

伊犁河谷农田生态系统生产力水平对碳源汇的影响

郝维维¹, 苏丽丽¹, 徐文修¹, 王娜², 赵国军², 李亚杰¹

(1. 新疆农业大学 农学院, 新疆 乌鲁木齐 830052; 2. 伊宁县农业技术推广中心, 新疆 伊宁 835100)

摘要: [目的] 分析伊犁河谷农田生态系统碳源汇的变化趋势及农田生态系统碳源汇的影响因素, 为农业产业结构调整 and 农业生产固碳减排提供科学依据。[方法] 以 2004—2013 年伊犁河谷农作物产量、播种面积、农业投入等相关统计数据为依据, 采用碳转化系数的方法对伊犁河谷农田生态系统主要碳源汇进行测算。[结果] (1) 近 10 a 来, 伊犁河谷农田生态系统碳吸收总量由 2004 年的 2.32×10^6 t 升到 2013 年的 4.48×10^6 t, 平均增长率为 7.57%, 单位播种面积碳吸收量也由 2004 年的 7.54 t/hm² 上升到 2013 年 9.27 t/hm², 提高了 0.23 倍。碳吸收量与水稻、小麦、玉米、蔬菜总产量呈极显著相关与胡麻总产量呈显著负相关。(2) 碳排放总量由 2004 年的 2.24×10^5 t 增加到 2013 年的 4.02×10^5 t, 10 a 间增加了 0.80 倍。对农田生态系统碳排放总量贡献最大的因素为柴油和化肥投入。(3) 近 10 a 间, 净碳吸收总量由 2004 年的 2.10×10^6 t 增至 2013 年的 4.07×10^6 t, 单位播种面积净碳吸收量由 2004 年的 6.81 t/hm² 上升至 2013 年的 8.44 t/hm², 年均增速 2.41%。[结论] 在伊犁河谷农业生产的高投入、高产出的模式下, 其农田生态系统表现为碳汇系统。

关键词: 伊犁河谷; 农田生态系统; 生产力水平; 碳吸收; 碳排放; 碳汇

文献标识码: A

文章编号: 1000-288X(2016)05-0288-06

中图分类号: S181

文献参数: 郝维维, 苏丽丽, 徐文修, 等. 伊犁河谷农田生态系统生产力水平对碳源汇的影响[J]. 水土保持通报, 2016, 36(5): 288-293. DOI:10.13961/j.cnki.stbctb.2016.05.053

Impacts of Farmland Ecosystem Productivity Level on Carbon Source and Sink in Iri Valley

HAO Weiwei¹, SU Lili¹, XU Wenxiu¹, WANG Na², ZHAO Guojun², LI Yajie¹

(1. College of Agronomy, Xinjiang Agriculture University, Urumqi, Xinjiang Uygur Autonomous Region 830052, China; 2. Yining Agriculture Technology and Popularization Center, Yining, Xinjiang Uygur Autonomous Region 835100, China)

Abstract: [Objective] This study is to analyze the carbon source and sink variation of agriculture ecosystem and its driving factors in Iri Valley in order to provide the scientific basis for agricultural structure adjustment and agricultural production of carbon emissions. [Methods] Based on the statistical data of crop yield, planting area, agriculture inputs in the period from 2004 to 2013, the carbon coefficient, the amounts of carbon source and sink of agriculture ecosystem in Iri Valley were calculated. [Results] (1) The total carbon absorption was increased from 2.32×10^6 t in 2004 to 4.48×10^6 t in 2013 with a rate of 7.57% each year. Carbon absorption per unit of sowing area was increased from 7.54 t/hm² in 2004 to 9.27 t/hm² in 2013 with the times of 0.23. The correlation analysis results showed that carbon absorption had significantly positive correlations with the yields of rice, wheat, corn and vegetables, while significantly negative correlation with the yield of linseed. (2) The total carbon emission was increased from 2.24×10^5 t in 2004 to 4.02×10^5 t in 2013, which increased by 0.80 times during the past 10 years. Diesel and fertilizer inputs were the most important factors that influenced carbon emission. (3) The net carbon absorption was increased from 2.10×10^6 t in 2004 to 4.07×10^6 t in 2013, and net carbon absorption per unit of sowing area was increased from 6.81 t/hm² in 2004 to 8.44 t/hm² in 2013 with a increasing rate of 2.41% each year. [Conclusion] With the high input and output model, the agriculture ecosys-

