

## 附 录\*

### 一、农业碳排放计算公式和各类碳源碳排放系数

农业碳排放来源主要包括农业生产、畜禽养殖、稻田、秸秆燃烧以及农用能源所产生的 CO<sub>2</sub>、CH<sub>4</sub>、N<sub>2</sub>O，将其统一折算成 CO<sub>2</sub> 标准量并加总得到农业碳排放总量，表示如下：

$$E_{total} = E_1 + E_2 + E_3 + E_4 + E_5 \quad (1)$$

(1) 式中： $E_{total}$ 、 $E_1$ 、 $E_2$ 、 $E_3$ 、 $E_4$  和  $E_5$  分别表示农业碳排放总量、农业生产、畜禽养殖、稻田、秸秆燃烧和农用能源所产生碳排放量。

第一个碳源是农业生产，包括化肥、农药、农膜、柴油使用、农业耕种和农业灌溉，本文参考 IPCC (2006) 指南<sup>①</sup>、Dubey et al. (2009) 和李波等 (2011) 方法，具体测算计算公式为：

$$E_1 = \sum E_i = \sum T_i \times \delta_i \quad (2)$$

(2) 式中： $E_1$  为种植业碳排放总量， $E_i$  为各类碳源碳排放量， $T_i$  为各类碳源量， $\delta_i$  为各类碳源排放系数。

第二个碳源是畜禽养殖，包括牛（分为奶牛和非奶牛）、马、驴、骡、骆驼、猪、羊（分为山羊和绵羊）以及家禽，畜牧业碳排放计算公式为：

$$E_2 = \sum GWP_{CH_4} \times D_i \times \delta_{1i} + \sum GWP_{CH_4} \times D_i \times \delta_{2i} + \sum GWP_{N_2O} \times D_i \times \delta_{3i} \quad (3)$$

(3) 式中： $E_2$  为畜牧业碳排放总量， $GWP_{CH_4}$  和  $GWP_{N_2O}$  分别为 CH<sub>4</sub> 温室效益指数和 N<sub>2</sub>O 温室效益指数， $D_i$  为牲畜年平均饲养量， $\delta_{1i}$ 、 $\delta_{2i}$ 、 $\delta_{3i}$  分别为牲畜肠胃发酵产生 CH<sub>4</sub>、粪便发酵产生 CH<sub>4</sub> 和 N<sub>2</sub>O 的排放系数。农业碳排放碳源与排放系数见附表 1。

\*附录由作者提供，文责自负。

<sup>①</sup>资料来源：2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories, <https://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/public/2006gl/index.html>。

附表 1 种植业碳排放碳源、排放系数及参考来源

碳源排放	排放系数	单位	参考来源
化肥	0.8956	千克/千克	美国橡树岭国家实验室
农药	4.9341	千克/千克	美国橡树岭国家实验室
农用薄膜	5.1800	千克/千克	南京农业大学农业资源与生态环境研究所
农用柴油	0.5927	千克/千克	IPCC (2006)
播种面积	3.1260	千克/公顷	中国农业大学生物与技术学院

资料来源：作者根据政府间气候变化专门委员会（IPCC）（2006）、胡向东和王济民（2010）、Dubey（2009）整理而得。

附表 2 畜禽养殖碳排放碳源、排放系数及参考来源

碳源排放	CH <sub>4</sub> 排放系数		N <sub>2</sub> O 排放系数	单位	参考来源
	肠胃发酵	粪便发酵			
猪	1.00	3.50	0.53	千克/（头·年）	CH <sub>4</sub> 排放系数来自 IPCC（2006） N <sub>2</sub> O 排放系数来自胡向东和王济民（2010） CH <sub>4</sub> 温室效益指数取 25，来自 IPCC（2006） N <sub>2</sub> O 温室效益指数取 298，来自 IPCC（2006）
兔	0.25	0.08	0.02	千克/（头·年）	
家禽	0.00	0.02	1.00	千克/（头·年）	
奶牛	68.00	16.00	1.37	千克/（头·年）	
非奶牛	51.40	1.50	1.39	千克/（头·年）	
马	18.00	1.64	1.39	千克/（头·年）	
驴	10.00	0.90	1.39	千克/（头·年）	
骡	10.00	0.90	0.33	千克/（头·年）	
山羊	5.00	0.17	0.33	千克/（头·年）	
绵羊	5.00	0.15	0.33	千克/（头·年）	
骆驼	46.00	1.92	1.39	千克/（头·年）	

