

上海农田生态系统碳源汇时空格局及其影响因素分析

钱晓雍

(上海市环境科学研究院, 上海 200233)

摘要:以 1990—2009 年上海市农作物产量、农田面积、农业投入等相关统计数据为依据,对上海农田生态系统主要碳源汇进行了测算,分析了上海农田生态系统碳源汇的时空变化特征,并探讨了农田生态系统碳源汇的影响因素。结果表明,1999—2009 年上海农田生态系统碳吸收总量总体处于逐步下降趋势,且经济作物和果蔬作物碳吸收比例分别下降和上升明显;碳排放总量则呈逐步下降并趋于稳定的趋势,农用化学品投入是其主要排放源;单位面积碳吸收和排放量则一直处于波动状态。2009 年上海各区县农田生态系统碳吸收量、碳排放量和单位耕地面积碳吸收量均为远郊大于近郊,而单位耕地面积碳排放量则为近郊大于远郊。碳源汇影响因素相关性分析表明,碳吸收与粮食作物和经济作物产量显著正相关,而与果蔬作物产量显著负相关;碳排放与农用化学品投入和燃料动力使用以及耕作灌溉管理均显著正相关。

关键词:上海;农田生态系统;碳源;碳汇;碳吸收;碳排放

中图分类号:X511 **文献标志码:**A **文章编号:**1672-2043(2011)07-1460-08

Spatial-temporal Variation and Impact Factor of Carbon Source and Sink of Farmland Ecosystem in Shanghai, China

QIAN Xiao-yong

(Shanghai Academy of Environmental Sciences, Shanghai 200233, China)

Abstract:Based on the statistical data of crop yields, cropland areas and agricultural inputs in the period from 1990 to 2009, the amounts of carbon absorption and emission of the farmland ecosystems in Shanghai were calculated, and the spatial-temporal variations and impact factors of carbon absorption and emission were analyzed. The results indicated that, the total amounts of carbon absorption appeared generally in the tendency of stepping down, and the carbon absorption proportion of economic crops and fruits-vegetables crops showed remarkable decreasing and increasing respectively. The total amounts of carbon emission appeared stepping down then tending to be stable, and the agrochemical inputs was the main source. The carbon absorption and emission per unit area of arable land and sown land were always at the stage of fluctuant situation. In 2009, the amounts of carbon absorption and emission and the amounts of carbon absorption per unit area of arable land in the exurbs were all larger than the suburbs, while the amounts of carbon emission per unit area of arable land in the suburbs was larger than the exurbs. The correlation analysis results showed that, carbon absorption was significantly positive correlated with the yields of grain crops and economic crops, and significantly negative correlated with the yields of fruits-vegetables crops. Significant positive correlations were observed between carbon emission and agrochemical inputs, power and fuels consumption, and cultivation and irrigation management.

Keywords:Shanghai; agricultural ecosystem; carbon source; carbon sink; carbon absorption; carbon emission

目前,以全球变暖为主要特征的气候变化已成为国际公认的事实,人类活动引起的温室气体的大量排放是气候变暖的主要原因^[1]。而农业活动是重要

的温室气体排放源,20%的 CO₂、70%的 CH₄ 和 90%的 N₂O 来源于农业活动及其相关过程^[2];同时,全球农田也是巨大的碳库,其碳储量达 170 Pg,占全球陆地碳储量的 10%以上^[3]。因此,准确合理地估算农业碳排放和农田碳吸收,不仅对制定合理的农业减排措施和适应措施具有重要的意义,而且能为合理评价农业碳减排的义务和责任提供依据^[4]。在此背景下,近年

收稿日期:2010-11-30

基金项目:公益性行业(农业)科研专项(200903056)

作者简介:钱晓雍(1981—),男,浙江湖州人,工程师,主要从事农业生态和农村环境保护研究工作。E-mail:qianxy@saes.sh.cn

来国内外逐渐开展了关于农业和农田碳汇问题的研究^[5-11],而国内对于农田生态系统碳源汇的综合估算和评价方面则相对研究较少,只涉及了沿海地区、河西绿洲地区以及河南省、山西省等个别省市^[12-15],但上述研究在考虑农田生态系统碳吸收时没有将近年来产量不断增长的果蔬类生鲜农产品纳入计算范围,同时在考虑农田生态系统碳排放时也没有将碳排放途径深入细化,在一定程度上影响了定量测算结果的精确性。

上海作为入选世界自然基金会(WWF)“中国低碳城市发展项目”的两个试点城市之一,低碳发展将成为今后相当长时间内上海城市可持续发展的必然选择,而农田生态系统作为重要的碳源和碳汇,其减源增汇将为上海低碳城市建设提供有力支撑。因此,本研究通过对1990—2009年上海农田生态系统主要农作物碳吸收量和主要农业生产活动碳排放量的估算,分析了上海农田生态系统碳源汇的时空格局及其影响因素,以期提供更精确的农业源碳排放清单,为上海农业产业结构调整和农业生产固碳减排提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 研究区域

上海市位于北纬31°14′、东经121°29′,地处长江三角洲东缘,北界长江,东濒东海,南临杭州湾,西接江苏、浙江两省,属亚热带季风气候。面积6340.5 km²,南北长约120 km,东西宽约100 km,下辖18个行政区县,包括112个乡镇和101个街道。根据2010年《上海市统计年鉴》,2009年全年平均气温17.8℃,极端最高和最低气温分别为40.0℃和-5.9℃,日照时间1506.5 h,年降雨量1457.9 mm,无霜期325 d。2009年末,上海全市常住人口1921万人,其中户籍常住人口1379万人;全年完成农业总产值283亿元,其中种植业产值147亿元;全市耕地面积20万hm²,耕地平均复种指数为196%。