收稿日期: 2015-11-20

修回日期: 2016-01-08

资助项目: 国家自然科学基金项目“新疆干旱绿洲复播大豆高产低碳技术体系及机理研究”(31560372); 新疆维吾尔自治区科技特派员项目“伊宁县复播大豆高产栽培关键技术与示范”

第一作者: 郝维维(1990—), 女(汉族), 河北省定兴县人, 硕士研究生, 研究方向为种植制度与优化设计。E-mail: 775838053@qq.com。

通讯作者: 徐文修(1962—), 女(汉族), 河北省蠡县人, 博士, 教授, 博士生导师, 研究方向为耕作制度与农业生态。E-mail: xjwxw@sina.com。

tem in Iri Valley showed as a carbon sink.

Keywords: Iri Valley; agriculture ecosystem; productivity level; carbon absorption; carbon emission; carbon sink

气候变暖是全球环境变化的重要问题。温室气体的排放,尤其是CO₂浓度的快速增加,是导致全球变暖的主要原因之一。农田生态系统是陆地生态系统的重要组成部分,是重要的大气碳源和碳汇。Bouwman^[1]研究表明,大气中20%的CO₂,90%的CH₄,70%的NO₂来自于农业活动及其相关的过程,Cole^[2]研究表明,未来50~100 a,全球农田可固定碳20~30 Pg。因此,对农田生态系统碳吸收和碳排放的研究显得尤为重要。

刘荣、赵荣钦等^[3-4]对中国沿海地区农田生态系统部分碳源/汇时空差异以及河南省农田生态系统碳源/汇进行了分析。袁再建等^[5]研究了河北地区农田生态系统碳源汇。位贺杰等^[6]对山西省关中地区农田生态系统碳源/汇进行研究,结果表明沿海及内陆地区农田生态系统均呈现固碳效应。但是,目前对于干旱半干旱地区的农田生态系统碳吸收、碳排放的分析还较为欠缺。伊犁河谷隶属新疆干旱半干旱地区,是新疆最湿润的地区,也是新疆重要的农业大区,在新疆种植业生产中占有重要地位。因此本研究拟以伊犁河谷为例,通过对农田生态系统的碳吸收量与碳排放的测算,揭示伊犁河谷农田生态系统碳源汇的变化特征,以期为伊犁河谷农业产业结构调整 and 农业生产固碳减排提供科学依据。

1 研究区概况

伊犁河谷地处42°14'—45°50'N,80°09'—84°56'E,位于新疆天山北坡西部山区。属温带,年平均气温10.4℃,年日照时数2 870 h,年平均降水量417.6 mm,是新疆最湿润的地区。该区总耕地面积为5.65×10⁵ hm²,以秋耕翻肥为主,春季翻耕为辅,一般施用磷酸二铵225~375 kg/hm²,尿素225~450 kg/hm²,硫酸钾肥45~75 kg/hm²。土壤类型为灰钙土、栗钙土和黑钙土,研究区栽培小麦、玉米、水稻、豆类、薯类等粮食作物,以及棉花、油料、甜菜等经济作物。其中小麦居于生产首位,大约占粮食总产量的32.81%,经济作物中以甜菜和油料作物为主。

2 材料与方法

2.1 数据来源

2004—2013年伊犁河谷各县市主要农作物播种面积、农作物产量、农用柴油使用量、农药使用量、灌溉面

积等数据,均来自历年《伊犁哈萨克自治州统计年鉴》^[7]。

2.2 研究方法

农田生态系统是受人为控制的能量输入和输出的复杂系统,涉及到多种物质循环和迁移^[8-9]。因此本研究碳排放主要从不同的碳排放途径,结合国内外碳转化系数进行估算^[10-13];碳吸收主要依据主要农作物产量、经济系数、碳吸收率进行测算。

