

近 20 年新疆农田生态系统碳足迹时空变化

王敬哲^{1,2}, 刘志辉^{1,2,3,4}, 张 波⁵

(1. 新疆大学资源与环境科学学院, 新疆 乌鲁木齐 830046; 2. 新疆大学绿洲生态教育部部共建重点实验室, 新疆 乌鲁木齐 830046;
3. 新疆大学干旱生态环境研究所, 新疆 乌鲁木齐 830046; 4. 干旱半干旱区可持续发展国际研究中心, 新疆 乌鲁木齐 830046;
5. 新疆环境保护科学研究院, 新疆 环境污染监控与风险预警重点实验室, 新疆 乌鲁木齐 830011)

摘 要: 利用 1994—2013 年新疆农田生产投入和农作物产量等数据, 采用碳排放系数法估算了新疆农田生态系统的碳排放量、碳吸收量及碳足迹的变化动态以及在各县市的空间分布特征。结果表明: 新疆农田生态系统的碳排放量从 1994 年的 179.46 万 t 增长到 2013 年的 474.15 万 t; 不同年份农业碳排放均主要源于化肥使用量的增加和不科学的灌溉方式, 其最大贡献率分别为 40.02% 和 41.56%; 农田生态系统的碳吸收量 20 年间增加了 2185.04 万 t, 棉花对新疆农田生态系统的碳吸收量贡献最大, 多年平均贡献率达 47%; 新疆农田生态系统的碳排放量、碳吸收量区域主要集中在南疆的县市并呈现出沿天山对称的趋势; 1994—2013 年, 农田生态系统碳足迹呈现快速增长态势, 从 1994 年的 $2\,732.63 \times 10^4 \text{ C} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ 增加至 2013 年的 $4\,474.89 \times 10^4 \text{ C} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$, 碳足迹增加了 $283.59 \times 10^4 \text{ C} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$, 表明新疆农田生态系统存在碳生态盈余的现象, 种植结构生态效益指数大于 1 的年份为 11 个, 种植结构的调整迫在眉睫。

关键词: 农田生态系统; 碳足迹; 碳排放; 碳吸收; 时空变化
中图分类号: S181.3 **文献标志码:** A

Temporal and spatial differences in carbon footprint of regional farmland ecosystem in Xinjiang during recent 20 years

WANG Jing-zhe^{1,2}, LIU Zhi-hui^{1,2,3,4}, ZHANG Bo⁵

(1. School of Resources and Environment Science, Xinjiang University, Urumqi, Xinjiang 830046, China;
2. Key Laboratory of Oasis Ecology Ministry of Education, Xinjiang University, Urumqi, Xinjiang 830046, China;
3. Institute of Arid Ecology and Environment, Xinjiang University, Urumqi, Xinjiang 830046, China;
4. International Center for Desert Affairs – Research on Sustainable Development in Arid and Semi-arid Lands, Urumqi, Xinjiang 830046, China; 5. Xinjiang Key Laboratory for Environmental Pollution Monitoring and Risk Warning, Xinjiang Academy of Environmental Protection Science, Urumqi, Xinjiang 830011, China)

Abstract: Statistic data on investment in farmland production and yield in Xinjiang from 1994 to 2013 were collected, and the carbon emissions coefficient method was employed to estimate the carbon emissions and absorptions of farmland ecosystems and carbon footprints in Xinjiang and their distribution in counties and cities. The results showed that the carbon emissions of farmland ecosystem in Xinjiang were increased from 1.7946 million tons in 1994 to 4.7415 million tons in 2013. Carbon emissions were mainly derived from increased agriculture fertilizer usage over years and irrational irrigation methods, with biggest contribution rates of 40.02% and 41.56%, respectively. Carbon absorption in farmland ecosystem was increased by 21.8504 million tons over 20 years, contributing the most to the carbon absorption in farmland ecosystem of Xinjiang, and its annual average contribution rate reached 47%. Farmland ecosystem carbon emissions and carbon absorption in Xinjiang area presented the obvious spatial agglomeration in some counties and cities in southern Xinjiang and displayed a trend of being symmetrical along the Tianshan mountain. Farmland ecosystem carbon footprints

收稿日期: 2015-07-17
基金项目: 水利部公益性项目“内陆干旱区实施最严格水资源管理关键技术”(201301103); 国家自然科学基金重点项目“干旱区湖泊流域陆面过程及人类活动适应性——以艾比湖流域为例”(41130531)
作者简介: 王敬哲(1992—), 男, 河南郑州人, 硕士研究生, 主要从事水文学水资源等方面的研究。E-mail: wjzf-682@163.com。
通信作者: 刘志辉(1957—), 男, 新疆乌鲁木齐人, 教授, 博士, 主要从事水文水资源、资源环境与空间决策支持、GIS 等研究。E-mail: lzh@xju.edu.cn。

showed a trend of rapid growth, from $2\,732.63 \times 10^4 \text{ C} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ in 1994 to $4\,474.89 \times 10^4 \text{ C} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ in 2013. Carbon footprint had increased by $283.59 \times 10^4 \text{ C} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$, indicating that carbon ecological surplus was found in farmland ecosystems of Xinjiang. In 11 years, the planting structure ecological indexes were greater than 1. Therefore, adjustment of planting structure is imminent.

