

doi: 10.7621/cjarrp.1005-9121.20191211

· 绿色发展 ·

长江下游地区稻麦轮作模式碳足迹研究^{*}

——基于生命周期评价

陈中督, 李凤博, 冯金飞, 周锡跃, 徐春春, 纪龙, 方福平[※]

(中国水稻研究所, 浙江杭州 311300)

摘要 [目的] 稻麦轮作是我国长江下游粮食主产区一种主要的种植制度, 系统分析稻麦轮作系统碳足迹构成对于实现该地区低碳农业具有重要的意义。[方法] 文章基于农户调研数据, 运用农业碳足迹理论及生命周期法定量研究长江下游地区稻麦轮作系统碳足迹大小及组成, 并进一步分析碳足迹影响因素。[结果] (1) 长江下游地区稻麦轮作系统单位产量、单位生物量、单位产值碳足迹分别为 $0.50\text{kgCO}_2\text{-eq/kg}$ 、 $0.22\text{kgCO}_2\text{-eq/kg}$ 和 $0.22\text{kgCO}_2\text{-eq/CNY}$ 。 CH_4 和 N_2O 排放、柴油、肥料为长江下游地区稻麦轮作系统碳排放主要来源, 分别占稻麦生产碳足迹的 65%、53%、11%~22% 和 15%~20%。(2) 在调研的稻麦田中发现农资投入中氮肥的施用量和柴油消耗量都与碳足迹呈现显著正相关关系, 而种植规模与碳足迹呈现显著负相关关系, 与小规模稻麦种植相比, 大规模稻麦种植单位产量碳足迹分别降低了 7.4% 和 20.9%。(3) 作物生产的碳足迹可能受到农场规模、气候条件以及作物管理实践的影响。[结论] 发展稻麦轮作系统节肥、节水及免耕技术, 构建规模化的低碳种植模式必将成为未来中国长江下游地区稻麦轮作模式应对气候变化发展低碳农业的重要举措。

关键词 碳足迹 稻麦轮作 全球变暖 生命周期

中图分类号:S19 文献标识码:A 文章编号:1005-9121[2019]12081-10

0 引言

在全球范围内, 大气中二氧化碳 (CO_2)、甲烷 (CH_4) 和氧化亚氮 (N_2O) 的浓度显著增加, 几乎可以肯定是自 1750 年以来人类活动的结果^[1, 2]。二氧化碳排放量的增加主要归因于化石燃料的燃烧和土地利用的变化, 而 CH_4 和 N_2O 排放主要来自于农业。IPCC 第五次评估报告表明, 农业源温室气体排放占全球温室气体排放总量的 24%, 其中 CH_4 和 N_2O 排放分别占全球总的 CH_4 和 N_2O 排放量的 70% 和 90%^[3]。2011 年, 化学肥料在农田施用过程中排放的温室气体占农业排放量的 13%, 是农业领域中增长最快的排放源, 自 2001 年以来增加了约 37%。因此, 减少全球农业温室气体排放、促进农业低碳经济在控制全球温室气体排放总量方面显得尤为重要。

现如今, 碳足迹 (Carbon footprint) 已被广泛应用于全球范围内与作物生产相关的碳排放的量化评价, 并基于生命周期法原则定量描述一种产品或一个活动“从摇篮到坟墓”整个生命周期内的温室气体排放^[4]。在过去的几十年中, 农业领域碳足迹已经被广泛运用。王兴等^[5]基于全国 2004—2014 年水稻生产相关统计数据, 利用碳足迹评价方法核算了全国水稻生产碳足迹及其变化趋势, 指出我国水稻单位面积碳足迹呈逐年增长, 而单位产量碳足迹则出现下降趋势。Dubey 和 Lal 对美国俄亥俄州和印度旁遮普邦的农业碳足迹进行了详细分析, 并探讨了两地农业生产的可持续性^[6]。黄祖辉和米松华^[7]基于浙江省投人

收稿日期: 2018-05-23

作者简介: 陈中督(1988—), 男, 浙江杭州人, 博士。研究方向: 低碳农作制

※通讯作者: 方福平(1971—), 男, 浙江杭州人, 教授。研究方向: 农业经济及农田生态生理。Email: fangfuping@caas.cn

*资助项目: 国家重点研发计划项目“粮食丰产增效科技创新”(2016YFD0300210) 和浙江省自然科学基金青年基金项目(LQ18G030013) 项目资助

产出表，结合投入产出和生命周期评价法，详细阐明了浙江省农业碳排放特征及其组成成分。所有这些研究表明，农业碳足迹理论结合生命周期评价方法，作为评估气候变化影响的一种行之有效的评价方法，为绿色低碳的粮食作物系统评价提供了强有力的数据支撑和理论依据。

长江下游地区是我国稻麦轮作种植模式的主要生产基地，每年稻麦产量对我国谷物生产贡献了将近30%，为保障我国粮食生产安全做出了重要贡献。大量统计资料表明，近年来，长江下游地区水稻和小麦的单产和总产均有大幅度的提高^[8, 9]。但是，稻麦产量提升的背后皆伴随着大量的肥料投入，从而不可避免带来温室气体排放的增加。协调好作物持续高产和生态环境保护等之间的矛盾，一直是备受关注的焦点^[10, 11]。因此，研究长江下游地区稻麦轮作系统碳足迹及其构成，分析各组分碳足迹贡献率，对于我国稻麦轮作系统低碳可持续发展有着重要意义。文章基于调研数据，利用农业碳足迹理论及生命周期评价法定量分析了长江中下游流域稻麦轮作系统碳足迹及其构成，以及探讨了长江下游地区稻麦生产低碳策略与潜力，为实现我国低碳农业提供理论支撑与科学依据。

1 材料与方法

1.1 数据来源

该研究立足于长江下游地区江苏、安徽稻麦轮作主产区，采用农户走访式问卷调研形式，2016—2017年前后共收到农户调查问卷130份，有效问卷116份，问卷合格率达89%。调查内容为农户在稻麦种植过程中的农资投入及农事操作能源消耗数据，主要包括稻麦种子投入量、出售价格，化肥投入、农膜使用量、机械柴油消耗量、灌溉耗水量等。

1.2 研究边界

该研究的系统边界为水稻季和小麦季播种到收获整个生育期内直接和间接温室气体排放。具体包括各项农资投入（种子、化肥、农膜、农药）温室气体排放、农事操作（灌溉、耕作、收获等）过程中能源消耗所形成的温室气体排放、作物种植期间CH₄、N₂O排放。理论上，稻田温室气体排放主要包括有CH₄、N₂O和CO₂等，但水稻光合作用所固定的CO₂要大于呼吸CO₂，在水稻生育期内的CO₂净排放通量为负值，因此，CO₂一般不列入稻田温室气体排放清单中予以计算^[12]。