1.2 数据来源

1990—2009年上海市农作物产量、农机总动力、

农业用电量、燃料用量、有效灌溉面积、化肥农药用量等农业统计数据均分别来自各年份《上海市统计年鉴》。

1.3 研究方法

1.3.1 碳源汇计算边界

农田生态系统包括生态过程、技术过程与经济过程,即农田生产的生态系统、技术系统和经济系统。碳循环主要发生在生态系统和技术系统中,目前在对碳循环的研究中多把焦点放在了生态过程的碳循环研究,即农田土壤碳的研究^[3-11],而忽略了技术过程中碳循环的研究。因此,本研究在计算农田生态系统碳源汇时以农业生产的技术系统为边界,将作物生育期碳吸收作为主要的碳吸收途径,而将农用化学品使用、农业生产燃料动力、农田耕作灌溉作为主要的碳排放途径。

1.3.2 碳源汇计算方法

本研究对碳吸收和碳排放采用分别估算的方法。其中,碳吸收主要依据农作物产量数据、经济系数和碳吸收率进行估算;碳排放主要从不同碳排放途径的角度,根据West等^[16]确定的碳转化系数进行估算。根据相关数据资料的可得性,本研究基于有历史统计数据的主要碳源汇进行了估算。

农业生态系统碳吸收主要为作物生育期碳吸收,估算方法如公式(1)所示。

$$C_r = \sum_i C_d \quad (1)$$

式中: i 为第 i 种农作物类型; C_d 为农作物全生育期的碳吸收量 $C_d = C_f D_w = C_f Y_w / H$; C_f 为合成单位有机质干物质所吸收的碳; D_w 为生物产量(干物质); Y_w 为经济产量; H 为经济系数,指经济产量与生物产量(干物质)的比值。上海市主要农作物经济系数 H 和碳吸收率 C_f 如表1所示^[17-18]。

农田生态系统碳排放考虑农用化学品使用、农业生产燃料动力、农田耕作灌溉等3大类主要的间接碳排放途径,估算方法分别如公式(2)、(3)、(4)所示。

$$E_c = E_f + E_p = \sum_i G_i A_i + PB \quad (2)$$

式中: E_c 为农用化学品的间接碳排放量; E_f 和 E_p

表1 上海市主要农作物经济系数(H)和碳吸收率(C_f)

Table 1 Economic coefficients(H) and carbon absorption rate(C_f) of main crops in Shanghai

作物类型	粮食作物					经济作物				果蔬作物	
	水稻	小麦	玉米	大豆	薯类	棉花	花生	油菜	甘蔗	蔬菜	水果
H	0.45	0.40	0.40	0.34	0.70	0.10	0.43	0.25	0.50	9.50	1.75
C_f	0.414 4	0.485 3	0.470 9	0.450 0	0.422 6	0.450 0	0.450 0	0.450 0	0.450 0	0.450 0	0.450 0

分别为化肥和农药的间接碳排放量; G_i 为化肥类型*i*的施用量,主要为氮肥、磷肥、钾肥和复合肥; A_i 为化肥类型*i*的转换系数; P 为农药施用量; B 为农药的转换系数。

$$E_e=E_m+E_t+E_d=MC+TD+YF$$

(3)

式中: E_e 为农业生产燃料动力的间接碳排放量; E_m 、 E_t 和 E_d 分别为农用机械用电、农产品加工用电和农用机械柴油消耗的间接碳排放量; M 为农用机械用电量; T 为农产品加工用电量; Y 为农用机械柴油消耗量; C 、 D 和 F 分别为农用机械用电、农产品加工用电和农用机械柴油消耗的转换系数。

$$E_q=E_h+E_i=QL+IR$$

(4)

式中: E_q 为农业耕作灌溉的间接碳排放量; E_h 和 E_i 分别为农田耕作和农田灌溉的间接碳排放量; Q 为农作物种植面积; I 为农田有效灌溉面积; L 和 R 分别为农田耕作和农田灌溉的转换系数。各转换系数取值