Keywords: farmland ecosystem; carbon footprint; carbon emission; carbon absorption; spatial and temporal variations

21 世纪以来,全球气候变化受到广泛关注,碳排放被认为是引起全球变暖的主导因素之一^[1-2]。碳足迹(carbon footprint)分析是一种评价碳排放影响的测度方法,其从生命周期的角度揭示不同对象的碳排放过程,具体衡量某种产品全生命周期或某种活动过程中直接和间接相关的碳排放量,为探索合理有效的温室气体减排途径提供科学依据^[3]。碳足迹是在生态足迹的概念基础上提出的,它是对某种活动引起的(或某种产品生命周期内积累的)直接或间接的 CO₂ 排放量的度量,它最早出现于英国,并在学界、非政府组织和新闻媒体的推动下迅速发展起来^[4-5]。

随着对碳足迹的深入研究,碳足迹作为一种新的研究方法被学术界认可,作为人类活动对环境的影响和压力程度的工具,碳足迹成为近年来生态学研究的热点。Hertwich 等^[6]利用 Mrio 模型从国家尺度上分别计算了卢森堡等 73 个国家的碳足迹。Robertson G P 等^[7]认为农业中的二氧化碳、氧化亚氮和甲烷气体的排放在全球温室气体中起着重要的作用。Yantai Gan 等^[8-10]提出以提高作物生产力和改进耕作制度降低农作物产品的碳足迹。国内对农业碳排放研究相应较多,李波等^[11]基于农业生产中 6 个主要方面的碳源,测算了我国 1993—2008 年农业碳排放。谷家川等^[12]基于 7 个方面的主要碳源对皖江城市带的农业碳排放进行测算。苏洋等^[13]用 kaya 恒等式对新疆农地的碳排放的驱动机理进行分解,得出农业经济为最主要驱动因素;农业生产效率具有较强抑制作用。近 10 年来,我国一些学者才引进了国外碳足迹的方法和指标,初步开展了农田系统碳足迹的研究,主要体现在耕作面积^[14-15]、化肥施用^[16]和农作制度^[17-18]等几个方面。这些研究大多是从国家、区域或城市尺度开展的,而对县域层面碳收支的研究还有所缺乏。因此,本文以新疆为例,通过对农作物碳吸收和生产过程中碳排放的测算,分析农田生态系统的碳源/汇功能和强度的时空分布,以了解新疆在县域尺度上农田碳足迹的分布情况。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

新疆地处欧亚大陆腹地,中国西北边陲,位居 73°32′~96°21′E, 34°22′~49°33′N 之间,地处中温带极端干旱的荒漠带。全区总面积为 166.31 万 km², 占全国土地总面积的 1/6,是我国最大的行政省区。新疆气温温差较大,日照时间充足降水量少,气候干燥,年平均降水量为 150 mm 左右。新疆是我国重要的农垦地区,农作物种植品种广泛,种植历史悠久,主要有稻谷、小麦、玉米、高粱、大麦、豆类、棉花(包括长绒棉)、油料、甜菜等。占新疆土地总面积 4.27%的绿洲承载着全疆 95% 以上的人口,是新疆经济、资源、人口综合作用的载体,绿洲农业是干旱区人类生存与发展的基本命脉,但近年来对农田生态系统破坏严重,农业的可持续发展面临严重威胁。

1.2 数据来源

本研究中涉及到的新疆农地利用中的化肥、农药、农膜、柴油、灌溉等数据均取自 1994—2013 年《中国农村统计年鉴》,以当年新疆实际使用量为准,各县市数据由《新疆统计年鉴》和《新疆调查年鉴》数据整理得到。其中,化肥为折纯量,灌溉面积以当年新疆实际灌溉面积为准,翻耕数据以当年新疆农作物实际播种面积为准,取自《新疆统计年鉴》;新疆县域行政区划图件数据来自 1:500000 国家基础地理数据。

1.3 研究方法

1.3.1 农田利用碳排放量估算 根据相关研究成果^[19-20],结合新疆农业生产的实际情况,确定主要碳源,构建新疆农田碳排放测算体系。新疆农田利用的碳排放主要来源是:① 化肥、农药、农膜及农用柴油等农业物质投入直接或间接引发的碳排放;② 农地翻耕导致土壤有机碳释放;③ 农业灌溉耗电所引发的碳排放。各碳源排放因子及系数如表 1 所示。农田利用碳排放总量(C)与碳排放强度(CI)计算公式为:

$$C = \sum C_i = \sum T_i \mu_i \tag{1}$$

$$CI = C/A \tag{2}$$

式中, C 为碳排放总量, C_i 为各种碳源的碳排放量, T_i 为各种碳排放源的量, μ_i 为各种碳源的碳排放系数, A 为当年耕地总面积。

表 1 各类农地利用活动的碳源、碳排放系数
Table 1 Emission coefficients of carbon sources

碳源 Carbon source	碳排放系数 Carbon emission coefficient	参考来源 Reference source
化肥 Fertilizer	0.8956 kg C·kg ⁻¹	美国橡树岭国家实验室,T.O.WEST ^[21]
农药 Pesticide	4.9341 kg C·kg ⁻¹	美国橡树岭国家实验室
农膜 Mulch	5.18 kg C·kg ⁻¹	南京农业大学农业资源与生态环境研究所(IREEA)
柴油 Diesel	0.5927 kg C·kg ⁻¹	联合国政府间气候变化专门委员会(IPCC)
翻耕 Ploughed fallow	312.6 kg C·km ⁻²	陈阜等 ^[22]
灌溉 Irrigation	266.48 kg C·hm ⁻²	段华平等 ^[23]