1.3 计算方法

碳足迹计算方法及稻田CH₄排放的相关参数均来源于《2006年IPCC国家温室气体清单指南》^[13]。水稻从播种到收获过程的农资投入碳足迹计算为：

$$CF_i = \sum_{i=1}^n (\partial m)_i \quad (1)$$

式(1)中，CF_i为早稻和晚稻生产的农资投入单位面积碳足迹(kg CO₂-eqhm⁻²)；n表示该双季稻生产系统从播种到收获整个过程消耗的农业生产资料种类和农事操作（化肥、农药、柴油等）， ∂ 表示某种农资的消耗量(kg)，m表示某种农资的温室气体排放参数，该研究排放参数主要源于中国生命周期数据库(CLCD)和Ecoinvent 2.2数据库(表1)。

稻田是CH₄的主要排放源^[14]，而稻田N₂O的直接排放很小^[15]，可忽略不计，故该研究在计算稻田碳足迹的构成时，根据ISO/TS14067碳足迹核算标准估算了稻田CH₄的排放量。水稻生长期间CH₄引起的碳排放计算公式为：

$$CF_{CH_4} = EF_{i,j,k} \times t_{i,j,k} \times 25 \quad (2)$$

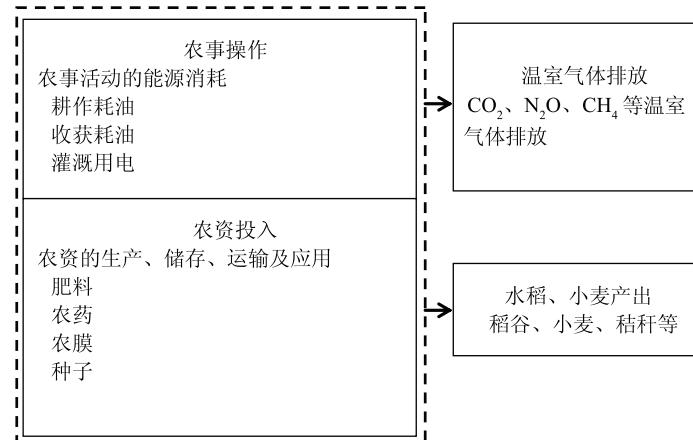


图1 稻麦轮作系统碳足迹计算边界

$$EF_{i,j,k} = EF_c \times SF_w \times SF_p \times SF_o \quad (3)$$

$$SF_o = (1 + \sum_i ROA_i \times CFOA_i)^{0.59} \quad (4)$$

$$ROA_i = Y \times 0.623 \times ISR_p \times 0.85 \quad (5)$$

式(2)~(5)中, CF_{CH_4} 为甲烷排放引起的二氧化碳排放当量 ($\text{kgCO}_2 - \text{eq}/\text{hm}^2$)。 $EF_{i,j,k}$ 是在 i, j 和 k 条件下的日排放因子 ($\text{kgCH}_4/(\text{hm}^2 \cdot \text{day})$) ; $t_{i,j,k} = i, j$ 和 k 条件下的水稻种植期 (日)。 i, j, k 分别代表不同的生态系统, 水分状况和有机添加量, 以及其他可以引起水稻甲烷排放变化的条件; EF_c 是不含有机添加物的持续性灌水稻田的基准排放因子 ($1.3\text{kgCH}_4/(\text{hm}^2 \cdot \text{day})$), SF_w 、 SF_p 分别为种植期不同水分状况的换算系数和种植期前季前不同水分状况的换算系数, 结合肖玉的研究^[16], 该研究 $SF_w = 1$, $SF_p = 1$ 。 SF_o 是有机添加物类型和数量变化的换算系数, $CFOA_i = 1$ 表示在品种土质之间有机添加物的转换系数, ROA_i 为有机添加物的施用比率, Y 为双季稻产量 ($\text{kg hm}^{2-1} \text{year}^{-1}$), 0.623 为水稻草谷比, ISR_p 为稻谷的秸秆还田系数, 表示农户稻草还田占稻草产量的比例。0.85 为水稻秸秆干重占鲜重的比值^[14]。

旱地的 CH_4 排放量较少, 可忽略不计, 旱地直接和间接的 N_2O 排放主要由施用氮肥所引起, 因此 N_2O 排放的计算公式为:

$$CF_{N_2O} = DCF_{N_2O} + GCF_{N_2O} + LCF_{N_2O} \quad (6)$$

$$DCF_{N_2O} = N \times F_1 \times 44/28 \times 298 \quad (7)$$

$$GCF_{N_2O} = N \times F_2 \times 44/28 \times 298 \quad (8)$$

$$LCF_{N_2O} = N \times F_3 \times 44/28 \times 298 \quad (9)$$

式(6)~(9)中, CF_{N_2O} 为 N_2O 排放引起的二氧化碳排放当量。 DCF_{N_2O} 为氮肥引起的田间 N_2O 直接排放, GCF_{N_2O} 是由 NH_3 和 NH_x 形式挥发到大气后氮沉降造成的间接 N_2O 排放。 LCF_{N_2O} 为通过淋失和径流损失的氮素造成的间接 N_2O 排放。 F_1 、 F_2 、 F_3 分别为氮肥投入引起的 N_2O 直接排放的排放因子、氮沉降造成的间接 N_2O 排放因子和淋失和径流损失的氮素造成的间接 N_2O 排放因子, 系数分别为 0.01、0.01 和 0.0075。FG 和 FL 分别为以 NH_3 和 NH_x 形式挥发的化肥氮比例 (0.1kg/kg) 和土壤中淋失和径流损失的氮比例 (0.3kg/kg)。44/28 为 N_2O 与 $\text{N}_2\text{O}-\text{N}$ 分子量之比, 298 为在 100 年尺度上将 N_2O 转化为 CO_2 的全球增温潜势, 以上排放因子均来源于 2006 年 IPCC 国家温室气体清单指南。

