

附录 A 水稻生产温室气体排放量和土壤固碳量估算

根据本文设定的系统边界。温室气体排放 (CE) 由以下部分组成: 农资产品在工厂生产产生的二氧化碳 (CO₂) (CE_{ij,CO_2}), 包括化肥 ($CE_{ij,sn}$)、种子 ($CE_{ij,sd}$)、农膜 ($CE_{ij,fm}$)、农药 ($CE_{ij,ds}$)、农机操作使用的柴油 ($CE_{ij,ps}$)、灌溉用电 ($CE_{ij,pi}$)。水稻的甲烷 (CH₄) 排放主要是通过甲烷细菌的活动产生的, 受水分管理、施肥和秸秆还田的影响 (CE_{ij,CH_4})。土壤中氧化亚氮 (N₂O) 的排放包括两个部分 (CE_{ij,N_2O}): 氮肥、粪肥和秸秆施入土壤中氮挥发直接产生 (N_2O_{direct}), 以及土壤中的氮淋溶和氮径流间接产生 ($N_2O_{indirect}$)。土壤固碳效应 (CS) 是指通过施用有机肥 ($CS_{ij,st}$) 和秸秆还田 ($CS_{ij,ma}$) 增加的土壤有机碳 (SOC)。另外, 在双季稻种植的地区, 每一季水稻产生的温室气体排放量和土壤固碳量进行独立估算, 再进行加总。

(一) 农资产品工厂生产产生的 CO₂

$$CE_{ij,sn} = TN_{ij} \times EF_n + TP_{ij} \times EF_p + TK_{ij} \times EF_k + TC_{ij} \times EF_c \quad (1)$$

$$CE_{ij,sd} = TSD_{ij} \times EF_{sd} \quad (2)$$

$$CE_{ij,fm} = TSM_{ij} \times EF_{fm} \quad (3)$$

式 (1) — (3) 中, $CE_{ij,sn}$, $CE_{ij,sd}$, $CE_{ij,fm}$ 分别表示 i 省份第 j 年每公顷使用的化肥、种子和农膜在工厂生产环节所产生的二氧化碳排放量 (kg CO₂-eq·hm⁻²); TN_{ij} , TP_{ij} , TK_{ij} , TC_{ij} 分别表示氮/磷/钾/复合肥施用量 (kg·hm⁻²); TSD_{ij} 和 TSM_{ij} 分别表示种子和农膜的施用量 (kg·hm⁻²)。以上所有农资品施用量数据直接来源于《全国农产品成本收益汇编》(2007—2024)。 EF_n , EF_p , EF_k , EF_c , EF_{sd} , EF_{fm} 表示不同投入品的 CO₂ 排放因子, 具体数值和来源见下表 A.1。

农机操作使用的柴油用量、农药用量和灌溉用电量无法直接获取。参考 CHEN et al. (2021) 的研究, 可以根据经济成本与施用量之间的对应关系进行折算, 具体公式如下:

$$CE_k = \frac{AM_k^{total}}{\sum_{m=1}^{16} \left(\frac{EC_k^m}{EC_k^{rice}} \times A_m \right)} \times \frac{EC_k^m}{EC_k^{rice}} \times EF_k \quad (4)$$

式 (4) 中, CE_k 表示不同投入品 k 的温室气体排放量 (kg CO₂-eq·hm⁻²), k 包括柴油用量 (kg·hm⁻²)、农药用量 (kg·hm⁻²) 和灌溉用电量 (kWh·hm⁻²)。 m 表示中国主要的农作物类型, 水稻、小麦、玉米、蔬菜等共 16 种; EC 表示作物生产过程中的经济成本 (yuan/hm²), 数据来源《全国农产品成本收益汇编》(2007—2024); AM_k^{total} 表示所有作物投入品 k 的使用总量 (kg·hm⁻²), 柴油和农药总用量来源《中国农村统计年鉴》(2007—2024), 排灌用电总量来源《中国电力年鉴》(2007—2024); EF_k 表示投入品 k 的二氧化碳排放因子, 具体数值和来源见下表 A.1。

