

# 嘉兴市农业温室气体排放特征及减排路径

沈亚强<sup>1</sup>, 陈龙骏<sup>2</sup>, 金玉婷<sup>2</sup>, 钱淑琼<sup>2</sup>, 陈贵<sup>1</sup>, 程旺大<sup>1,\*1</sup>

1. 浙江省嘉兴市农业科学研究院(所), 浙江 嘉兴 314016

2. 嘉兴市经济建设规划院, 浙江 嘉兴 314050

**摘要:** 农业是重要的温室气体排放源之一, 准确分析农业温室气体的排放特征可为制定和更新低碳化政策及措施提供重要依据。根据浙江省嘉兴市相关统计资料, 参照《浙江省温室气体清单编制指南(2017年版)》温室气体核算方法, 分析了嘉兴市2010—2016年农业温室气体的排放特征。结果显示: 嘉兴市农业温室气体减排工作成效显著, 年均减排幅度达8.4%, 2014年较2013年减排20.2%; 种植业是嘉兴市农业温室气体的主要来源, 排放占比最大的温室气体排放源依次为化肥氮、稻田甲烷和与羊养殖相关的排放源, 2016年, 三者分别占嘉兴市农业温室气体排放总量的40.2%、36.0%和10.5%; 种植业发展规模较大的桐乡市和平湖市农业温室气体排放量位居嘉兴市前2位; 种植业和畜牧业体量都不大的嘉善县, 农业温室气体排放量总体相应较小。稻田甲烷减排、合理施用化肥将是未来嘉兴市低碳农业发展的重点。

**关键词:** 嘉兴市; 农业; 温室气体; 减排

**中图分类号:** S181

**文献标志码:** A

**文章编号:** 1004-1524(2018)10-1755-10

以全球变暖为主要特征的气候变化已经成为当今世界最为重要的环境问题, 是21世纪人类面临的最严峻的挑战之一, 直接关系到人类的生存和发展<sup>[1]</sup>, 对全球生态系统及社会经济系统产生了巨大影响。近10多年来, 人们切身感受到了冰川融化、海平面上升、极端干旱、极端高温、极端降水等极端事件的频发, 以及作物生产力的下降等一系列由气候变化带来的负面影响<sup>[2, 3, 4, 5]</sup>。农业是受全球气候变化冲击最大的行业之一, 同时也是温室气体的主要排放源之一, 对温室气体总排放的贡献率约为20%<sup>[6, 7, 8, 9, 10, 11, 12, 13, 14]</sup>。据估计, 全球范围内农业排放的甲烷(CH<sub>4</sub>)约占源于人类活动产生的CH<sub>4</sub>排放总量的50%, 氧化亚氮(N<sub>2</sub>O)约占60%<sup>[15, 16, 17]</sup>。2010年数据显示, 我国农业温室气体排放达15.9亿t二氧化碳当量, 占世界农业领域温室气体排放总量的33.69%<sup>[18, 19]</sup>, 成为目前农业温室气体排放量最大、增长速度最快的国家<sup>[20, 21]</sup>。在全球气候变化背景下, 农业活动温室气体排放越来越受到社会各界的关注。准确合理地分析农业温室气体的排放特征可以为合理制定农业减排措施提供重要的依据。

嘉兴市是浙江省粮、油、畜、茧、鱼的重要产区。近年来, 嘉兴市围绕稳定粮食生产、推进产业转型、促进农民增收的总体要求, 大力发展现代都市型生态农业, 农业可持续发展水平一直保持全省领先。同时, 通过大力推进农业面源污染治理工作, 生猪养殖业减量提质取得了显著成效。近年来嘉兴市农业温室气体的排放总量及其结构在不断变化, 深入分析嘉兴市农业温室气体排放特征, 明确农业减排的重点对象, 可为合理制定和更新低碳化政策及措施, 加速低碳城市建设提供依据。

<sup>1</sup> \*通信作者, 程旺大, E-mail: chwd228@163.com

**作者简介:** 沈亚强(1984—), 男, 浙江海宁人, 硕士, 农艺师, 主要从事湿地生态农业研究。E-mail: shenyaqiang@163.com

**收稿日期:** 2018-05-11

**基金资助:** 嘉兴市重大科技项目(2017AZ13025); 嘉兴市农业技术推广基金会项目; 浙江省自然科学基金(LY16D050002)

# 1 材料与方法

主要采用《浙江省温室气体清单编制指南(2017年修订版)》(以下简称《指南》)计算分析2010—2016年嘉兴市农业领域温室气体排放特征。根据《指南》界定嘉兴市农业领域温室气体的排放源,纳入核算的温室气体主要为CH<sub>4</sub>和N<sub>2</sub>O,其中CH<sub>4</sub>的排放源包括稻田CH<sub>4</sub>、动物肠道发酵以及动物粪便管理3方面,而N<sub>2</sub>O的排放源主要包括农用地和动物粪便管理2个方面。利用统计资料获得的排放因子和活动水平数据计算各部门温室气体排放情况,分析温室气体的排放特征。

## 1.1 数据来源

反映稻田CH<sub>4</sub>排放活动的各类水稻播种面积数据主要来源于2011—2017年的《嘉兴市统计年鉴》、农经部门调查数据以及专家咨询数据;反映农用地N<sub>2</sub>O排放活动水平的数据主要包括各县(市、区)农用地化肥纯氮用量、主要农作物产量及秸秆还田率、畜禽年末存栏量以及乡村人口等。

根据嘉兴市农业发展的实际情况,文中主要统计了水稻、小麦、玉米、大麦、大豆、蚕豆、油菜、花生、芝麻、棉花、薯类、麻类、蔬菜、烟叶、甘蔗等作物的产量数据及奶牛、湖羊、山羊、猪、家禽、兔等畜禽的年末存栏量数据,数据主要来源于2011—2017年的《嘉兴市统计年鉴》以及农经部门调查数据。水稻、小麦、玉米、大麦、大豆、蚕豆、油菜、花生、棉花以及薯类等作物秸秆的还田率采用农经部门的调查数据,而芝麻、麻类、烟叶、蔬菜、甘蔗的秸秆还田率因农经部门未进行调查统计,采用了《指南》的推荐值进行核算。