作物生产的单位面积碳足迹 (CF), 单位产量碳足迹 (CF_y)、单位生物产量碳足迹 (CF_b)、单位产值的作物生产碳足迹 (CF_v) 的计算分别见公式 (10) ~ (13)。

$$CF = CF_i + CF_{CH_4} + CF_{N_2O} \quad (10)$$

$$CF_y = CF/Y \quad (11)$$

$$CF_b = CF/B \quad (12)$$

$$CF_v = CF/V \quad (13)$$

式(10)~(13)中, Y 指作物产量, B 指作物生物产量, V 指作物产值。

1.4 数据处理与分析

利用 EXCEL 2011 和 SPSS17.0 (SPSS Inc., Chicago, IL, US) 软件对数据进行处理和统计分析, 采用 EXCEL 2011 和 SigmaPlot 12 制作图表。

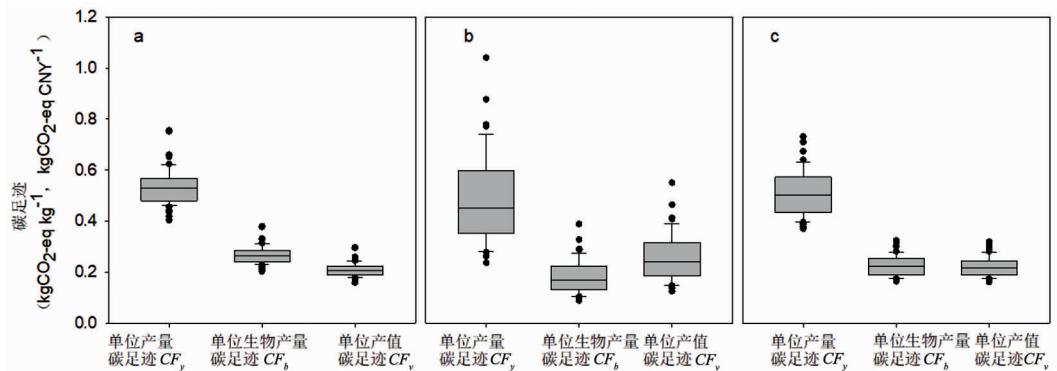
表 1 农业投入资料的温室气体排放系数

项目	单位	系数	来源
柴油	$\text{kg CO}_2 - \text{eq}/\text{kg}$	0.89	CLCD0.7
柴油燃烧	$\text{kg CO}_2 - \text{eq}/\text{kg}$	4.1	CLCD0.7
灌溉用电	$\text{kg CO}_2 - \text{eq}/\text{kWh}$	0.82	CLCD0.7
氮肥	$\text{kg CO}_2 - \text{eq}/\text{kg}$	1.53	CLCD0.7
磷肥	$\text{kg CO}_2 - \text{eq}/\text{kg}$	1.63	CLCD0.7
钾肥	$\text{kg CO}_2 - \text{eq}/\text{kg}$	0.65	CLCD0.7
农膜	$\text{kg CO}_2 - \text{eq}/\text{kg}$	22.72	Ecoinvent2.2
杀虫剂	$\text{kg CO}_2 - \text{eq}/\text{kg}$	16.61	Ecoinvent2.2
除草剂	$\text{kg CO}_2 - \text{eq}/\text{kg}$	10.15	Ecoinvent2.2
杀菌剂	$\text{kg CO}_2 - \text{eq}/\text{kg}$	10.57	Ecoinvent2.2
水稻种子	$\text{kg CO}_2 - \text{eq}/\text{kg}$	1.84	Ecoinvent2.2
小麦种子	$\text{kg CO}_2 - \text{eq}/\text{kg}$	0.58	Ecoinvent2.2

2 结果分析

2.1 长江下游地区稻麦轮作模式碳足迹

长江下游地区稻麦轮作模式碳足迹如图 2 所示。长江下游地区水稻生产单位产量碳足迹值为 $0.53\text{kgCO}_2\text{-eq/kg}$, 最大值与最小值分别为 $0.75\text{kgCO}_2\text{-eq/kg}$ 、 $0.40\text{kgCO}_2\text{-eq/kg}$; 单位生物产量碳足迹值为 $0.26\text{kgCO}_2\text{-eq/kg}$, 最大值与最小值分别为 $0.37\text{kgCO}_2\text{-eq/kg}$ 、 $0.20\text{kgCO}_2\text{-eq/kg}$; 单位产值碳足迹值为 $0.20\text{kgCO}_2\text{-eq/CNY}$, 最大值与最小值分别为 $0.29\text{kgCO}_2\text{-eq/CNY}$ 、 $0.15\text{kgCO}_2\text{-eq/CNY}$; 小麦生产单位产量碳足迹值为 $0.48\text{kgCO}_2\text{-eq/kg}$, 最大值与最小值分别为 $1.04\text{kgCO}_2\text{-eq/kg}$ 、 $0.23\text{kgCO}_2\text{-eq/kg}$; 单位生物产量碳足迹值为 $0.18\text{kgCO}_2\text{-eq/kg}$, 最大值与最小值分别为 $0.38\text{kgCO}_2\text{-eq/kg}$ 、 $0.08\text{kgCO}_2\text{-eq/kg}$; 单位产值碳足迹值为 $0.25\text{kgCO}_2\text{-eq/CNY}$, 最大值与最小值分别为 $0.55\text{kgCO}_2\text{-eq/CNY}$ 、 $0.12\text{kgCO}_2\text{-eq/CNY}$ 。稻麦轮作系统生产单位产量碳足迹值为 $0.50\text{kgCO}_2\text{-eq/kg}$, 最大值与最小值分别为 $0.73\text{kgCO}_2\text{-eq/kg}$ 、 $0.36\text{kgCO}_2\text{-eq/kg}$; 单位生物产量碳足迹值为 $0.22\text{kgCO}_2\text{-eq/kg}$, 最大值与最小值分别为 $0.32\text{kgCO}_2\text{-eq/kg}$ 、 $0.16\text{kgCO}_2\text{-eq/kg}$; 单位产值碳足迹值为 $0.22\text{kgCO}_2\text{-eq/CNY}$, 最大值与最小值分别为 $0.31\text{kgCO}_2\text{-eq/CNY}$ 、 $0.16\text{kgCO}_2\text{-eq/CNY}$ 。