1.3.2 农作物年碳吸收量估算 农田生态系统中所有的农作物全生育期对碳的吸收量 C_i 为:

$$C_i = \sum C_d = \sum C_f D_w = \sum C_f Y_w / H \tag{3}$$

式中, C_d 为 i 类农作物全生育期对碳的吸收量; C_f 为 i 类作物光合作用合成单位质量干物质所需要吸收的碳; D_w 为 i 类作物生物总量; Y_w 为 i 类作物的经济产量; H 为 i 类作物的经济系数。由于农田碳足迹研究的发展尚处在基础阶段,许多碳参数还不够完善。因此,本研究的碳吸收参数主要参考前人研究和相关的文献资料^[24-26]。中国主要农作物的碳吸收率(C_f)和经济系数(H)见表 2。

表 2 中国主要农作物经济系数与碳吸收率
Table 2 Carbon absorption coefficients(C_f) and economic coefficients(H) of major crops in China

作物名称 Crop	经济系数 H	碳吸收率 C_f
水稻 Rice	0.45	0.4144
小麦 Wheat	0.40	0.4853
玉米 Corn	0.40	0.4709
高粱 Sorghum	0.35	0.4500
谷子 Millet	0.40	0.4500
薯类 Potato	0.70	0.4226
大豆 Soybean	0.35	0.4500
其他经济作物 Other industrial crop	0.40	0.4500
棉花 Cotton	0.10	0.4500
油菜籽 Rapeseed	0.25	0.4500
向日葵籽 Sunflower seed	0.30	0.4500
花生 Peanut	0.43	0.4500
甘蔗 Sugarcane	0.50	0.4500
甜菜 Beet	0.70	0.4072
烟草 Tobacco	0.55	0.4500

1.3.3 农田生态系统碳足迹估算 参照段华平等^[23]的方法,本研究将碳足迹看作生态足迹的一部分,把碳足迹定义为:消纳碳排放所需要的生产性土地(植被)的面积,即碳排放的生态足迹(CEF),单位为 $C \cdot hm^{-2} \cdot a^{-1}$ 。

$$CEF = E / NEP, NEP = C_i / S \tag{4}$$

式中: E 为农田利用的碳排放总量,含义等同于公式(1)中 C ; NEP 反映了农作物的固碳能力,即 1 hm^2 的植被 1 a 吸收的碳量; C_i 为农田生态系统中所有农作物全生育期对碳的吸收量,含义等同于公式(3)中的 C_i ; S 为耕地面积,在碳足迹总量的基础上,用碳足迹除以耕地面积可以得到农田生态系统单位面积碳足迹^[3]。

区域农田生态系统碳足迹如果超过了区域生态承载力(耕地面积)那么就出现碳生态赤字;如果小于区域生态承载力,则表现为碳生态盈余。

$$CED = CEF - CEC (CEF > CEC) \tag{5}$$

$$CER = CEC - CEF (CEF < CEC) \tag{6}$$

式中, CED 为碳生态赤字; CER 为碳生态盈余; CEC 为生态承载力,即耕地面积。

1.3.4 种植结构生态效益指数 农田种植结构生态效应指数用于表征农田种植结构的变化对碳足迹的影响利弊及强弱,在前人文献^[27]的基础上调整得出,其计算公式为:

$$I = \frac{CEF_e}{CEF_n} \tag{7}$$

I 为种植结构生态效应指数; CEF_e 为某年农田实际中级结构情况下的碳足迹; CEF_n 为同年未发生种植结构改变的碳足迹。 $I < 1$ 时, I 越小,种植结构变化的生态效应越积极,即实际种植结构越利于抑制碳足迹增长; $I > 1$ 时, I 越大,种植结构变化的生态效应越消极,即实际种植结构越不利于抑制碳足迹增长; $I = 1$ 时,种植结构变化的生态效应不明显。

2 结果与分析

2.1 农田生态系统碳排放的年际变化

由图 1 可知,1994—2013 年新疆农田利用所引起的碳排放总量呈逐年增长趋势,由 1994 年 179.46 万 t 增长到 2013 年 474.15 万 t,近 1.64 倍。农田碳排放的年际变化可以分为三个阶段:① 缓慢增长期(1994—1998 年),碳排放量由 179.46 万 t 增加至

234.63 万 t,年平均增速为 6.15%;② 波动增长期(1999—2002 年),增速在该时期内出现最大值 7.29%与最小值 - 3.88%;③ 快速增长期(2003—2013 年),碳排放量由 2003 年的 247.44 万 t 增加至 474.15 万 t。各类农业投入的碳排放量在 1994—2003 年呈现出不同的变化趋势,化肥的碳排放量在 1998—2000 年呈现下降的趋势;之后的年份呈现增加的趋势;农田灌溉的碳排放量在 1994—2006 年波动,之后开始上升;农用柴油和农膜利用所引起的碳排放量缓慢增长。从各类农业投入对新疆整体农田

的碳排放量贡献率来看,各类型碳源的差异较大。化肥使用、农田灌溉是农田生态系统碳排放的主要来源,分别占碳排放总量的 27.83% ~ 40.02% 与 24.89% ~ 41.56%。农田翻耕仅占 0.43%,比重最小,其他依次为农膜使用(15.25% ~ 24.29%)、农用柴油使用(9.28% ~ 10.67%)、农药使用(0.22% ~ 2.91%)。除化肥、农田灌溉所引发的碳排放表现出明显增长趋势外,其他类型的碳排放年际变化较小。新疆农地利用的碳排放强度变化与总量的变化趋势基本保持一致,总体上也呈现出三阶段增长特征。