## 1.2 核算方法

首先计算出各部门CH<sub>4</sub>和N<sub>2</sub>O的排放量,然后统一将CH<sub>4</sub>和N<sub>2</sub>O的排放量换算成等量CO<sub>2</sub>。按联合国政府间气候变化专门委员会(inter governmental panel on climate change, IPCC)第2次评估报告给出的全球增温潜势计算,CH<sub>4</sub>和N<sub>2</sub>O分别用21倍和310倍进行换算。汇总计算出各个排放源以及各部门的温室气体排放量后,分析各个排放源及各部门排放的占比构成,并分别计算出种植业和畜牧业的碳排放强度(单位生产总值增长带来的CO<sub>2</sub>排放量,单位:t·万元<sup>-1</sup>)。各部门排放量的计算方法如下。

### 1.2.1 稻田CH<sub>4</sub>排放

稻田CH<sub>4</sub>排放的估算方法总体上遵循IPCC指南的基本方法。首先,分别确定分类型稻田的排放因子和活动水平,然后根据式(1)计算排放量。

$$E_{CH_4} = \sum EF_i \times D_i. \quad (1)$$

式中: $E_{CH_4}$ 为稻田CH<sub>4</sub>排放总量(t);  $EF_i$ 为分类型稻田CH<sub>4</sub>排放因子(kg·hm<sup>-2</sup>);  $D_i$ 为对应于该排放因子的水稻播种面积(10<sup>3</sup>hm<sup>2</sup>);  $i$ 表示稻田类型,分别指单季水稻、双季早稻和晚稻。采用《指南》中推荐的排放因子,单季稻、双季早稻、双季晚稻排放因子分别为215.5、211.4和224.0 kg·hm<sup>-2</sup>。

### 1.2.2 农用地N<sub>2</sub>O排放

农用地N<sub>2</sub>O排放等于各排放过程的氮输入量乘以其相应的N<sub>2</sub>O排放因子(式2)。

$$E_{N_2O} = \sum(N_{\text{输入}} \times EF). \quad (2)$$

式中：EN<sub>20</sub>EN<sub>20</sub> 为农用地 N<sub>20</sub> 排放总量； N 输入为各排放过程氮输入量； EF 为对应的 N<sub>20</sub> 排放因子。

农用地氮输入量主要包括化肥氮(氮肥和复合肥中的氮)(N 化肥)、粪肥氮(N 粪肥)以及秸秆还田氮(包括地上秸秆还田氮和地下根氮)N 秸秆，分为直接输入和间接输入 2 部分。根据式(3)计算农用地 N<sub>20</sub> 直接排放量，其中，N 粪肥和 N 秸秆的计算方法如式(4)、式(5)。在计算粪肥氮时，淋溶径流损失率和挥发损失率采用推荐值，分别为 15%和 20%。

$$N_{20 \text{ 直接}} = (N_{\text{化肥}} + N_{\text{粪肥}} + N_{\text{秸秆}}) \times EF_{\text{直接}}. \quad (3)$$

式中，EF 直接为农用地 N<sub>20</sub> 直接排放对应的 N<sub>20</sub> 排放因子。

$$N_{\text{粪肥}} = (\text{畜禽总排泄氮量} + \text{乡村人口总排泄氮量}) \times (1 - \text{淋溶径流损失率} 15\% - \text{挥发损失率} 20\%) - \text{畜禽粪便管理系统 N}_{20} \text{排放量折纯氮量}. \quad (4)$$

$$N_{\text{秸秆}} = (\text{作物籽粒产量} / \text{经济系数} - \text{作物籽粒产量}) \times \text{干质量比} \times \text{秸秆还田率} \times \text{秸秆含氮率} + \text{作物籽粒产量} / \text{经济系数} \times \text{根冠比} \times \text{干质量比} \times \text{根或秸秆含氮率}. \quad (5)$$

主要农作物参数见表 1。

表 1 嘉兴市主要农作物参数

作物类型	经济系数	干质量比	根冠比	籽粒含氮比例	秸秆或根含氮比例	秸秆还田率
Crop type	Economic coefficient	Dry weight ratio	Root-shoot ratio	Nitrogen content in grain	Nitrogen content in straw or root	Straw returning ratio/%
稻谷 Rice	0.489	0.855	0.125	0.010 00	0.007 53	70
小麦 Wheat	0.434	0.87	0.166	0.014 00	0.005 16	85.7
玉米 Corn	0.438	0.86	0.17	0.017 00	0.005 80	26
高粱 Sorghum	0.393	0.87	0.185	0.017 00	0.007 30	14
谷子 Millet	0.385	0.83	0.166	0.007 00	0.008 50	0
其他杂粮 Other	0.455	0.83	0.166	0.014 00	0.005 60	48.6

coarse cereals						
大豆 Soybean	0.425	0.86	0.13	0.060 00	0.018 10	29.9
其他豆科作物 Other beans	0.385	0.82	0.13	0.050 00	0.022 00	14
油菜籽 Rape	0.271	0.82	0.15	0.005 48	0.005 48	23
花生 Peanut	0.556	0.9	0.2	0.050 00	0.018 20	14
芝麻 Sesame	0.417	0.9	0.2	0.050 00	0.013 10	14
棉花 Cotton	0.383	0.83	0.2	0.005 48	0.005 48	19.7
薯类 Potato	0.667	0.45	0.05	0.004 00	0.011 00	21.3
麻类 Tuber crop	0.83	0.83	0.2	0.013 10	0.013 10	14
烟叶 Tobacco	0.83	0.83	0.2	0.041 00	0.014 40	14
蔬菜 Vegetables	0.83	0.15	0.25	0.008 00	0.008 00	14
甘蔗叶 Sugarcane leaf	0.83	0.83			0.005 80	14
甘蔗茎 Sugarcane stem	0.75	0.32	0.26	0.004 00	0.005 80	14