注: a: 水稻单位产量、单位生物量、单位产值碳足迹; b: 小麦单位产量、单位生物量、单位产值碳足迹; c: 稻麦轮作系统单位产量、单位生物量、单位产值碳足迹

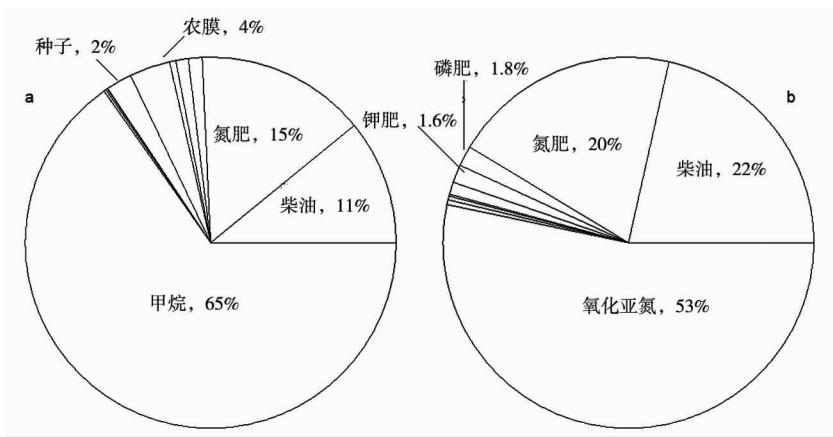
图 2 长江下游地区稻麦轮作系统碳足迹

2.2 长江下游地区稻麦轮作模式的碳足迹构成

长江下游地区稻麦轮作系统生产的碳足迹构成如图 3 所示。水稻生产碳足迹构成中以 CH_4 排放占比最大, 约为 65%, 农资投入品引起的碳足迹占 35%。在农资投入品中, 柴油和氮肥投入所产生的碳足迹较大, 分别占到 15% 和 11%, 其次为农膜和种子, 分别占到 4% 和 2%, 农药各组分所占比例较小, 几乎可忽略不计。小麦生产碳足迹构成与水稻类似, 田间直接排放所占比例最大, N_2O 占比为 53%, 其他农资投入占比为 47%。农资投入中, 化肥投入引起的碳足迹最大 (23.4%), 其中氮肥、磷肥、钾肥分别占总碳足迹的 20%、1.8% 和 1.6%。其次是柴油投入引起的碳足迹, 稍高于氮肥占比, 占到 22%。由于长江中下游流域雨水较多, 小麦生产不需要进行灌溉, 因此不产生碳足迹。稻麦轮作系统中农药投入所带来的温室气体排放最低, 水稻和小麦贡献度分别为 0.5% 和 0.8%。其中, 农药组成中, 贡献率表现为杀菌剂 > 杀虫剂 > 除草剂。

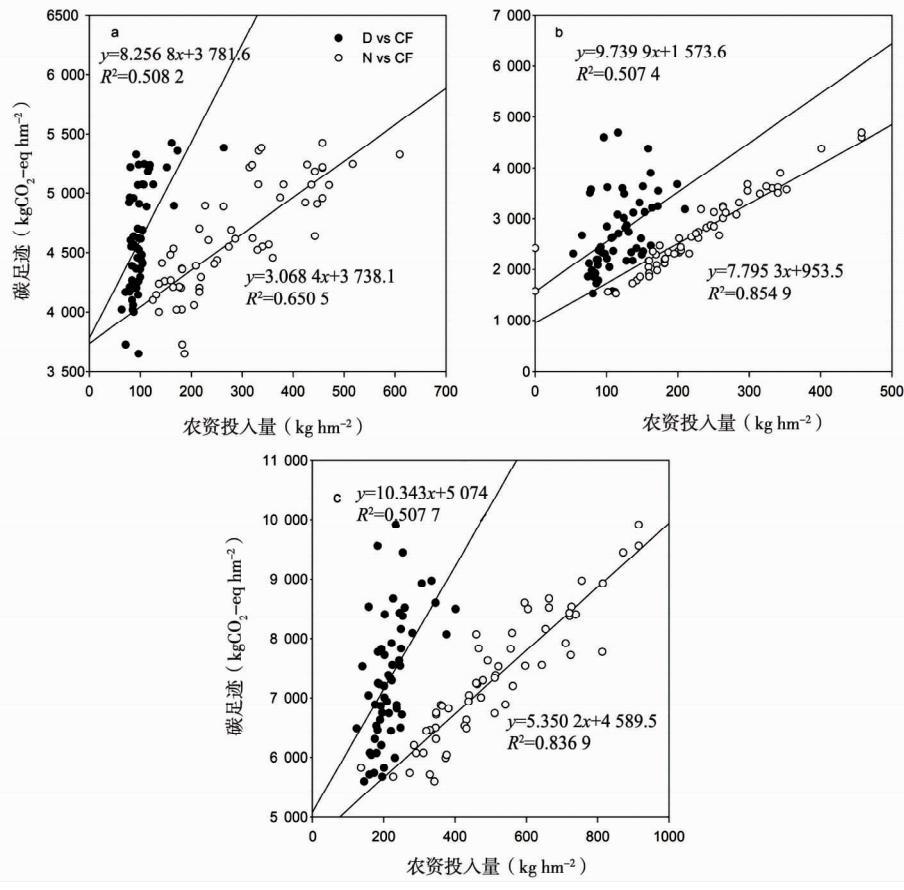
2.3 稻麦轮作模式碳足迹影响因素分析

进一步, 我们通过对农户角度各个农资投入与总碳足迹做相关性分析可知, 结果发现氮肥的施用量和柴油消耗量与总碳足迹存在正相关性关系 (图 4)。由图 4 可以看出, 水稻生产过程中, 每公顷柴油使用量增加 1kg, 水稻生产碳足迹增加 $8.26\text{kgCO}_2\text{-eq}/\text{hm}^2$ (趋势线方程为 $y = 8.2568x + 3781.6$, $R^2 =$