资料来源：作者根据政府间气候变化专门委员会（IPCC）（2006）、胡向东和王济民（2010）、Dubey（2009）整理而得。

第三个碳源是稻田，包括早稻、一季晚稻、双季晚稻产生的 CH<sub>4</sub>。系数在空间上有差异，需要考虑省级差异，计算方法如下：

$$E_3 = \sum E_i = \sum q_i \times f_i \times 25 \quad (4)$$

（4）式中： $E_3$  为稻田碳排放总量， $E_i$  是各类碳源碳排放量， $q_i$  是水稻种植面积， $f_i$  是稻田甲烷系数，CH<sub>4</sub> 温室效益指数与前文保持一致取 25，分为早季稻、晚季稻和中季稻三类，如附表 2 所示。

附表3 水稻生长周期内CH<sub>4</sub>排放系数

省份	早稻	一季晚稻	双季晚稻	省份	早稻	一季晚稻	双季晚稻
北京	—	13.23	—	湖北	17.51	58.17	39.00
天津	—	11.34	—	湖南	14.71	56.28	34.10
河北	—	15.33	—	广东	15.05	57.02	51.60
山西	—	6.62	—	广西	12.41	47.78	49.10
内蒙古	—	8.93	—	海南	13.43	52.29	49.40
辽宁	—	9.24	—	重庆	6.55	25.73	18.50
吉林	—	5.57	—	四川	6.55	25.73	18.50
黑龙江	—	8.31	—	贵州	5.1	22.05	21.00
上海	12.41	53.87	27.5	云南	2.38	7.25	7.60
江苏	16.07	53.55	27.6	西藏	—	6.38	—
浙江	14.37	57.96	34.5	陕西	—	12.51	—
安徽	16.75	51.24	27.6	甘肃	—	6.83	—
福建	7.74	43.47	52.6	青海	—	—	—
江西	15.47	65.42	45.8	宁夏	—	7.00	—
山东	—	21.00	—	新疆	—	10.00	—
河南	—	17.85	—				

资料来源：作者根据闵继胜和胡浩（2012）整理而得。

注：一字线“—”代表“无法获得”该项。

第四个碳源是秸秆燃烧，在生物质燃烧导致碳排放方面，联合国粮食及农业组织对于农作物秸秆焚烧的作物品种主要包括玉米、小麦、水稻和甘蔗，本文考虑数据可获得性，选取玉米、小麦、水稻秸秆燃烧，主要排放物包括CO<sub>2</sub>和CH<sub>4</sub>，具体计算方法如下：

$$E_4 = \sum_{i=1}^I \sum_{k=1}^I E_{4, i, k} = \sum_{i=1}^I \sum_{k=1}^I (Y_{ik} \times s_k \times o_k \times l_k \times ef_k) \quad (5)$$

(5)式中： $E_4$ 为秸秆燃烧碳排放， $k$ 代表作物种类， $i$ 代表区域， $Y_{ik}$ 代表作物经济产量， $s_k$ 代表 $k$ 作物的草谷比(%)， $o_k$ 表示 $k$ 作物秸秆露天焚烧比例(%)， $l_k$ 表示作物 $k$ 的燃烧效率(%)， $ef_k$ 代表 $k$ 作物秸秆露天焚烧的排放因子(克/千克)。所有系数如附表4、附表5和附表6所示。