2.2.1 碳排放的估算 农田生态系统碳排放的主要来源是化肥、农药、农膜、使用农业机械消耗的柴油(简称为柴油)、新疆依靠电能进行提水灌溉(简称为灌溉)。本文中碳排放的公式如下:

$$E_t = E_f + E_e + E_p + E_m + E_i \quad (1)$$

式中: E_t ——农田生态系统总碳排放(kg); E_f ——农业化肥的施用造成的碳排放(kg); E_e ——农膜使用带来的碳排放量(5.18 kg,以C含量计); E_p ——农药使用带来的碳排放量(4.934 1 kg,以C含量计); E_m ——灌溉带来的碳排放量(25 kg/hm²,以C含量计); E_i ——柴油使用带来的碳排放量(3.32 kg,以C含量计)。

$$E_f = G_f \times A = (G_{\text{氮肥}} \times A_{\text{氮肥}}) + (G_{\text{磷肥}} \times A_{\text{磷肥}}) + (G_{\text{钾肥}} \times A_{\text{钾肥}}) \quad (2)$$

式中: G_f ——化肥的使用量(kg/hm²); A ——施用化肥的碳排转化系数,氮、磷、钾肥的碳转化系数以C含量表示,分别是4.96,1.14和0.66 kg/kg。

2.2.2 碳吸收的估算 农田生态系统中农作物全生育期对碳的吸收量(C_t):

$$C_t = \sum_{i=1}^n C_d = \sum_{i=1}^n C_f D_w = \sum_{i=1}^n C_f Y_w / H \quad (3)$$

式中: C_t —— i 类作物全生育期的碳吸收量(kg); C_f —— i 类作物合成有机质所需要吸收的碳(kg/kg,以C含量计); D_w ——第 i 类作物生物产量(kg); Y_w —— i 类作物的经济产量(kg); H —— i 类作物的经济系数^[14-15], (见表1)。

2.2.3 农田生态系统净碳吸收量的估算方法 农田生态系统的净碳吸收量(N_c)是指农作物生育期的碳吸收量与农业投入带来的碳排放量的差值^[13]。

$$N_c = C_t - E_t \quad (4)$$

$$N_u = N_c / S_a \quad (5)$$

式中:当 $N_c > 0$,农田生态系统为固碳(碳汇), $N_c < 0$ 时,此系统为排碳(碳源); N_u ——单位播种面积净碳吸收量(t/hm²); S_a ——农作物总播种面积(hm²)。

表 1 中国主要农作物的碳吸收率(C_f)和经济系数(H)

作物	水稻	小麦	玉米	棉花	豆类	薯类	油菜	胡麻	葵花	甜菜	蔬菜	瓜类	其他
H	0.45	0.40	0.40	0.10	0.35	0.65	0.25	0.25	0.30	0.70	9.50	1.75	0.40
C_f	0.410 0	0.485 3	0.470 9	0.450 0	0.450 0	0.422 6	0.450 0	0.450 0	0.450 0	0.407 2	0.450 0	0.450 0	0.450 0

3 结果与分析

3.1 伊犁河谷农田生态系统碳吸收特征分析

3.1.1 伊犁河谷碳吸收量变化趋势分析 作物产量的高低决定了农田生态系统碳吸收量的大小。由图 1 可知,除 2008 年外,2004—2013 年伊犁河谷农田碳吸收总量呈现逐年上升的趋势。碳吸收总量由 2004 年的 2.32×10^6 t 升到 2013 年 4.48×10^6 t,年平均增长率为 7.57%,这说明随着年份递进,农作物总产量不断增加,使得伊犁河谷农田生态系统固碳量也呈现逐年上升的趋势。由于伊犁河谷农作物播种面积从 2004 年的 3.08×10^5 hm^2 增加到 2013 年的 4.83×10^5 hm^2 ,增加了 0.93 倍,因此有必要分析单位播种面积碳吸收量,以反映近年来作物生产力的变化趋势。伊犁河谷单位播种面积碳吸收量也由 2004 年的 $7.54 \text{ t}/\text{hm}^2$ 上升到 2013 年 $9.27 \text{ t}/\text{hm}^2$,提高了 0.23 倍。表明随着伊犁河谷农业发展,作物单产水平不断提高,从而使得单位播种面积生物量的碳吸收量不断增加,最终农田碳吸收总量也不断提高。