注: a: 水稻碳足迹构成; b: 小麦碳足迹构成

图3 长江中下游流域稻麦轮作模式碳足迹构成



注: a: 水稻; b: 小麦; c: 稻麦轮作模式。小黑点表示柴油消耗量与碳足迹的相关性, 小白点表示氮肥投入量与碳足迹的相关性

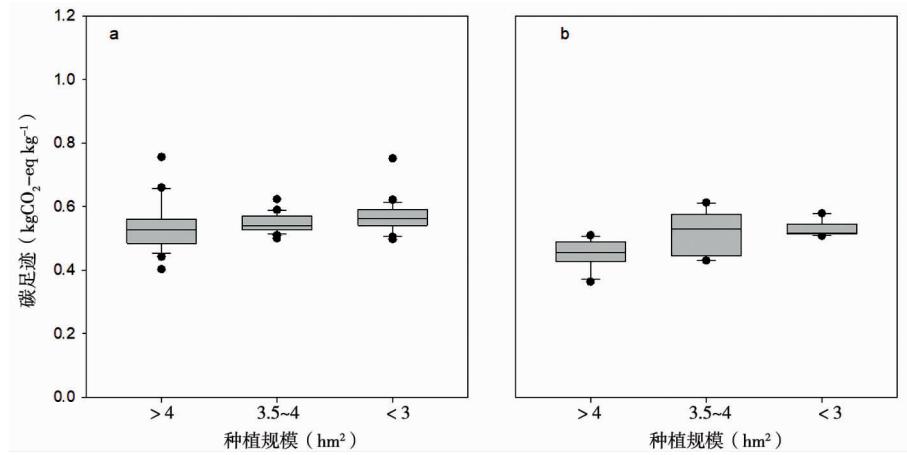
图4 长江中下游流域稻麦轮作模式碳足迹影响因素解析

0.5082), 每公顷增施1kg氮肥, 水稻生产碳足迹增加3.07kgCO₂-eq/hm² (趋势线方程为 $y=3.0684x+3738.1$, $R^2=0.6505$), 可见水稻生产过程中, 氮肥增加对碳足迹的影响程度小于柴油。小麦生产过程中, 每公顷增加1kg柴油和1kg氮肥, 小麦碳足迹分别增加9.74和7.80kgCO₂-eq/hm², 同样表现为柴油碳足迹影响程度略大于肥料。稻麦轮作模式下, 每公顷增加1kg柴油和1kg氮肥, 稻麦轮作模式碳足

迹分别增加 10.34 和 5.35 kgCO₂ - eq/hm²，趋势线方程分别为 $y = 10.343x + 5.074$ ($R^2 = 0.5077$) 和 $y = 5.3502x + 4.589.5$ ($R^2 = 0.8369$)。综合来看，氮肥施用量对水稻碳足迹的影响程度略小于小麦碳足迹，柴油消耗量对水稻碳足迹的影响程度小于小麦。

2.4 不同种植规模对稻麦轮作模式碳足迹的影响

不同种植规模的稻麦轮作模式生产粮食（水稻和小麦）的碳足迹情况见图 5。由图 5 可知，稻麦轮作模式中水稻碳足迹和小麦碳足迹均与种植规模成显著的负相关性，即碳足迹随着种植规模的增大而呈下降趋势。进一步将种植规模分为小（0~3.5 hm²）、中（3.5~4.0 hm²）和大（>4.0 hm²）3 种类型进行研究，发现水稻在 3 类种植规模上的平均单位产量碳足迹分别为 0.57 kgCO₂ - eq/kg、0.55 kgCO₂ - eq/kg 和 0.53 kgCO₂ - eq/kg，而小麦相应的碳足迹分别为 0.53 kgCO₂ - eq/kg、0.52 kgCO₂ - eq/kg 和 0.45 kgCO₂ - eq/kg。可见，稻麦轮作系统中的水稻和小麦在 3 种种植规模中的碳足迹均是小规模类型最高，中规模的较低，大规模的最低。



注 a: 水稻不同种植规模碳足迹；b: 小麦不同种植规模碳足迹

图 5 长江中下游流域不同种植规模稻麦轮作模式碳足迹

长江下游地区稻麦轮作系统不同种植规模碳足迹投入及构成如表 2 所示。长江下游地区水稻大规模种植平均单产为 9 000 kg/hm²，较小规模种植平均单产（8 700.0 kg/hm²）提高了 3.4%。对比分析水稻不同种植规模的碳足迹、单位面积投入和构成发现，大规模种植 CF 、 CF_y 、 CF_b 和 CF_v 稍高于小规模种植，但差异不显著 ($P > 0.05$)。比较分析小麦不同种植规模生产碳足迹发现，小麦大规模生产 CF 、 CF_y 、 CF_b 和 CF_v 分别显著高于小规模生产 12.4%、20.9%、18.8% 和 22.7%，差异呈现显著水平 ($P < 0.05$)。大规模小麦生产单位面积柴油和氮肥碳足迹显著低于小规模小麦生产，降低幅度分别为 15.6% 和 11.6% ($P < 0.05$)；而磷肥则呈现相反趋势，增加幅度为 29.6% ($P < 0.05$)。大规模种植小麦平均单产为 5 625.0 kg/hm²，较小规模种植平均单产（5 250.0 kg/hm²）提高了 6.7%，差异呈现显著水平 ($P < 0.05$)。

3 讨论与结论

3.1 长江下游地区稻麦轮作系统碳足迹

该研究发现，相对与我国水稻（0.89 kgCO₂ - eq/kg）和小麦（0.81 kgCO₂ - eq/kg）平均碳足迹而言^[5, 17]，长江下游地区水稻和小麦碳足迹有所降低。研究表明，长江下游地区水稻生产单位产量碳足迹、单位产值碳足迹分别为 0.53 kgCO₂ - eq/kg, 0.20 kgCO₂ - eq/CNY，小麦生产单位产量碳足迹、单位产值碳足迹分别为 0.48 kgCO₂ - eq/kg, 0.25 kgCO₂ - eq/CNY。这可能跟中国各省作物生产对于农资投入的规模，各结构组分的比例不同有关，例如不同省份对灌溉需求不同，相对于水资源较为匮乏的中国北方农作区，

长江下游地区因其天然优越的气候资源，其对灌溉的需求较小，从而减少了灌溉用电带来的碳足迹。另外，由于长江下游地区优越的地理特征及气候条件，其产量普遍高于其他农作区，从而导致其单位产量碳足迹较小。根据 2014 年全国农业普查可知，江苏省水稻和小麦产量分别为 $8\ 824.5\text{kg}/\text{hm}^2$ 和 $6\ 604.1\text{kg}/\text{hm}^2$ ，较全国水稻和小麦产量分别提高了 2.9% 和 6.3%。作物生产碳足迹受种植制度、农作措施以及社会经济等多方面影响，并且各因素存在互作，因此不同作物的碳足迹存在显著差异^[18]。卢小宏等基于田间试验数据，计算分析了河北吴桥玉米单位产量碳足迹值为 $0.29\text{kgCO}_2 - \text{eq}/\text{kg}$ ^[19]。王占彪等^[20]基于农户调研数据，指出河北省棉花单位产量碳足迹平均值为 $0.11\text{kgCO}_2 - \text{eq}/\text{kg}$ 。可见，单位产量碳足迹表现为水稻生产平均值 > 冬小麦 > 夏玉米 > 棉花，说明长江中下游流域水稻生产投入较其他作物高，因此在未来长江中下游流域作物生产布局中应适当压缩双季稻播种面积，适当扩大小麦、玉米等其他作物种植面积，推广多种形式的轮作模式，从而减少农业温室气体排放。从国际层面上来看，我国稻麦碳足迹水平较其他发达国家普遍较高，研究结果与 Kitzes 等 (2008)^[21] 报道类似。当前，我国农资投入水平普遍高于发达国家。例如，在中国，合成氮肥的施用率约为发达国家的 2~3 倍。其次，我国小麦产量普遍低于发达国家。据估计，荷兰的小麦产量为中国的小麦产量的 1.9 倍。此外，中国严重依赖煤炭获取各种能源和材料的生产，由于煤的能源效率较低，因此农资投入的温室气体排放系数显著高于发达国家，从而导致了更高的温室气体排放^[22, 23]。这对我国粮食生产的可持续性提出了巨大挑战，提高作物生产率，减少农田温室气体排放是提高我国粮食安全的重要途径。