(二) 稻田 CH₄ 排放

稻田 CH₄ 估算公式参考 IPCC (2019 年), 具体公式如下:

$$CE_{ij,CH_4} = EF_i \times t \quad (5)$$

式 (5) 中, t 表示水稻从播种到收获的总天数 (d), 不同水稻周期取值见下表 A.1; EF_i 表示每公顷稻田单日 CH₄ 排放系数 (kg CH₄·hm⁻²·d⁻¹), 计算公式如下:

$$EF_i = EF_c \cdot SF_w \cdot SF_p \cdot SF_o \quad (6)$$

式(6)中, EF_c 表示持续淹水且无有机物添加条件下的基线排放因子, 取值 $1.32 \text{ kg CH}_4 \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$; SF_w 表示不同灌溉方式使用后的影响因子, 包括持续淹水(F)、季中排水(F-D-F)和间歇灌溉(F-D-F-M)3种, 不同地区取值参考王兴等(2017); SF_p 表示单季稻和双季稻两种种植制度的影响因子, 取值和来源见下表 A.1; SF_o 表示秸秆和有机肥施用等有机质添加带来的影响, 计算公式如下:

$$SF_o = (1 + \sum_g ROA_g \times CFOA_g)^{0.59} \quad (7)$$

式(7)中, ROA_g 表示有机物 g 的干物质重量($\text{t} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{dm}$), g 表示秸秆(ROA_{st})和有机肥(ROA_{ma}); $CFOA_g$ 表示有机质转化因子, 取值和来源见下表 A.1。秸秆还田和有机肥施用量无法直接获取, 通过如下方法估算:

$$ROA_{ij,st} = Yield_{ij}(T) \times RAG \times RSR_{ij} \quad (8)$$

$$Yield_{ij}(T) = Yield_{ij} \times DRY \quad (9)$$

式(8) — (9)为秸秆还田量估算方法。 $Yield$ 表示水稻产量($\text{t} \cdot \text{hm}^{-2}$); DRY 和 RAG 分别为收获产量的干物质分数和地上残茬物质与收获产量的比值, 取值和来源见表 A.1; RSR_{ij} 表示秸秆还田部分占地上残茬总量的比例, 参考LIU等(2018)研究估算。

关于有机肥施用量估算, 本研究首先根据ZHANG等(2011)的研究, 以2005年各地区有机肥施用量作为基期, 假设有机肥的施用量随着经济成本的年度变化而同比例变化, 获得2006—2023年各地区有机肥施用量。另外, 为了得到每年有机肥经济成本的实际价格, 用CPI指数(《中国物价年鉴》)对其名义价格进行修正。

(三) 土壤 N_2O 排放

土壤 N_2O 估算参考IPCC(2019b), 具体公式如下:

$$CE_{ij,N_2O} = (N_2O_{direct} + N_2O_{indirect})_{ij} \times 44/28 \quad (10)$$

$$N_2O_{direct} = (F_{sn} + F_{ma} + F_{st}) \times EF_1 \quad (11)$$

$$N_2O_{indirect} = (F_{sn} \times \text{Frac}_{GASF} + F_{ma} \times \text{Frac}_{GASM}) \times EF_2 + (F_{sn} + F_{ma} + F_{st}) \times \text{Frac}_{leach} \times EF_3 \quad (12)$$