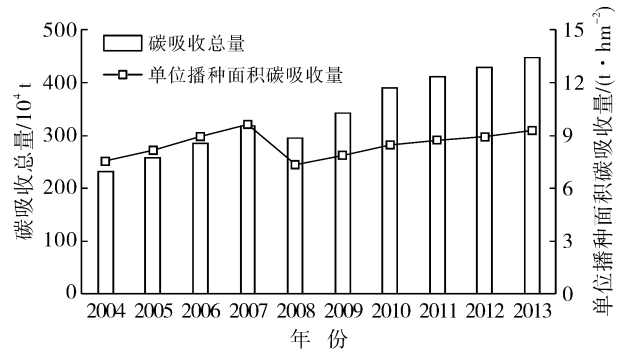


图 1 2004—2013 年伊犁河谷农田碳吸收总量及单位播种面积碳吸收量

3.1.2 农田生态系统各种农作物单位面积生物量的碳吸收量分析 不同作物单位面积生产力水平不同,其对生态系统碳吸收量的贡献也不相同。进一步分析伊犁河谷近 10 a 各作物单位面积生物量的碳吸收量(表 2)可知,各类作物中每年均以甜菜的单位面积生物量的碳吸收量最高,年均碳吸收量达 $35.39 \text{ t}/\text{hm}^2$ 。其次是薯类,年均为 $21.24 \text{ t}/\text{hm}^2$,单位面积生物量的碳吸收量最低的是蔬菜,年均碳吸收量仅为 $2.12 \text{ t}/\text{hm}^2$,只有甜菜的 6.00%。

表 2 伊犁河谷 2004—2013 年各类农作物单位面积生物量的碳吸收量

t/hm^2

年份	水稻	小麦	玉米	棉花	豆类	薯类	油菜	胡麻	葵花	甜菜	蔬菜	瓜类	其他
2004	7.89	5.15	12.48	4.79	3.80	21.14	2.89	2.62	3.56	31.67	1.86	8.66	8.66
2005	8.06	5.61	12.66	5.27	3.74	20.09	3.11	4.16	8.01	34.52	2.03	11.15	17.70
2006	8.19	5.73	12.56	5.27	3.65	20.93	3.21	2.46	3.33	34.57	2.11	11.44	12.00
2007	8.72	5.90	13.24	5.33	3.70	20.80	3.83	2.40	3.47	35.60	2.12	11.44	10.97
2008	8.06	4.26	12.13	4.66	3.63	20.08	2.73	1.89	3.49	35.77	2.08	12.07	7.44
2009	8.04	6.53	13.33	5.13	3.65	22.69	4.19	2.67	3.44	35.50	2.16	11.32	8.51
2010	8.41	6.48	13.53	5.06	3.68	21.05	4.16	2.51	3.56	35.16	2.15	10.77	7.12
2011	8.49	6.84	13.86	5.13	3.43	21.86	4.48	2.75	3.78	36.45	2.20	12.23	10.53
2012	8.60	6.52	13.95	5.40	3.34	21.60	4.27	2.70	3.62	37.49	2.27	11.73	9.21
2013	8.51	6.99	14.36	5.74	3.36	22.12	4.94	3.08	3.96	37.13	2.27	11.09	14.65

注:薯类折粮系数为 5:1。

3.2 伊犁河谷农田生态系统碳排放及其特征分析

3.2.1 伊犁河谷碳排放量变化趋势分析 物质投入量的大小决定了农田生态系统碳排放量的高低。由图 2 可知,除 2008 年外,伊犁河谷农业生态系统的碳排放总量基本呈持续上升趋势,由 2004 年的 2.24×10^5 t 增加到 2013 年的 4.02×10^5 t,这说明随着时间的推移,伊犁河谷农田生态系统的化肥、农药、农膜等