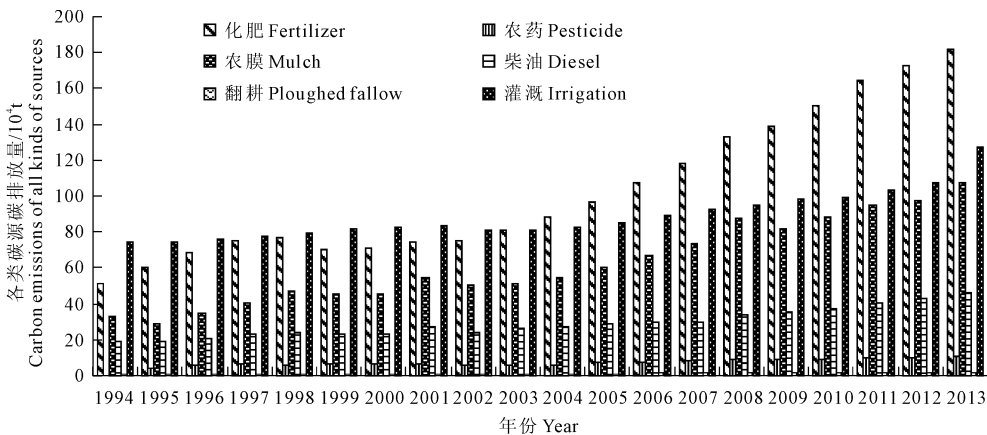


图 1 新疆各项农田投入的碳排放比较

Fig.1 Comparison of carbon emissions by agricultural input in Xinjiang

表 3 1994—2013 年新疆农田生态系统碳排放量

Table 3 Farmland ecosystem carbon emissions in Xinjiang from 1994 to 2013

年份 Year	化肥 Fertilizer /10 ⁴ t	农药 Pesticide /10 ⁴ t	农膜 Mulch /10 ⁴ t	柴油 Diesel /10 ⁴ t	翻耕 Ploughed fallow/10 ⁴ t	灌溉 Irrigation /10 ⁴ t	总量 Total /10 ⁴ t	增速 Growth rate/%	强度 Intensity /(t·km ⁻²)
1994	51.32	0.39	33.09	19.14	0.94	74.58	179.46	—	0.57
1995	60.72	4.49	28.70	19.26	0.95	74.08	188.21	4.88	0.60
1996	68.96	5.58	35.06	20.33	0.96	75.72	206.61	9.77	0.65
1997	75.05	6.36	40.68	23.35	1.00	77.55	224.00	8.42	0.69
1998	76.65	6.12	47.48	23.84	1.02	79.51	234.63	4.75	0.71
1999	70.15	6.32	45.64	22.87	1.06	81.69	227.72	- 2.95	0.67
2000	70.90	6.71	45.65	23.52	1.06	82.46	230.29	1.13	0.67
2001	74.60	6.22	54.24	27.32	1.06	83.62	247.08	7.29	0.72
2002	75.50	5.67	50.16	23.70	1.09	81.38	237.50	- 3.88	0.71
2003	81.27	5.97	51.48	26.31	1.11	81.30	247.44	4.18	0.75
2004	88.82	6.07	54.72	27.10	1.12	82.79	260.62	5.33	0.78
2005	96.52	7.20	60.05	28.74	1.17	85.39	279.06	7.08	0.69
2006	107.16	7.70	66.63	29.34	1.31	88.87	301.00	7.86	0.73
2007	117.79	8.19	73.21	29.95	1.31	92.35	322.80	7.24	0.78
2008	133.35	9.08	87.56	33.96	1.40	95.20	360.54	11.69	0.87
2009	138.80	8.93	81.99	35.32	1.46	97.95	364.45	1.08	0.87
2010	150.07	8.98	88.43	36.93	1.49	99.17	385.06	5.66	0.75
2011	164.50	9.52	94.78	40.08	1.56	103.52	413.97	7.51	0.81
2012	172.58	9.77	97.26	42.71	1.60	107.37	431.29	4.18	0.84
2013	181.99	10.50	107.05	45.87	1.63	127.11	474.15	9.94	0.81

2.2 农田生态系统碳吸收的年际变化

由表 4 可知,新疆农田生态系统碳吸收量在 1994—2013 年呈先缓慢增加,然后浮动变化,最后快速增加的趋势,1994 年的碳吸收量为 1 431.99 万 t,到 1998 年的 1 979.31 万 t,年均增加 136.83 万 t,从 1998 年再到 2004 年的 2 078.89 万 t,期间增速十分缓慢,碳吸收量在 2 001.56 万 t 浮动。2004—2013 年,碳吸收量快速增长,2013 年的碳排放量达到 3 617.04 万 t。1994—2013 年,整个新疆农田生态系统的碳吸收量增加 2 185.04 万 t。各类农作物中,棉

花是主要的经济作物,碳吸收量最大,对新疆农田生态系统的碳吸收量贡献率最大,高达 47% 以上,其贡献率呈现波动增长的趋势。其次是小麦,玉米。根据多年来的平均值计算得出,三者的贡献率高达 80.16%。显然,棉花、小麦和玉米的碳吸收量在全疆碳吸收总量中居于绝对主导地位,其变动情况对全疆碳吸收量趋势影响举足轻重。因此,稳定这三种主要作物面积对于新疆农田生态系统的固碳减排、发展低碳高效农业是一项有效措施。

表 4 1994—2013 年新疆农田生态系统的碳吸收量/10⁴t
Table 4 Farmland ecosystem carbon absorptions in Xinjiang from 1994 to 2013

