

武安市农田生态系统碳源与碳汇研究

罗广芳,张建军*,饶永恒,黄 卉
(中国地质大学(北京)土地科学技术学院,北京 100083)

摘要:对武安市农田生态系统碳吸收量和排放量进行估算,并对其主要影响因素进行分析,以寻求减少农田生态系统碳排放的有效途径,进而促进农业的可持续发展。结果表明,武安市农田生态系统碳排放量整体呈相对稳定状态,其中化肥生产使用是主要的碳排放源;农田生态系统碳吸收量总体呈先降低后升高趋势,年际间波动明显,主要原因是农业投入的变化与种植结构的调整。相关性分析表明,碳吸收量与农作物产量、主要农作物类型、有效灌溉面积、农业机械的使用均存在正相关关系;碳排放量与化肥的生产使用、农业机械使用、有效灌溉面积以及农作物播种面积均呈正相关关系。基于以上分析,提出了调整农作物种植结构,改善化肥条件,调整耕作模式和灌溉制度以及秸秆等废弃物处置方式的建议,以达到促进温室气体减排和低碳农业发展的目的。

关键词:农田生态系统;碳吸收;碳排放;碳源;碳汇

中图分类号:S181;X21 文献标志码:A 文章编号:1004-3268(2015)05-0081-06

Carbon Source and Sink of Farmland Ecosystem in Wu'an

LUO Guangfang,ZHANG Jianjun*,RAO Yongheng,HUANG Hui
(School of Land Science and Technology,China University of Geosciences (Beijing),Beijing 100083,China)

Abstract: In order to explore the effective ways to decrease carbon emissions of farmland ecosystem, and promote the sustainable development of agriculture, this paper calculated the amount of carbon absorption and carbon emission respectively, and the spatial-temporal variations and impact factors of carbon absorption and emission were analyzed. The results showed that the total amount of carbon emission appeared a relatively stable state, and the fertilizer production and use was the main source; the total amount of carbon absorption decreased first and then increased in the farmland ecosystem, the main reasons were the adjustments of farm inputs and agricultural structure. The correlation analysis results showed that carbon absorption amount was significantly positively correlated with the crop yield, main crop types, effective irrigation area and use of agricultural machinery; positive correlations were observed between carbon emission amount and use of fertilizer, the use of agricultural machinery, effective irrigation area and crop planting area. Based on the above analysis, some policy suggestions were put forward to decrease the greenhouse gas emission and promote the low-carbon agriculture development, such as adjusting the crop planting structure, improving the conditions of fertilizer, adjusting the cultivation mode, the system of irrigation and straw waste disposal ways.

Key words: farmland ecosystem; carbon absorption; carbon emission; carbon source; carbon sink

近年来,生态环境问题日益突出,全球气候变暖活,治理与保护环境已成为当今世界各国共同关注的热点问题之一。农业生产活动是重要的温室气体

收稿日期:2014-10-14
基金项目:北京市支持中央高校共建项目——青年英才计划(YETP0639)
作者简介:罗广芳(1990-),女,四川宣汉人,在读硕士研究生,研究方向:土地利用与碳排放。E-mail:luoyi630@163.com
* 通讯作者:张建军(1982-),男,山西太原人,副教授,博士,主要从事土地利用与生态经济方面的教学与研究工作。
E-mail:zhangjianjun_bj@126.com

排放源之一。研究表明,大气中 20% 的 CO₂、70% 的 CH₄、90% 的 N₂O 来源于农业活动及其相关过程^[1]。农田生态系统是巨大的碳库,其碳储量达 170 Pg,占全球陆地碳储量的 10% 以上^[2]。因此,对农田生态系统的碳吸收与碳排放量进行研究具有十分重要的现实意义。目前,关于碳循环的研究主要涵盖农田、森林、草地、城市、海洋等领域,研究内容主要集中于农田生态系统碳源/汇时空格局变化、城市系统碳循环与碳平衡分析、森林生态系统碳循环系统的设计、不同类型陆地植被的碳源/汇分析、海洋生态系统碳循环模式等方面^[3-14]。关于农田生态系统碳源与碳汇方面的研究较少,已有文献主要从大尺度(省域以上)上进行研究^[15-21],小尺度的研究鲜有报道。为此,本研究计算了武安市农田生态系统碳吸收量与碳排放量,并对其主要影响因素进行分析,以期寻求出减少农田生态系统碳排放量的有效途径,进而促进武安市低碳农业的可持续发展。