物质投入不断增加。

进一步分析伊犁河谷农田生态系统单位播种面积碳排放量可知(图 2),与碳排放总量变化趋势不同,单位播种面积的碳排放量基本呈现出相对稳定的态势。由此说明,尽管伊犁河谷农田生态系统的碳排放总量呈增加趋势,但是随着近年伊犁河谷播种面积的不断增长,以及滴灌技术、配方施肥等技术的应用,

使得单位播种面积的物质投入量并没有大幅度提高,因此,使得单位播种面积的排碳量仍保持着相对稳定的发展态势。

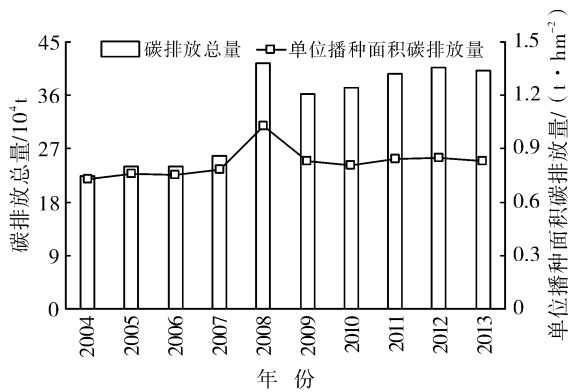


图 2 2004—2013 年伊犁河谷农田生态系统碳排放总量与单位播种面积碳排放量

3.2.2 农田生态系统主要碳排放途径的分析 10 a 来随着农业的发展,伊犁河谷农业生产集约化水平也不断提高,表现为农田生态系统的物质投入不断增加,从而使碳排放总量基本呈持续上升的变化趋势(表 3)。10 a 来化肥、农膜、柴油、灌溉、农药碳排放量年均增速分别为 7.20%,6.87%,6.47%,4.29%和 1.35%。从伊犁河谷农田生态系统碳排放的主要途径来看,柴油与化肥是引起农田系统碳排放的主要因素,二者碳排放总量之和均超过农田生态系统总碳排放量的 90%以上,尤其是自 2007 年之后柴油、化肥、农膜的投入增多,表明伊犁河谷农田生态系统近年的机械化水平和化学化水平呈持续增加态势促进了农田生态系统的碳排放总量的增加。

表 3 2004—2013 年伊犁河谷主要物质投入碳排放量

年份	碳排放量/10 ⁴ t					总计
	化肥	柴油	农膜	灌溉	农药	
2004	10.21	10.44	0.90	0.58	0.28	22.40
2005	11.21	10.87	1.03	0.58	0.30	23.99
2006	11.09	10.79	1.22	0.58	0.29	23.97
2007	12.37	11.20	1.25	0.61	0.33	25.75
2008	14.43	24.13	1.83	0.62	0.31	41.33
2009	16.24	16.75	2.19	0.68	0.29	36.16
2010	16.48	17.80	1.95	0.74	0.31	37.28
2011	18.25	18.45	1.84	0.78	0.31	39.63
2012	18.91	18.79	1.90	0.82	0.31	40.74
2013	19.08	18.36	1.63	0.84	0.31	40.21

进一步对伊犁河谷农田生态系统碳排放量与主要碳排放途径进行相关性分析,结果表明,碳排放量

与柴油、化肥、农膜、灌溉、农药的相关系数分别为 0.948,0.913,0.878,0.809,0.443,碳排放与柴油和化肥有显著的相关性($p < 0.01$)。由此可见,能源的消耗使用是影响农田生态系统碳排放的主要原因,所以在柴油和化肥投入量持续增加的情况下,需要提高机械使用率和肥料利用率,通过免耕或更新农业机械,采用先进的节油技术,对农田进行测土配方施肥,增施有机肥,达到降低伊犁河谷农田生态系统物质投入,进而降低碳排放的目的^[16-19]。