见表 2。

2 结果与分析

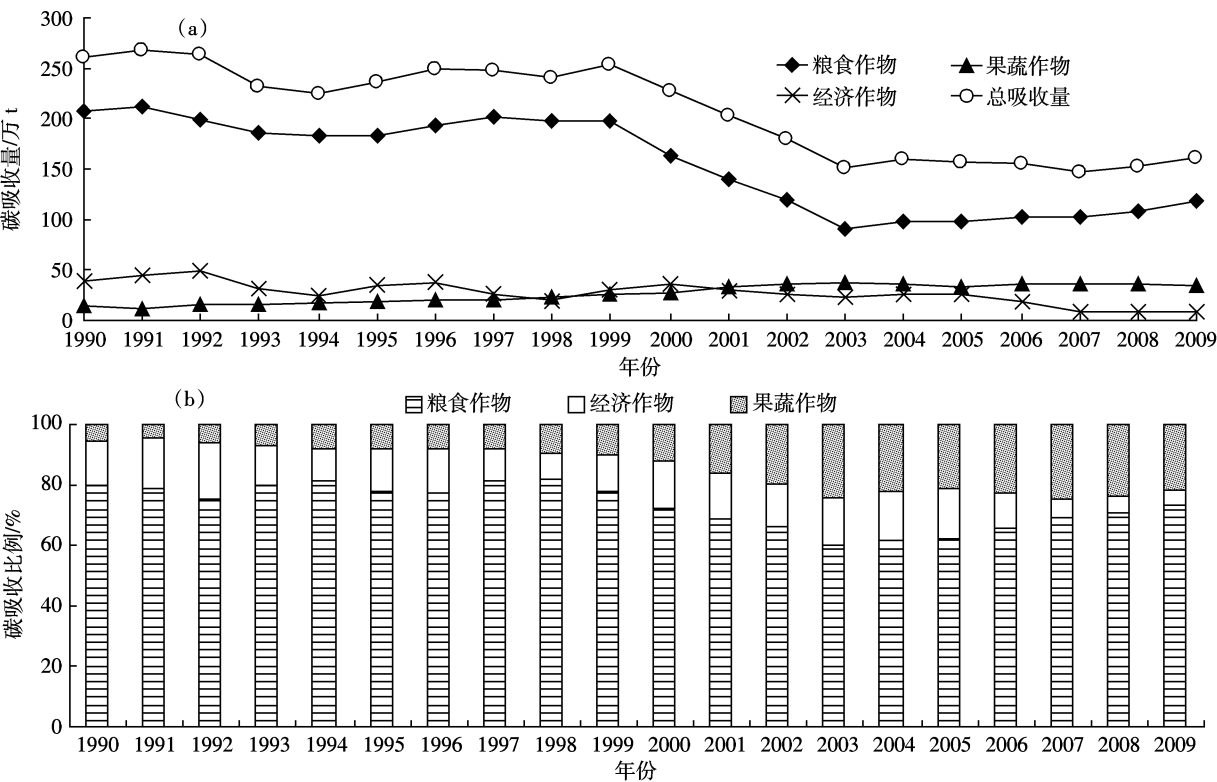
2.1 上海农田生态系统碳源汇时间变化分析

2.1.1 上海农田生态系统碳吸收量变化

1990—2009 年上海农田生态系统碳吸收情况的计算结果如图 1 所示。由图 1-a 可知,20 年来上海农田生态系统碳吸收总量总体处于下降趋势,从 1990 年的 260.79 万 t 减少到 2009 年的 161.99 万 t,减幅达到 37.89%,年均递减 2.48%。其中,粮食作物碳吸收量从 208.05 万 t 减少到 118.82 万 t,减幅为 42.89%,年均递减 2.91%;经济作物碳吸收量从 38.83 万 t 减少到 7.95 万 t,减幅为 79.53%,年均递减 8.01%;果蔬作物碳吸收量则从 13.91 万 t 增加到 35.22 万 t,增幅为 153.18%,年均递增 5.01%。由图 1-b 可知,上海农田生态系统碳吸收比例也发生了一定的变化,粮食作

表 2 农田生态系统碳排放源转换系数^[16]
Table 2 Conversion coefficient of carbon emission of agricultural eco-system^[16]

项目	$A/\text{kg}\cdot\text{t}^{-1}$				$B/\text{kg}\cdot\text{t}^{-1}$	$C、D/\text{kg}\cdot\text{kW}\cdot\text{h}^{-1}$	$F/\text{kg}\cdot\text{t}^{-1}$	$L/\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$	$R/\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$
	氮肥	磷肥	钾肥	复合肥					
转换系数	857.54	165.09	120.28	380.97	4 937.28	0.18	937.27	16.47	266.48



a. 碳吸收量;b. 碳吸收比例
a. carbon absorption amount;b. carbon absorption proportion

图 1 1990—2009 年上海农田生态系统碳吸收变化
Figure 1 Carbon absorption of farmland ecosystem of Shanghai from 1990 to 2009

物碳吸收比例基本保持在 60%~80%之间,但经济作物碳吸收比例从近 20%逐步降低到仅 5%左右,果蔬作物碳吸收比例则从 4%逐步升高到 20%,这充分反映了随着近 20 年来上海居民生活水平的不断提高,对蔬菜、瓜果等生鲜农产品的需求也不断增加。

2.1.2 上海农田生态系统碳排放量变化

1990—2009 年上海农田生态系统碳排放情况的计算结果如图 2 所示。由图 2-a 可知,20 年来上海农田生态系统碳排放总量呈逐步下降并趋于稳定的趋势,从 1990 年的 50.74 万 t 减少到 2009 年的 39.09 万 t,减幅达到 22.95%,年均递减 1.36%。其中,农用化学品碳排放量从 22.45 万 t 减少到 12.91 万 t,减幅为 42.51%,年均递减 2.87%;燃料动力碳排放量从 18.73 万 t 增加到 19.96 万 t,增幅为 6.60%,年均递增 0.34%;耕作灌溉碳排放量则从 9.56 万 t 减少到 6.22 万 t,减幅为 34.89%,年均递减 2.23%。由图 2-b 可知,上海农田生态系统碳排放比例则变化较小,农用化学品碳排放比例从 40%左右下降到 30%左右,燃料动力碳排放比例保持在 40%~50%之间,耕作灌溉碳排放保持在接近 20%的水平,这从一定程度上反映了近 20 年来上海农业生产方式总体上来说并未发生