$$F_{st} = (ROA_{st} + BGR) \times N_{st} \quad (13)$$

$$BGR = (Yield(T) + ROA_{st}) \times RS \quad (14)$$

$$F_{ma} = ROA_{ma} \times N_{ma} \quad (15)$$

式(10) — (15)中, N_2O_{direct} 为 N_2O 直接排放量, $N_2O_{indirect}$ 表示氮挥发、淋溶和径流的大气沉降间接 N_2O 排放($\text{kg N}_2\text{O-N ha}^{-1}$); 44/28是氮元素向 N_2O 的转化分数; F_{sn} 、 F_{ma} 、 F_{st} 分别表示氮肥、有机肥、秸秆的氮施入量; EF_1 表示氮素施入后稻田 N_2O 排放因子; EF_2 表示氮元素在土壤和水面的大气沉降所产生的 N_2O 排放因子; EF_3 表示氮淋溶和径流中 N_2O 排放的排放因子; Frac_{GASF} 和 Frac_{GASM} 表示氮肥和有机肥中氮元素以 NO_x 形式挥发的部分; Frac_{leach} 是指氮肥、秸秆和有机肥中氮元素施入土壤后通过淋溶和径流而损失的部分; BGR 为水稻地下残茬的总干物质质量(kg); RS 为地下根系生物量与地上部生物量之比; N_{st} 和 N_{ma} 为秸秆和有机肥的含氮量。相关影响因子及来源见表 A.1。

(四) 土壤固碳量

$$CS_{ij,ma} = ROA_{ij,ma} \times C_{ma} \times 19.1\% \quad (16)$$

$$CS_{ij,st} = ROA_{ij,st} \times C_{st} \times 7.7\% \quad (17)$$

式 (16) — (17) 中, C_{ma} 和 C_{st} 表示有机肥和秸秆的含碳量; 19.1% 和 7.7% 分别表示每单位有机肥和秸秆 C 施入土壤后的有机碳固存率, 由 SAUNOIS 等 (2016) 和 ZHOU 等 (2016) 研究确定。

附表 A.1 主要指标的排放因子及来源

指标名称	简写	排放因子	参考文献
氮肥	EF_n	7.76 kg CO ₂ -eq·kg ⁻¹	(陈舜 等, 2015)
磷肥	EF_p	2.33 kg CO ₂ -eq·kg ⁻¹	(陈舜 等, 2015)
钾肥	EF_k	0.66 kg CO ₂ -eq·kg ⁻¹	(陈舜 等, 2015)
复合肥	EF_c	2.47 kg CO ₂ -eq·kg ⁻¹	(XU 等, 2016)
种子	EF_{sd}	1.68 kg CO ₂ -eq·kg ⁻¹	(LI 等, 2024)
农膜	EF_{fm}	18.9 kg CO ₂ -eq·kg ⁻¹	(LI 等, 2024)
农药	EF_{ps}	7.88 kg CO ₂ -eq·kg ⁻¹	(陈舜 等, 2016)
柴油	EF_{ds}	3.21 kg CO ₂ -eq·kg ⁻¹	(XU 等, 2016)
水稻生长周期	t	双季早稻	77 days
		双季晚稻	110 days
		单季稻	130 days
CH ₄ 基线排放因子	EF_c	1.32 kg CH ₄ ·hm ⁻² ·d ⁻¹	(IPCC, 2019a)
水稻灌溉方式	SF_w	东北地区	0.52
		华北地区	0.52
		华中地区	1
		华南地区	1
		西南地区	0.6
		西北地区	0.52
		双季晚稻	2.13
水稻种植制度	SF_p	双季早稻	1
		单季稻	华中、华南地区取 0.89; 其他地区取 0.59
秸秆转化因子	$CFOA_{st}$	双季稻	1
		单季稻	0.21