3.3 伊犁河谷农田生态系统碳源汇特征分析

3.3.1 伊犁河谷农田生态系统碳源汇变化趋势分析

由 2004—2013 年伊犁河谷农田生态系统净碳吸收总量与单位播种面积净碳吸收量可知(图 3),伊犁河谷农田生态系统的净碳吸收总量与单位播种面积净碳吸收量均呈正值,且基本上均呈现持续增加趋势。净碳吸收总量由 2004 年的 2.10×10^6 t 增至 2013 年的 4.07×10^6 t,增加了 0.94 倍,单位播种面积净碳吸收量由 2004 年的 6.81 t/hm^2 上升至 2013 年的 8.44 t/hm^2 ,年均增速 2.41%,表明伊犁河谷农田生态系统物质投入水平不断提高也促进了作物生产力水平的不断提高,使得农田生态系统固碳能力高于碳排放,最终表现为碳汇,也进一步说明农业现代化水平的不断提高,更有利于农田生态系统的碳吸收。

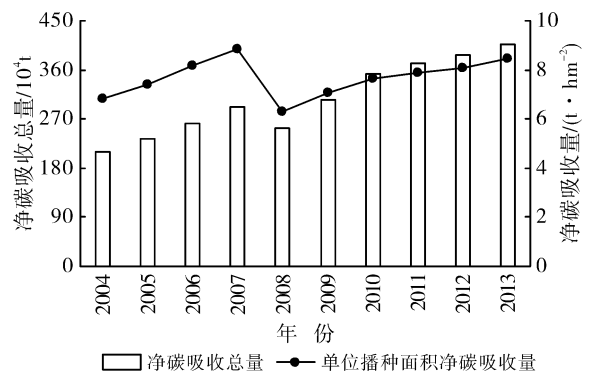


图 3 2004—2013 年伊犁河谷农田生态系统净碳吸收总量与单位播种面积净碳吸收量

3.3.2 农田生态系统碳排放、碳吸收总量与净碳吸收总量的相关性分析

由图 4 可知,10 a 来,伊犁河谷农田生态系统历年的碳吸收总量远高于碳排放总量,其年均的碳吸收总量是年均碳排放总量的 9.69 倍。由此说明,伊犁河谷农田生态系统是巨大的固碳系统,且固碳能力逐年提高。而农田生态系统中净碳吸收量与碳吸收量和碳排放量的相关性系数分别为 0.998,0.751,显著性水平为 0.01,相关回归方程为 $y = 0.9151x - 4.2055$,表明净碳吸收总量与碳吸收总量显著相关。

进一步对农田生态系统碳吸收总量和作物总产量的相关性分析(表 4),系统碳吸收总量与小麦、玉米、水稻、蔬菜的总产量有极显著性正相关($p < 0.01$),与胡麻产量有极显著性负相关($p < 0.01$)。这可能是由于胡麻单位面积生物量较少,其碳吸收总量较低所致。因此在满足胡麻需求量持续增加的趋势下,需要从增强作物生产和优化种植结构角度出发,通过提升肥料利用率以提高作物单位面积产量,并通过适当配置绿肥作物以提高作物固碳量,从而达到保持或提高农田生态系统碳吸收能力的目的^[20-21]。

表 4 农田生态系统碳吸收总量与作物总产量的相关性分析

农作物	水稻	小麦	玉米	豆类	薯类	棉花	油菜	葵花	甜菜	蔬菜	其他	胡麻	瓜类
相关系数	0.965**	0.933**	0.911**	-0.303	-0.581	0.340	0.698*	0.310	-0.138	0.905**	0.318	-0.853**	0.548

注: * 显著性水平为 0.01, 即 $p < 0.01$ 。

4 讨论与结论

罗海秀等^[22]对重庆市农田生态系统的研究表明,农田生态系统具有较稳定的碳汇能力。钱晓雍等^[9]对上海农田生态系统碳源汇研究结果表明,碳吸收量逐渐下降,碳排放量也出现下降且趋于稳定。杨浩然等^[23]对潍坊市农田生态系统碳源汇的研究表明,碳吸收量小于碳排放量,但碳吸收的增长速率高于碳排放速率,因此有较高的固碳潜力。本研究表明,伊犁河谷农田生态系统为强大的碳汇系统,且随着生产力水平不断提高,农田碳汇能力不断增强。这也说明各地农业发展水平不同,所处环境条件不同,农田生态系统的固碳水平也不尽相同。