附表4 不同作物草谷比 单位：%

省份	水稻	小麦	玉米
北京、天津、河北、内蒙古、山西、山东、河南	93	134	173
黑龙江、吉林、辽宁	97	93	186
江苏、上海、浙江、江西、安徽、湖北、湖南	128	138	205
陕西、甘肃、宁夏、青海、新疆	68	123	152

附表4 (续)

四川、重庆、贵州、云南	100	97	129
福建、广东、广西、海南	106	127	132

资料来源:《国家发展改革委办公厅 农业部办公厅关于开展农作物秸秆综合利用规划终期评估的通知》, [https://www.ndrc.gov.cn/fggz/hjzy/zyzhlyhxhj/201512/t20151216\\_1314764.html](https://www.ndrc.gov.cn/fggz/hjzy/zyzhlyhxhj/201512/t20151216_1314764.html)。

附表5 主要作物焚烧秸秆的比例 单位: %

省份	水稻	小麦	玉米	省份	水稻	小麦	玉米	省份	水稻	小麦	玉米
北京	0.0	3.1	12.1	浙江	25.9	31.4	33.7	海南	34.8	0.0	31.1
天津	4.1	13.2	16	安徽	42.3	28.9	35.9	重庆	18.6	10.7	12.3
河北	5.8	9.9	15.8	福建	17.8	35.3	13.9	四川	25.6	16.2	28.8
山西	8.4	36	25.3	江西	26.8	23.8	17.2	贵州	3.4	4.6	4.3
内蒙古	2.2	3.7	10.8	山东	9.7	19.7	23.4	云南	36.8	33.2	23.1
辽宁	9.3	21.9	12.9	河南	19.7	34.8	19.3	陕西	6.2	13.4	22
吉林	18.1	12.7	13.5	湖北	19.1	27.8	21.6	甘肃	8.5	6.7	15.1
黑龙江	21.8	33.1	11.9	湖南	43.2	47.2	39.1	青海	0.0	8.1	6.5
上海	26.2	27.7	24.6	广东	40.4	42.1	37.7	宁夏	19.7	20.3	18.2
江苏	34.6	27.3	23.3	广西	28.6	39.8	31.9	新疆	6.3	3.9	11.5

资料来源:作者根据 Wu et.al. (2022) 整理而得。

附表6 作物露天焚烧秸秆的燃烧效率和碳排放系数

作物	水稻	小麦	玉米
燃烧效率 (%)	93	93	92
CH <sub>4</sub> 排放系数 (克/千克)	3.2	3.4	4.4
CO <sub>2</sub> 排放系数 (克/千克)	1460	1460	1350

资料来源:作者根据 Wu et.al (2022) 整理而得。

第五个碳源是农用能源消耗产生的碳排放,这一部分也是已有研究容易忽视的地方。本文根据现有文献,选取了农、林、牧、渔(水利)业终端消费量中的原煤、洗精煤、其他洗煤、型煤、焦炭、汽油、柴油、燃料油、液化石油气、天然气、煤油、热力、电力计算能源消费产生的CO<sub>2</sub>排放,未包含润滑油、焦炉、炼厂干气、石油焦及其他石油制品的原因主要是这农业对这几类能源的消费量非常少,故未纳入计算。计算公式如下:

$$E_5 = \sum E_i = \sum T_i \times SC_i \times NCV_i \times EF_i \times O_i = \sum T_i \times \sigma_i \quad (6)$$

(6) 式中:  $E_5$  为农用能源碳排放总量,  $E_i$  为各类燃料碳排放量,  $T_i$  为各类燃料消费量,  $SC_i$  为折标准煤系数, 为平均低位热值,  $EF_i$  为单位热值含碳量,  $O_i$  为碳氧化率,  $\sigma_i$  为各类碳源排放系数。

其中能源品类中  $NCV_i$  的电力和热力的碳排放量为能源消费量与碳排放系数的乘积<sup>①</sup>。农业生产中不同能源品种的平均低位热值、折标准煤系数、单位热值含碳量、碳氧化率与碳源排放系数如附表 7 所示。