1 材料和方法

1.1 研究区概况

河北省武安市地处晋冀鲁豫经济区的腹地(113°45′~114°22′E、36°28′~37°01′N),总面积 1 819 km²。武安矿产资源丰富但综合利用程度低,土地破坏面积达 26.7 km²,其中农田破坏面积达到 13.4 km²。近 10 a,武安市经济突飞猛进,至 2013 年,农作物种植面积达到 632.80 km²,粮食作物总产量为 30.97 万 t,主要以小麦、谷子、玉米为主,另有棉花、油料等经济作物;农业机械化使用程度提高,全市机械总动力高达 2.126 × 10⁶ kW,机耕面积达到 359.30 km²,实现了机械播种、机械收获等操作;近几年该市加大农田水利设施建设,农田水利灌溉面积达到 376.30 km²;化肥施用量达到 8.36 万 t,主要包括氮肥、磷肥等。

1.2 数据来源

本研究所用数据主要来源于 2000—2013 年的《武安市社会经济统计年鉴》。其中,农田面积、播种面积、粮食产量等用于研究武安市农田生态系统的碳吸收量;化肥施用量、灌溉面积、秸秆量和农业机械总动力用于研究武安市农田生态系统碳排放量。

1.3 农田生态系统的碳排放量估算

农田生态系统是一个大量物质能量输入、输出的复杂系统,其中受人为因素影响较大,人类为了获得物质收入对农田生态系统加以投入,促使其向人类有益的方向发展,并在较大程度上促进了农田生态系统的碳排放。许多专家学者认为,农田生态系

统碳排放的主要来源包括化肥生产使用过程中所产生的碳排放、农药与农膜生产使用过程中所产生的碳排放、农业机械使用消耗化石能源所产生的碳排放、农业灌溉过程中所产生的碳排放、植被秸秆资源作为生活燃料或在露天焚烧所产生的碳排放等^[20-23]。

本研究基于主成分分析法找出影响农田生态系统碳排放量与碳吸收量的关键因素,然后对碳排放量与碳吸收量进行估算。由于农药与农膜的生产使用造成的碳排放量极少,经过粗略计算得出其碳排放量不足化肥生产使用的 0.10%,故本研究忽略其碳排放过程。

1.3.1 化肥生产使用带来的碳排放量 化肥生产使用带来的碳排放量计算见公式(1)。

$$E_f = G_f \times \sum_{i=1}^2 V_i \tag{1}$$

式中, E_f 表示化肥生产使用带来的碳排放量, G_f 为化肥施用量, V_i 为化肥生产运输各环节碳排放系数,假设化肥生产运输过程分为生产与运输 2 个阶段,并且化肥生产环节碳排放系数不变,对 West 等^[22]研究中的化肥生产使用碳排放系数根据武安市实际情况进行修正得到实际碳排放系数为 836.08 g/kg。

1.3.2 农业机械使用带来的碳排放量 农业机械使用带来的碳排放量计算见公式(2)。

$$E_m = [(A_m \times B) + (W_m \times C)] \times (1 + K_2) \tag{2}$$

式中, E_m 表示农业机械使用带来的碳排放量, A_m 为农作物种植面积, W_m 为农业机械总动力, B 、 C 为转换系数,分别为 16.47 kg/hm²^[20]、0.18 kg/kW^[21]。根据美国^[24]与武安^[25]的农业机械效率进行系数修正得到 $K_2 = e_2/e_1$,其中 e_1 为美国的机械效率, e_2 为武安市的机械效率, K_2 为修正系数。