(1) 本文研究了伊犁河谷农田生态系统生产力水平对碳源汇的影响,结果表明:2004—2013 年伊犁河谷农田生态系统碳吸收总量逐年上升,碳排放总量也在不断增加,但是年均的碳吸收总量为碳排放总量的 9.69 倍。充分说明,随着农业现代化的发展、农田生产力水平的提高以及大量的物质投入,农田生态系统反而表现出较强的固碳能力。

(2) 农田生态系统碳源汇影响因素分析表明,化肥与柴油在碳排放中起主导作用。因此,我们应该从伊犁河谷农业减源增汇的角度出发,通过测土配方施肥,增施有机肥、绿肥,减少化肥的施用量以及采用少耕、免耕或机械更新等措施降低柴油的使用量,从优化种植结构,注重低碳农业技术的推广应用,提高作物生产力,减少温室气体的排放,进而达到固碳减排的目标。

随着农业科技水平的进步,虽然大量的物质投入

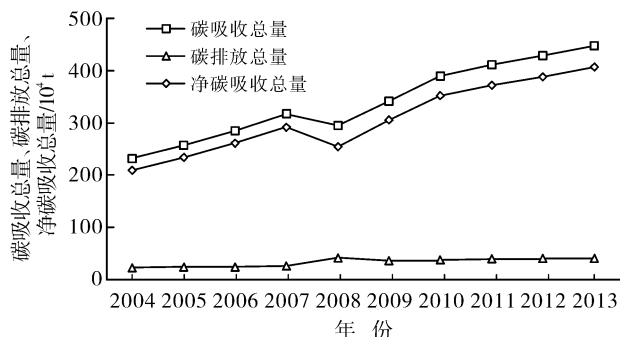


图 4 2004—2013 年伊犁河谷农田生态系统碳排放总量、碳吸收总量与净碳吸收总量随时间分布

导致农田生态系统排碳量的增加,但也正是由于农田生产活动中的高投入促使农作物产量得到大幅提高,增加了农作物的固碳量,反而使得碳吸收量高于碳排放量。因此,在高投入、高产出的农业生产活动模式下,农田生态系统表现为碳汇。

[参 考 文 献]

- [1] Bouwman A F. Soil and the greenhouse effect[M]. Chichester, England: John Wiley & Sons, 1990:78.
- [2] Cole. Agricultural options for mitigation of greenhouse gas emission[M]. Cambridge: Cambridge University Press, 1996.
- [3] 刘英,赵荣钦,焦士兴. 河南省土地利用碳源/汇及其变化分析[J]. 水土保持研究, 2010, 17(5):154-157.
- [4] 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.
- [5] 袁再健,张京京,付亚男. 河北省农田生态系统碳源/汇时空变化及其影响因素[J]. 水土保持通报, 2012, 32(6):206-210.
- [6] 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.
- [7] 伊犁哈萨克自治州统计局. 伊犁哈萨克自治州统计年鉴 2004—2014[M]. 伊犁哈萨克自治州统计局, 2004-2014.
- [8] 牛海生,李大平,张娜,等. 不同灌溉方式冬小麦农田生态系统碳平衡研究[J]. 生态环境学报, 2014, 23(5):749-755.
- [9] 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.
- [10] 苏洋,马惠兰,颜璐. 新疆农地利用碳排放时空差异及驱动机理研究[J]. 干旱区地理, 2013(6):1162-1169.

- [11] 刘巽浩,徐文修,李增嘉,等. 农田生态系统碳足迹: 误区。改进与应用: 兼析中国集约农作碳效率[J]. 中国农业资源与区划, 2013, 34(6): 1-11.
- [12] 朱亚红,马燕玲,陈秉谱. 甘肃省农地利用碳排放测算及影响因素研究[J]. 农业现代化研究, 2014, 35(2): 248-252.
- [13] 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 & Environment*, 2002, 91(1): 217-232.
- [14] 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: 260-261.
- [15] 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.
- [16] 贺祥,顾欣,杨宗周. 黔东南地区气候变化对能源消费碳排放的响应[J]. 绿色科技, 2014(1): 3-6.
- [17] 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, 237.
- [18] 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.
- [19] 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.
- [20] 崔红艳,许维成,孙毓民,等. 有机肥对胡麻产量和品质的影响[J]. 核农学报, 2014, 28(3): 518-525.
- [21] 邵锋祥,屈小娥,席瑶. 陕西省碳排放环境库兹涅茨曲线及影响因素: 基于 1978—2008 年的实证分析[J]. 干旱区资源与环境, 2012, 26(8): 37-43.
- [22] 罗海秀,王龙昌. 基于 ArcGIS 的重庆市农田生态系统碳源/汇特征研究[J]. 西南师范大学学报: 自然科学版, 2015, 40(3): 91-97.
- [23] 杨皓然,宋戈,杨光,等. 潍坊市农田生态系统碳源(碳汇)及其碳足迹变化[J]. 湖南农业大学学报: 自然科学版, 2015, 41(1): 82-88.

