

朱永昶, 李玉娥, 姜德锋, 等. 基于生命周期评估的冬小麦-夏玉米种植系统碳足迹核算——以山东省高密地区为例[J]. 农业资源与环境学报, 2017, 34(5): 473-482.

ZHU Yong-chang, LI Yu-e, JIANG De-feng, et al. Life Cycle Assessment on Carbon Footprint of Winter Wheat-Summer Maize Cropping System Based on Survey Data of Gaomi in Shandong Province, China[J]. *Journal of Agricultural Resources and Environment*, 2017, 34(5): 473-482.

基于生命周期评估的冬小麦-夏玉米种植系统碳足迹核算——以山东省高密地区为例

朱永昶^{1,2}, 李玉娥¹, 姜德锋³, 邹晓霞^{3*}

(1.中国农业科学院农业环境与可持续发展研究所/农业部农业环境与气候变化重点开放实验室, 北京 100081; 2.中国气象局资产管理事务中心, 北京 100081; 3.青岛农业大学农学院, 山东 青岛 266109)

摘要:粮食生产过程中的原材料生产、能源消耗、氮肥施用以及农机作业等过程均会排放大量的温室气体。本研究通过对山东省高密市冬小麦-夏玉米种植系统粮食种植过程的原材料投入和农业管理措施等进行问卷调查, 采用生命周期评估(Life cycle assessment, LCA)方法核算当地小麦和玉米生产过程的碳足迹(Carbon footprint, CFP)。结果表明, 高密市小麦、玉米生产和冬小麦-夏玉米种植系统单位面积的碳足迹分别为 5 183.33、3 778.09 kg CO₂-eq·hm⁻² 和 8 961.42 kg CO₂-eq·hm⁻², 单位产量的碳足迹分别为 0.69、0.40 kg CO₂-eq·kg⁻¹ 和 0.53 kg CO₂-eq·kg⁻¹, 单位净现值的碳足迹分别为 1.82、0.40 kg CO₂-eq·元⁻¹ 和 0.44 kg CO₂-eq·元⁻¹。冬小麦-夏玉米种植系统粮食生产的碳足迹主要来自氮肥的生产(48.30%)和氮肥施用(12.04%)、灌溉耗电(12.94%)和农业机械耗油(11.20%)等方面。综上可知, 优化肥料施用、减少氮肥用量和节水灌溉等措施是实现当地粮食清洁生产的重要途径。

关键词:冬小麦-夏玉米; 碳足迹; 生命周期评价; 减缓气候变化

中图分类号: S181

文献标志码: A

文章编号: 2095-6819(2017)05-0473-10

doi: 10.13254/j.jare.2017.0180

Life Cycle Assessment on Carbon Footprint of Winter Wheat-Summer Maize Cropping System Based on Survey Data of Gaomi in Shandong Province, China

ZHU Yong-chang^{1,2}, LI Yu-e¹, JIANG De-feng³, ZOU Xiao-xia^{3*}

(1. Institute of Environment and Sustainable Development in Agriculture, Chinese Academy of Agricultural Sciences / Key Laboratory for Agro-Environment, Ministry of Agriculture, Beijing 100081, China; 2. Asset Operation Center, China Meteorological Administration, Beijing 100081, China; 3. College of Agronomy, Qingdao Agriculture University, Qingdao 266109, China)

Abstract: Grain production can generate huge amount of greenhouse gases through raw material production and energy consumption, nitrogen fertilizer amendment and farming machinery operation. Based questionnaire survey of raw material inputs and management of wheat-maize cropping system in Gaomi, Shandong Province, carbon footprint of grain production was calculated using life cycle assessment methodology. Carbon footprint per unit area of wheat, maize, and winter wheat-summer maize cropping system were 5 183.33, 3 778.09 kg CO₂-eq·hm⁻² and 8 961.42 kg CO₂-eq·hm⁻², carbon footprint per unit grain yield were 0.69, 0.40 kg CO₂-eq·kg⁻¹ and 0.53 kg CO₂-eq·kg⁻¹, carbon footprint per unit net present value were 1.82, 0.40 kg CO₂-eq·yuan⁻¹ and 0.44 kg CO₂-eq·yuan⁻¹, respectively. Greenhouse gas (GHG) emission of winter wheat-summer maize cropping system mainly came from nitrogen fertilizer production(48.30%) and nitrogen fertilizer application(12.04%), irrigation electricity consumption(12.94%) and machinery oil consumption(11.20%). Optimizing the application of fertilizer, reducing the amount of nitrogen fertilizer and saving water irrigation were important ways to realize the clean production.

Keywords: winter wheat-summer maize; carbon footprint; life cycle assessment; climate change mitigation

收稿日期: 2017-06-29

基金项目: 农业源温室气体排放峰值、减排成本与潜力研究(2013087); 青岛农业大学高层次人才启动基金(631409)

作者简介: 朱永昶(1992-), 山东泰安人, 硕士研究生, 研究方向为农业源温室气体减排。E-mail: zhuyongchang_atmos@163.com

* 通信作者: 邹晓霞 E-mail: zzouxiaxia666@126.com

气候变化作为重大全球性问题,会对人类的生产生活造成影响。农业是受气候变化影响最大的部门^[1],同时也是重要的温室气体排放源。农业温室气体排放主要来源于反刍动物肠道发酵、肥料管理、水稻种植和生物质燃烧等方面^[2]。2010 年全球农业领域总的非 CO₂ 温室气体排放为 5.2~5.8 Gt CO₂-eq·a⁻¹^[3],占全球人为温室气体排放的 10%~12%^[2]。1994 年、2005 年和 2012 年,我国农业活动温室气体排放分别为 0.66^[4]、0.82 Gt CO₂-eq·a⁻¹^[5]和 0.94 Gt CO₂-eq·a⁻¹^[6],分别占同年全国温室气体排放总量的 17.59%、10.97% 和 7.9%,年均增长率为 0.02 Gt CO₂-eq·a⁻¹。核算农业生产过程中的碳足迹,是识别农业生产过程中温室气体排放的关键步骤,有助于推进我国农业的清洁生产。

碳足迹指的是某项活动或某产品的生命阶段直接和间接的温室气体排放总量^[7]。碳足迹的概念最早来源于“生态足迹”^[8],Gan 等^[9]将农业生产过程中的碳足迹进一步定义为与某种食物生产或某项服务相关的总的温室气体排放,温室气体排放可能产生于农业原材料的生产、运输和分销过程,氮肥的施用,农业机械使用和灌溉耗能等过程中。生命周期评价(Life cycle assessment, LCA)是一种评价某生产过程或活动整个生命周期内的环境负荷的工具^[10]。国家标准化委员会将生命周期评价定义为对一个产品的生命周期中输入、输出及其潜在环境影响的汇编和评价^[11]。国际标准化组织(ISO)于 2012 年发布了应用 LCA 方法学的碳足迹核算标准^[12],规定碳足迹的量化应包括目标和范围的确定、生命周期清单分析、生命周期影