年份 Year	碳吸收量 Carbon absorption										合计 Total
	其他 Other	水稻 Rice	小麦 Wheat	玉米 Corn	豆类 Soybean	薯类 Potato	棉花 Cotton	油菜 Rape	葵花 Sunflower	甜菜 Beet	
1994	26.19	38.29	409.92	270.17	29.93	15.06	396.95	33.84	37.58	174.07	1431.99
1995	15.00	44.43	462.50	314.02	17.14	15.96	420.75	27.22	43.59	167.62	1528.22
1996	10.72	47.42	509.95	367.94	12.25	19.62	423.18	18.27	25.37	206.23	1640.95
1997	13.80	50.90	530.92	346.48	15.78	16.14	517.50	16.06	26.54	226.12	1760.22
1998	17.39	45.64	538.68	355.82	19.88	20.00	630.00	22.18	31.23	298.49	1979.31
1999	19.21	49.86	513.56	380.32	21.96	27.81	633.38	29.47	53.54	206.07	1935.16
2000	28.88	55.58	492.34	351.08	33.00	38.64	675.00	26.55	53.21	170.24	1924.51
2001	32.03	52.30	453.93	374.85	36.60	36.23	706.50	21.94	34.97	264.75	2014.10
2002	29.69	55.82	468.85	446.24	33.93	37.68	675.00	23.22	34.89	271.55	2076.87
2003	30.40	46.72	407.25	431.17	34.74	43.35	720.00	27.77	38.70	222.01	2002.11
2004	32.05	47.25	419.71	456.91	36.63	42.74	788.63	21.89	32.85	200.23	2078.89
2005	28.36	49.89	486.16	447.78	32.43	39.76	880.65	16.60	32.54	243.81	2257.97
2006	28.14	54.58	485.68	455.36	32.16	46.18	1203.89	17.51	24.26	323.16	2670.91
2007	23.28	57.57	435.82	466.19	26.60	61.19	1305.00	17.28	38.09	341.43	2772.45
2008	25.89	52.03	480.07	490.22	29.58	64.97	1356.98	19.21	64.31	255.30	2838.55
2009	36.26	53.69	765.20	517.26	41.44	76.10	1135.80	28.30	62.10	243.40	2959.54
2010	31.86	54.31	756.45	496.34	36.41	61.88	1115.55	27.25	66.17	283.28	2929.50
2011	32.75	55.84	699.61	609.43	37.43	72.29	1303.97	27.32	68.04	301.88	3208.56
2012	28.15	54.66	699.49	697.06	32.17	39.75	1592.78	20.16	62.16	335.76	3562.14
2013	23.76	55.09	754.74	764.06	27.15	48.81	1583.10	20.31	62.84	277.17	3617.04

2.3 农田生态系统碳排放、吸收的空间格局动态特征

为确保不同时间尺度下各县域农田生态系统碳排放、吸收数据的标准性与可比性,参考王强等^[28]的方法,按照当年全省县域农田生态系统的碳排放量与吸收量平均值的 0.5 倍、1.0 倍、1.5 倍,把各县市农田生态系统的碳排放量归为低碳排放区、中度排放区、较高排放区和高碳排放区 4 种类型;同样。把农田生态系统的碳排放强度划分为Ⅰ级、Ⅱ级、Ⅲ级和Ⅳ级;碳吸收量及碳吸收强度的归类方法同上。新疆农田生态系统碳排放量空间集聚特征明显,主要年份高碳排放区集中在南疆地州的县市,以

1994 年为例,碳排放量前五位为莎车县、伊宁县、库车县和叶城县。这与该区耕地广阔,农业发展水平较高相关,并且碳排放高值有在该区域集聚的趋势(图 2)。此外,新疆农田生态系统的碳排放量的地域分布还呈现出沿天山对称的趋势。1994 年,全疆范围内低碳排放区 19 个,中度排放区 30 个,较高排放区 15 个,高碳排放区 21 个;2013 年分别为 21 个、24 个、15 个、24 个。20 年间,大部分市县多属于中度排放区,中度排放区与高碳排放区明显增多。相比农业碳排放量,农业碳排放强度更能客观地反映一个地区的碳排放水平,便于不同地区进行横向比

较。从数量上来看,1994 年新疆农田生态系统的农业碳排放强度Ⅰ级 1 个,Ⅱ级 27 个,Ⅲ级 52 个,Ⅳ级 5 个;2013 年依次为 0 个、56 个、19 个、10 个。全疆农田生态系统的碳排放强度主要为Ⅱ级水平,空间分布上较碳排放量相比更为均衡。全疆范围内农

田生态系统碳排放量高值分布相对离散,1994 年碳排放强度高值相对集中在南疆(和田市、和田县、墨玉县)天山南麓(轮台县);2013 年则相对集中于北疆(哈巴河县、布尔津县、阿勒泰市)、东疆(伊吾县)与南疆(塔什库干县,乌恰县)。