(上接第 282 页)

- [19] 鲍土旦. 土壤农化分析[M]. 3 版. 北京: 中国农业出版社, 2007.
- [20] 国家环境保护总局. 水和废水监测分析方法[M]. 4 版. 北京: 中国环境科学出版社, 2002.
- [21] 国家环境保护总局. (GB3838-2002)地表水环境质量标准[S]. 北京: 中国环境科学出版社, 2002.
- [22] 王冠星,同学东,张凡,等. 青藏高原路侧土壤重金属含量分布规律及影响因素研究[J]. 环境科学学报, 2014, 34(2): 431-438.
- [23] 雷凌明,喻大松,陈玉鹏,等. 陕西泾惠渠灌区土壤重金属空间分布特征及来源[J]. 农业工程学报, 2014, 30(6): 88-96.

(上接第 287 页)

- [9] 郭存芝,罗琳琳,叶明. 资源型城市可持续发展影响因素的实证分析[J]. 中国人口·资源与环境, 2014, 24(8): 81-89.
- [10] 陶晓燕. 资源枯竭型城市生态安全评价及趋势分析[J]. 干旱区资源与环境, 2014, 28(2): 53-59.
- [11] 马文明,卞正富. 基于 RS 的平顶山土地利用动态变化研究[J]. 测绘科学, 2007, 32(6): 176-178.
- [12] 王亮,宋周莺,余金艳,等. 资源型城市产业转型战略研究: 以克拉玛依为例[J]. 经济地理, 2011, 31(8): 1278-1282.
- [13] 朱琳,卞正富,朱环. 资源枯竭型城市转型期土地利用与城市发展耦合关系分析[J]. 城市土地, 2013, 54(6): 54-59.
- [14] 冯思静,姜滢,张新联. 辽西北半干旱区煤炭资源型城市环境容量评价[J]. 水土保持通报, 2013, 33(4): 18-25.
- [15] 任海,彭少麟. 恢复生态学导论[M]. 北京: 科学出版社, 2001: 107-121.
- [16] 阿里木江. 卡斯木,安瓦尔·买买提明,王晓峰. 新疆克拉玛依市产业结构调整对策研究[J]. 新疆师范大学学报: 自然科学版, 2009, 28(1): 78-82.
- [17] Risser P G, Iverson L R. 30 years later—landscape ecology: Directions and approaches [J]. *Landscape Ecology*, 2013, 28(3): 367-369.
- [18] 陈文波,肖笃宁,李秀珍. 景观空间分析的特征和主要内容[J]. 生态学报, 2002, 22(7): 1135-1142.
- [19] Hassett E M, Stehman S V, Wickham J D. Estimating landscape pattern metrics from a sample of land cover [J]. *Landscape Ecology*, 2012, 27(1): 133-149.
- [20] 张明阳,王克林,刘会玉,等. 白洋淀流域景观空间格局随高程分异研究[J]. 干旱区资源与环境, 2005, 19(4): 75-81.
- [21] Shao Guofa, Wu Jianguo. On the accuracy of landscape pattern analysis using remote sensing data [J]. *Landscape Ecology*, 2008, 23(5): 505-511.
- [22] 减淑英,倪宏伟,李艳红. 资源型城市土地利用变化与湿地生态安全响应: 以黑龙江省大庆市为例[J]. 地理科学进展, 2004, 23(5): 34-42.