1.3.3 灌溉带来的碳排放量 灌溉带来的碳排放量计算见公式(3)。

$$E_i = A_i \times D \times (1 + K_3) \tag{3}$$

式中, E_i 表示灌溉带来的碳排放量, A_i 为灌溉面积, D 表示转换系数,为 266.48 kg/hm²^[22]。根据武安市水资源状况对转换系数进行修正得到修正系数 $K_3 = (Q_1/S_1)/(Q_2/S_2) = 0.308$, Q_1 、 Q_2 分别为武安市^[26]与美国^[27]的灌溉用水量, S_1 、 S_2 分别为武安^[26]与美国^[27]的灌溉面积。

1.3.4 秸秆燃烧带来的碳排放量 我国 44% 的秸秆作为传统的生活燃料加以利用,而剩下的 56% 在田间直接焚烧^[28]。农作物秸秆的燃烧利用率为 60%^[29],1 t 农作物秸秆燃烧可向大气中释放 CO₂ 1.60 t^[30]。故秸

秆燃烧释放 CO₂ 的总量可以表示为式(4)。

$$E_q = V \times 60\% \times 1.6$$

(4)

$$V = \sum_{i=1}^n Y_i d_i$$

式中, E_q 为农作物秸秆燃烧带来的碳排放总量, V 为农作物秸秆总量, i 为作物种类, Y_i 为*i*种作物的经济产量, d_i 为*i*种作物的草谷比。

1.3.5 农田生态系统的碳排放总量与碳排放强度

农田生态系统的碳排放总量(E_t)、碳排放强度(E_{qd})计算见公式(5)、(6)。

$$E_t = E_f + E_m + E_i + E_q$$

(5)

$$E_{qd} = E_t / S$$

(6)

式中, S 为农作物播种面积。

1.4 农田生态系统的碳吸收量估算

农田生态系统吸收的碳主要是指农作物光合作用过程中吸收的碳,根据不同农作物的经济系数、碳吸收率以及武安市历年来的农作物产量来估算^[31],但植被的固碳能力不仅表现在果实上,还有植被的秸秆和地下部分。因此,将根冠比引入植被碳吸收公式^[32]中,具体计算见式(7)。

$$T_i = \sum_{i=1}^n [C_i \times (1 - W_i) \times (1 + R_i) \times Y_i / H_i]$$

(7)

碳吸收强度(T_{xq})计算公式为:

$$T_{xq} = T_i / S$$

(8)

式中, T_i 为*i*类农作物的总碳量, C_i 为*i*类农作物的含碳率, W_i 为*i*类农作物的含水率, R_i 为*i*类农作物的根冠比(地下生物量与地上生物量之比), Y_i 为*i*类农作物的经济产量(收获产量), H_i 为*i*类农

作物的经济系数(经济产量与生物产量的比值), S 为农作物播种面积。主要农作物的根冠比、含碳率、含水率与经济系数见表 1^[30-34]。

表 1 主要农作物的根冠比、含碳率、含水率与经济系数

作物	根冠比	含碳率/%	含水率/%	经济系数
冬小麦	0.48	0.485 3	0.138	0.357
谷子	1.33	0.450 0	0.135	0.391
玉米	0.44	0.470 9	0.145	0.441
高粱	0.40	0.450 0	0.133	0.386
薯类		0.422 6	0.125	0.700
豆类	0.92	0.439 9	0.083	0.435
棉花	0.19	0.450 0	0.090	0.383
花生	1.40	0.450 0	0.090	0.426
油菜籽	0.04	0.447 4	0.450	0.300
芝麻	0.30	0.450 0	0.150	0.145

根据计算可知,武安市主要农作物高粱、薯类、油类作物的碳吸收量极少,其总和不足碳吸收总量的 4%,为了便于比较分析和后期农业结构调整规划,本研究主要考虑具有代表性的小麦、谷子、玉米的碳吸收量,对其他农作物不予考虑。