3.2 长江下游地区稻麦轮作系统碳足迹主要构成

大量研究指出，大田温室气体的直接排放农田主要来源于肥料的施用，其中氮肥投入所产生的温室气体排放占到农田总排放的 44%~79%^[24]。该研究也发现，水稻生产中肥料的碳足迹贡献率达到 17.1%，小麦季肥料（包括氮肥导致的田间 N_2O 直接和间接排放）碳足迹贡献率高达 76.5%。该研究氮肥生产过程的温室气体排放系数基于中国生命周期基础数据库 (CLCD)^[12]，系数为 $1.53\text{kgCO}_2 - \text{eq}/\text{kg}$ ，远高于国外氮肥温室气体排放系数 ($0.86\text{kgCO}_2 - \text{eq}/\text{kg}$)，从而造成了氮肥生产过程中的高排放。另一方面，我国农作物连续高产的同时，也伴随着我国化肥的高使用量。研究表明我国当季氮肥和磷肥利用率普遍较低，分别为 35% 和 18%，远低于国际标准水平^[25]。再者，农田中施用过量化肥，会在植物和土壤中大量集聚，在降雨及灌溉的条件下随着水分流失，造成间接的 N_2O 排放。另外，该研究发现柴油在稻麦轮作系统农资投入碳排放中所占比重较大，农业机械化及其自动化是我国农业未来发展的方向及目标，机械能源的消耗必然有所增加，如何协调生态环境及经济效益和调发展是未来研究的重点，从经济能源高效利用角度实现我国低碳农业生产。稻田 CH_4 排放是水稻生产碳足迹的主要来源之一，已得到学术界的广泛认同。例如，曹黎明等^[26]对上海市单季晚稻农田温室气体评估值为 $1.28 \times 10^4\text{kgCO}_2 - \text{eq}/\text{hm}^2$ ，占全部碳排放的 77.2%。王兴等^[5]的研究发现全国水稻生产碳足迹组成中占比最大的部分为稻田 CH_4 排放，达 85.05%。

表 2 不同种植规模碳足迹投入及构成

种类	水稻		小麦	
	大规模	小规模	大规模	小规模
甲烷	3 041.6a	2 998.6a		
氧化二氮			1 275.1a	1 442.6a
柴油	451.5b	581.0a	516.4b	611.9a
灌溉	12.8a	20.3a		
氮肥	902.8a	1013.8a	491.1b	555.7a
磷肥	52.0a	55.2a	52.7a	37.1b
钾肥	44.9a	58.0a	44.7a	32.1a
农膜	165.5a	169.7a		
除草剂	2.8a	2.9a	3.8a	3.2a
杀虫剂	6.6a	4.5a	8.2a	10.3a
杀菌剂	15.3a	10.4a	8.1a	10.9a
水稻种子	150.7a	136.0a		
小麦种子			32.0a	30.1a
单位面积碳足迹	4 846.5a	5 050.5a	2 432.2b	2 733.8a
产量	9 000.0a	8 700.0a	5 625.0a	5 250.0b
单位产量碳足迹	0.54a	0.58a	0.43b	0.52a
单位生物量碳足迹	0.27a	0.29a	0.16b	0.19a
单位产值碳足迹	0.21a	0.23a	0.22b	0.27a

注：不同小写字母表示不同种植规模间的差异显著水平 ($P < 0.05$)

我国稻麦碳足迹水平较其他发达国家普遍较高，研究结果与 Kitzes 等 (2008)^[21] 报道类似。当前，我国农资投入水平普遍高于发达国家。例如，在中国，合成氮肥的施用率约为发达国家的 2~3 倍。其次，我国小麦产量普遍低于发达国家。据估计，荷兰的小麦产量为中国的小麦产量的 1.9 倍。此外，中国严重依赖煤炭获取各种能源和材料的生产，由于煤的能源效率较低，因此农资投入的温室气体排放系数显著高于发达国家，从而导致了更高的温室气体排放^[22, 23]。这对我国粮食生产的可持续性提出了巨大挑战，提高作物生产率，减少农田温室气体排放是提高我国粮食安全的重要途径。

本研究也得出类似的结论, CH_4 排放量对水稻季碳排放贡献显著, 占到总碳足迹的 65% 左右。目前, 对于如何抑制稻田 CH_4 排放, 国内外学者也已开展了大量研究, 主要集中在稻田灌溉^[27]、肥料管理^[28]、品种选择^[27]、稻田综合种养^[29]、耕作方式^[15]等方面。但是, 影响稻田 CH_4 排放的因素有很多, 如土壤性质、水分因素、施肥、耕作、气候因素等^[24], 今后的研究中需要多方面综合考虑。

3.3 规模种植对作物碳足迹的影响

该研究显示了不同种植规模单位产量碳足迹存在显著差别, 稻麦轮作系统的碳足迹随种植规模增大而呈下降趋势, 小麦季大规模农场单位产量碳足迹显著低于小规模家庭农场, 这与 Feng 等 (2011)^[30] 的研究结果一致, 其研究报告指出, 大规模种植农场 ($>0.7\text{hm}^2$) 表层土壤有机碳储量较小规模种植农场 ($<0.7\text{hm}^2$) 提高 30%, 从而提高了作物单位产量。Sefeedpari 等 (2013)^[31] 在一项类似的研究中发现, 小于 1hm^2 的农场的总能量投入比 $1 \sim 4\text{hm}^2$ 、 $4 \sim 10\text{hm}^2$ 和 $>10\text{hm}^2$ 的总能量投入要高, 分别提高了 17%、21% 和 34%, 主要原因是种植规模大的农户生产管理相对科学, 提高了水肥的利用效率, 可见种植规模化对实现低碳农业具有积极作用。但是由于种植规模效益同时受经济社会条件的影响, 在不同区域, 效果会存在差异, 因此该研究结果有待进一步完善。同时, 该研究发现小麦单位产量碳足迹对农作措施的敏感性高于水稻。现阶段, 我国农地破碎化问题严重, 需要加快构建土地流转规模化经营体系, 从而推动我国农业现代化发展^[32]。通过土地的流转和兼并, 减少了额外的农作技术投入, 避免了多余的能耗损失, 从而促进我国农作物低碳绿色生产。因此, 改善农业系统管理, 特别是加强农业集约化, 是中国农业低碳发展的关键问题。