农用地 N<sub>2</sub>O 间接排放源于施肥土壤和畜禽粪便氮氧化物 (NO<sub>x</sub>) 和氨 (NH<sub>3</sub>) 挥发, 经过大气氮沉降引起的 N<sub>2</sub>O 排放 (N<sub>2</sub>O 沉降), 以及土壤氮淋溶或径流损失进入水体而引起的 N<sub>2</sub>O 排放 (N<sub>2</sub>O 淋溶)。大气氮主要来源于畜禽粪便 (N 畜禽) 和农用地氮输入 (N 输入) 的 NH<sub>3</sub> 和 NO<sub>x</sub> 挥发。N 畜禽和 N 输入的挥发率采用推荐值, 分别为 20% 和 10%。排放因子采用 IPCC 推荐的排放因子 0.01; 氮淋溶和径流损失的氮量按占农用地总氮输入量的 20% 来估算, 排放因子采用 IPCC 推荐的排放因子 0.007 5。计算方法如式 (6)、式 (7)。

$$N_2O_{\text{沉降}} = (N_{\text{粪肥}} \times 20\% + N_{\text{输入}} \times 10\%) \times 0.01; \quad (6)$$

$$N_2O_{\text{淋溶}} = N_{\text{输入}} \times 20\% \times 0.0075. \quad (7)$$

### 1.2.3 动物肠道发酵 CH<sub>4</sub> 排放

嘉兴市动物肠道 CH<sub>4</sub> 的排放源动物包括奶牛、绵羊、山羊和猪。各种动物肠道发酵 CH<sub>4</sub> 排放量等于动物的存栏数量乘以适当的排放因子, 各种动物的排放量总和为总排放量。计算方法如式 (8)。

$$E_{CH_4} = \sum EF_{CH_4,enteric,i} \times P_i \times 10^{-3}。 (8)$$

式中： $E_{CH_4}$  为动物肠道发酵  $CH_4$  总排放量，t； $EF_{CH_4,enteric,i}$  为第  $i$  种动物  $CH_4$  排放因子， $kg \cdot ind^{-1} \cdot a^{-1}$ ； $P_i$  为第  $i$  种动物的数量。

采用《指南》推荐的华东地区动物肠道发酵  $CH_4$  排放因子数据(表 2)。

表 2 嘉兴市动物肠道发酵  $CH_4$  排放因子

饲养方式	奶牛	绵羊	山羊	猪
Feeding model	Cow	Sheep	Goat	Pig
规模化饲养	88.1	8.2	8.9	1
Large-scale feeding				
农户散养	89.3	8.7	9.4	1
Scatter-feeding				

#### 1.2.4 动物粪便管理 $CH_4$ 和 $N_2O$ 排放

嘉兴市动物粪便管理  $CH_4$  和  $N_2O$  的排放源包括奶牛、绵羊、山羊、猪以及家禽。各种动物粪便管理  $CH_4$  和  $N_2O$  排放计算方法如式(9)和式(10)。

$$E_{CH_4,manure,i} = EF_{CH_4,manure,i} \times P_i \times 10^{-3}。 (9)$$

式中： $E_{CH_4,manure,i}$  为动物粪便管理  $CH_4$  总排放量，单位 t； $EF_{CH_4,manure,i}$  为第  $i$  种动物粪便管理  $CH_4$  排放因子，单位  $kg \cdot ind^{-1} \cdot a^{-1}$ ； $P_i$  为第  $i$  种动物的数量。

$$E_{N_2O,manure,i} = \sum EF_{N_2O,manure,i} \times P_i \times 10^{-3}。 (10)$$

式中： $E_{N_2O,manure,i}$  为动物粪便管理  $N_2O$  总排放量，t； $EF_{N_2O,manure,i}$  为第  $i$  种动物粪便管理  $N_2O$  排放因子， $kg \cdot ind^{-1} \cdot a^{-1}$ ； $P_i$  为第  $i$  种动物的数量。

采用《指南》推荐的华东地区粪便管理  $CH_4$  和  $N_2O$  排放因子数据(表 3)。

表 3 嘉兴市动物粪便管理  $CH_4$  和  $N_2O$  排放因子

排放种类	奶牛	绵羊	山羊	猪	家禽
Emission sources	Cow	Sheep	Goat	Pig	Poultry
动物粪便管理 CH4					
CH4 emission from animal manure management	8.33	0.26	0.28	5.08	0.02
动物粪便管理 N2O					
N2O emission from animal manure management	2.065	0.113	0.113	0.175	0.007

## 2 结果与分析

### 2.1 嘉兴市农业温室气体排放量变化

2010—2016年，嘉兴市农业领域温室气体减排工作成效显著(图1)，年均减排量达到16.2万t二氧化碳当量，年均减排幅度达8.4%。2010—2016年，嘉兴市农业温室气体年减排量与减排幅度的变化趋势一致。从2010年开始，嘉兴市农业温室气体年减排量及降幅逐年增大，至2014年，减排量及降幅达到最大，降幅达到20.2%；2015年后，农业温室气体年减排量及降幅又逐年减小。分析其原因，主要是因为2013年开始，嘉兴市针对生猪养殖业进行了全面铁腕整治，出台了一系列生猪养殖转型升级、减量提质的政策措施。通过科学规划，划定禁、限养区，限定养殖数量，引导鼓励农民转产转业，让留下的养猪户由传统的“低小散”转向生态、规模化养殖。2013年生猪存栏量较2012年下降了77.66万头，降幅达28.4%。其后，嘉兴市生猪存栏量每年以44%~60%的速度大幅下降，至2016年末，嘉兴市生猪存栏量已降至18.34万头，仅为2010年末存栏量的6.2%。