2 结果与分析

2.1 武安市农田生态系统碳排放量分析

由图 1 可以看出,2000—2007 年武安市农田生态系统碳排放量总体呈下降趋势,由 2000 年的 8 909.03 万 t 减少至 2007 年 8 226.65 万 t,其主要原因是农田面积缩减造成农业投入相对减少;2008 年出现一个波峰,原因是 2008 年的化肥施用量变大,同年农作物的碳吸收量得到增加,可见农业化肥施用量的增加虽然得到了较高的农作物产量,但同时也给生态系统造成一定程度的负面影响;2008 年

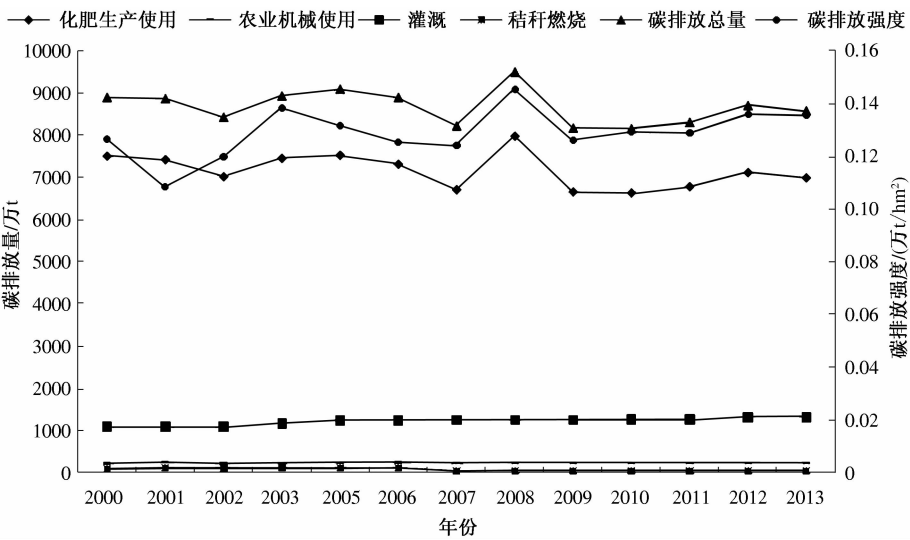


图 1 2000—2013 年武安市农田生态系统碳排放量

之后碳排放量下降并趋于平稳,说明此时的农田生态系统处于一个良好的发展阶段。碳排放强度方面,2000—2013 年武安市农田生态系统碳排放强度总体变化不大,从 2000 年的 0.127 万 t/hm² 增至 2013 年的 0.136 万 t/hm²;但是碳排放强度在 2000—2009 年年际间波动较大,最大值出现于 2008 年,为 0.146 万 t/hm²。

对主要碳排放源分析(图 2)可以看出,2000—2013 年武安市化肥生产使用所引起的碳排放量占总碳排放量的比重最大,其随着时间的推进逐渐下降并最终趋于平稳,平均为 82.53%;其次是灌溉,其所引起的碳排放量占总碳排放量的比重随着时间的推进缓慢增加,由 2000 年的 12.17% 增加为 2013

年的 15.27%,其主要变化原因是武安市近些年重视水利建设,加大了水库水渠等水利工程建设力度,灌溉面积由 2000 年的 3.11 万 hm² 增加至 2013 年的 3.763 万 hm²;农业机械使用所引起的碳排放量占总碳排放量的比重居第 3 位,其随着时间的推进年际变化不明显;秸秆燃烧所引起的碳排放量占总碳排放量的比重最小。可以看出,武安市农田生态系统最大的碳排放源是化肥生产使用,其后依次是灌溉、农业机械使用、秸秆燃烧。因此,降低农田生态系统碳排放量的主要途径是改变化肥的生产使用方式,其次是调整耕作与灌溉方式,采用免耕或少耕技术提高农业机械使用效率,推广喷灌、滴灌等节水灌溉技术,从而降低农田生态系统碳排放量。