附表 7 各类能源的 CO<sub>2</sub> 排放系数值

能源	平均低位 发热量	单位	折标准煤 系数	单位	单位热值含碳量 (吨碳/太焦耳)	碳氧 化率	排放系数 (千克二氧化碳/千克)
原煤	20934	千焦 (5000 千卡) / 千克	0.7143	千克标准煤/ 千克	26.37	0.94	1.9027
型煤	1746	千焦 (5000 千卡) / 千克	0.6072	千克标准煤/ 千克	33.60	0.90	0.1936
洗精煤	26377	千焦 (6300 千卡) / 千克	0.9000	千克标准煤/ 千克	25.41	0.93	2.2855
其他洗煤	1537	千焦 (6300 千卡) / 千克	0.5252	千克标准煤/ 千克	25.41	0.90	0.1289
焦炭	28470	千焦 (6800 千卡) / 千克	0.9714	千克标准煤/ 千克	29.50	0.93	2.8639
汽油	43124	千焦 (10300 千卡) / 千克	1.4714	千克标准煤/ 千克	18.90	0.98	2.9287
柴油	42705	千焦 (10200 千卡) / 千克	1.4571	千克标准煤/ 千克	20.20	0.98	3.0998
燃料油	41868	千焦 (10000 千卡) / 千克	1.4286	千克标准煤/ 千克	21.10	0.98	3.1744
液化石油气	50242	千焦 (12000 千卡) / 千克	1.7143	千克标准煤/ 千克	17.20	0.98	3.1052
天然气	38931	千焦 (7700~9310 千卡) /立方米	1.2000	千克标准煤/ 立方米	15.30	0.99	2.1622
煤油	43124	千焦 (10300 千卡) / 千克	1.4714	千克标准煤/ 千克	19.60	0.98	3.0372
热力 (当量)			0.0341	千克标准煤/ 百万焦耳			3.7440

资料来源：平均低位发热量和折标准煤系数来源于《综合能耗计算通则》（<http://c.gb688.cn/bzgk/gb/showGb?type=online&hcno=53D1440B68E6D50B8BA0CCAB619B6B3E>），单位热值含碳量和碳氧化率来源于《省级温室气体清单编制指南（试行）》（<http://www.cbcsd.org.cn/sjk/nengyuan/standard/home/20140113/download/shengjiwenshiqiti.pdf>）。

<sup>①</sup>各区域电网的排放因子数据来自环境保护部发布的 2001—2020 年历年中国区域电网二氧化碳基准线排放因子，资料来源：<https://www.mee.gov.cn/searchnew/?searchword=2019%E5%B9%B4%E5%BA%A6%E4%B8%AD%E5%9B%BD%E5%8C%BA%E5%9F%9F%E7%94%B5%E7%BD%91%E4%BA%8C%E6%B0%A7%E5%8C%96%E7%A2%B3%E5%9F%BA%E5%87%86%E7%BA%BF%E6%8E%92%E6%94%BE%E5%9B%A0%E5%AD%90>。

## 二、农业面源污染计算

对于农业面源污染的测算，现有文献常使用较为广泛的方法是单元调查评估法，该方法具有广泛的适用性，针对大面积污染的测算较为适宜。参考本文将农业面源污染源分为五类，分别是农田化肥、畜禽养殖、固体废弃物、农村生活和水产养殖，污染排放主要有化学需氧量（COD）、总氮（TN）、总磷（TP），计算方法如下：

$$EI = \sum_i EU_i \rho_i (1 - \eta_i) C_i (EU_i, S) = \sum_i PE_i (1 - \eta_i) C_i (EU_i, S) \quad (7)$$