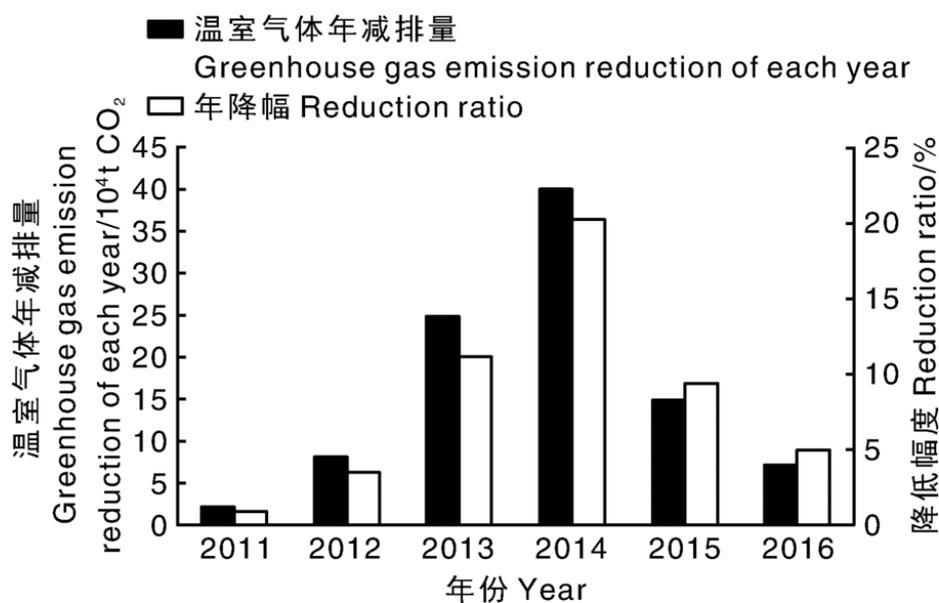


图1 2011—2016年嘉兴市农业温室气体减排情况

## 2.2 嘉兴市农业温室气体排放结构变化

从图 2 可以看出，嘉兴市农业温室气体排放以 N<sub>2</sub>O 为主。2010—2016 年，N<sub>2</sub>O 对嘉兴市农业温室气体排放的贡献率均在 50% 以上，且贡献率呈逐年增长的趋势。相应地，CH<sub>4</sub> 对嘉兴市农业温室气体排放的贡献率则逐年降低。农业温室气体排放结构的变化与排放 N<sub>2</sub>O 和 CH<sub>4</sub> 相关的农业活动变化密切相关。2010—2016 年，嘉兴市水稻种植面积逐年下降，但下降幅度不大，平均年变化率为 3.3%，整体上，嘉兴市稻田 CH<sub>4</sub> 排放量较为稳定。嘉兴市农业领域 CH<sub>4</sub> 排放量的减少主要源于动物肠道产生的 CH<sub>4</sub> 及动物粪便管理中产生的 CH<sub>4</sub> 的降低。这也从侧面反映出，嘉兴市对畜牧业的调整转型努力取得了较大的减排成效。

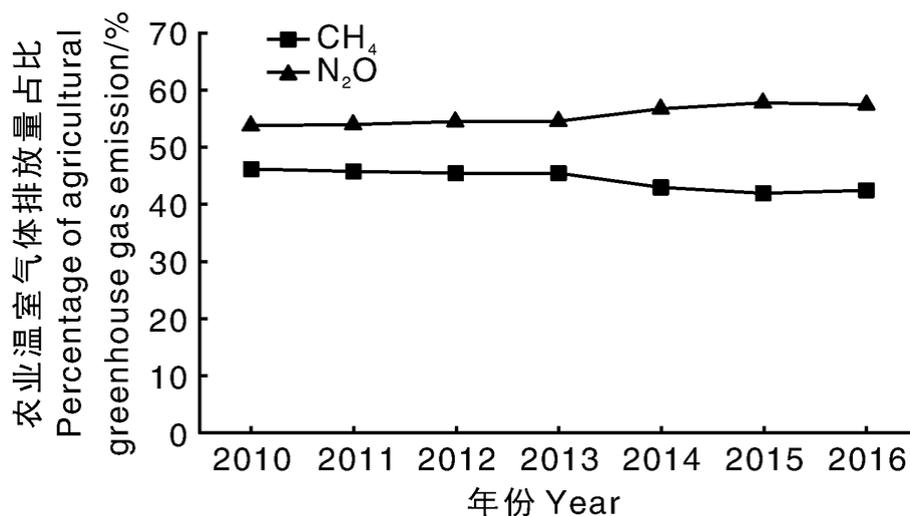


图 2 2010—2016 年嘉兴市农业温室气体排放组成结构变化

## 2.3 种植业和畜牧业温室气体排放变化

2010—2016 年，嘉兴市农业温室气体排放总量中种植业的贡献远大于畜禽养殖业，且种植业排放量所占比重呈逐年增长趋势，至 2016 年，种植业排放所占比重已经达到 87.1% (图 3)。在各个部门中，农用地 N<sub>2</sub>O 排放占比重最大。从 2014 年开始，其排放量占比已经达到 50% 以上。农用地 N<sub>2</sub>O 的排放主要与肥料施用有关。从目前嘉兴市农用地肥料施用情况来看，存在着施肥量大、强度高、肥料利用低等问题，导致农用地 N<sub>2</sub>O 排放量较大。因此，嘉兴市种植业存在着较大的减排潜力。稻田 CH<sub>4</sub> 的排放占比仅次于农用地 N<sub>2</sub>O 排放，至 2016 年，其排放占比已达到嘉兴市农业温室气体排放总量的 1/3。嘉兴市稻田 CH<sub>4</sub> 排放量较为稳定，其占比增长主要源于农业温室气体排放总量的减少。自开展生猪养殖业减量提质转型发展后，嘉兴市农业领域动物肠道发酵 CH<sub>4</sub> 排放、动物粪便管理 CH<sub>4</sub> 和 N<sub>2</sub>O 排放所占比例逐年降低。