有机肥转化因子	$CFOA_{ma}$	0.21		(IPCC, 2019)
水稻收获产量的干物质分数	DRY	0.89		(IPCC, 2019)
水稻地上残茬干物质质量与收获物干物质质量之比	RAG	1.4		(IPCC, 2019)
氮元素输入稻田后, N_2O 直接排放系数	EF_1	0.004		(IPCC, 2019)
氮元素在土壤和水面的大气沉降所产生的 N_2O 排放因子	EF_2	0.01		(IPCC, 2019)
氮淋溶和径流中 N_2O 排放因子	EF_3	0.011		(IPCC, 2019)
氮肥施入土壤后以 NO_x 形式挥发的部分	$Frac_{GASF}$	0.11		(IPCC, 2019)
有机肥施入土壤后以 NO_x 形式挥发的部分	$Frac_{GASM}$	0.21		(IPCC, 2019)
氮肥、秸秆和有机肥中氮元素施入土壤后通过淋溶和径流而损失的部分	$Frac_{leach}$	0.24		(IPCC, 2019)
秸秆氮含量	N_{st}	0.007 kg N·kg ⁻¹		(IPCC, 2019)
有机肥氮含量	N_{ma}	0.032 kg N·kg ⁻¹		(IPCC, 2019)
水稻地下根系生物量与地上部生物量之比	RS	0.16		(IPCC, 2019)
秸秆碳含量	C_{st}	0.42 kg C·kg ⁻¹		(IPCC, 2019)
有机肥碳含量	C_{ma}	0.41 kg C·kg ⁻¹		(IPCC, 2019)
灌溉耗电	$EF_{electricity}$	0.97 kg CO ₂ -eq/3.6MJ	中国西北	(王兴 等, 2017)
		1.23 kg CO ₂ -eq/3.6MJ	中国北方	
		0.82 kg CO ₂ -eq/3.6MJ	中国南方	

附表 A.2 2006—2023 年 23 个省（市、区）年均每公顷稻田温室气体排放量（kg CO₂-eq·hm⁻²·a⁻¹）

省（市、 区）	年份						
	2006	2009	2012	2015	2018	2021	2023
单季稻							
河北	8093	9211	7482	7702	7496	6438	6426
内蒙古	6566	6645	7281	6093	7002	6033	6163
辽宁	6927	6769	6430	5968	6058	6022	6022
吉林	5826	6184	5942	5604	5489	5314	5302
黑龙江	5400	5191	5344	5345	5441	5322	5594
江苏	7859	7727	7490	7620	7414	7440	7338
浙江	7676	6936	6845	6992	6767	6361	6297
安徽	6016	6252	5962	6149	5919	5837	5720
福建	4871	4979	4913	5046	4967	4672	4667
山东	7921	6511	6402	6352	5827	6748	6691
河南	6871	7302	6661	6871	6425	6300	6385
湖北	5987	5922	5914	5786	5735	5703	5614
湖南	5563	5420	5289	5539	5414	5384	5237
重庆	3952	3989	4128	4207	3932	3816	3869
四川	4117	4400	4402	4361	4306	4143	4120
贵州	4202	3791	4126	4397	4283	4030	4080
云南	4996	5583	5578	5610	5408	5213	4933
陕西	4800	4595	4780	4861	6194	5072	5148
宁夏	7724	7347	6990	6652	6356	6595	7359
双季稻							
浙江	15354	14859	14440	14269	15054	14876	14789
安徽	13944	14804	14301	15651	14998	14891	14477

福建	13345	12851	13307	13515	13172	13134	12835
江西	12851	13213	13945	14138	14441	14212	14076
湖北	13464	13109	13220	13404	14094	13826	13809
湖南	13407	13216	12959	12765	12518	12080	11938
广东	14013	13922	13938	14062	13961	13425	13209
广西	13863	14074	14508	14088	13821	13637	13273
海南	12305	12892	12955	13162	13664	13509	12834

附表 A.3 2006—2023 年 23 个省（市、区）年均每公顷稻田土壤固碳量（ $\text{kg CO}_2\text{-eq}\cdot\text{hm}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$ ）