响分析和生命周期解释等 4 部分。采用 LCA 方法评估农业生产过程中的碳足迹已在世界范围内被广泛使用^[13-19]。

本研究以我国典型冬小麦-夏玉米轮作核心区——山东省高密市为研究对象,对小麦、玉米生产过程中的各项投入、产出和管理措施等进行问卷调查,采用生命周期评估方法学,核算当地冬小麦-夏玉米种植系统的温室气体排放,以期为实现小麦-玉米轮作体系清洁生产提供参考。

1 材料与方法

1.1 核算目标和范围的确定

本研究在山东省高密市进行,该地区位于我国的冬小麦-夏玉米轮作核心区域——黄淮海平原。研究以问卷调查的形式进行,共访问经营小麦-玉米轮作的农户 56 户。问卷内容包括粮食生产过程中的投入和产出情况:(1)粮食产量;(2)种子、肥料、除草剂、杀菌剂和杀虫剂等农资投入;(3)农业机械能耗情况,包括播种、耕作和粮食运输等过程的油耗等;(4)灌溉能耗等。

本研究核算了粮食生产过程从摇篮到门口的温室气体排放,核算系统边界包括:农资(例如种子、农药、肥料等)投入的温室气体排放;农机使用过程(耕作、播种、收获和粮食运输等)的温室气体排放;肥料施用造成的田间 N₂O 排放;灌溉能耗温室气体排放等(图 1)。由于本研究为调研数据,无法获得农户土壤碳的本底状况,且由于不同农户管理方式的不同,其

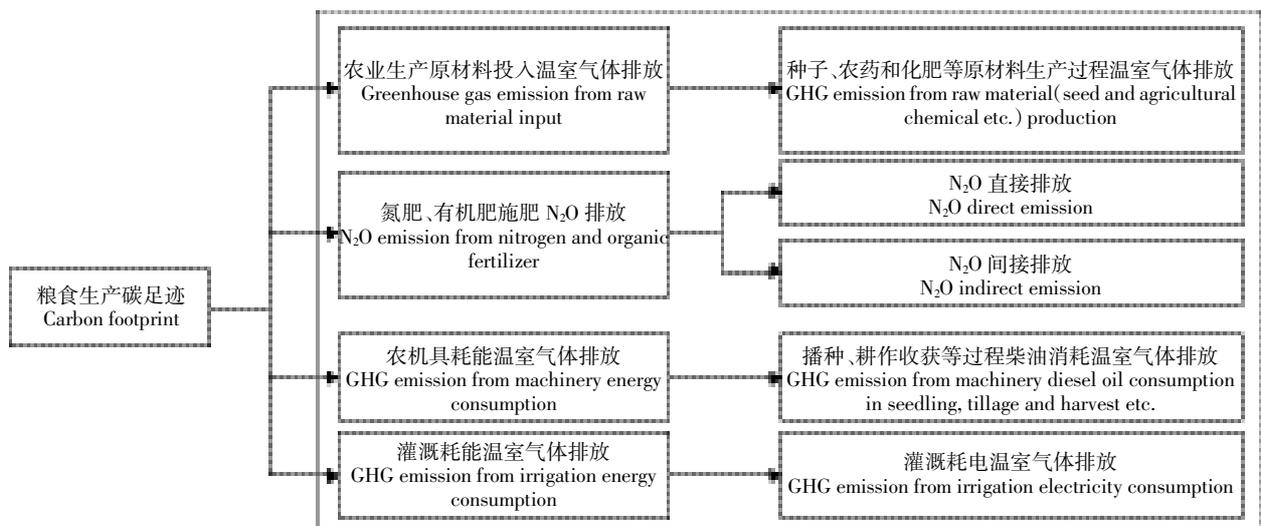


图 1 温室气体排放核算系统边界

Figure 1 Carbon footprint accounting system boundary

土壤碳的本底状况不同,故没有在核算土壤碳的变化。本研究选取的功能单元为单位面积和单位产量的碳足迹。

1.2 碳足迹生命周期清单分析

温室气体排放核算采用《2006 IPCC 国家温室气体清单指南》推荐的方法学^[20],并依照国际标准《ISO/DIS 14067》^[12]进行。不同投入源的温室气体排放系数详见表1。

(1)农业生产原材料生产和能源投入产生的温室气体排放,农机使用过程(耕作、播种、收获和粮食运输等)产生的温室气体排放,以及灌溉过程产生的温室气体排放,采用方程(1)进行计算:

$$GHG_{input} = \sum_{i=1}^n (Input_i \times EF_i) \quad (1)$$

式中, i :不同投入源; GHG_{input} :农资生产和运输过程,以及油、电等能源投入产生的温室气体排放($\text{kg CO}_2\text{-eq}\cdot\text{hm}^{-2}$); $Input$:农资投入,例如种子、肥料、农药、柴油消耗($\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$)和电耗($\text{kWh}\cdot\text{hm}^{-2}$); EF_i :农资和能源投入的排放系数(种子、肥料、农药、柴油消耗等的温室气体排放系数,单位为 $\text{kg CO}_2\text{-eq}\cdot\text{kg}^{-1}$,电耗的温室气体排放系数单位为 $\text{kg CO}_2\text{-eq}\cdot\text{kWh}^{-1}$)。

(2)施肥导致的直接和间接 N_2O 排放。肥料投入包括无机肥、有机肥和还田秸秆。施肥产生的直接 N_2O 排放采用方程(2)计算。肥料以 NH_3 和 NO_x 形式挥发后沉降产生的间接 N_2O 排放以及淋溶和径流产生的间接 N_2O 排放采用方程(3)和(4)计算:

$$N_2O_{direct} = [(F_{SN} + F_{ON} + F_{CR}) \times EF_7] \times 44/28 \quad (2)$$

$$N_2O_{(ATD)} = (F_{SN} \times FRAC_{GASF} \times EF_{2SN} + F_{ON} \times FRAC_{GASM} \times EF_{2ON}) \times 44/28 \quad (3)$$

$$N_2O_{(L)} = (F_{SN} + F_{ON} + F_{CR}) \times FRAC_{LEACH} \times EF_3 \times 44/28 \quad (4)$$

$$GHG_{N_2O} = (N_2O_{direct} + N_2O_{(ATD)} + N_2O_{(L)}) \times 265 \quad (5)$$

式中, N_2O_{direct} :土壤施肥直接 N_2O 排放($\text{kg N}_2\text{O-N}\cdot\text{hm}^{-2}$); F_{SN} :每季土壤化肥投入($\text{kg N}\cdot\text{hm}^{-2}\cdot\text{growing season}^{-1}$); F_{ON} :每季土壤有机肥投入($\text{kg N}\cdot\text{hm}^{-2}\cdot\text{growing season}^{-1}$); F_{CR} :每季秸秆还田量(包括秸秆和地下根系)($\text{kg N}\cdot\text{hm}^{-2}\cdot\text{growing season}^{-1}$); EF_7 :施肥 N_2O 直接排放系数 [$\text{kg N}_2\text{O-N}\cdot(\text{kg N}_{input})^{-1}$]; $N_2O_{(ATD)}$:肥料以 NH_3 和 NO_x -N的形式挥发后沉降的 N_2O 排放($\text{kg N}_2\text{O-N}\cdot\text{hm}^{-2}$); $FRAC_{GASF}$:化肥以 NH_3 和 NO_x -N的形式挥发的比例, $FRAC_{GASF}=0.1 \text{ kg N}\cdot\text{kg}^{-1} \text{ N}^{[21]}$; $FRAC_{GASM}$:有机肥以 NH_3 和 NO_x -N的形式挥发的比例, $FRAC_{GASM}=0.2 \text{ kg N}\cdot\text{kg}^{-1} \text{ N}^{[21]}$; EF_{2SN} :化肥以 NH_3 和 NO_x -N的形式挥发后沉降的 N_2O 排放 [$\text{kg N}_2\text{O}\cdot(\text{kg N})^{-1}$]; EF_{2ON} :有机