3.4 研究局限性

该研究利用农户调研数据核算长江下游地区稻麦生产的碳足迹, 计算过程考虑了稻麦生产中最主要的 10 种农资投入以及田间温室气体排放, 实现了同一标准下较为全面的计算衡量与比较。但是, 该研究的农田温室气体直接排放的计算方法借鉴了前人研究结果, 由于气候、土壤及管理方式的不同, 估算的结果与实测数据存在一定的差异。因此, 今后的研究中, 将补充大田试验, 通过实测数据排除背景影响, 从而获得更加科学的一手试验结果。另外, 该研究采用生命周期评价法, 系统边界存在一定的争议, 例如计算碳足迹时是否考虑土壤碳储量变化、人工投入以及机械磨损等^[33, 34]。这些争议需要国内外学者进行进一步的讨论和完善, 从而为农作物碳足迹的研究制定一套统一的评价体系, 为最终构建低碳农业生态系统做铺垫。

参考文献

- [1] IPCC, 2007. In: Solomon S, Qin D, Manning M, Chen Z, Marquis M, Averyt K B, Tignor M, Miller H L. (Eds.), Climate Change 2007: The Physical Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge University Press, Cambridge, UK and New York. http://www.ipcc.ch/pdf/assessment-report/ar4/syr/ar4_syr.pdf.
- [2] IPCC, 2013. In: Stocker T F, Qin D, Plattner G K, Tignor M, Allen S K, Boschung J, Nauels A, Xia Y, Bex V, Midgley P M. (Eds.), Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, p. 1535.
- [3] West T O, Marland G. Net carbon flux from agriculture: Carbon emissions, carbon sequestration, crop yield, and land-use change. *Biogeochemistry*, 2003, 63 (1): 73–83.
- [4] WRI, November 2010. Product Accounting&Reporting Standard. Draft for Stakeholder Review. World Resources Institute and World Business Council for Sustainable Development.
- [5] 王兴, 赵鑫, 王钰乔, 等. 中国水稻生产的碳足迹分析. *资源科学*, 2017, 39 (4): 713–722.
- [6] AnjaliDubey, RattanLal. Carbon Footprint and Sustainability of Agricultural Production Systems in Punjab, India, and Ohio, USA. *Journal of Crop Improvement*, 2009, 23 (4): 332–350.
- [7] 米松华, 黄祖辉, 朱奇彪, 等. 农户低碳减排技术采纳行为研究. *浙江农业学报*, 2014, 26 (3): 797–804.
- [8] 费震江, 董华林, 武晓智, 等. 湖北省水稻生产发展策略及科技需求分析. *湖北农业科学*, 2010, 49 (12): 3224–3226.
- [9] 申建波, 张福锁. 水稻养分资源管理理论与实践. 北京: 中国农业出版社, 2006: 2–5.
- [10] 王红, 张瑞芳, 周大迈. 氮肥引起的面源污染问题研究进展. *北方园艺*, 2011, 5: 201–203.

- [11] 唐浩, 邱卫国, 周翻, 等. 稻麦轮作条件下氮素流失特性及控制对策研究. 人民黄河, 2010, 32 (6): 64–66.
- [12] 刘夏璐, 王洪涛, 陈建, 等. 中国生命周期参考数据库的建立方法与基础模型. 环境科学学报, 2010, 30 (10): 2136–2144.
- [13] Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). Climate Change2006: Synthesis Report. Cambridge: Cambridge University Press, 2006.
- [14] 曹黎明, 李茂柏, 王新其, 等. 基于生命周期评价的上海市水稻生产的碳足迹. 生态学报, 2014, 34 (2): 491–499.
- [15] 薛建福. 耕作措施对南方双季稻田碳、氮效应的影响. 北京: 中国农业大学, 2015.
- [16] 肖玉. 中国稻田生态系统服务功能及其经济价值研究. 北京: 中国科学院地理科学与资源研究所, 2005.
- [17] 王钰乔, 赵鑫, 王兴, 等. 基于碳足迹角度的中国小麦生产可持续性评价. 中国农业大学学报, 2018 (2)
- [18] 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. 中国人口资源与环境, 2011, 21 (9): 93–98.
- [19] 卢小宏. 不同农作措施下冬小麦—夏玉米碳足迹及优化潜力评价. 北京: 中国农业大学, 2013.
- [20] 王占彪, 陈静, 张立峰, 等. 河北省棉花生产碳足迹分析. 棉花学报, 2016, 28 (6): 594–601.
- [21] Kitzes J, Wackernage M, Loh J, et al. Shrink and share: humanity's present and future ecological footprint. Philosophical Transactions of the Royal Society B, 2008, 363, 467–475.
- [22] 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. European Journal of Agronomy, 2012, 43, 175–184.
- [23] Breiling M, Hoshino T, Matsuhashi R. Contributions of Rice Production to Japanese Greenhouse Gas Emissions applying Life Cycle Assessment as a Methodology. Laboratory for land Resource Sciences, Department of Biological and Environmental Engineering, Graduate School for Agriculture and Life Sciences, The University of Tokyo, Tokyo, 1999, 32.
- [24] Yan M, Cheng K, Luo T, et al. Carbon footprint of grain crop production in China: Based on farm survey data. Journal of Cleaner Production, 2015, 104: 130–138.
- [25] 杨帆, 孟远夺, 姜义, 等. 2013年我国种植业化肥施用状况分析. 植物营养与肥料学报, 2015, 21 (1): 217–225.
- [26] 曹黎明, 李茂柏, 王新其, 等. 基于生命周期评价的上海市水稻生产的碳足迹. 生态学报, 2014, 34 (2): 491–499.
- [27] 曹凑贵, 李成芳, 展茗, 等. 稻田管理措施对土壤碳排放的影响. 中国农业科学, 2011, 44 (1): 93–98.
- [28] 李晶, 王明星, 陈德章. 水稻田甲烷的减排方法研究及评价. 大气科学, 1998, 22 (3): 99–107.
- [29] 展茗, 曹凑贵, 汪金平, 等. 稻鸭共作对甲烷排放的影响. 应用生态学报, 2008, 19 (12): 2666–2672.
- [30] Feng S, Tan S, Zhang A, et al. Effect of household land management on cropland topsoil organic carbon storage at plot scale in a red earth soil area of South China. Journal of Agricultural Science, 2011, 149, 557–566.
- [31] Sefeedpari P, Ghahderijani M, Pishgar-Komleh S H. Assessment the effect of wheat farm sizes on energy consumption and CO₂ emission. Journal of Renewable and Sustainable Energy, 2013, 5, 023131.
- [32] 黄祖辉, 王朋. 农村土地流转: 现状、问题及对策——兼论土地流转对现代农业发展的影响. 浙江大学学报(人文社会科学版), 2008, 38 (2): 38–47.
- [33] 刘冀浩, 徐文修, 李增嘉, 等. 农田生态系统碳足迹法: 误区、改进与应用——兼析中国集约农作碳效率. 中国农业资源与区划, 2013, 35 (6): 1–11.
- [34] Hillier J, Hawes C, Squire G, et al. The carbon footprint of food crop production. International Journal of Life Cycle Assessment, 2009 (7): 107–118.