(7)式中： $EI$ 代表农业面源污染总量； $EU_i$ 代表第*i*调查单元的污染基数； $\rho_i$ 指第单元的产污强度系数； $C_i$ 指*i*单元的污染排放系数，与不同调查单元的污染基数 $EU_i$ 与区域特征相关，意味着农业污染物排放受到区域资源管理和利用、区域环境、气候、水文等差异的影响。其中，农田化肥流失率参见赖斯芸（2004），产污系数和污染排放系数主要依据重点参考《第一次全国污染源普查：农业源系数手册》、梁流涛（2009）。具体产污清单如附表8。

附表8 农业面源污染产污清单列表

污染源	调查单元	调查指标	单位	排放清单
农用化肥	氮肥、磷肥、复合肥	折纯施用量	万吨	TN、TP
畜禽养殖	牛、羊	年末存栏数	万头	COD、TN、TP
	猪、家禽	年末出栏数	万头/只	
固体废弃物	稻谷、小麦、玉米、豆类、薯类、油料、蔬菜、花生、油菜籽	产量	万吨	COD、TN、TP
农村生活	乡村人口	乡村人口数	万人	COD、TN、TP
水产养殖	内陆养殖	内陆养殖面积	公顷	COD、TN、TP

资料来源：作者根据杜江等（2016）、郭海红和刘新民（2020）整理而得。

附表9 指标测量方式及数据来源

指标	数据来源
土地投入	《中国农村统计年鉴》（2001—2021年，历年）、《中国统计年鉴》（2001—2021年，历年）
劳动力投入	《中国统计年鉴》（2001—2021年，历年）
资本投入	《中国固定资产投资统计年鉴》（2001—2017年，历年）、《中国统计年鉴2013》、《中国统计年鉴》（2018—2021年，历年）
机械投入	《中国农村统计年鉴》（2001—2021年，历年）
水资源投入	《中国统计年鉴》（2001—2021年，历年）
经济产出	《中国农村统计年鉴》（2001—2021年，历年）
环境产出	《中国林业统计年鉴》（2001—2019年，历年）、《中国环境统计年鉴》（2010—2021年，历年）
碳排放	《中国农业年鉴》（2001—2021年，历年）、《中国能源统计年鉴》（2001—2021年，历年）、《中国畜牧兽医年鉴》（2001—2021年，历年）、《中国农村统计年鉴》（2001—2021年，历年）
面源污染	《中国农村统计年鉴》（2001—2021年，历年）、《中国统计年鉴》（2001—2021年，历年）

附表9 (续)

政府监管	《中国环境年鉴》(2002—2020年, 历年)、《中国环境统计年鉴》(2002—2021年, 历年)、北大法宝数据库
政府激励	《中国环境统计年鉴》(2002—2020年, 历年)、《中国生态环境统计年报》(2018—2020年, 历年)
市场激励	2001—2017年(缺2009年)数据来源于Wind数据库中企业年度报告的财务报表附注、2009年数据来源于《中国环境年鉴2010》、2018—2020年数据来源于《中国税务年鉴》(2019—2021年, 历年)
市场化水平	中国市场化指数数据库、王小鲁等发布的《中国分省份市场化指数报告(2021)》
公众参与	《中国环境年鉴》(2002—2020年, 历年)、《中国生态环境统计年报2020》
城镇化水平	夜间灯光数据来源美国国家海洋和大气管理局(National Oceanic and Atmospheric Administration)下的国际地球观测组织(Group on Earth Observations)
经营规模	《中国农村统计年鉴》(2002—2021年, 历年)