肥以 NH_3 和 NO_x -N的形式挥发后沉降的 N_2O 排放 [$\text{kg N}_2\text{O}\cdot(\text{kg N})^{-1}$]; $N_2O_{(L)}$:氮肥淋溶和径流产生的 N_2O 间接排放 ($\text{kg N}_2\text{O-N}\cdot\text{hm}^{-2}$); $FRAC_{LEACH}$:氮肥因淋溶和径流损失的比例, $FRAC_{LEACH}=0.2 \text{ kg N}\cdot\text{kg}^{-1} \text{ N}^{[21]}$; EF_3 :氮肥淋溶和径流产生的 N_2O 间接排放系数 [$\text{kg N}_2\text{O}\cdot(\text{kg N})^{-1}$]; $44/28$: $\text{N}_2\text{O-N}$ 向 N_2O 的转换系数; GHG_{N_2O} :施肥产生的 N_2O 排放 ($\text{kg CO}_2\cdot\text{hm}^{-2}$); 265 : N_2O 的100年全球增温潜势^[22]。

作物秸秆含氮量由公式(6)计算:

$$F_{CR} = (Yield_i / R_{AG(i)} - Yield_i) \times R_{RT(i)} \times N_{c(i)} + Yield_i / R_{AG(i)} \times R_{RS(i)} \times N_{c(i)} \quad (6)$$

式中, i :不同的作物类型; $Yield_i$:作物产量(kg); $R_{AG(i)}$:产量和地上部生物量的比例,小麦和玉米的值分别为0.434和0.438^[21]; $R_{RT(i)}$:作物秸秆还田率(%); $N_{c(i)}$:各种作物的含氮量,小麦和玉米水稻分别为 $0.00516 \text{ kg N}\cdot(\text{kg DM})^{-1}$ 和 $0.0058 \text{ kg N}\cdot(\text{kg DM})^{-1}$ ^[21]; $R_{RS(i)}$:作物根冠比,小麦和玉米的根冠比分别为0.166和0.17^[21]。

(3)粮食生产过程中总的温室气体排放采用公式(7)计算:

$$GHG_{all} = GHG_{input} + GHG_{N_2O} \quad (7)$$

式中, GHG_{all} :粮食生产过程中总的温室气体排放。

由于所调研地区农户年龄普遍偏高(平均年龄为50.64岁),不适合外出务工,故不考虑其田间劳动和土地外租的机会成本,采用净现值(Net present value, N_{pw})核算其收益。净现值指用贴现值减去贴现收益^[27]。 N_{pw} 采用公式(8)计算:

$$N_{pw} = \sum_t B_t(1+i)^{-t} - \sum_t C_t(1+i)^{-t} \quad (8)$$

式中, B_t :贴现收益,元; C_t :贴现费用,元; t :年,范围为0年(项目开始时间)至 T 年(项目结束时间)。由于本研究为1年内的粮食生产情况,此项设为0; i :贴现率,由于本研究为1年内的粮食生产情况,此项设为0。

1.3 数据分析

采用Microsoft Excel(2013)和SPSS Statics 20的Pearson相关分析对数据进行处理和分析。

2 结果与分析

2.1 粮食生产投入和产出

本研究中,农户平均耕作面积为 $0.99 \text{ hm}^2\cdot\text{户}^{-1}$,且每户的农田平均被分为了3.00块。农户小麦和玉米生产中平均氮肥用量分别为 $316.49 \text{ kg N}\cdot\text{hm}^{-2}$ 和 $205.03 \text{ kg N}\cdot\text{hm}^{-2}$ (表2),平均农药用量分别为5.43

表 1 不同投入源的温室气体排放系数

Table 1 GHG emission factor of different input sources

温室气体排放源 Emission source	简写 Abbreviation	排放因子 Emission factor	参考文献 Literature
冬小麦种子 Winter wheat seed	$EF_{\text{winter wheat seed}}$	0.40 kg CO ₂ -eq·kg ⁻¹	文献[23]
玉米种子 Maize seed	$EF_{\text{maize seed}}$	3.85 kg CO ₂ -eq·kg ⁻¹	文献[23]
氮肥 N	$EF_{\text{N fertilizer}}$	8.30 kg CO ₂ -eq·kg ⁻¹	文献[24]a
磷肥 P ₂ O ₅	$EF_{\text{P fertilizer}}$	1.63 kg CO ₂ -eq·kg ⁻¹	CLCD v0.7 ^[18]
钾肥 K ₂ O	$EF_{\text{K fertilizer}}$	0.65 kg CO ₂ -eq·kg ⁻¹	CLCD v0.7 ^[18]
除草剂 Herbicide	$EF_{\text{herbicide}}$	10.15 kg CO ₂ -eq·kg ⁻¹	Ecoinvent 2.2 ^[25]
杀虫剂 Pesticide	$EF_{\text{pesticide}}$	16.61 kg CO ₂ -eq·kg ⁻¹	Ecoinvent 2.2 ^[25]
杀菌剂 Fungicide	$EF_{\text{fungicide}}$	10.57 kg CO ₂ -eq·kg ⁻¹	Ecoinvent 2.2 ^[25]
柴油 Diesel oil	$EF_{\text{diesel oil}}$	3.10 kg CO ₂ -eq·kg ⁻¹	文献[21]
电 Electricity	$EF_{\text{electricity}}$	0.80 kg CO ₂ -eq·kWh ⁻¹	文献[21]b
旱地施肥直接 N ₂ O 排放 Direct N ₂ O emission from N fertilizer	EF_1	2.47×10 ⁻³ kg N ₂ O-N·kg ⁻¹ N	文献[26]c
化肥挥发间接 N ₂ O 排放 Indirect N ₂ O emission from N fertilizer volatilization	$EF_{2\text{SN}}$	0.01 kg N ₂ O-N·kg ⁻¹ N	文献[21]
有机肥挥发间接 N ₂ O 排放 Indirect N ₂ O emission from organic fertilizer volatilization	$EF_{2\text{ON}}$	0.02 kg N ₂ O-N·kg ⁻¹ N	文献[21]
氮肥淋溶间接 N ₂ O 排放 Indirect N ₂ O emission from N fertilizer leaching and runoff	EF_3	7.50×10 ⁻³ kg N ₂ O-N·kg ⁻¹ N	文献[21]

注:a,氮肥生产过程温室气体排放因子基于对国内化肥厂的大量数据调研得到;b,电力温室气体排放因子选取山东省所在的华东区域电网排放系数;c,旱地施肥直接 N₂O 排放因子选取距离高密市较近的桓台县实测数据。

Note:a, GHG emission factor of N fertilizer production based on survey data of a big number of fertilizer plants in China;b, emission factor of eastern China;c, based on measured data of Huantai county nearby.