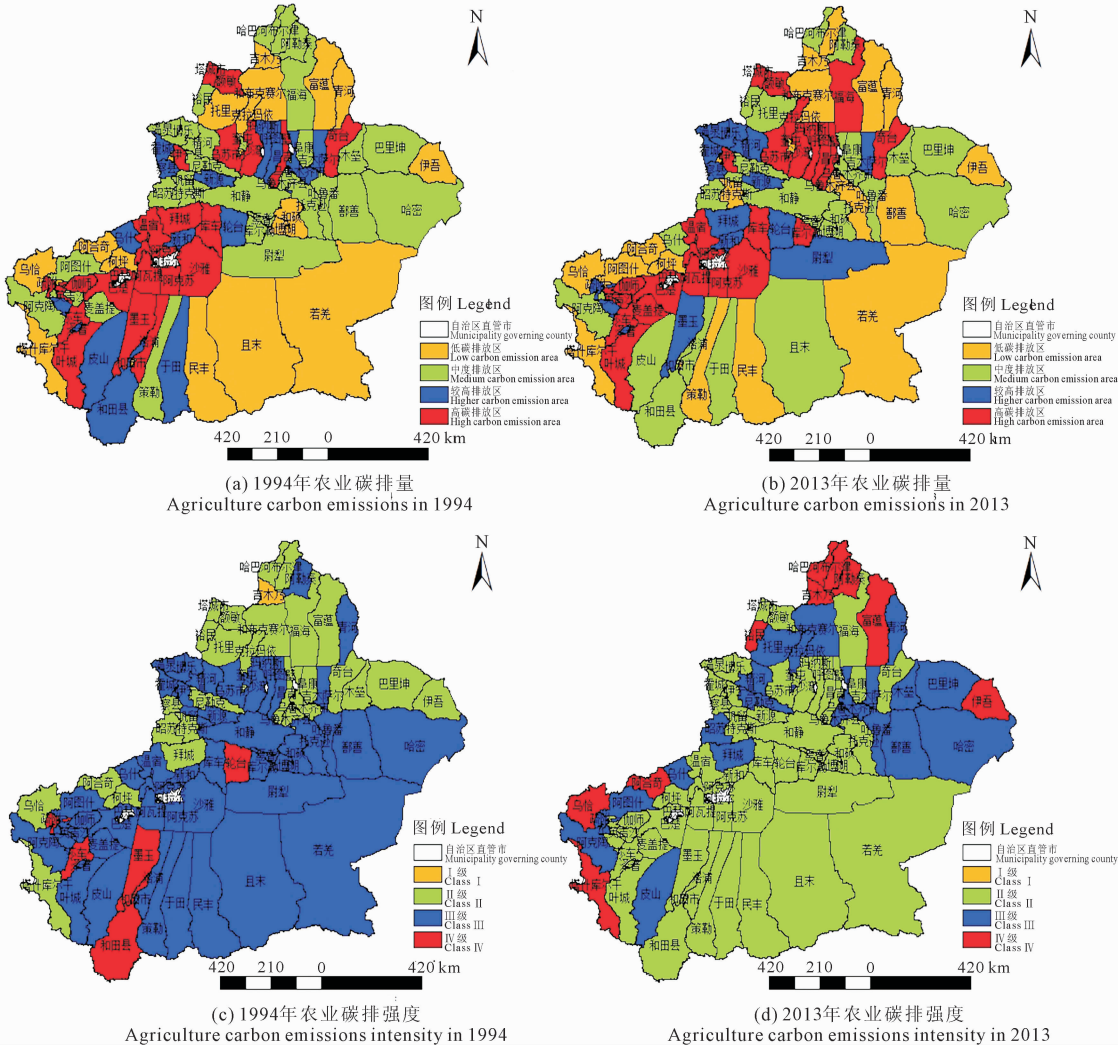


图 2 1994 与 2013 年新疆农田生态系统碳排放量及碳排放强度的空间格局
Fig.2 Spatial pattern of farmland ecosystem carbon emissions and carbon intensity in Xinjiang (1994 and 2013)

与碳排放量一样,新疆农田生态系统的碳吸收量也呈现出明显的空间聚集和对称趋势(图 3)。1994 年,碳吸收量排前五位的为莎车县、伊宁市、霍城县、库车县和阿克苏市。1994 年,全疆范围内低碳吸收区 26 个、中度吸收区 23 个、较高吸收区 12 个、高碳吸收区 24 个;2013 年分别为 24 个、25 个、12 个、24 个。20 年间,主要分布在低碳吸收区和高碳吸收区。20 年间,各类碳吸收区的变动不大。尤其是高碳吸收区,主要集中在塔里木河流域周边各县市和天山北麓玛纳斯河流域,其主要原因是该地区的棉花和小麦种植面积十分广阔。1994 年新疆农

田生态系统的农业碳吸收强度Ⅰ级 15 个、Ⅱ级 20 个、Ⅲ级 37 个、Ⅳ级 13 个;2013 年依次为 32 个,21 个,8 个,24 个。全疆农田生态系统的碳吸收强度主要为Ⅰ、Ⅱ级水平,空间分布上与碳吸收量的地域分布较为一致。

2.4 农田生态系统碳足迹及其特征分析

根据公式(4),对新疆农田生态系统碳足迹的计算结果表明,碳足迹整体呈现出逐年增加的趋势,1994 年为 $391.52 \times 10^4 \text{ C} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$, 2013 年为 $675.11 \times 10^4 \text{ C} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$,增长率达 72.43%。碳足迹均小于同期的耕地面积,这表明新疆农田生态系

统存在碳生态盈余的现象。农田生态系统碳生态盈余从 1994 年的 $2\,732.63 \times 10^4 \text{ C} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ 增加至 2013 年的 $4\,474.89 \times 10^4 \text{ C} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$, 呈快速增长趋势。农田生态系统的碳生态盈余能够部分补充新疆

工业、经济发展和社会生活的碳生态赤字,对区域的可持续发展有着积极的作用。新疆单位面积碳足迹呈波动趋势,但大致围绕 $0.14 \times 10^4 \text{ C} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ 上下浮动。