根本性的转变。

2.1.3 上海农田生态系统单位面积碳源汇变化

1990—2009 年上海农田生态系统单位耕地面积和单位播种面积碳吸收量的计算结果如图 3 所示。由图 3-a 可知,20 年来上海农田生态系统单位耕地面积碳吸收量一直处于波动状态,从 1990 年的 $8.07 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$ 波动下降到 2003 年的 $5.88 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$,2003 年以后波动上升到 2009 年的 $8.01 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$;单位播种面积碳吸收量虽略有下降,但基本处于稳定状态,保持在 $4.00 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$ 上下。这表明,上海农田生态系统的碳吸收能力不仅没有增加,反而处于稳中有降的状态。由图 3-b 可知,20 年来上海农田生态系统单位耕地面积碳排放量也一直处于波动状态,范围在 $1.50 \sim 2.00 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$ 之间;单位播种面积碳排放量虽略有上升,但基本处于稳定状态,保持在 $1.00 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$ 上下。这表明,上海农田生态系统的碳排放能力基本保持不变,即农业生产过程中单位面积的资源 and 能源消耗量长期以来没有发生变化。

2.2 上海农田生态系统碳源汇空间差异分析

2.2.1 上海农田生态系统碳源汇区县分布

2009 年上海各区县农田生态系统碳源汇情况如

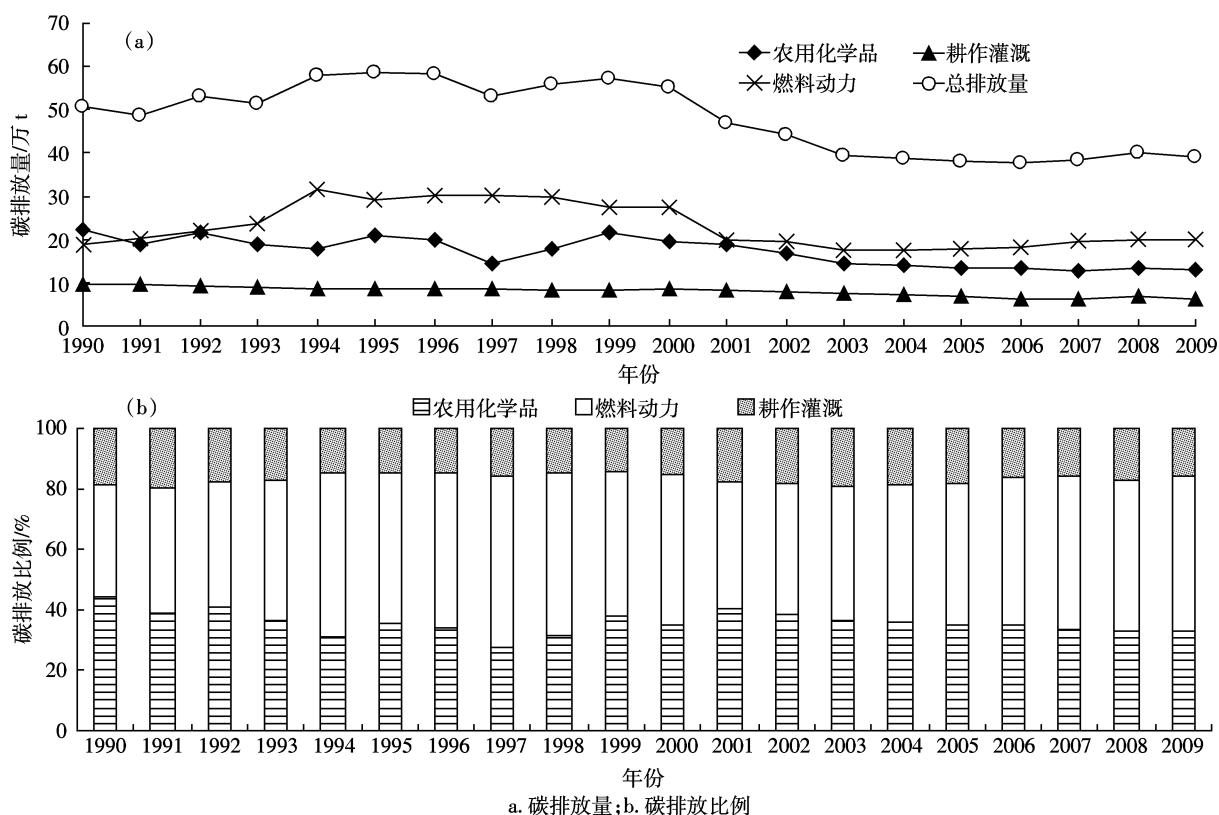


图 2 1990—2009 年上海农田生态系统碳排放变化

Figure 2 Carbon emission of farmland ecosystem of Shanghai from 1990 to 2009

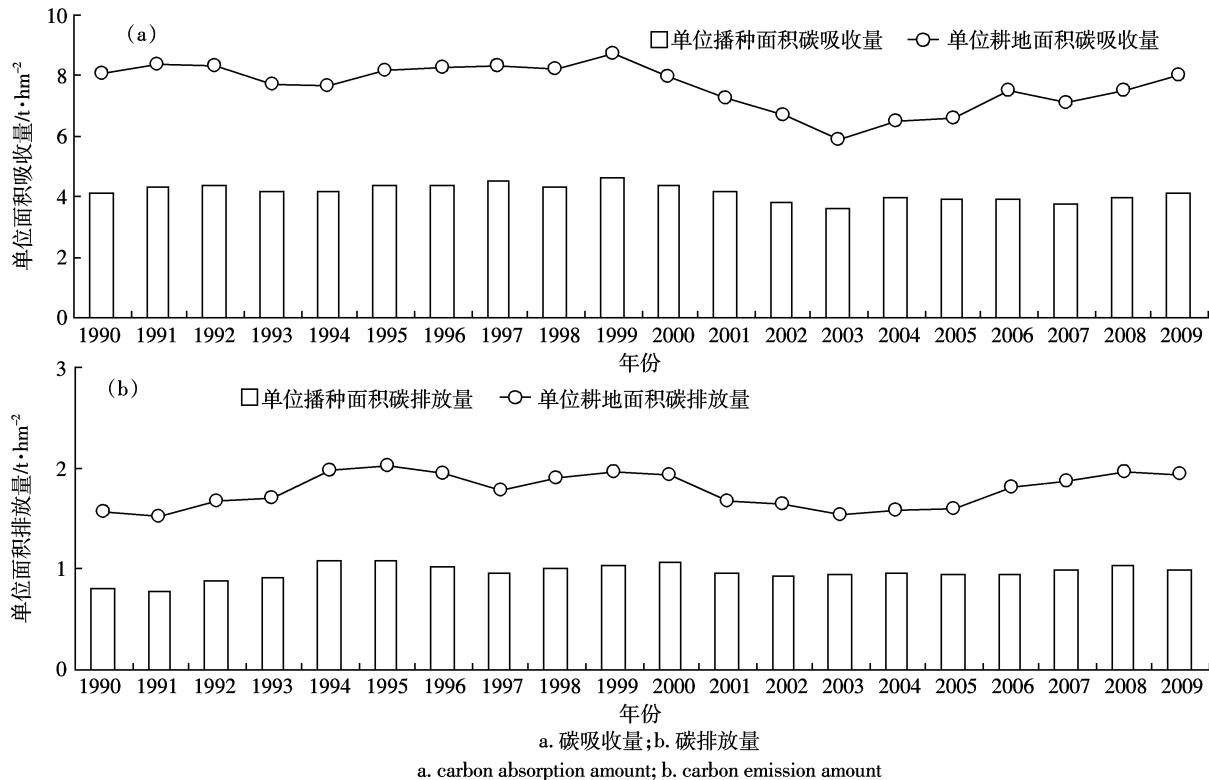


图3 1990—2009年上海农田生态系统单位面积碳源汇变化

Figure 3 Carbon absorption amount per unit area of farmland ecosystem of Shanghai from 1990 to 2009