表 2 农户小麦、玉米生产过程中的农资投入

Table 2 Raw material inputs of grain production

农资投入 Raw material inputs	小麦 wheat	玉米 maize	冬小麦-夏玉米种植系统 Cropping system
产量 Grain yield/kg·hm ⁻²	7 564.02±125.97	9 962.95±228.58	17 616.96±324.32
种子 Seed/kg·hm ⁻²	153.48±6.46	31.51±0.59	185.00±6.33
氮肥 N fertilizer/kg·hm ⁻²	316.49±12.65	205.03±11.27	521.5±19.87
磷肥 P ₂ O ₅ fertilizer/kg·hm ⁻²	162.07±5.52	160.97±5.43	323.04±9.92
钾肥 K ₂ O fertilizer/kg·hm ⁻²	161.55±5.47	160.97±5.43	322.52±9.88
还田秸秆含氮量 Straw input/kg N·hm ⁻²	66.61±1.10	96.57±2.22	163.19±3.04
除草剂 Herbicide/kg·hm ⁻²	0.67±0.14	5.75±0.34	6.42±0.39
杀虫剂 Pesticide/kg·hm ⁻²	1.99±0.19	3.34±0.56	5.33±0.64
杀菌剂 Fungicide/kg·hm ⁻²	2.77±0.69	1.70±0.59	4.47±1.17
农业机械耗油 Machinery oil/kg·hm ⁻²	210.47±3.42	113.35±1.64	323.83±4.12
灌溉耗电 Irrigation electricity/kWh·hm ⁻²	798.87±41.05	651.04±41.56	1 449.90±72.36

kg·hm⁻² 和 10.79 kg·hm⁻²。农业机械使用带来了较高的能源投入,农户小麦和玉米生产过程中平均机械耗油分别为 210.47 kg·hm⁻² 和 113.35 kg·hm⁻²,平均灌溉耗电量分别为 798.87 kWh·hm⁻² 和 651.04 kWh·hm⁻²。

农户经营小麦,玉米和冬小麦-夏玉米种植系统的净现值(N_{PV})为 11 059.98、12 210.99 元·hm⁻²·a⁻¹ 和 23 270.97 元·hm⁻²·a⁻¹。其中经营小麦和玉米的支出分别为 8 626.18 元·hm⁻²·a⁻¹ 和 7 714.91 元·hm⁻²·

a⁻¹(图 2),这些支出主要来源于购买肥料(42.67%~43.57%),租赁机械用于播种、耕作(21.00%~26.04%)和购买种子(6.50%~9.61%)等方面。

2.2 生命周期影响评价

粮食生产过程中大量的原材料投入导致了大量的温室气体排放。冬小麦-夏玉米种植系统单位面积,单位产量和单位净现值的碳足迹分别为 8 961.42 kg CO₂-eq·hm⁻²、0.53 kg CO₂-eq·kg⁻¹ 和 0.44 kg CO₂-eq·

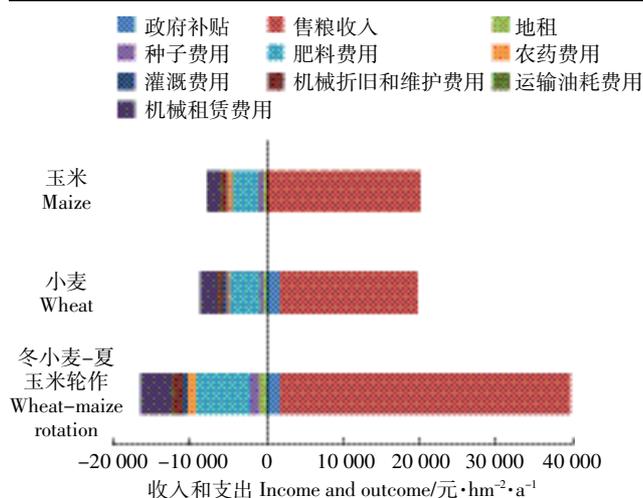


图2 小麦、玉米生产过程中的经济收支

Figure 2 Economy inputs and outputs of wheat and maize production

元⁻¹(表3)。

小麦和玉米生产过程中的碳足迹主要来源于氮肥施用和农业机械使用等方面。在冬小麦-夏玉米种植系统中氮肥的生产所产生的温室气体排放为 4 328.60 kg CO₂-eq·hm⁻²(48.30%),氮肥施用所产生

的温室气体排放为 1 079.36 kg CO₂-eq·hm⁻²(12.04%),其中直接排放为 536.42 kg CO₂-eq·hm⁻²(5.98%),间接排放为 542.94 kg CO₂-eq·hm⁻²(6.06%)。冬小麦-夏玉米种植系统中灌溉耗电产生的温室气体排放为 1 159.92 kg CO₂-eq·hm⁻²(12.94%),农业机械耗油产生的温室气体排放为 1 003.86 kg CO₂-eq·hm⁻²(11.20%)(图3)。

3 讨论

3.1 冬小麦-夏玉米种植系统碳足迹构成分析

冬小麦-夏玉米种植系统粮食生产的碳足迹来源于其生产过程中大量的农资投入,其中氮肥生产(48.30%)和施用(12.04%),灌溉耗电(12.94%)和农业机械耗能(11.20%)等方面是粮食生产过程中碳足迹的最主要贡献源。这与前人研究^[18-19]得出的肥料与灌溉是农田温室气体排放的主要来源一致。小麦、玉米和冬小麦-夏玉米种植系统粮食生产过程中单位面积的氮肥施用量与单位面积的碳足迹均呈显著相关($P<0.05$),氮肥的用量能解释其单位面积碳足迹变率的 94%、92%和 92%,能解释其单位产量碳足迹的 75%、75%和 77%(图4),这与 Yan 等^[17]的研究一致。

表3 小麦、玉米生产单位面积、单位产量和单位净现值的碳足迹

Table 3 Carbon footprint per unit area, yield and N_{PV} of wheat and maize production

作物类型 Crop type	CF_{area} /kg CO ₂ -eq·hm ⁻²	CF_{yield} /kg CO ₂ -eq·kg ⁻¹	CF_{NPV} /kg CO ₂ -eq·元 ⁻¹
小麦 Wheat	5 183.33±134.06	0.69±0.03	1.82±0.87
玉米 Maize	3 778.09±130.76	0.40±0.02	0.40±0.04
冬小麦-夏玉米种植系统 Cropping system	8 961.42±224.06	0.53±0.02	0.44±0.03