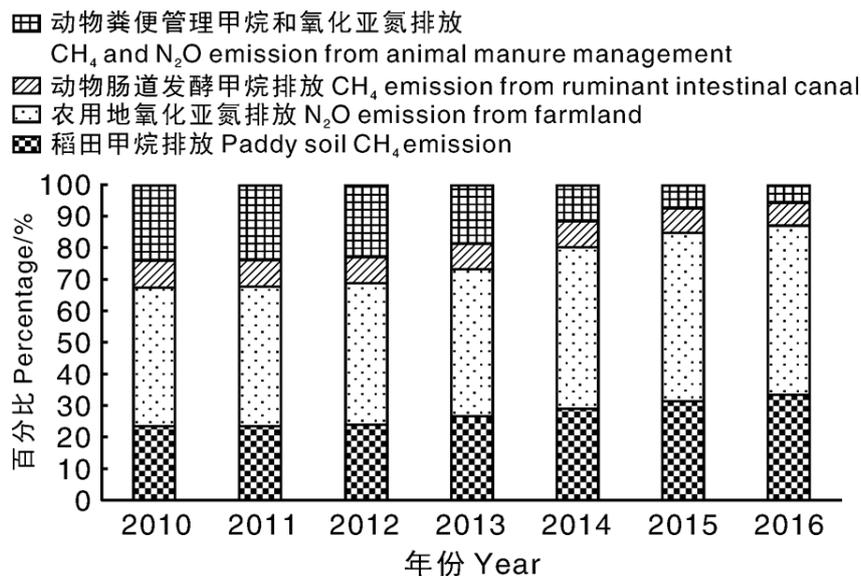


图3 2010—2016年嘉兴市农业温室气体各来源排放量占比情况

从2010—2016年种植业和畜禽养殖业碳排放强度的变化来看，嘉兴市种植业和畜牧业碳排放强度均呈逐年降低趋势(图4)，从2010年的 $1.56 \text{ t} \cdot \text{万元}^{-1}$ 和 $0.95 \text{ t} \cdot \text{万元}^{-1}$ 分别降低到2016年的 $0.85 \text{ t} \cdot \text{万元}^{-1}$ 和 $0.37 \text{ t} \cdot \text{万元}^{-1}$ ，这与近年来嘉兴市农业现代化水平的不断提高及大力发展现代都市型生态农业有着密不可分的关系。

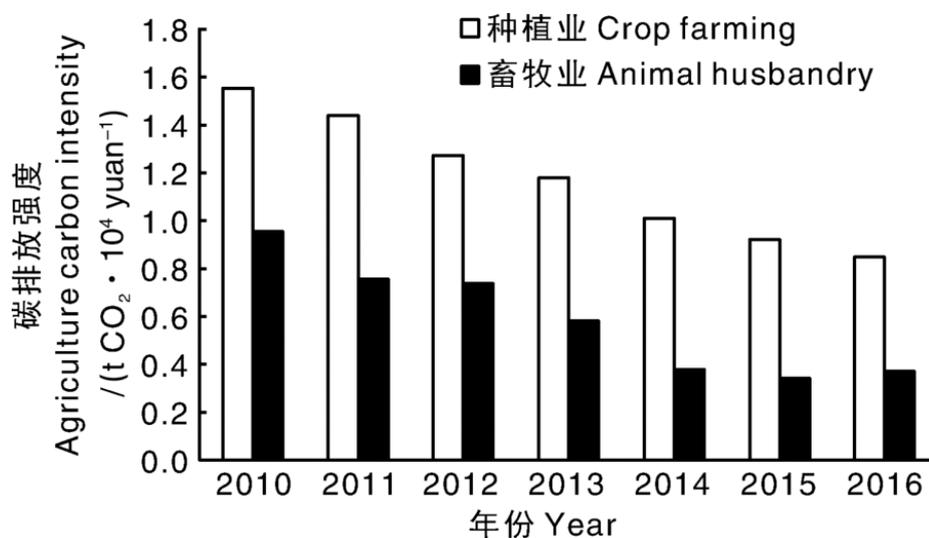


图4 2010—2016年嘉兴市种植业和畜牧业碳排放强度趋势

#### 2.4 嘉兴市农业温室气体排放来源

由表4可知:2010—2012年，与生猪养殖相关的排放是嘉兴市农业领域温室气体第1大排放源，第2大排放源为与水稻种植相关的排放(包含水稻秸秆还田引起的N<sub>2</sub>O排放)，而由化肥氮引起的农田N<sub>2</sub>O排放是第3大排放源。

表4 2010—2016年嘉兴市农业温室气体排放来源与构成

排放源 Emission sources									
年份 Year	化肥氮 Inorganic fertilizer-nitrogen	水稻种植 Rice farming	其他作物 (除水稻外) Other crops farming	生猪养殖 Pig husbandry	羊养殖 Sheep husbandry	家禽养殖 Poultry production	兔养殖 Rabbit husbandry	牛养殖 Cattle husbandry	乡村人口粪 肥氮 Human manure
2010	22.7	24.8	0.7	33.7	9.0	4.4	0.9	0.5	3.2
2011	22.9	24.8	0.7	33.8	8.5	4.5	0.9	0.6	3.3
2012	23.8	25.5	0.7	32.4	7.9	4.6	1.0	0.6	3.5
2013	26.8	28.4	0.8	26.1	8.8	4.0	0.9	0.4	3.9
2014	33.5	31.0	0.9	13.8	10.5	4.2	1.0	0.4	4.8
2015	36.3	33.6	1.6	6.1	11.2	4.3	1.2	0.4	5.3
2016	40.2	36.0	1.6	3.6	10.5	4.4	0.0	0.2	3.5

2013年，与水稻种植相关的排放已成为第1大排放源，而由化肥氮引起的农田N<sub>2</sub>O排放是第2大排放源；由于对生猪养殖业的全面整治，2013年，与生猪养殖相关的排放占比已降至第3位。2014—2016年，由化肥氮引起的农田N<sub>2</sub>O排放跃升为第1大排放源，与水稻种植相关的排放为第2大排放源。从2015年开始，与羊养殖相关的排放成为第3大排放源。嘉兴市是湖羊的重点产区之一，湖羊养殖历史悠久。虽然这几年嘉兴市羊养殖数量逐年下降，但其排放量占整个农业温室气体排放总量的百分比一直维持在10%左右。2016年，与生猪养殖相关的排放已降至第5位。