省（市、 区）	年份						
	2006	2009	2012	2015	2018	2021	2023
单季稻							
河北	628	762	766	1178	1034	1103	1048
内蒙古	261	198	481	469	504	367	387
辽宁	272	256	302	273	294	309	390
吉林	493	555	595	520	591	680	740
黑龙江	547	422	580	853	516	571	566
江苏	373	501	691	1020	1336	1422	1362
浙江	547	460	604	559	819	830	918
安徽	316	316	435	1137	1015	1158	1083
福建	243	266	274	344	365	358	357
山东	878	1027	1208	1687	1344	1412	1426
河南	274	514	783	802	805	824	922
湖北	163	413	422	804	1208	1308	1318

湖南	243	364	200	170	279	277	294
重庆	161	176	188	174	151	232	330
四川	169	200	238	250	335	340	351
贵州	201	168	140	101	79	64	92
云南	126	154	151	159	144	131	144
陕西	332	302	416	527	523	546	572
宁夏	263	342	273	287	353	361	358
双季稻							
浙江	949	893	811	765	1272	1196	1386
安徽	443	577	610	1852	2001	1815	1493
福建	479	510	521	688	691	676	784
江西	782	709	1452	1688	2385	2353	2145
湖北	447	381	612	989	1885	2001	2086
湖南	555	503	317	307	467	429	475
广东	651	613	560	647	675	646	671
广西	407	459	601	684	816	1116	1192
海南	444	685	571	584	740	905	809

附表 A.4 其他相关研究结果

类型	研究周期	指标(t CO ₂ -eq·hm ⁻² ·a ⁻¹)	研究结果	参考文献
本研究结果				
全国平均	2006-2023	净温室气体排放 ¹	5.68	——
单季稻	2006-2023	净温室气体排放	5.20	——
双季稻	2006-2023	净温室气体排放	12.86	——
其他研究结果				
全国平均	2001-2018	净温室气体排放	9.50	(CHEN 等, 2021)
双季稻	2007-2018	净温室气体排放	19.22	(LI 等, 2024)
单季稻	2007-2018	净温室气体排放	9.30	
全国平均	2005-2015	温室气体排放	12.23	(LIU 等, 2018)
全国平均	2004-2014	温室气体排放	5.80	(王兴 等, 2017)
全国平均	2004-2013	温室气体排放	7.29	(XU 等, 2017)
双季稻	2004-2012	温室气体排放	10.78	(XUE 等, 2016)

¹为了更好的对比相关研究结果，用净温室气体排放和温室气体排放两个指标来表示。其中净温室气体排放=温室气体排放-碳固存。

附录 B 马尔可夫链结果

附表 B.1 双季稻 GTFP 增长的传统和空间马尔可夫链转移概率

传统	类型	低水平	中低水平	中高水平	高水平	频数
	低水平	0.6098	0.3171	0.0488	0.0244	41
	中低水平	0.1538	0.4359	0.3590	0.0513	39
	中高水平	0.0750	0.1500	0.5250	0.2500	40
	高水平	0.0303	0.0303	0.1212	0.8182	33
空间滞后						
低水平	低水平	0.8919	0.0541	0.0270	0.0270	37
	中低水平	0.1364	0.5909	0.2727	0.0000	22
	中高水平	0.0000	0.6667	0.3333	0.0000	3
	高水平	0.0000	0.0000	0.0000	1.0000	1
中低水平	低水平	0.7273	0.2727	0.0000	0.0000	22
	中低水平	0.1667	0.7083	0.1250	0.0000	24
	中高水平	0.0370	0.1481	0.7407	0.0741	27
	高水平	0.0000	0.0000	0.4000	0.6000	5
中高水平	低水平	0.7083	0.2917	0.0000	0.0000	24
	中低水平	0.1515	0.5152	0.3333	0.0000	33
	中高水平	0.0233	0.0698	0.6977	0.2093	43
	高水平	0.0000	0.0000	0.1765	0.8235	17
高水平	低水平	0.0000	1.0000	0.0000	0.0000	1
	中低水平	0.0000	0.6667	0.3333	0.0000	3
	中高水平	0.0000	0.2222	0.3333	0.4444	9
	高水平	0.0000	0.0000	0.0192	0.9808	52