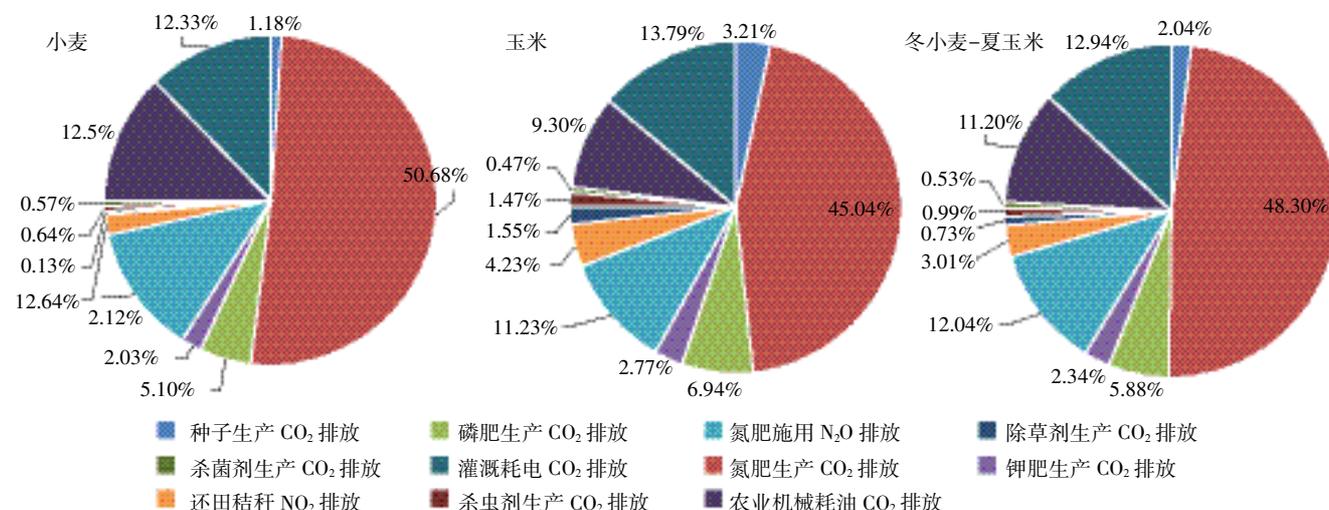


图3 不同生产环节碳排放对粮食生产单位面积碳排放的贡献

Figure 3 Relative contribution of different production processes to the carbon footprint of grain production

氮肥施入土壤中部分会因氨挥发或反硝化过程以气态形式进入大气,农用地 N_2O 的排放分为直接排放和间接排放两种,农用地 N_2O 的间接排放又分为大气氮沉降引起的排放和淋溶、径流引起的排放两类^[28]。化肥的过量及不合理施用不仅造成严重的资源浪费,且土壤盈余的养分在降雨或灌溉条件下易随水流失,造成大气污染和地下水富营养化等环境问题^[29]。农药的生产过程中排放的温室气体占小麦、玉米和冬小麦-夏玉米种植系统温室气体排放的 1.34%、3.49% 和 2.24%。大量的农药施用会造成土壤污染^[30]、水体污染^[31]等环境问题。农用化学品的适时适量,合理使用对温室气体减排和生态环境改善意义重大。

3.2 冬小麦-夏玉米种植系统低碳减排的途径探讨

3.2.1 优化肥料管理措施以降低粮食生产碳足迹

氮肥的生产和施用造成了大量的温室气体排放,通过优化肥料管理,施用缓、控释肥,添加硝化抑制剂,施用有机肥等方式可以减缓氮肥施用后产生的 N_2O 排放,同时能够减少氮肥用量,减缓肥料生产过程中的温室气体排放。本研究中,农户施肥主要以常规三元复合肥和尿素为主,在小麦和玉米生产过程中,缓、控释肥的施用比例仅为 0.04%。控释肥能够有效地提高氮肥利用率,且能减少施肥的次数,由此节约了劳动力并减少燃油的消耗。当控释肥氮素的释放跟植物的需要同步时,控释肥能够减少因硝酸根淋溶和 N_2O 排放造成的氮素向环境的流失^[32-33]。Akiyama 等^[32]通过对田间试验数据进行 meta 分析得出,较传统肥料相比,控释肥能降低 35% 的 N_2O 排放。为实现

农业清洁生产,应当推广缓、控释肥的使用。

添加硝化抑制剂可以抑制农用地 N_2O 排放。硝化抑制剂可以抑制氨氧化过程,通过抑制硝化过程,硝化抑制剂还能减缓后续的反硝化过程并减少氮素的淋溶,提高氮素利用率^[32]。Akiyama 等^[32]通过对田间试验数据进行 meta 分析得出,较传统肥料相比,添加硝化抑制剂能降低 38% 的 N_2O 排放。Qiao 等^[34]通过 meta 分析发现添加硝化抑制剂能够降低 44% 的 N_2O 排放。脲酶抑制剂能够减缓尿素向 NH_4^+ 的转化过程,由此减小了土壤中的 NH_4^+ 浓度以及 NH_3 的挥发潜力。农地配合施用脲酶抑制剂剂脲醌(HQ)和硝化抑制剂双氰胺(DCD)能取得明显的减排效果^[35]。黄国宏等^[36]通过对沈阳玉米田的研究发现施加缓释尿素(尿素+HQ+DCD)的处理较单施尿素处理可以减少 62% 的 N_2O 排放。

本研究中农户在小麦和玉米种植过程中均未施用有机肥。由于规模化养殖取代了传统散户养殖,传统的有机肥逐渐被化肥取代。用有机肥可以起到培肥地力,增加土壤碳的作用,施有机肥和化肥混施可分别使土壤有机碳增加 $0.52\sim 0.71\text{ t}\cdot\text{hm}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$ 和 $0.71\sim 0.96\text{ t}\cdot\text{hm}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$ ^[15]。有机肥与化肥混施等可以通过影响土壤中的微生物活性,提高氮素利用率^[37]。翟振等^[38]对迁西春玉米田的研究发现有机无机肥配施和单施有机肥较单施化肥均能减少 N_2O 的排放。

3.2.2 优化管理方式以降低粮食生产碳足迹

落后的管理方式是导致农业资源投入过大、农业生产温室气体排放较高的原因之一,优化管理方式可

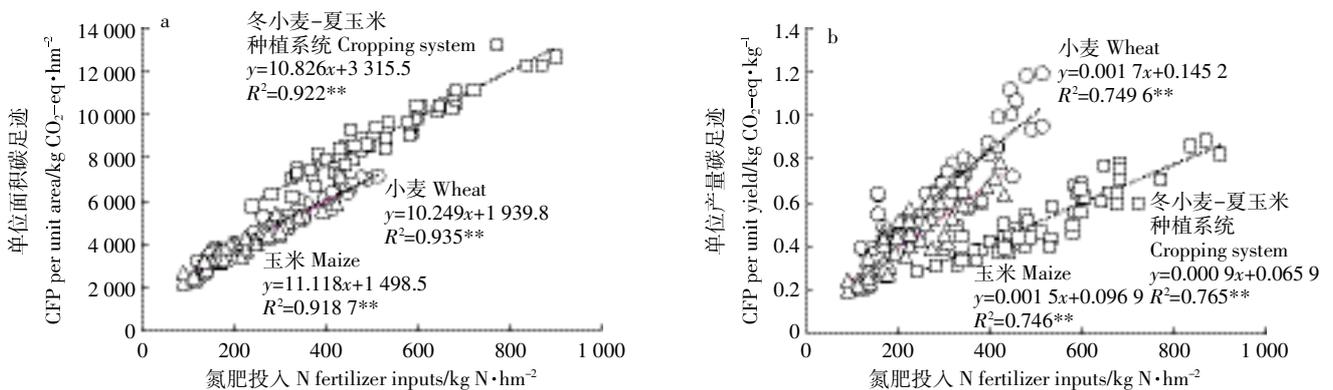


图 a, b 分别为氮肥投入和单位面积、单位产量碳足迹的关系。圆形, 三角形和正方形分别代表小麦, 玉米和小麦-玉米轮作系统。

** 表示在 $P<0.01$ 上显著

Figure a and b indicate correlation between N fertilizer inputs and carbon footprint per unit area and grain yield, separately.