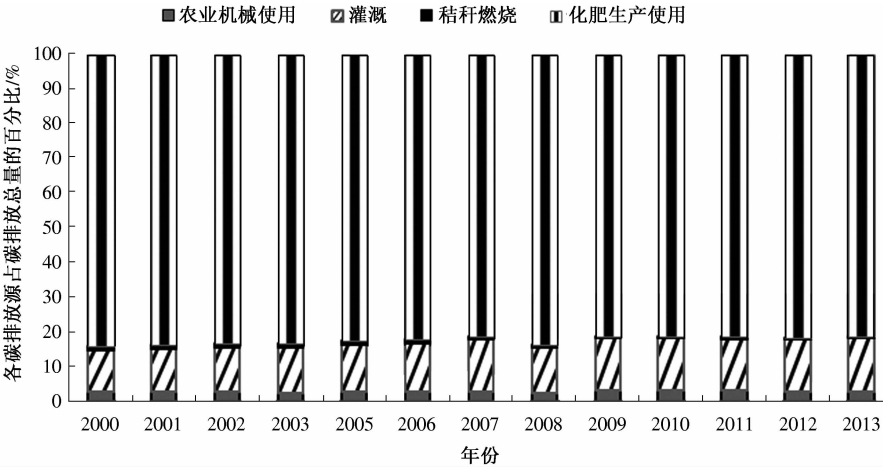


图 2 2000—2013 年武安市农田生态系统主要碳排放源所占比重

2.2 武安市农田生态系统碳吸收量分析

武安市农作物的碳吸收总量有明显的波动趋势,2000 年到 2011 年的碳吸收量总体波动情况符合时间(x)与碳吸收量(y)的二次函数曲线 $y = 0.0586x^2 + 1.4303x + 27.5530$ 的变化规律, R^2 值达到 0.9054(图 3)。曲线大体可以分为 3 个阶段,第 1 阶段为 2000—2002 年,该阶段碳吸收总量不断减少,从 30.09 万 t 减少到 26.25 万 t,碳吸收总量减少的主要原因是该阶段农田转变为其他土地利用类型,农作物种植面积减少,从而使农作物产量减少;第 2 阶段为 2002—2005 年,此阶段碳吸收总量直线上升,引起此变化的主要原因是农业投入力度相对加强促进单位面积产量提高,作物碳吸收量增加,其中农业机械总动力由 2002 年的 803 490 kW 增长到 2005 年的 1 377 130 kW,化肥施用量由 2002 年的 8.40 万 t 增加到 2005 年的 9.01 万 t;第 3 阶段为 2005—2013 年,在农田总面积相对减少,而农业投入保持不变的条件下,碳吸收总量不断上升,主要

的原因因为农作物种植结构的调整。在第 3 阶段玉米与谷子种植面积增加,小麦种植面积几乎不变,因此碳吸收总量出现增长趋势。从整体碳吸收强度方面看,武安市农田生态系统碳吸收强度增加趋势明显,由 2000 年的 4.28 t/hm² 增加到 2013 年的 8.51 t/hm²,涨幅达 98.8%。

2.3 碳排放量和碳吸收量影响因素分析

2.3.1 碳排放量影响因素分析 相关性分析表明,农田生态系统碳排放量与化肥的生产使用、农业机械使用、有效灌溉面积、农作物播种面积均呈正相关关系,这说明资源和能源的消耗是影响农田生态系统碳排放量的主要因素。其中,化肥生产使用与碳排放量相关性最强为 0.987,其次为农业机械使用(0.313)、农作物播种面积(0.296),有效灌溉面积相关性最差为 0.173。因此,需要从调整耕作和化肥生产使用条件、提高机械使用效率以及优化灌溉制度等方面入手有效降低农田生态系统碳排放量^[23,34]。