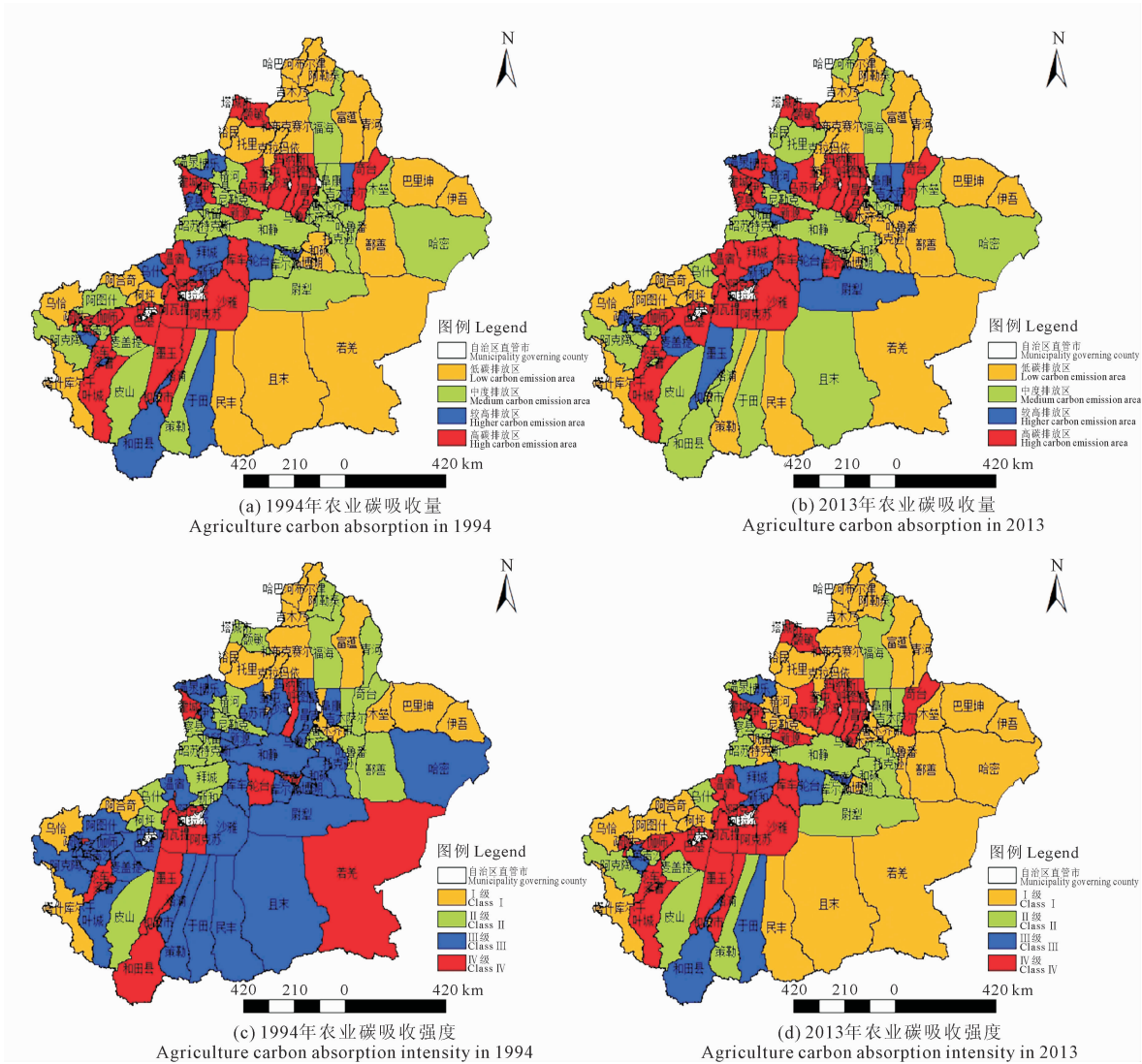


图 3 1994 与 2013 年新疆农田生态系统的碳吸收量及碳排放强度的空间格局

Fig.3 Spatial pattern of farmland ecosystem carbon absorption and carbon intensity in Xinjiang (1994 and 2013)

种植结构生态效益指数反映了农田种植结构变化对碳足迹的影响。从表 5 可以看出,除起始年 1994 年 $I = 1$ 外,1995 年、1998 年、2002 年、2006 年、2009、2011—2012 年 $I < 1$,表明这 9 个年份的农田种植结构要优于 1994 年;1996—1997 年、1999—2001 年、2003—2004 年、2007—2008 年、2010 年和 2013 年 $I > 1$;表明这 11 个年份的种植结构不如 1994;1999 年 $I = 1$,表明该年份种植结构变化导致的生态效益不明显。其中 2010 年的种植结构生态效益指数最大,达到 1.31。总体上,新疆农田生态系统的种植结构并不十分合理,不能朝着很好地抑制碳足迹增

长的方向发展。因此为了增强新疆农田生态系统碳吸收功能,调整新疆农业的种植结构迫在眉睫。

3 结论与讨论

本文以新疆农田生态系统为研究对象,碳足迹计算公式对 1994—2013 年全新疆及各县市农田生态系统的碳排放、碳吸收及全疆范围的碳足迹计算结果显示:

1) 1994—2013 年新疆农田利用所引起的碳排放总量呈逐年增长趋势。1994 年新疆农田利用所产生的碳排放量为 179.46 万 t,2013 年为 474.15 万 t,

表 5 1994—2013 年新疆农田生态系统的碳足迹与生态盈余

Table 5 Farmland ecosystem carbon footprint and ecological surplus in Xinjiang from1994 to 2013