图4所示。从碳吸收的角度来看,碳吸收量较大且单位耕地面积碳吸收能力较强的区县均主要分布在上海远郊地区。其中,碳吸收量最大的是崇明县,达到41.80万t,其次是金山区和合并了南汇区以后的浦东新区,分别为29.25万t、20.58万t,然后是青浦区、奉贤区和松江区,分别为19.49万t、16.60万t、13.72万t;而单位耕地面积碳吸收量最大的是金山区,达到11.08万t,其次是崇明县和松江区,分别为8.36万t、8.17万t,然后是青浦区和奉贤区,分别为7.14万t、6.07万t。从碳排放的角度来看,碳排放量较大的区县主要分布在上海西部地区,单位耕地面积碳排放能力较强的区县则主要分布在上海北部地区。其中,碳排放量最大的是崇明县,达到11.48万t,其次是浦东新区,为6.36万t,然后是金山区和青浦区,分别为4.27万t、4.15万t;而单位耕地面积碳排放量较大的则是嘉定区和宝山区,分别达到2.60万t、2.51万t,其次是崇明县和松江区,分别为2.30万t、2.17万t,然后是闵行区、浦东新区、金山区和青浦区,分别为1.65万t、1.64万t、1.62万t、1.52万t。

2.2.2 上海农田生态系统碳源汇比区县比较

从2009年上海各区县农田生态系统碳源汇比来看(图5),碳源汇比最高的是宝山区,达到0.64,是全

市平均水平的2倍多,其次是嘉定区、闵行区和浦东新区,分别为0.44、0.35、0.31,而崇明县和松江区与全市平均水平基本持平,奉贤区、青浦区、金山区则低于全市平均水平。由此可见,地处近郊的嘉定、宝山两区相比于地处远郊的奉贤、青浦、金山等区县,虽然耕地面积相对较少,但为了保证农业高产而出采取了高投入、高强度、集约化的农业生产方式,从而导致了碳排放量相对较高。

2.3 上海农田生态系统碳源汇影响因素分析

对农田生态系统碳吸收量与主要农作物产量的相关性分析表明(表3),碳吸收与水稻、小麦、玉米等粮食作物以及油菜籽等经济作物的产量有显著的正相关性($P<0.01$),而与蔬菜、水果等果蔬作物的产量有显著的负相关性($P<0.01$),这主要是由于果蔬作物由于其水分含量高、干物质含量低导致碳吸收能力相对较差,因此在果蔬作物需求量持续增加促使其种植面积不断扩大的大趋势下,需要从增强作物生产力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种植以提高作物固碳量,从而达到保持或提高农田生态系统碳吸收能力的目的^[19]。