另外，从表4数据也可以看出，由化肥氮引起的农田N<sub>2</sub>O排放以及与水稻种植相关的排放所占的比重均呈逐年增长趋势。这主要是因为2010—2016年，嘉兴市农用地氮肥施用量及水稻种植面积总体上保持稳定，而农业温室气体排放总量则逐年降低，故其排放量占比逐年增加。

## 2.5 嘉兴市农业温室气体排放空间特征

由表5可以看出，2010—2016年，桐乡市、平湖市农业温室气体排放量一直占据前2位，分别平均占嘉兴全市农业温室气体排放总量的18.6%和16.8%，主要是由于桐乡市和平湖市种植业体量明显大于其他县(市、区)。海盐县农业温室气体排放量在2010—2015年一直位居第3位，2016年则下滑至第5位。2010—2012年，秀洲区农业温室气体排放量在嘉兴市各县(市、区)中最低；其后，占比逐渐增加，至2016年，已升至第3位。由于种植业和畜牧业体量相对较小，嘉善县农业温室气体的排放量总体较低，其占嘉兴市农业温室气体排放总量的比重一直位于最后2位。

表5 2010—2016年嘉兴市农业温室气体排放的地理分布

年份	南湖区	秀洲区	嘉善县	海盐县	海宁市	平湖市	桐乡市
Year	Nanhu District	Xiuzhou District	Jiashan City	Haiyan City	Haining City	Pinghu City	Tongxiang City
2010	14.4	11.2	12.4	15.2	13.5	16.5	16.7
2011	14.2	11.2	12.2	15.4	13.6	16.3	17.0
2012	13.3	11.6	12.4	15.3	13.9	16.5	17.0
2013	11.8	12.3	12.3	14.5	14.3	17.1	17.7
2014	10.4	12.9	10.3	16.1	13.8	16.1	20.4
2015	9.5	13.6	10.5	15.3	14.1	16.3	20.7
2016	9.8	14.8	9.7	12.7	13.7	18.8	20.5

### 3 结论与讨论

本文从嘉兴市实际情况出发,采用《指南》推荐的计算方法,分析了2010—2016年嘉兴市农业领域温室气体排放的特征。结果表明,整治调整畜禽养殖业后,嘉兴市农业减排工作成效显著。农业温室气体排放总量以年均8.4%的速率逐年降低,2014年降幅达到20.2%。由于畜禽养殖业温室气体排放的大幅下降,种植业对嘉兴市农业温室气体的贡献率逐年增长,至2016年,种植业温室气体排放所占比重已经达到87.1%。通过对嘉兴市农业温室气体种类、排放源的识别和排放量占比的分析,发现由化肥氮引起的农田N<sub>2</sub>O排放及与水稻种植相关的排放是目前嘉兴市农业温室气体排放的主要来源。种植业将是今后嘉兴市农业减排工作的重点领域。

#### 3.1 稻田减排

与水稻种植相关的排放是嘉兴市农业温室气体的主要排放源之一,其排放量占比一直位居前2位。嘉兴市一直是浙江省最大的粮食主产区,2010—2016年,年均水稻种植面积为11.1万hm<sup>2</sup>,且以单季晚稻为主,双季稻种植面积仅占0.04%。2016年,嘉兴市水稻播种面积占浙江省总面积的12.3%。受沿海经济社会发展、农业劳动力短缺及粮经种植结构调整等因素影响,近年来嘉兴市水稻种植面积有所下降,但整体下降幅度不大,且从2016年开始水稻种植面积又有所增加。在稳粮增产大背景下,未来嘉兴市水稻种植面积年间间会存在正常波动,但波动幅度不会大。因此,预计未来嘉兴市稻田CH<sub>4</sub>排放量仍会维持在较高的水平。

从嘉兴市水稻生产实际看,为获得高产,稻田肥料施用量较大,往往以经验施肥为主,盲目性也较大。因此,在生产上提倡根据水稻不同生长期所需的营养元素,测土配方施肥,平衡氮、磷、钾等营养元素,适当调减氮肥用量,少量多次施肥以提高肥料利用率。另外,在水稻生产实际中,不少农户会选择施用有机肥,但不少研究表明,稻田CH<sub>4</sub>排放量会随着有机肥用量的增加而增加<sup>[22, 23, 24]</sup>。从减排角度而言,可选用沼渣代替有机肥进行施肥,既能降低稻田CH<sub>4</sub>的排放量,又能保证水稻产量<sup>[25, 26]</sup>。

目前,嘉兴地区主要以种植单季晚稻为主,晚稻收割后约一半左右稻田在冬季被闲置,从而导致大量杂草生长,这部分杂

草在翻耕还田、腐烂降解时会显著促进 CH<sub>4</sub> 的产生和排放，其影响也不容小觑[27]。另外，这部分冬闲田大部分处于长期淹水或者湿润状态。研究表明，常年淹水稻田在水稻生长季具有最大 CH<sub>4</sub> 排放量，在非水稻生长季也有一定的 CH<sub>4</sub> 排放[28]。而冬水田转稻麦轮作后，可增加生态系统温室气体的碳盈余，降低温室气体的综合增温效应，并多出一季小麦产出，是一种对环境 and 农户有利的土地利用方式<sup>[29, 30]</sup>。因此，从降低温室气体排放角度出发，稻田应采用合理的轮作模式，水稻收割后尽可能种植小麦等春花作物。

推广稻田养鸭、稻田养鱼等综合种养模式也是减少稻田温室气体排放的有效措施之一。袁伟玲等<sup>[31]</sup>的研究表明，采用稻田养鱼模式后，稻田 CH<sub>4</sub> 及 N<sub>2</sub>O 排放量均有所降低，采用稻田养鸭模式后，稻田 CH<sub>4</sub> 排放量有所减少，而 N<sub>2</sub>O 排放量有所增加，但综合温室效应仍有所降低。而且，采用综合种养模式往往也能获得较高的经济效益。目前，稻田养鱼这一模式在嘉兴市已有一定推广面积，今后可适当加大推广力度。