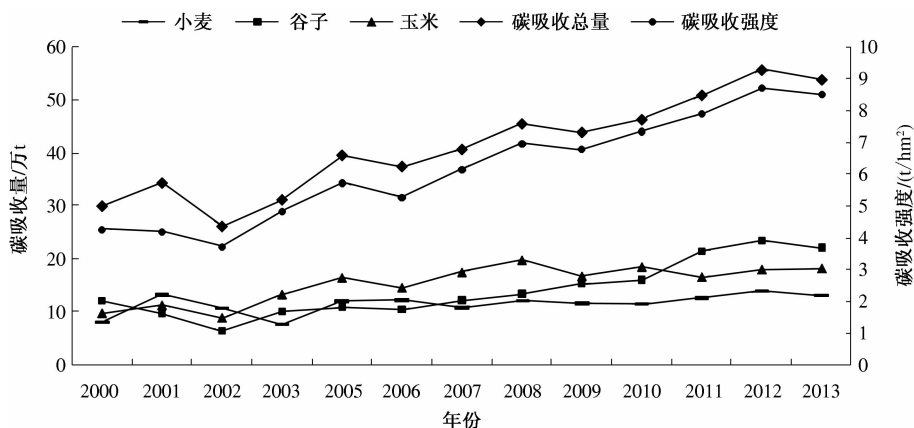


图 3 2000—2013 年武安市农田生态系统主要农作物碳吸收量

2.3.2 碳吸收量影响因素分析 影响农田生态系统碳吸收量的因素很多,主要为农作物类型、农作物产量、化肥的生产使用、农业机械的使用、农作物播种面积、有效灌溉面积等,本研究将以上因素分别与碳吸收量进行相关性分析发现,农作物产量、农业机械的使用对农田生态系统碳吸收量有显著影响,相关性最强,分别为 0.846 和 0.845,主要原因为碳吸收量的主要来源是农作物在光合作用过程中所固定的碳,因此农作物产量越多,碳吸收总量也会越多;同时农业机械的使用极大地促进了农作物增产,碳吸收量随之增加;有效灌溉面积与碳吸收量相关性较好,为 0.759;肥料的使用相关性最差,为 0.325。同时,武安市农田生态系统碳吸收量与主要农作物类型呈正相关关系,其中与玉米相关性最高,为 0.854,谷子次之,为 0.659,而小麦相对较小,为 0.554。通过武安市农业种植结构可以看出,玉米、谷子的播种面积呈增加趋势,碳吸收量随之增加,这说明在农作物播种面积逐年降低的趋势下,合理调整种植结构,提高玉米、谷子的播种面积,增加农业投入,可以使农田生态系统向有益的方向发展。因此可以从此方面入手保持或提高农田生态系统碳吸收能力。

3 结论与建议

本研究对 2000—2013 年武安市农田生态系统碳源与碳汇进行了估算,结果表明,武安市农田生态系统碳吸收量先降低后升高,年际间波动明显,碳吸收强度增加趋势显著,由 2000 年的 4.28 t/hm^2 增加到 2013 年的 8.51 t/hm^2 。其中,谷子、玉米的碳吸收功能强大,应当大规模种植发挥其固碳优势。在碳排放方面,化肥的生产使用、灌溉、农业机械使用及秸秆燃烧都直接或间接进行着碳的排放,而在整个研究阶段其碳排放量呈相对稳定状态,同时碳排

放强度整体变化不明显。对影响农田生态系统碳源与碳汇的因素进行相关性分析发现,碳吸收量与农作物产量、主要农作物类型、农业机械的使用、有效灌溉面积均存在正相关关系;而碳排放量与化肥的生产使用、农业机械使用、有效灌溉面积以及农作物播种面积均呈正相关关系。可见,资源和能源的消耗是影响农田生态系统碳排放量、吸收量的主要因素,因此武安市在低碳经济发展的大背景下建立低碳农业需要从优化能源利用结构以及调整耕作和灌溉制度等方面入手。