对农田生态系统碳排放量与主要碳排放途径的

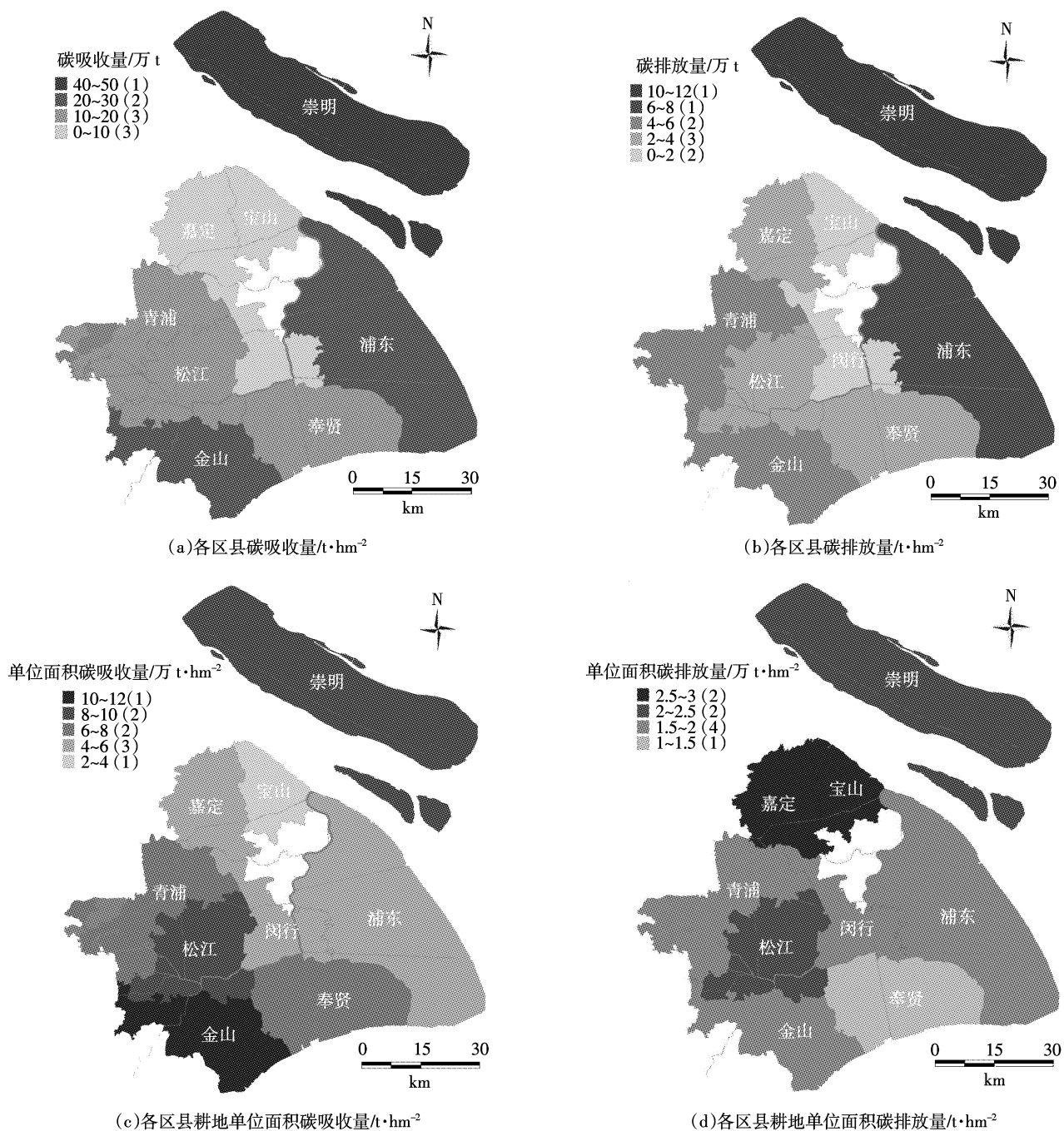


图4 2009年上海农田生态系统单位面积碳源汇区县分布

Figure 4 Spatial distribution of carbon source and sink of farmland ecosystem of Shanghai in 2009

相关性分析表明(表4),碳排放与氮肥、农药等农用化学品投入和机械用电、加工用电、农机动力等燃料动力使用以及种植面积、有效灌溉等耕作灌溉管理有显著的正相关性($P < 0.01$),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。因此,在农业投入持续增加和机械化程度不断提高的大背景下,需要从改变肥料施用方式、优化能源利用结构以及调整耕作和灌溉制度等方面入手,通过实施测土配

方施肥、增加有机肥施用、采用免耕或少耕技术、应用精确滴灌技术、发展生物质能等措施,从而达到有效降低农田生态系统碳排放量的目标^[19-21]。

3 讨论

长期以来,上海地区的农业生产水平一直处于全国领先地位,高强度的农业生产方式使得作物单产始终保持在较高水平,其粮食单产是全国平均水平

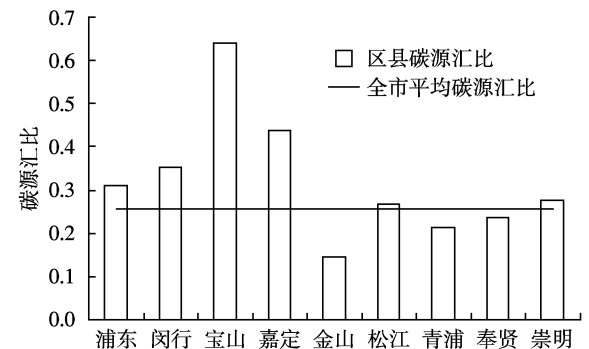


图 5 2009 年上海各区县农田生态系统碳源汇比
Figure 5 Carbon source/sink ratio in Shanghai in 2009

的 1.2 倍、化肥和农药投入水平分别是全国平均水平的 1.7 倍和 2.9 倍、复种指数是全国平均水平的 1.5 倍^[22-23], 从而导致单位耕地面积农田生态系统碳吸收量和碳排放量均高于我国其他地区^[12-15]。高强度的农业生产方式虽然使农田生态系统碳吸收量有所提高, 但为了维持作物高产而更多地消耗了资源和能源, 反而使农田生态系统碳排放量显著升高。因此, 在上海建设低碳城市的过程中, 需要重点转变现有农业生产方式以达到农业碳减排的目标。