### 3.2 农用地 N<sub>2</sub>O 减排

农用地 N<sub>2</sub>O 排放是嘉兴市农业领域温室气体排放的主体，其中，化肥氮又是最大的排放源。从当前生产实际来看，嘉兴市农用地施肥量普遍较大。2010—2016 年，嘉兴市农用地年均纯氮用量为 8.14 万 t，其中 95%以上氮素来自氮肥，其余来自复合肥。故要减少农用地 N<sub>2</sub>O 排放，首当其冲就是减少氮肥用量。研究表明，N<sub>2</sub>O 的排放会随着施肥量的增加而增加，且 N<sub>2</sub>O 的排放量与氮肥的施用量并不呈线性变化关系，而是以指数形式增长，特别是当施氮量超过作物最大需氮量时<sup>[32, 33]</sup>。因此，生产上应合理施氮，推荐测土配方施肥以及施用缓释肥。

测土配方施肥是当今科学施肥的发展方向，通过合理的养分配比、有机肥与化肥混施等提高氮肥利用率。另外，目前农田施肥的方式主要还是以人工撒施为主，盲目性和随机性较大。将施肥方式改为深施、少量频施及叶面喷施等均可减少 N<sub>2</sub>O 的排放。施用长效缓释肥也可降低农田 N<sub>2</sub>O 排放。碳酸氢铵和尿素是嘉兴市的主体肥料，但它们的肥效期短，挥发损失量大，氮素利用率低，而施用长效碳酸氢铵与长效尿素则能显著减少 N<sub>2</sub>O 排放。但缓释肥价格较高，因而推广的阻力较大。

### 3.3 畜牧业减排

近年来，通过生猪养殖业的“减量提质”调整，嘉兴市生猪养殖数量锐减。目前，嘉兴市生猪存栏量已基本趋于稳定，主要以规模化、集约化养殖为主。另外，在畜禽养殖废弃物处理方面，嘉兴市一直走在浙江省前列。早在 2005 年，嘉兴市各级农业部门就牵头组织开展了以“干湿分离、雨污分离、沼气处理设施建设”为主的畜禽排泄物治理工作。同时，根据嘉兴市畜禽养殖户多、规模小的特点，开展畜禽干粪集中收集处理，生产有机肥和复合有机肥，并将生猪养殖场沼液通过管网或槽灌车输送到相邻或周边农田、水果、林木、蔬菜地，形成了一系列各具特色的循环利用模式。2011 年，嘉兴市人民政府又印发了《嘉兴市畜禽养殖污染防治管理办法》，进一步加强和规范畜禽养殖污染的防治管理。因此，未来嘉兴市生猪养殖业的减排空间不大。

嘉兴市是湖羊的原产地之一，湖羊养殖量大，2010—2016 年，嘉兴市年均湖羊存栏量达 61.1 万头。2015 年开始，湖羊养殖业的排放已成为嘉兴市农业温室气体排放的第 3 大排放源。传统湖羊养殖主要以饲喂干草料为主，若饲喂青贮后的草料，则可以缩短草料中的纤维在瘤胃或大肠中的滞留时间，从而减少 CH<sub>4</sub> 的生成。目前，桐乡市、秀洲区等地积极探索湖羊饲料利用新方式，通过试验，已成功研制出了秸秆青贮饲料、秸秆颗粒饲料，在解决秸秆处理难题的同时，无形中也降低了湖羊养殖过程中 CH<sub>4</sub> 的排放。今后，需进一步加大秸秆青贮的示范推广力度。

本研究获取数据来源的优先顺序为统计数据、行业部门数据、专家咨询数据。由于一些统计数据、基础资料和观测资料的缺乏，在核算分析过程中还存在许多不确定因素。一是方法方面，主要采用《指南》中的方法进行核算，这些核算方法间由于数据和测定技术的差异，会带来一定不确定性；二是数据方面，虽然本研究对嘉兴市农业温室气体排放源数据进行了较全面、

---

详细的收集,但多数排放因子均采用了《指南》中的推荐值,而排放因子的影响因素众多,因此估算结果也存在一定不确定性。如稻田CH<sub>4</sub>的排放因子一般会随着水稻品种、土壤条件、天气条件、灌溉方式及施肥管理等因素的不同而变化[34, 35, 36, 37, 38],嘉兴市水稻种植面积较大,故采用推荐值进行核算所带来的不确定性就会更大。因此,今后有必要开展部分实地实测数据的检验对比,从而让核算结果更加符合嘉兴市农业温室气体排放实际情况,为低碳农业的发展提供帮助。

#### 参考文献:

- [1] 方精云,朱江玲,王少鹏,等.全球变暖碳排放及不确定性[J].中国科学:地球科学,2011,41(10):1385-1395.
- [2] KENNEDY D. Breakthrough of the year[J]. Science, 1998, 282(5397): 2156-2161.
- [3] IPCC. IPCC fourth assessment report: climate change 2007 [M]. UK: Cambridge University Press, 2007: 211-212.
- [4] 肖国举,张强,王静.全球气候变化对农业生态系统的影响研究进展[J].应用生态学报,2007,18(8):1877-1885.
- [5] 潘月红.全球气候变化背景下的山东省低碳经济发展研究[D].济南:山东师范大学,2010.
- [6] PAUSTIAN K, COLE V C, SAUERBECK D, et al. CO<sub>2</sub> mitigation by agriculture: an overview[J]. Climatic Change, 1998, 40(1): 135-162.
- [7] ZHENG X H, HUANG Y, WANG Y S, et al. Seasonal characteristics of nitric oxide emission from a typical Chinese rice-wheat rotation during the non-waterlogged period[J]. Global Change Biology, 2003, 9(2): 219-227.
- [8] VERGÉ X P C, KIMPE C D, DESJARDINS R L. Agricultural production, greenhouse gas emissions and mitigation potential[J]. Agricultural and Forest Meteorology, 2007, 142(2): 255-269.
- [9] 韩雪莹.咸阳市农业温室气体清单编制及研究[J].福建质量管理,2017(17):293.
- [10] 宋利娜,张玉铭,胡春胜,等.华北平原高产农区冬小麦农田土壤温室气体排放及其综合温室效应[J].中国生态农业学报,2013,21(3):297-307.
- [11] 张明洁,李文韬,张京红,等.海南省农业温室气体排放核算研究[J].中国人口·资源与环境,2014(增刊3):19-23.
- [12] 李苒.安徽省农业温室气体排放核算与特征分析[J].河南农业科学,2014,43(12):77-82.
- [13] 尚杰,杨果,于法稳.中国农业温室气体排放量测算及影响因素研究[J].中国生态农业学报,2015,23(3):354-364.
- [14] 那伟,赵新颖,高星爱,等.吉林省农业温室气体排放核算及特征分析[J].安徽农业科学,2016,44(34):76-79,81.
- [15] 董红敏,李玉娥,陶秀萍,等.中国农业源温室气体排放与减排技术对策[J].农业工程学报,2008,24(10):