Circle, triangle and square refer to wheat, maize and wheat-maize rotation, respectively. ** Significant at $P<0.01$

图 4 肥料投入与粮食生产碳足迹的关系

Figure 4 Correlation between N fertilizer inputs and carbon footprint

以降低粮食生产过程中的温室气体排放。本研究中,高密地区小麦和玉米生产在底肥施用阶段均能采用机械化浅层施肥,但在追肥过程中均使用人工播撒肥料。肥料深施、混施可以通过减少径流、氨挥发和反硝化损失来提高氮素利用率,从而有效地减少 N_2O 的排放量^[5,39]。Kessel 等^[40]通过实验数据进行 meta 分析发现对于免耕和少耕处理,5 cm 以上深施可以减少区域 N_2O 排放。Liu 等^[41]通过对 Colorado 地区玉米田的研究发现,在常规耕作条件下,10 cm 和 15 cm 深施氮肥(尿素硝酸铵溶液,32%N)的 N_2O 排放总量分别较 5 cm 少 55%和 68%。

本研究中小麦和玉米生产过程中灌溉均采用传统漫灌。采用节水灌溉可以提高土壤有机碳储量^[42],减少土壤温室气体排放^[43-44],并能够通过减少能耗降低 CO_2 排放^[45]等。Zou 等^[46]的研究发现 2007—2009 年,节水灌溉共减少我国 CO_2 排放 34.67 Mt,且节水灌溉措施是经济可行的^[45]。

规模化经营可以起到一定的减缓农业生产温室气体排放的作用。Yan 等^[17]比较了中国大规模经营(>0.5 hm^2)和小规模经营(<0.5 hm^2)的 GHG 排放情况,发现大规模经营在小麦和玉米生产过程中的碳排放分别比小规模经营降低了 22%~24%和 2%~16%。规模化经营有利于统一采取优化的管理措施,从而减少粮食生产过程中的物质投入已达到减排的目的。在后续的研究过程中,我们将会调研山东省农业合作社、涉农企业等规模化经营主体对粮食生产碳足迹的影响。

3.3 国内不同碳足迹研究的对比分析

针对国内作物生产碳足迹的研究在系统边界和系数的选取等方面不尽相同,得到的核算结果也有不同。Cheng 等^[16]根据年鉴统计数据核算了我国整个农业生产过程中农用化学品投入、氮肥施用、农用机械油耗和灌溉耗能产生的温室气体排放,得出我国作物生产单位面积碳足迹平均值为 $2.86 t CO_2-eq \cdot hm^{-2}$ 。王占彪等^[18]根据年鉴统计数据核算了华北平原作物生产的碳足迹,得出华北平原作物生产单位面积碳足迹平均值为 $6.55 \sim 7.69 t CO_2-eq \cdot hm^{-2}$ 。Yan 等^[17]根据调研数据采用 LCA 方法学评估我国粮食生产的碳足迹,发现我国水稻、小麦和玉米单位面积的碳足迹分别为 6.0 、 $3.0 t CO_2-eq \cdot hm^{-2}$ 和 $2.3 t CO_2-eq \cdot hm^{-2}$ 。史磊刚等^[19]根据调研数据核算了河北吴桥县小麦-玉米轮作系统的碳足迹,得出当地小麦生产单位面积碳足迹为 $4.03 t CO_2-eq \cdot hm^{-2}$,玉米生产单位面积碳足迹为

$2.33 t CO_2-eq \cdot hm^{-2}$ 。研究结果的不同首先与当地的气候、土壤条件、种植制度和管理方式等有关,不同研究所选取的系统边界和核算系数不同也是造成核算结果不同的重要原因。目前国内尚缺乏对于农业生产碳足迹核算统一的系统边界和核算系数的标准,应加强对这方面的研究。

3.4 不同排放因子的敏感性分析

国内外采用生命周期评价方法学核算粮食生产碳足迹的研究中,针对相同粮食生产过程,采用不同的排放因子不尽相同^[17-19,47-49],这可能是由于不同国家的工业生产水平不同以及生产工艺的逐年进步造成的。本研究取核算中采纳的氮肥生产排放因子($8.30 kg CO_2-eq \cdot kg^{-1}$)的-25%、-15%、-5%、5%、15%和25%,分析不同氮肥生产温室气体排放因子对高密市冬小麦-夏玉米种植系统碳足迹的敏感性(表 4),发现采用不同排放因子核算得到的种植系统单位面积碳足迹最高相差 1.29 倍,相应排放源排放的温室气体占总排放量的比例最高相差 1.33 倍。应通过大样本实地调研等方式搜集基础数据,通过科学的方法学获取尽可能接近当地实际的排放系数,以提高碳足迹计算的准确性。国家应对农业生产碳足迹核算的内容和深度等进行规范,形成国家和行业标准、方法、参数和指南等规范性文件。

4 结论

(1)高密地区小麦-玉米轮作系统单位面积的碳足迹为 $8 961.42 kg CO_2-eq \cdot hm^{-2}$,单位产量的碳足迹为 $0.53 kg CO_2-eq \cdot kg^{-1}$,单位净现值的碳足迹为 $0.44 kg CO_2-eq \cdot 元^{-1}$ 。

(2)小麦-玉米轮作系统粮食生产碳足迹主要来自于:氮肥的生产(48.30%)和氮肥施用(12.04%)、灌溉耗电(12.94%)、农业机械耗油(11.20%)等方面。

(3)可以通过减少氮肥施用和优化农业管理措施,例如采用氮肥深施、节水灌溉等以达到减少当地粮食生产碳足迹的目的。

(4)国内外各研究采用的排放因子不尽相同,应通过试验和实地调研等科学的方法获取尽可能接近当地实际的排放系数,提高碳足迹计算的准确性。

参考文献:

- [1] 蔡运龙, Barry Smit. 全球气候变化下中国农业的脆弱性与适应对策[J]. 地理学报, 1996(3):202-212.
CAI Yun-long, Barry Smit. Sensitivity and adaptation of Chinese agriculture under global climate change[J]. *Acta Geographica Sinica*, 1996