综合考虑本研究结果,认为武安市平衡碳源、碳汇,降低碳排放应该从以下几个方面入手:(1)调整农作物种植结构。在农作物生产条件适宜、经济收益满足社会需求的情况下优先选用固碳能力较强的玉米、谷子的种植结构,适度考虑小麦,从而达到在有限的农田面积下,提高农田生态系统的碳吸收能力。(2)合理灌溉,推广喷灌、滴灌等节水灌溉技术,不能大水灌溉,推广低碳、节水的种植技术;探索并推广保护性耕作技术^[35],减少农田土壤碳的排放,实施免耕等技术增加土壤的渗透性,增强土壤抗旱能力。(3)改善施肥条件^[36-37]。化肥在增加作物产量的同时也会释放大量的碳,而施用有机肥则是一种很好的农田固碳措施,长期在农田土壤中施用有机肥可以显著提高土壤活性,另外先对有机肥进行发酵再施用可以有效降低甲烷排放量。因此,在化肥使用方面可以采取增施有机肥的措施。(4)秸秆还田。秸秆还田有利于抑制温室气体的扩散,还能培育土壤肥力,因此在农业生产活动中应该提倡,直接还田的秸秆要经粉碎、沤制后施用,严禁就地焚烧。

总而言之,发展低碳农业是武安市农业生产的方向与目标,农田生态系统应该从减源增汇的角度出发,转变追求高产高效的农业生产理念,提倡生态

和低碳的环境友好型农业建设。合理进行农业投入以提高作物生产力,调整农作物种植结构,改善化肥施用条件,改变传统施肥方法,调整耕作模式、灌溉制度、秸秆等废弃物处置方式等,从而促进农田生态系统良性循环。

参考文献:

- [1] Paustian K, Andren O, Janzen H, *et al.* Agricultural soil as a C sink to offset CO₂ emission[J]. *Soil Use and Management*, 1997, 13(4): 230-244.
- [2] 张秀梅, 李升峰, 黄贤金, 等. 江苏省 1996 年至 2007 年碳排放效应及时空格局分析[J]. *资源科学*, 2010, 32(4): 768-774.
- [3] 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, 11.
- [4] 祁兴芬. 低碳背景下德州市农田生态系统碳源汇变化及其影响因素分析[J]. *农业现代化研究*, 2012, 33(2): 253-256.
- [5] 卢娜曲, 福田, 冯淑怡. 中国农田生态系统碳净吸收重心移动及其原因[J]. *中国人口·资源与环境*, 2011, 21(5): 119-125.
- [6] 赵荣钦, 黄贤金, 彭补拙. 南京城市系统碳循环与碳平衡分析[J]. *地理学报*, 2012, 67(6): 758-770.
- [7] 李宇, 王喆, 王菲, 等. 城市碳排放的评估方法——影响要素和过程研究[J]. *自然资源学报*, 2013, 28(9): 1637-1648.
- [8] 罗怀良. 川中丘陵地区近 55 年来农田生态系统植被碳储量动态研究——以四川省盐亭县为例[J]. *自然资源学报*, 2009, 24(2): 251-258.
- [9] 王萍. 森林碳循环模型概述[J]. *应用生态学报*, 2009, 20(6): 1505-1510.
- [10] 朱建刚, 余新晓, 张振明, 等. 森林生态系统碳循环动态仿真系统的设计[J]. *应用生态学报*, 2009, 20(11): 2603-2609.
- [11] 齐玉春, 董云社, 耿元波, 等. 我国草地生态系统碳循环研究进展[J]. *地理科学进展*, 2003, 22(4): 342-352.
- [12] 陈晓鹏, 尚占环. 中国草地生态系统碳循环研究进展[J]. *中国草地学报*, 2011, 33(4): 99-110.
- [13] 殷建平, 王友绍, 徐继荣, 等. 海洋碳循环研究进展[J]. *生态学报*, 2006, 26(2): 566-575.
- [14] 徐永福, 浦一芬, 赵亮. 海洋碳循环模式的研究进展[J]. *地球科学进展*, 2005, 20(10): 1106-1115.
- [15] 位贺杰, 张艳芳, 朱妮, 等. 陕西省关中地区农田生态系统碳源/汇估算[J]. *水土保持通报*, 2014, 34(3): 121-125.
- [16] 赵荣钦, 刘英, 丁明磊, 等. 河南省农田生态系统碳源/汇研究[J]. *河南农业科学*, 2010(5): 40-44.
- [17] 周陶, 高明, 谢德, 等. 重庆市农田系统碳源/汇特征及碳足迹分析[J]. *西南大学学报: 自然科学版*, 2014, 36(1): 96-102.
- [18] 张京京. 河北省农田生态系统碳循环时空变化及其效益研究[D]. 石家庄: 河北科技大学, 2012.
- [19] 李波, 张俊飏, 李海鹏. 中国农业碳排放与经济发展的实证研究[J]. *干旱区资源与环境*, 2011, 25(12): 8-13.
- [20] 刘允芬, 欧阳华, 张宪洲, 等. 青藏高原农田生态系统碳平衡[J]. *土壤学报*, 2002, 39(5): 636-642.
- [21] 张大东, 张杜梅, 黄伟. 浙江省农业生态系统碳源、碳汇现状评估分析[J]. *中国农业资源与区划*, 2012, 33(5): 12-19.
- [22] 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.
- [23] 王静, 冯永忠, 杨改河, 等. 山西农田生态系统碳源/汇时空差异分析[J]. *西北农林科技大学学报: 自然科学版*, 2010, 38(1): 195-200.
- [24] 刘恒新, 李斯华, 何进. 美国低碳农业机械化技术发展及对中国的启示[J]. *世界农业*, 2012(6): 7-11.
- [25] 孟庆佳. 河北省农业机械化发展水平研究[D]. 保定: 河北农业大学, 2011.
- [26] 武增强, 刘燕. 武安市生态水系工程建设探析[J]. *河北水利*, 2010(6): 24-25.
- [27] 徐方军, 王兰英. 美国 2000 年取水情况及历史变化分析[J]. *水利发展研究*, 2005, 10(1): 76-77.
- [28] 马洪儒, 张运真. 生物质秸秆发电技术研究进展与分析[J]. *水利电力机械*, 2006, 28(12): 9-13.
- [29] 肖玲, 赵先贵, 栾建伟. 甘肃省 2000—2009 年碳循环研究[J]. *地域研究与开发*, 2012, 31(5): 122-126.
- [30] 孙启祥. 从生命周期角度评估木材的环境友好性[J]. *安徽农业大学学报*, 2001, 28(2): 170-175.
- [31] 李克让. 土地利用变化和温室气体净排放与陆地生态系统碳循环[M]. 北京: 气象出版社, 2000: 250.
- [32] 王戎, 黄耀, 张稳, 等. 中国农业植被净初级生产力模拟(II)——模型的验证与净初级生产力估算[J]. *自然资源学报*, 2006, 21(6): 916-925.
- [33] 张福春, 朱志辉. 中国作物的收获指数[J]. *中国农业科学*, 1990, 23(2): 83-87.
- [34] 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.
- [35] 伍芬琳, 李琳, 张海林, 等. 保护性耕作对农田生态系统净碳释放量的影响[J]. *生态学杂志*, 2007, 26(12): 2035-2039.
- [36] 唐海明, 汤文光, 肖小平, 等. 中国农田固碳减排发展现状及其战略对策[J]. *生态环境学报*, 2010, 19(7): 1755-1759.
- [37] 赵荣钦. 农田生态系统碳源/汇的时空差异及增汇技术研究——以中国沿海地区为例[D]. 开封: 河南大学, 2004.