STUDY ON CARBON FOOTPRINT FOR RICE-WHEAT ROTATION SYSTEM IN THE LOWER REACHES OF YANGTZE RIVER^{*} —BASED ON THE LIFE CYCLE ASSESSMENT

Chen Zhongdu, Li Fengbo, Feng Jinfei, Zhou Xiyue, Xu Chunchun, Ji Long, Fang Fuping^{}**

(China National Rice Research Institute, Hangzhou, Zhejiang 311300, China)

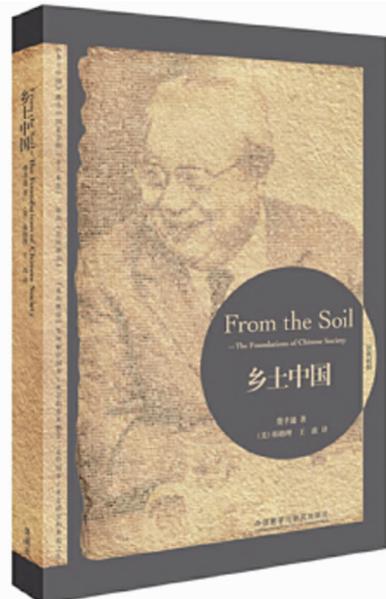
Abstract Rice-wheat rotation system is a major cropping system in the lower reaches of Yangtze River in China, and it is of great significance to analyze the carbon footprint of rice-wheat cropping pattern for developing low-carbon agriculture in this region. Based on farmer's production survey data from Yangtze River, the carbon footprint of rice-wheat cropping pattern in the lower reaches of Yangtze River was estimated using a life-cycle assessment method in the agricultural sector. The proportion of different agricultural inputs in the carbon footprint of rice-wheat cropping pattern production was explored. In addition, the influence factors of carbon footprint were analyzed. The results showed the carbon footprint per unit yield, carbon footprint per unit biomass and carbon footprint per unit production value for rice-wheat cropping pattern in the lower reaches of Yangtze River were 0.50 kgCO² – eq/kg,

0.22 kgCO² - eq/kg and 0.22 kgCO² - eq/CNY, respectively. The main components of the carbon footprint were CH₄ (65%), N₂O (53%), Diesel consumption (11 ~ 22%) and fertilizer (15 ~ 20%) for the rice-wheat cropping pattern. Moreover, the amount of nitrogenous fertilizer and diesel consumption was positively correlated with the carbon footprint and the scale of planting was negatively correlated with the carbon footprint, and a decrease in the product carbon footprint both of rice and wheat was found in large sized farms by 7.4% and 20.9% compared to smaller ones, respectively. This study demonstrated that carbon footprint of crop production could be affected by farm size and climate condition as well as crop management practices. Improving crop management practices that limit water and fertilizer consumption, as well as developing conservation tillage technology and large scaled farms could help to mitigate greenhouse gas emissions from rice-wheat rotation system of the lower reaches of Yangtze River of China.

Keywords carbon footprint; rice-wheat rotation cropping; global warming; life cycle assessment; the lower reaches of Yangtze River

· 书评 ·

英语在跨文化交际中的应用 ——评费孝通《乡土中国（英汉对照）》



早在 20 世纪 30 年代，在中华民族置于深重的危机时，中华民族的精英就开始向世界寻求古老中国走向现代、走向世界的灵丹妙药，在当时涌现出一大批用英文写就的经典著述，幽默风趣的笔调与睿智流畅的语言将中国的道德精神、生活情趣及社会的方方面面娓娓道来，在世界引起巨大反响，如林语堂的《My Country and My People》(1935)。20 世纪 40 年代后期，费孝通先生应《世纪评论》之约，根据其在西南联大与云南大学所讲“乡村社会学”一课的内容写成分期连载的文章，并以

《乡土中国》之名结集出版，全书共 14 篇文章，第一篇是背景；二三篇主要介绍文字在乡土中的不适应性；四至七篇主要介绍差序格局对于私人道德、家族甚至男女关系的影响；八至十一篇主要介绍乡土中的政治运作；最后三篇介绍乡村变迁。《乡土中国（英汉对照）》一书由外语教学与研究出版社于 2012 年 7 月出版，费孝通著，韩格理、王政译。费孝通先生是著名社会学家、人类学家、民族学家、社会活动家；两位译者均是社会学家，韩格理教授现任教于美国西雅图华盛顿大学。该书对中国社会的一系列制度进行深刻剖析，至今被学界公认为研究中国乡土社会传统文化与社会结构理论的代表作。

跨文化交际指的是不同文化间的交流，成功的跨文化交际是双向且平等的。不但包括不同文化的输入，而且还包括本土文化的输出。在跨文化交际的过程中，既要掌握另一种文化，同时还要熟悉本土文化，两者缺一不可。《乡土中国（英汉对照）》以中英双语思维架构与写作形式予读者以启迪，成为和平发展新时代背景下一条向“世界说明中国”的纽带。著名语言学家萨皮尔在《语言论》中明确指出：语言很大程度上决定了我们的日常生活风格、个人信仰等，可见语言是文化之载体，而文化有深植于语言中，通过语言可以传达一个民族或区域的文化，而英语作为一种交际工具也不例外。

(下转第 146 页)