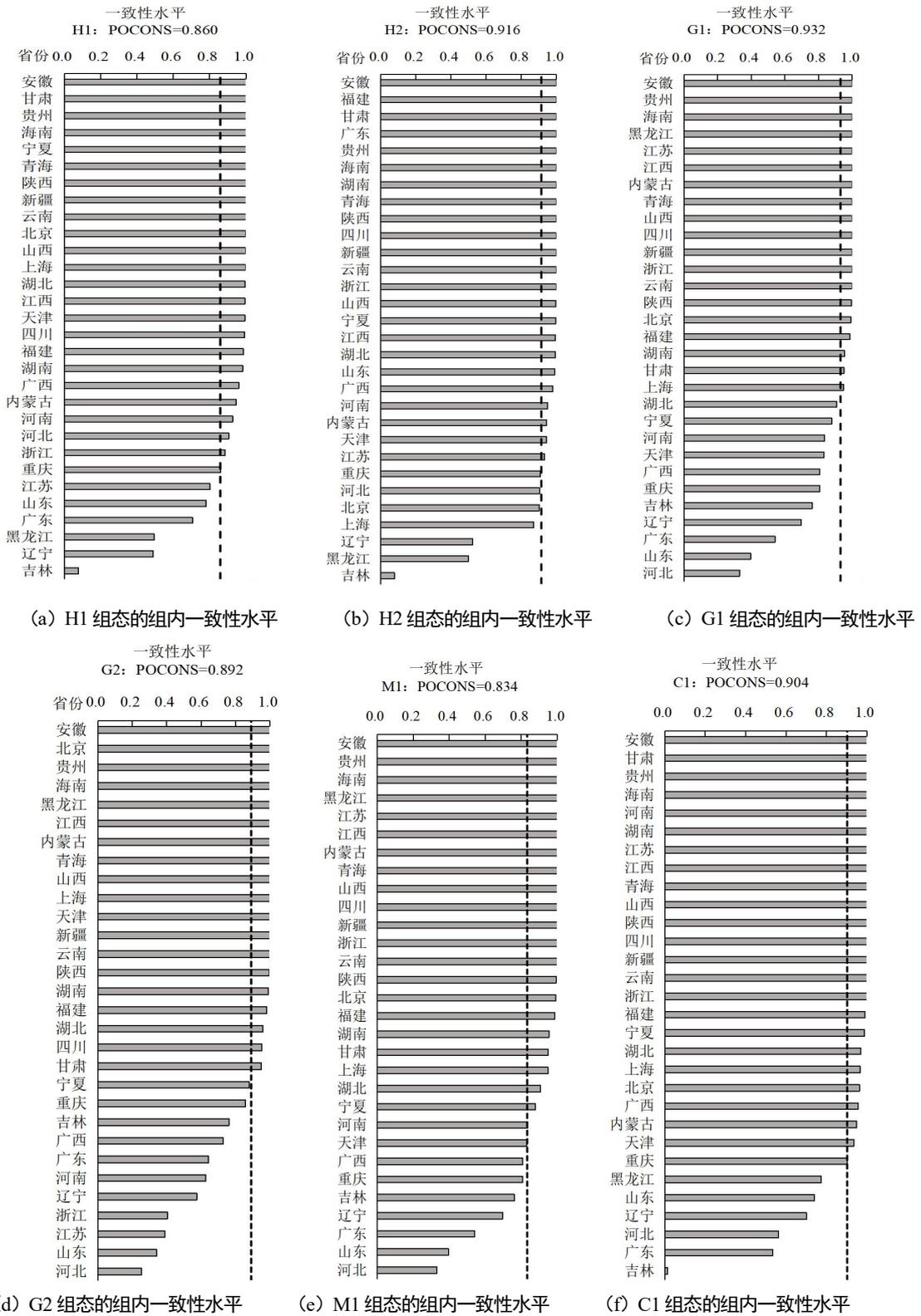
资料来源: 北大法宝官方网站数据库, <https://www.pkulaw.com/law?isFromV5=1>; 《2020年中国生态环境统计年报》, [https://www.mee.gov.cn/hjzl/sthjzk/sthjtnb/202202/t20220218\\_969391.shtml](https://www.mee.gov.cn/hjzl/sthjzk/sthjtnb/202202/t20220218_969391.shtml); 中国市场化指数数据库, <https://cmi.ssap.com.cn>; 《2020年中国生态环境统计年报》; VIIRS Nighttime Light, <https://eogdata.mines.edu/products/vnl/>。