参考文献

- CHEN X H, MA C, ZHOU H, LIU Y, HUANG X, WANG M, CAI Y, SU D, MUNEEER M A, GUO M, CHEN Xuanji, ZHOU Y, HOU Y, CONG W, GUO J, MA W, ZHANG W, CUI Z, WU L, ZHOU S, ZHANG F. Identifying the main crops and key factors determining the carbon footprint of crop production in China, 2001–2018. *Resources, Conservation and Recycling*, 2021,172: 105661. DOI: 10.1016/j.resconrec.2021.105661.
- IPCC, 2019. 2019 Refinement to the 2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories. United Kingdom and New York: Cambridge University Press.
- IPCC, 2019a. 2019 Refinement to the 2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories: Volume 4, Chapter 5. United Kingdom and New York: Cambridge University Press.
- LI S, LU H, LI X, SHAO Y, TANG Y, CHEN G, CHEN Z, ZHU Z, ZHU J, TANG L, LIANG J, 2024. Toward Low-Carbon Rice Production in China: Historical Changes, Driving Factors, and Mitigation Potential. *Environmental Science & Technology*, 58(13): 5772-5783. DOI: 10.1021/acs.est.4c00539.
- LIANG D, LU X, ZHUANG M, SHI G, HU C, WANG S, HAO J, 2023. Author Correction: China's greenhouse gas emissions for cropping systems from 1978–2016. *Scientific Data*, 10(1): 122. DOI: 10.1038/s41597-023-02027-z.
- LIU W, ZHANG G, WANG X, LU F, OUYANG Z, 2018. Carbon footprint of main crop production in China: Magnitude, spatial-temporal pattern and attribution. *Science of The Total Environment*, 645: 1296-1308. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2018.07.104.
- SAUNOIS M, JACKSON R B, BOUSQUET P, POULTER B, CANADELL J G. The growing role of methane in anthropogenic climate change. *Environmental Research Letters*, 2016, 11(12): 120207. DOI: 10.1088/1748-9326/11/12/120207.
- XU X, LAN Y. A comparative study on carbon footprints between plant- and animal-based foods in China. *Journal of Cleaner Production*, 2016, 112: 2581-2592. DOI: 10.1016/j.jclepro.2015.10.059.

XU X, LAN Y. Spatial and temporal patterns of carbon footprints of grain crops in China. *Journal of Cleaner Production*, 2017, 146: 218-227. DOI: 10.1016/j.jclepro.2016.11.181.

XUE J F, PU C, LIU S L, ZHAO X, ZHANG R, CHEN F, XIAO X P, ZHANG H L. Carbon and nitrogen footprint of double rice production in Southern China. *Ecological Indicators*, 2016, 64: 249-257. DOI: 10.1016/j.ecolind.2016.01.001.

ZHANG W, YU Y, HUANG Y, LI T, WANG P. Modeling methane emissions from irrigated rice cultivation in China from 1960 to 2050. *Global Change Biology*, 2011, 17(12): 3511-3523. DOI: 10.1111/j.1365-2486.2011.02495.x.

ZHOU P, SHENG H, LI Y, TONG C, GE T, WU J. Lower C sequestration and N use efficiency by straw incorporation than manure amendment on paddy soils. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, , 2016, 219: 93-100. DOI: 10.1016/j.agee.2015.12.012.

王兴, 赵鑫, 王钰乔, 薛建福, 张海林. 中国水稻生产的碳足迹分析. *资源科学*, 2027, 39(4): 713-722.

陈舜, 逯非, 王效科. 中国氮磷钾肥制造温室气体排放系数的估算. *生态学报*, 2015, 35(19): 6371-6383.

陈舜, 逯非, 王效科. 中国主要农作物种植农药施用温室气体排放估算. *生态学报*, 2016, 36(9): 2560-2569.