溉碳排放系数修正为 $20.476 \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{hm}^{-2}$ 。通过对碳排放系数的修正, 可使本文对农田生态系统碳排放量的估算更接近其真实水平。例如韩召迎等^[8]利用经过修正的氮肥和灌溉碳排放系数取得较好的估算效果。

尽管本文对北京市农田生态系统固碳量和碳排放量的估算存在一定的不确定性, 但研究结果与刘巽浩等^[9]的研究结果表现出高度的一致性, 因此, 在一定程度上能够反映北京市农田生态系统的功能和地位, 对北京市整体规划和产业布局有一定的理论支撑作用。

4 结论

2004—2012 年北京农田生态系统碳蓄积量总体呈增加趋势, 年递增幅度为 2.8%, 年平均碳蓄积量为 105.82 万 t, 农田生态系统中粮食作物碳蓄积量所占比例最大平均为 80.4%, 在粮食作物中玉米碳蓄积所占比例最大为 68.5%, 其次为小麦为 27.2%。农田生态系统单位耕地面积年均碳蓄积量为 $5.03 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$, 且呈逐年增加的趋势。可见北京市农田生态系统碳汇功能明显, 玉米和小麦的碳汇功能表现尤其突出。影响北京地区农田生态系统碳汇功能的主要因素是粮食作物中玉米以及小麦的经济产量及其种植面积。

2004—2012 年北京农田生态系统的碳排放量基本上呈现出逐年降低的趋势, 年均递减 1.3%, 年均碳

排放量为 27.6 万 t, 其中碳排放量的比例分布情况为: 农业化学品最大, 为 85.4%。在农用化学品中, 化肥的碳排放量所占比例最大为 63.5%, 其次是农膜, 为 27.6%。在化肥的碳排放量中, 氮肥所占比例最高, 为 83.7%。因此, 减少北京市农田生态系统碳排量的主要措施是减少农业化学品中氮素化肥的施用量, 加强农田生态系统配方施肥的进程。

北京市农田生态系统 2004—2012 年碳足迹呈逐年降低的趋势, 年递减率为 5.5%, 处于碳生态盈余状态, 但是由于近年北京市耕地面积的减少, 碳生态盈余量呈下降趋势。北京农田生态系统的碳生态效率较高, 年平均为 $3.854 \text{ kg C} \cdot \text{kg}^{-1} \text{ CE}$, 其固碳量大于碳投入量, 碳汇能力较强, 农田生态系统处于较高的持续状态。

参考文献:

- [1] 于贵瑞, 何念鹏, 王秋凤, 等. 中国生态系统碳收支及碳汇功能[M]. 北京: 科学出版社, 2013: 3–21.
YU Gui-rui, HE Nian-peng, WANG Qiu-feng, et al. Carbon budget and carbon sink of ecosystems in China[M]. Beijing: Science Press, 2013: 3–21.(in Chinese)
- [2] 林而达. 气候变化与农业可持续发展[M]. 北京: 北京出版社, 2001: 1–50.
LIN Er-da. Climate change and sustainable development of agriculture [M]. Beijing: Beijing Publishing House, 2001: 1–50.(in Chinese)
- [3] 孟成民, 刘 清, 王建武. 广东省农田生态系统碳源汇时空差异[J]. 广东农业科学, 2014(8): 198–201.
MENG Cheng-min, LIU Qing, WANG Jian-wu. Temporospatial variation analysis on carbon source/sink of farmland ecosystem in Guangdong [J]. *Guangdong Agricultural Science*, 2014(8): 198–201.(in Chinese)
- [4] 李 俊, 于 强, 孙晓敏. 华北平原农田生态系统碳交换及其环境调控机制[J]. 中国科学(D 辑): 地球科学, 2006, 36(增刊): 210–223.
LI Jun, YU Qiang, SUN Xiao-min. The north China plain farmland ecosystem carbon exchange and environmental regulation[J]. *Chinese Science (Series, D): Earth Sciences*, 2006, 36(Suppl.): 210–223.(in Chinese)
- [5] 钱晓雍. 上海农田生态系统碳源汇时空格局及其影响因素分析[J]. 农业环境科学学报, 2011, 30(7): 1460–1467.
QIAN Xiao-yong. Spatial-temporal variation and impact factor of carbon source and sink of farmland ecosystem in Shanghai, China[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2011, 30(7): 1460–1467.(in Chinese)
- [6] 方精云, 郭兆迪, 朴世龙. 1981—2000 年中国陆地植被碳汇的估算[J]. 中国科学(D 辑): 地球科学, 2007, 37(6): 804–812.
FANG Jing-yun, GUO Zhao-di, PU Shi-long. Estimation of terrestrial vegetation carbon sequestration of Chinese in 1981—2000[J]. *Chinese Science (Series, D): Earth Sciences*, 2007, 37(6): 804–812.(in Chinese)
- [7] 田志会. 北京山区果园生态系统服务功能及经济价值评估[M]. 北京: 气象出版社, 2012: 83–94.
TIAN Zhi-hui. Evaluation of services and their economic value of Beijing mountainous orchard ecosystem[M]. Beijing: China Meteorological Press, 2012: 83–94.(in Chinese)
- [8] 韩召迎, 孟亚利, 周治国, 等. 区域农田生态系统碳足迹时空差异分析[J]. 农业环境科学学报, 2012, 31(5): 1034–1041.
HAN Zhao-ying, MENG Ya-li, ZHOU Zhi-guo, et al. Temporal and spatial difference in carbon footprint of regional farmland ecosystem[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2012, 31(5): 1034–1041.(in Chinese)
- [9] 刘巽浩, 徐文修, 李增嘉, 等. 农田生态系统碳足迹法: 误区、改进与应用[J]. 中国农业资源与区划, 2013, 34(6): 1–11.
LIU Xing-hao, XU Wen-xiu, LI Zeng-jia, et al. The misstep, improvement and application of carbon footprint methodology in farmland ecosystem[J]. *Chinese Journal of Agricultural Resources and Regional Planning*, 2013, 34(6): 1–11.(in Chinese)
- [10] 张智全. 庆阳市生态承载力与生态环境评价研究[D]. 兰州: 甘肃农业大学, 2010: 77–101.
ZHANG Zhi-quan. Evaluation of the ecological environment and the ecological bearing capacity in Qingyang City[D]. Lanzhou: Gansu Agricultural University, 2010: 77–101.(in Chinese)
- [11] Carbon Dioxide Information Analysis Center. Carbon efficiency (most recent) by country[EB/OL]. http://www.nationmaster.com/graph/env_car_eff-environment-carbon-efficiency. [2014–11–20].
- [12] Canadell J G, Le Quere C, Raupach M R, et al. Contributions to accelerating atmospheric CO₂ growth from economic activity, carbon intensity, and efficiency of natural sinks[J]. *Proc Natl Acad Sci USA*, 2007, 104: 18866–18870.
- [13] Burney J A, Davis S J, Lobell D B. Greenhouse gas mitigation by agricultural intensification[J]. *Proc Natl Acad Sci USA*, 2010, 107: 12052–12057.
- [14] 史磊刚, 范士超, 陈 阜, 等. 华北平原主要作物生产的碳效率研究初报[J]. 作物学报, 2011, 37(8): 1485–1490.
SHI Lei-gang, FAN Shi-chao, CHEN Fu, et al. Preliminary study on the carbon efficiency of main crops production in north China plain[J]. *Acta Agronomica Sinica*, 2011, 37(8): 1485–1490.(in Chinese)
- [15] 刘子凡, 黄 洁. 作物栽培学总论[M]. 北京: 中国农业科学技术出版社, 2007: 56–57.
LIU Zi-fan, HUANG Jie. Crop cultivation science pandect[M]. Beijing: Chinese Agricultural Science and Technology Press, 2007: 56–57.(in Chinese)
- [16] 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.
- [17] 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.(in Chinese)
- [18] 田 云, 李 波, 张俊彪. 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.(in Chinese)