附表10 实现低AGTFP的组态结果

前因条件	F1a	F1b	F1c	F2
政府监管		●	●	
政府激励	⊗	⊗	⊗	⊗
市场激励		●	●	⊗
市场化水平	⊗	⊗	⊗	
公众参与	⊗	●		⊗
城镇化水平			●	⊗
经营规模	●			●
一致性	0.897	0.919	0.909	0.898
不一致性的比例减少	0.870	0.843	0.831	0.870
原始覆盖度	0.273	0.091	0.084	0.212
唯一覆盖度	0.054	0.004	0.003	0.015
组间一致性调整距离	0.063	0.048	0.055	0.051
组内一致性调整距离	0.045	0.027	0.030	0.045
总体一致性	0.886			
总体覆盖度	0.608			

注: ① ⊗ 代表非高前因条件水平, ● 代表高前因条件水平。②大圈表示核心条件, 小圈表示边缘条件, 空格则表示前因条件对于结果的发生可有可无。

制度组态视角下提升农业绿色全要素生产率的多元路径探析



附图 1 各条件组态组内一致性水平

注：图中的 H1 和 H2 对应表 4 中的多元驱动型组态路径，G1 和 G2 对应表 5 中政府主导型组态路径，M1 对应表 5 中二元驱动型组态路径，C1 对应表 5 中多元协同城镇化驱动型组态路径；POCONS 对应的是表 4 中各组态的一致性水平，表示不考虑组间组内差异时的一致性水平。

#### 参考文献

- 1.杜江、王锐、王新华，2016：《环境全要素生产率与农业增长：基于 DEA-GML 指数与面板 Tobit 模型的两阶段分析》，《中国农村经济》第 3 期，第 65-81 页。
- 2.郭海红、刘新民，2020：《中国农业绿色全要素生产率时空演变》，《中国管理科学》第 9 期，第 66-75 页。
- 3.胡向东、王济民，2010：《中国畜禽温室气体排放量估算》，《农业工程学报》第 10 期，第 247-252 页。
- 4.赖斯芸、杜鹏飞、陈吉宁，2004：《基于单元分析的非点源污染调查评估方法》，《清华大学学报（自然科学版）》第 9 期，第 1184-1187 页。
- 5.李波、张俊飏、李海鹏，2011：《中国农业碳排放时空特征及影响因素分解》，《中国人口·资源与环境》第 8 期，第 80-86 页。
- 6.梁流涛，2009：《农村生态环境时空特征及其演变规律研究》，南京农业大学博士学位论文。
- 7.闵继胜、胡浩，2012：《中国农业生产温室气体排放量的测算》，《中国人口·资源与环境》第 7 期，第 21-27 页。
- 8.Dubey, A. & L. R., 2009, "Carbon Footprint and Sustainability of Agricultural Production Systems in Punjab, India, and Ohio, USA", *Journal of Crop Improvement*, 23(4): 332-350.
- 9.Wu, H. Y., H. J. Huang, W. K. Chen, and Y. Meng, 2022: "Estimation and Spatiotemporal Analysis of the Carbon-Emission Efficiency of Crop Production in China", *Journal of Cleaner Production*, Vol. 371: 1-16.

**注：该附录是本刊所发表论文的组成部分，同样被视为作者在本刊公开发表的内容。如研究中使用该附录中的内容，请务必在研究成果上注明引文和下载附件出处。**

引用示例：

参考文献引用范例（具体请根据目标投稿期刊对应调整体例）：

[1]王术坤、林文声，2023：《高标准农田建设的农地流转市场转型效应》，《中国农村经济》第 12 期，第 23-43 页。

如果研究中使用了未在《中国农村经济》纸质版刊发、但在杂志网站上正式公开发表的数字内容（包括数据、程序、附录文件），请务必在研究成果正文中注明：

某数据（及程序等或其他材料）来自王术坤、林文声（2023），详见《中国农村经济》网站（<http://crecrs-zgncjj.ajcass.org/>）该文的对应附件。