表 4 氮肥生产排放因子对单位面积粮食生产碳足迹的敏感性
Table 4 Sensitivity of the total carbon footprint to emission factor of N production

氮肥生产排放因子变化 Change of emission factor of N production	作物类型 Crop type	氮肥生产相关温室气体排放 GHG emissions/ kg CO ₂ -eq·hm ⁻²	该排放源所占总排放量的比例 GHG emissions percentage of total emission/%	单位面积粮食生产碳足迹 Total carbon footprint/ kg CO ₂ -eq·hm ⁻²
增加 25% 25% increase	小麦 Wheat	3 285.13	56.24	5 841.62
	玉米 Maize	2 128.22	50.62	4 204.56
	冬小麦-夏玉米种植系统 Cropping system	5 413.36	53.88	10 046.18
增加 15% 15% increase	小麦 Wheat	3 022.45	54.18	5 578.94
	玉米 Maize	1 958.05	48.53	4 034.38
	冬小麦-夏玉米种植系统 Cropping system	4 980.50	51.81	9 613.32
增加 5% 5% increase	小麦 Wheat	2 759.76	51.91	5 316.26
	玉米 Maize	1 787.87	46.27	3 864.20
	冬小麦-夏玉米种植系统	4 547.64	49.54	9 180.46
减少 5% 5% decrease	小麦 Wheat	2 497.08	49.41	5 053.57
	玉米 Maize	1 617.70	43.79	3 694.03
	冬小麦-夏玉米种植系统 Cropping system	4 114.78	47.04	8 747.60
减少 15% 15% decrease	小麦 Wheat	2 234.40	46.64	4 790.89
	玉米 Maize	1 447.52	41.08	3 523.85
	冬小麦-夏玉米种植系统 Cropping system	3 681.92	44.28	8 314.74
减少 25% 25% decrease	小麦 Wheat	1 971.71	43.54	4 528.20
	玉米 Maize	1 277.34	38.09	3 353.68
	冬小麦-夏玉米种植系统 Cropping system	3 249.06	41.22	7 881.88

(3):202-212. (in Chinese).

[2] IPCC. Climate Change 2014: Mitigation of climate change, Contribution of working group III to the fifth assessment report of the intergovernmental panel on climate change[R]. UK: Cambridge University Press, 2014.

[3] Tubiello F N, Salvatore M, Rossi S, et al. The FAOSTAT database of greenhouse gas emissions from agriculture[J]. *Environmental Research Letters*, 2013, 8(1):015009.

[4] 中华人民共和国国家发展和改革委员会. 中华人民共和国气候变化初始国家信息通报[R]. 2004. NDRC(National Development and Reform Commission). The People's Republic of China initial national communications on climate change [R]. 2004. (in Chinese)

[5] 中华人民共和国国家发展和改革委员会. 中华人民共和国气候变化第二次国家信息通报[R]. 2013. NDRC (National Development and Reform Commission). Second national communication on climate change of the People's Republic of China [R]. 2013. (in Chinese)

[6] 中华人民共和国国家发展和改革委员会. 中华人民共和国气候变化第一次两年更新报告[R]. 2016. NDRC(National Development and Reform Commission). The People's Republic of China first biennial update report on climate change[R]. 2016. (in Chinese)

[7] Wiedmann T, Minx J. A definition of 'carbon footprint' [J]. *Ecological Economics Research Trends*, 2008(1):1-11.

[8] Rees W E. Ecological footprints and appropriated carrying capacity: What urban economics leaves out[J]. *Environment and Urbanization*, 1992, 4(2): 121-130.

[9] Gan Y, Liang C, Hamel C, et al. Strategies for reducing the carbon footprint of field crops for semiarid areas: A review[J]. *Agronomy for Sustainable Development*, 2011, 31(4):643-656.

[10] Roy P, Nei D, Orikasa T, et al. A review of life cycle assessment(LCA) on some food products[J]. *Journal of Food Engineering*, 2009, 90(1): 1-10.

[11] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局, 中国国家标准化管理委员会. 环境管理, 生命周期评价, 原则与框架[M]北京: 中国标准出版社, 2008. General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine, Standardization Administration of China. Environmental management, life cycle assessment, principles and framework [M] Beijing: China Standard Press, 2008. (in Chinese).

[12] International Organization for Standardization. Carbon footprint of products—requirements and guidelines for quantification and communication(ISO/DIS 14067)[S]. 2012.