此外, 本研究在计算农田生态系统碳源汇的过程中, 由于部分统计资料的缺失, 没有将涉及碳吸收的所有农作物和涉及碳排放的所有农业生产活动计算在内, 只计算了主要农作物类型的碳吸收和主要农业生产活动的碳排放, 虽然可能对研究结果有一定的影响, 但从总体上来说, 本研究基本反映了上海农田生态系统碳源汇时空变化格局。此外, 本研究碳吸收量的计算公式中农作物生物产量是由经济产量推算而来, 不可避免会产生一些误差, 而碳排放量的计算由于国内尚未研究确定农田生态系统碳排放清单, 转换系数的选取是在参照国外相关研究的基础上进行的, 对其在上海地区的适用性没有得到充分验证, 且由于没有相关监测数据也尚未将作物和土壤呼吸排放量纳入计算范围, 从而影响了本研究的估算精度, 需要

在今后的工作中通过农田生态系统的长期定位监测、农田土壤碳库变化等研究进一步补充完善本研究成果, 并探索农田生态系统碳减排增汇技术和措施, 应用于农业生产实践。

4 结论

1990—2009 年上海农田生态系统碳吸收总量总体处于逐步下降趋势, 粮食作物碳吸收比例基本保持在 60%~80%之间, 但经济作物碳吸收比例从近 20%逐步降低到仅 5%左右, 果蔬作物碳吸收比例则从 4%逐步升高到 20%; 碳排放总量呈逐步下降并趋于稳定的趋势, 农用化学品碳排放比例从 40%左右下降到 30%左右, 燃料动力碳排放比例保持在 40%~50%之间, 耕作灌溉碳排放保持在接近 20%的水平。单位耕地面积碳吸收量和碳排放量一直处于波动状态, 单位播种面积碳吸收量和碳排放量分别略有下降和上升, 但都基本处于稳定状态。

上海农田生态系统碳源汇影响因素分析表明, 碳吸收与水稻、小麦、玉米等粮食作物以及油菜籽等经济作物的产量有显著的正相关性, 而与蔬菜、水果等果蔬作物的产量有显著的负相关性; 而碳排放与氮肥、农药等农用化学品投入和机械用电、加工用电、农机动力等燃料动力使用以及种植面积、有效灌溉等耕作灌溉管理均有显著的正相关性。

本研究通过农田生态系统碳吸收量和碳排放量的测算, 基本掌握了上海农田生态系统碳源汇现状及其影响因素, 为上海低碳农业的发展提供了基础依据。因此, 在上海市进一步发展都市型现代农业的过程中, 从农田生态系统减源增汇的角度出发, 应转变追求高产高效的农业生产理念, 以提高作物生产力和肥料利用率、优化种植结构和能源利用结构、改变传统施肥方法和废弃物处置方式、调整耕作模式和灌溉制度等重点, 更多地注重基于生态和低碳的环境友好型农业生产技术的推广应用, 从而促进温室气体的减

表 3 农田生态系统碳吸收量与主要农作物产量的相关性分析

Table 3 Analysis on impact factors of carbon absorption of agricultural eco-system

农作物	水稻	小麦	玉米	大豆	薯类	棉花	花生	油菜籽	甘蔗	蔬菜	水果
相关系数	0.987**	0.877**	0.913**	-0.004	-0.176	0.618**	-0.497*	0.853**	-0.352	-0.848**	-0.910**

注:** 显著性水平为 0.01, 即 $P < 0.01$, 下同。

表 4 农田生态系统碳排放量与主要碳排放途径的相关性分析

Table 4 Analysis on impact factors of carbon emission of agricultural eco-system

排放途径	机械用电	加工用电	柴油	种植面积	灌溉面积	氮肥	磷肥	钾肥	复合肥	农药	农机动力
相关系数	0.950**	0.933**	0.176	0.831**	0.757**	0.795**	0.281	-0.011	-0.790**	0.467**	0.666**

排和低碳城市的发展。

参考文献:

- [1] 李迎春, 林而达, 甄晓林. 农业温室气体清单方法研究最新进展[J]. 地球科学进展, 2007, 22(10):1076-1080.
LI Ying-chun, LIN Er-da, ZHEN Xiao-lin. Advances in methods of agricultural greenhouse gas inventories[J]. *Advances in Earth Science*, 2007, 22(10):1076-1080.
- [2] IPCC, Working Group III. Greenhouse gas mitigation in agriculture[R]. Fourth Assessment Report, 2006:4-8.
- [3] 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.
- [4] IPCC. Volume 4: Agriculture, forestry and other land uses (AFOLU). 2006 IPCC guidelines for national greenhouse gas inventories[M]. IPCC/IGES, Hayama, Japan, 2006:5-6.
- [5] Cole C V. Agricultural options for mitigation of greenhouse gas emission[C]//Watson R T, Zinyowera M C, Moss R H. Climate change 1995 - impacts, adaptations and mitigation of climate change: intergovernmental panel on climate change. Cambridge: Cambridge University Press, 1996:1-27.
- [6] Lal R, Bruce J P. The potential of world crop land soils to sequester C and mitigate the greenhouse effect[J]. *Environmental Science & Policy*, 1999, 2(2):177-185.
- [7] Lal R, Kimble J M, Follett R F, et al. The potential of US crop land to sequester carbon and mitigate the greenhouse effect [M]. Chelsea, MI: Sleeping Bear Press Inc, 1998:128.
- [8] 赵荣钦, 黄爱民, 秦明周, 等. 中国农田生态系统碳增汇/减排技术研究进展[J]. 河南大学学报(自然科学版), 2004, 34(1):60-65.
ZHAO Rong-qin, HUANG Ai-min, QIN Ming-zhou, et al. Progress in the studies of techniques of adding carbon sinks and reducing carbon emissions in agroecosystems of China[J]. *Journal of Henan University (Natural Science Edition)*, 2004, 34(1):60-65.
- [9] 杨学明, 张晓平, 方华军. 农业土壤固碳对缓解全球变暖的意义[J]. 地理科学, 2003, 23(1):101-106.
YANG Xue-min, ZHANG Xiao-ping, FANG Hua-jun. Importance of agricultural soil sequestering carbon to offsetting global warming[J]. *Scientia Geographica Sinica*, 2003, 23(1):101-106.
- [10] 李长生. 土壤碳储量减少: 中国农业之隐患——中美农业生态系统碳循环对比研究[J]. 第四纪研究, 2000, 20(4):345-350.
LI Chang-sheng. Loss of soil carbon threatens Chinese agriculture: A comparison on agroecosystem carbon pool in China and the US[J]. *Quaternary Sciences*, 2000, 20(4):345-350.
- [11] 韩冰, 王效科, 欧阳志云. 中国农田生态系统土壤碳库的饱和水平及其固碳潜力[J]. 生态与农村环境学报, 2005, 21(4):6-11.
HAN Bing, WANG Xiao-ke, OUYANG Zhi-yun. Saturation levels and carbon sequestration potentials of soil carbon pools in farmland ecosystems of China[J]. *Journal of Ecology and Rural Environment*, 2005, 21(4):6-11.
- [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. Temporospatial 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] 颀鹏, 蔺海明, 黄高宝, 等. 河西绿洲农田生态系统碳源/汇的时空差异研究[J]. 草业学报, 2009, 18(4):224-229.
XIE Peng, LIN Hai-min, HUANG Gao-bao, et al. Research on the temporal-spatial differences of carbon sources and sinks of farmland ecosystem of Hexi oasis in Gansu[J]. *Acta Prataculturae Sinica*, 2009, 18(4):224-229.
- [14] 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.
WANG Jing, FENG Yong-zhong, YANG Gai-he, et al. Temporospatial variation analysis of carbon source/sink of farmland ecosystem in Shanxi[J]. *Journal of Northwest Agriculture and Forestry University (Natural Science Edition)*, 2010, 38(1):195-200.
- [15] 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, 7:40-44.
ZHAO Rong-qin, LIU Ying, DING Ming-lei, et al. Research on carbon source and sink of farmland ecosystem in Henan Province[J]. *Journal of Henan Agricultural Sciences*, 2010, 7:40-44.
- [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(1/2/3):217-232.
- [17] 王修兰. 二氧化碳、气候变化与农业[M]. 北京: 气象出版社, 1996:53-59.
WANG Xiu-lan. CO₂, climate change and agriculture [M]. Beijing: China Meteorological Press, 1996:53-59.
- [18] 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.
LI Ke-rang. Land use change, greenhouse gases emission and carbon cycle of terrestrial ecosystem[M]. Beijing: China Meteorological Press, 2000:260-261.
- [19] 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.
TANG Hai-ming, TANG Wen-guang, XIAO Xiao-ping, et al. Current situation and countermeasures of China's C sequestration and mitigation[J]. *Ecology and Environmental Sciences*, 2010, 19(7):1755-1759.
- [20] 伍芬琳, 李琳, 张海, 等. 保护性耕作对农田生态系统净碳释放量的影响[J]. 生态学报, 2007, 26(12):2035-2039.
WU Fen-lin, LI Lin, ZHANG Hai, et al. Effects of conservation tillage on net carbon flux from farmland ecosystems[J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2007, 26(12):2035-2039.
- [21] 彭华, 纪雄辉, 刘昭兵, 等. 洞庭湖地区长期施肥条件下双季稻田生态系统净碳汇效应及收益评估[J]. 农业环境科学学报, 2009, 28(12):2526-2532.
PENG Hua, JI Xiong-hui, LIU Zhao-bing, et al. Evaluation of net carbon sink effect and economic benefit in double rice field ecosystem under long-term fertilization [J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2009, 28(12):2526-2532.
- [22] 钱晓雍, 沈根祥, 吴婷, 等. 上海农用化学品使用历史演变及污染防治对策[J]. 环境科学与技术, 2010, 33(12):184-187.
QIAN Xiao-yong, SHEN Gen-xiang, WU Ting, et al. Application history and pollution control strategy of agrochemicals in Shanghai[J]. *Environmental Science and Technology*, 2010, 33(12):184-187.
- [23] 中华人民共和国国家统计局. 2009年中国统计年鉴[M]. 北京: 中国统计出版社, 2009:329-344.
National Bureau of Statistics of China. China statistical yearbook 2009 [M]. Beijing: China Statistics Press, 2009:329-344.