- [16] 黄德林, 蔡松锋. 中国农业温室气体减排潜力及其政策意涵[J]. 农业资源与环境学报, 2011, 28(4): 25-41.
- [17] 王莉玮, 赵中金, 曾荣, 等. 重庆市农业温室气体减排潜力分析[J]. 安徽农业科学, 2012, 40(5): 2928, 3084.
- WANG L W, ZHAO Z J, ZENG R, et al. Analysis on agriculture greenhouse gases reduction in Chongqing City[J]. Journal of Anhui Agricultural Sciences, 2012, 40(5): 2928, 3084. (in Chinese with English abstract)
- [18] BEACH R H, DEANGELO B J, ROSE S, et al. Mitigation potential and costs for global agricultural greenhouse gas emissions[J]. Agricultural Economics, 2008, 38(2): 109-115.
- [19] 谭秋成. 中国农业温室气体排放: 现状及挑战[J]. 中国人口·资源与环境, 2011, 21(10): 69-75.
- [20] ZENG N, DING Y H, PAN J H, et al. Sustainable development. Climate change: the Chinese challenge[J]. Science, 2008, 319(5864): 730-731.
- [21] 刘杰, 王粟, 柴永山, 等. 黑龙江省农业温室气体排放量的估算研究及低碳农业发展建议[J]. 黑龙江农业科学, 2017 (10): 104-110.
- [22] YAGI K, MINAMI K. Effect of organic matter application on methane emission from some Japanese paddy fields[J]. Soil Science and Plant Nutrition, 1990, 36(4): 599-610.
- [23] 陈宗良, 邵可声, 李德波, 等. 控制稻田甲烷排放的农业管理措施研究[J]. 环境科学研究, 1994 (1): 5-10.
- [24] 林而达, 李玉娥, 饶敏杰, 等. 稻田甲烷排放量估算和减缓技术选择[J]. 农村生态环境学报, 1994, 10(4): 55-58.
- [25] 李晶, 王明星, 陈德章. 水稻田甲烷的减排方法研究[J]. 中国农业气象, 1997, 18(6): 9-14.
- [26] 朱红梅, 荣湘民, 袁正平, 等. 不同有机肥施用量对稻田甲烷排放的影响[J]. 湖南农业大学学报, 1998, 24(5): 355-359.
- [27] ZHANG G B, ZHANG W X, YU H Y, et al. Increase in CH<sub>4</sub> emission due to weeds incorporation prior to rice transplanting in a rice-wheat rotation system[J]. Atmospheric Environment, 2015, 116: 83-91.
- [28] ZHANG G B, ZHANG X Y, JI Y, et al. Carbon isotopic composition, methanogenic pathway, and fraction of CH<sub>4</sub> oxidized in a rice field flooded year-round[J]. Journal of Geophysical Research Biogeosciences, 2011, 116(G4): 4025.
- [29] 莫永亮. 冬水田转稻麦轮作对温室气体排放的影响[D]. 武汉: 华中农业大学, 2014.
- [30] 任晓静. 冬水田转稻麦轮作对 CH<sub>4</sub> 排放的影响[D]. 武汉: 华中农业大学, 2017.
- [31] 袁伟玲, 曹凑贵, 李成芳, 等. 稻鸭、稻鱼共作生态系统 CH<sub>4</sub> 和 N<sub>2</sub>O 温室效应及经济效益评估[J]. 中国农业科学, 2017, 50(12): 2315-2324.

---

2009, 42(6): 2052-2060.

[32] MCSWINEY C P, ROBERTSON G P. Nonlinear response of N<sub>2</sub>O flux to incremental fertilizer addition in a continuous maize ( *Zea mays* L. ) cropping system[J]. *Global Change Biology*, 2005, 11(10): 1712-1719.

[33] HOBEN J P, GEHL R J, MILLAR N, et al. Nonlinear nitrous oxide (N<sub>2</sub>O) response to nitrogen fertilizer in on-farm corn crops of the US Midwest[J]. *Global Change Biology*, 2011, 17(2): 1140-1152.

[34] 王明星, 李晶, 郑循华. 稻田甲烷排放及产生、转化、输送机理[J]. *大气科学*, 1998, 22(4): 600-612.

[35] WANG B, XU Y, WANG Z, et al. Methane emissions from rice fields as affected by organic amendment, water regime, crop establishment, and rice cultivar[J]. *Environmental Monitoring & Assessment*, 1999, 57(2): 213-228.

[36] 王增远, 徐雨昌, 李震, 等. 水稻品种对稻田甲烷排放的影响[J]. *作物学报*, 1999, 25(4): 441-446.

[37] 曹云英, 朱庆森, 郎有忠, 等. 水稻品种及栽培措施对稻田甲烷排放的影响[J]. *江苏农业研究*, 2010, 21(3): 22-27.

[38] 廖松婷, 王忠波, 张忠学, 等. 稻田温室气体排放研究综述[J]. *农机化研究*, 2014 (10): 6-11.