- [13] Kramer K J, Moll H C, Nonhebel S. Total greenhouse gas emissions related to the Dutch crop production system[J]. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 1999, 72(1):9-16.
- [14] Brock P, Madden P, Schwenke G, et al. Greenhouse gas emissions profile for 1 tonne of wheat produced in Central Zone(East) New South Wales: A life cycle assessment approach [J]. *Crop and Pasture Science*, 2012, 63(4):319-329.
- [15] Gan Y, Liang C, May W, et al. Carbon footprint of spring barley in relation to preceding oilseeds and N fertilization[J]. *The International Journal of Life Cycle Assessment*, 2012, 17(5):635-645.
- [16] Cheng K, Pan G, Smith P, et al. Carbon footprint of China's crop production: An estimation using agro-statistics data over 1993-2007[J]. *Agriculture Ecosystems & Environment*, 2011, 142(3-4):231-237.
- [17] Yan M, Cheng K, Luo T, et al. Carbon footprint of grain crop production in China-based on farm survey data [J]. *Journal of Cleaner Production*, 2015, 104:130-138.
- [18] 王占彪, 王 猛, 陈 阜. 华北平原作物生产碳足迹分析[J]. 中国农业科学, 2015, 48(1):83-92.
WANG Zhan-biao, WANG Meng, CHEN Fu. Carbon footprint analysis of crop production in north China plain[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2015, 48(1):83-92. (in Chinese)
- [19] 史磊刚, 陈 阜, 孔凡磊, 等. 华北平原冬小麦-夏玉米种植模式碳足迹研究[J]. 中国人口·资源与环境, 2011, 21(9):93-98.
SHI Lei-gang, CHEN Fu, KONG Fan-lei, et al. The carbon footprint of winter wheat-summer maize cropping pattern on north China plain[J]. *China Population, Resources and Environment*, 2011, 21(9):93-98. (in Chinese).
- [20] IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change). IPCC guidelines for national greenhouse gas inventories[C]. Intergovernmental Panel on Climate Change, Institute for Global Environmental Strategies(IGES), Japan: 2006.
- [21] 国家发展和改革委员会. 省级温室气体清单编制指南(试行)[R]. 2011.
NDRC(National Development and Reform Commission, the People's Republic of China). Provincial greenhouse gas list preparation guidelines[R]. 2011. (in Chinese)
- [22] IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change). Climate change 2013, The physical science basis[R]. Cambridge Cambridge University Press, 2013.
- [23] 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.
- [24] Zhang W, Dou Z, He P, et al. New technologies reduce greenhouse gas emissions from nitrogenous fertilizer in China[J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 2013, 110(21):8375-8380.
- [25] Xue J F, Liu S L, Chen Z D, et al. Assessment of carbon sustainability under different tillage systems in a double rice cropping system in Southern China[J]. *International Journal of Life Cycle Assessment*, 2014, 19(9):1581-1592.
- [26] Tan Y, Xu C, Liu D, et al. Effects of optimized N fertilization on greenhouse gas emission and crop production in the North China Plain[J]. *Field Crops Research*, 2017, 205:135-146.
- [27] Huang H P, Ma S M, Lin E D, et al. Benefits comparison analysis of different rice and wheat cropping patterns to adapt to climate change[J]. *Advances in Climate Change Research*, 2013, 4(3):182-189.
- [28] McDowell R W, Sharpley A N. Approximating phosphorus release from soils to surface runoff and subsurface drainage[J]. *Journal of Environmental Quality*, 2001, 30(2):508-520.
- [29] 国家发展和改革委员会. 中国温室气体清单研究[M]. 北京: 中国环境出版社, 2014.
NDRC (National Development and Reform Commission). China's greenhouse gas inventory study[M]. Beijing: China Environmental Science Press, 2014. (in Chinese)
- [30] 李秀芬, 朱金兆, 顾晓君, 等. 农业面源污染现状与防治进展 [J]. 中国人口·资源与环境, 2010, 20(4):81-84.
LI Xiu-fen, ZHU Jin-zhao, GU Xiao-jun, et al. Current situation and control of agricultural non-point source pollution[J]. *China Population, Resources and Environment*, 2010, 20(4):81-84. (in Chinese)
- [31] 刘宇程, 袁建梅, 靳贤娴. 国内农业用水污染现状及防治措施[J]. 环境工程 2014, 32(4):1-3.
LIU Yu-cheng, YUAN Jian-mei, JIN Xian-xian, et al. Pollution status and prevention measures of agricultural water in China[J]. *Environmental Engineering*, 2014, 32(4):1-3. (in Chinese)
- [32] Akiyama H, Yan X, Yagi K. Evaluation of effectiveness of enhanced-efficiency fertilizers as mitigation options for N₂O and NO emissions from agricultural soils: Meta-analysis[J]. *Global Change Biology*, 2010, 16(6):1837-1846.
- [33] Shaviv A. Advances in controlled-release fertilizers[J]. *Advances in agronomy*, 2001, 71:1-49.
- [34] Qiao C, Liu L, Hu S, et al. How inhibiting nitrification affects nitrogen cycle and reduces environmental impacts of anthropogenic nitrogen input[J]. *Global Change Biology*, 2015, 21(3):1249-1257.
- [35] 李香兰, 徐 华, 蔡祖聪. 氢醌、双氰胺组合影响稻田甲烷和氧化亚氮排放研究进展[J]. 土壤学报, 2009, 46(5):917-924.
LI Xiang-lan, XU Hua, CAI Zu-cong. Effect of combined use of hydroquinone and dicyandiamide on CH₄ and N₂O emissions from rice paddy field: A review[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2009, 46(5):917-924. (in Chinese)
- [36] 黄国宏, 陈冠雄, 张志明. 玉米田 N₂O 排放及减排措施研究[J]. 环境科学学报, 1998, 18(4):344-349.
HUANG Guo-hong, CHEN Guan-xiong, ZHANG Zhi-ming. N₂O emission in maize field and its mitigation[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 1998, 18(4):344-349. (in Chinese)
- [37] 邹晓霞, 李玉娥, 高清竹, 等. 中国农业领域温室气体主要减排措施研究分析[J]. 生态环境学报, 2011, 20(8/9):1348-1358.
ZOU Xiao-xia, LI Yu-e, GAO Qing-zhu, et al. How to reduce greenhouse gas(GHG) emissions in agriculture: An analysis of measures and actions taken in China [J]. *Ecology and Environmental Sciences*, 2011, 20(8/9):1348-1358. (in Chinese).
- [38] 翟 振, 王立刚, 李 虎, 等. 有机无机肥料配施对春玉米农田 N₂O 排放及净温室效应的影响[J]. 农业环境科学学报, 2013, 32(12):

- 2502–2510.
- ZHAI Zhen, WANG Li-gang, LI Hu, et al. Nitrous oxide emissions and net greenhouse effect from spring-maize field as influenced by combined application of manure and inorganic fertilizer [J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2013, 32(12): 2502–2510. (in Chinese)
- [39] 蔡祖聪, 徐 华, 马 静. 稻田生态系统 CH₄ 和 N₂O 排放[M]. 合肥: 中国科学技术大学出版社, 2009.
- CAI Zu-cong, XU Hua, MA Jing. Rice paddy ecosystem CH₄ and N₂O Emission [M]. Hefei: Press of University of Science and Technology of China, 2009. (in Chinese)
- [40] Kessel C, Venterea R, Six J, et al. Climate, duration, and N placement determine N₂O emissions in reduced tillage systems; A meta-analysis [J]. *Global Change Biology*, 2013, 19(1): 33–44.
- [41] Liu X J, Mosier A R, Halvorson A D, et al. The impact of nitrogen placement and tillage on NO, N₂O, CH₄ and CO₂ fluxes from a clay loam soil[J]. *Plant and Soil*, 2006, 280(1–2): 177–188.
- [42] Lal R. Soil carbon sequestration impacts on global climate change and food security[J]. *Science*, 2004a, 304(5677): 1623–1627.
- [43] Kallenbach C M, Rolston D E, Horwath W R. Cover cropping affects soil N₂O and CO₂ emissions differently depending on type of irrigation [J]. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 2010, 137(3): 251–260.
- [44] Sánchez-Martín L, Arce A, Benito A, et al. Influence of drip and furrow irrigation systems on nitrogen oxide emissions from a horticultural crop[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2008, 40(7): 1698–1706.
- [45] Zou X, Li Y, Cremades R, et al. Cost-effectiveness analysis of water-saving irrigation technologies based on climate change response: A case study of China[J]. *Agricultural Water Management*, 2013, 129: 9–20.
- [46] Zou X, Li Y, Gao Q, et al. How water saving irrigation contributes to climate change resilience: A case study of practices in China[J]. *Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change*, 2012, 17(2): 111–132.
- [47] 逯 非, 王效科, 韩 冰, 等. 中国农田施用化学氮肥的固碳潜力及其有效性评价[J]. *应用生态学报*, 2008, 19(10): 2239–2250.
- LU Fei, WANG Xiao-ke, HAN Bing, et al. Assessment on the availability of nitrogen fertilization in improving carbon sequestration potential of China's cropland soil[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2008, 19(10): 2239–2250. (in Chinese)
- [48] Huang T, Gao B, Christie P, et al. Net global warming potential and greenhouse gas intensity in a double-cropping cereal rotation as affected by nitrogen and straw management[J]. *Bio Geosciences*, 2013, 10: 7897–7911.
- [49] 黄坚雄, 陈源泉, 刘武仁, 等. 不同保护性耕作模式对农田的温室气体净排放的影响[J]. *中国农业科学*, 2011, 44(14): 2935–2942.
- HUANG Jian-xiong, CHEN Yuan-quan, LIU Wu-ren, et al. Effect on net greenhouse gases emission under different conservation tillage in Jilin province[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2011, 44(14): 2935–2942. (in Chinese)