年份 Year	碳足迹 Carbon footprint /(10 ⁴ C·hm ⁻² ·a ⁻¹)	生态盈余 Ecological surplus /(10 ⁴ C·hm ⁻² ·a ⁻¹)	单位面积 碳足迹 carbon footprint in unit area /(10 ⁴ C·hm ⁻² ·a ⁻¹)	种植结构生态 效益指数 Planting structure ecological index
1994	391.52	2732.63	0.14	—
1995	385.26	2743.00	0.14	0.98
1996	399.85	2775.94	0.14	1.04
1997	410.89	2817.87	0.15	1.03
1998	392.46	2918.26	0.13	0.96
1999	398.20	2985.74	0.13	1.00
2000	408.83	3007.69	0.14	1.03
2001	421.91	3017.41	0.14	1.03
2002	384.77	2979.89	0.13	0.91
2003	409.57	2904.42	0.14	1.06
2004	421.51	2940.81	0.14	1.03
2005	502.20	3561.20	0.14	1.19
2006	462.85	3644.25	0.13	0.92
2007	479.02	3635.18	0.13	1.03
2008	523.89	3600.71	0.15	1.09
2009	514.41	3662.89	0.14	0.98
2010	673.50	4450.40	0.15	1.31
2011	662.43	4471.87	0.15	0.98
2012	621.72	4513.28	0.14	0.94
2013	675.11	4474.89	0.15	1.09

增长近 1.64 倍。主要是由于化肥使用量的增加和不科学的灌溉方式引起。

2) 新疆农田生态系统碳吸收量在 1994—2013 年呈先缓慢增加,然后浮动变化,最后快速增加的趋势。20 年间,整个新疆农田生态系统的碳吸收量增加 2185.04 万 t。各类农作物中,棉花是主要的经济作物,碳吸收量最大,对新疆农田生态系统的碳吸收量贡献率最大。

3) 从区域上看,新疆农田生态系统的碳排放量、碳吸收量区域呈现出明显的空间集聚和对称趋势。全疆农田的碳排放强度主要为Ⅱ级水平,空间分布上较碳排放量相比更为均衡。20 年间,全疆各类碳吸收区的变动不大。

4) 新疆农田生态系统碳足迹整体呈现出逐年不断增加的趋势,1994—2013 年,碳足迹增加了 $283.59 \times 10^4 \text{ C} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$,表明新疆农田生态系统存在碳生态盈余的现象。农田系统 I 指数大于 1 年份达到 11 个,新疆农田生态系统的种植结构并不十分合理,种植结构的调整迫在眉睫。

通过对新疆农田生态系统碳排放、吸收及碳足迹分析,可以看出碳吸收量要明显大于碳排放量,这表明新疆农田生态系统具有较强的固碳能力,同时存在碳生态盈余的现象,这与段华平等^[23]的研究结果相似,但碳排放的总量估算值与李波^[11]等的结果有较大差异,主要原因是对碳排放系数的选取有所差异。此外农田碳足迹受农作物种类、土壤类型、耕作方式等多个因素影响,并且各因素彼此之间有相互作用。因此,不同区域、不同种植模式,碳足迹差异显著。本研究并没有就实地情况修正,对于新疆农业中占有很大比例的特色林果业没有加以测算,不能很好的贴近新疆的实际状况。在以后的研究过程中,应深入探讨农田生态系统的碳循环和土壤呼吸,评价不同条件对碳吸收和排放的影响,提高估算的精度。同时,应加强 RS 技术在碳足迹估算中的应用,这些问题将于今后继续进行深入研究。

致谢:感谢新疆大学资源与环境科学学院马轩凯硕士对本研究图件绘制及成文过程中提供的帮助。

参 考 文 献:

[1] Climate change 2007 – the physical science basis: Working group I contribution to the fourth assessment report of the IPCC[M]. Cambridge: Cambridge University Press, 2007.

[2] Fang J Y, Zhu J L, Wang S P, et al. Global warming, human-induced carbon emissions, and their uncertainties[J]. Science China Earth Sciences, 2011,54(10):1458-1468.

[3] 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):71-78.

[4] East A J. Vegetable industry carbon footprint scoping study discussion paper 1: What is a carbon footprint?. An Overview of Definitions and Methodologies[R]. Sydney:Horticulture Australia Limited, 2008.

[5] Weidema B P, Thrane M, Christensen P, et al. Carbon footprint[J]. Journal of Industrial Ecology, 2008,12(1):3-6.

[6] Robertson G P, Paul E A, Harwood R R. Greenhouse gases in intensive agriculture: contributions of individual gases to the radiative forcing of the atmosphere[J]. Science,2000,289:1922-1925.

[7] Hertwich E G, Peters G P. Carbon footprint of nations: A global, trade-linked analysis[J]. Environmental Science & Technology,2009, 43(16): 6414-6420.

[8] Gan Y, Liang C, Wang X, et al. Lowering carbon footprint of durum wheat by diversifying cropping systems[J]. Field Crops Research, 2011,122(3):199-206.

[9] Gan Y, Liang C, Huang G, et al. Carbon footprint of canola and mustard is a function of the rate of N fertilizer[J]. The International Journal of Life Cycle Assessment, 2012,17(1):58-68.

[10] Gan Y, Liang C, Campbell C A, et al. Carbon footprint of spring wheat in response to fallow frequency and soil carbon changes over 25 years on the semiarid Canadian prairie[J]. European Journal of Agronomy, 2012,43:175-184.

