

面向村落尺度的温室气体排放核算方法及实证：以河南省邑西里村为例

徐月萍^{1,2}, 韩彬^{1,2}, 李宏庆¹, 张丽华³, 薛冰^{1,3*}

1. 中国科学院沈阳应用生态研究所, 沈阳 110016

2. 中国科学院大学, 北京 100049

3. 山东师范大学 地理与环境学院, 济南 250358

摘要：开展村落尺度温室气体排放源识别及核算是科学应对气候变化并实现低碳城乡建设的重要前提。以河南省邑西里村为研究对象，基于问卷调查和实际走访并结合文献检索建立村落温室气体核算数据库，设计了村落尺度温室气体排放核算框架，从农业生产、畜禽养殖、居民生活和基础设施等四个方面展开了村落尺度温室气体核算，实现以自然村为基本单元的村落温室气体排放的精准评估。结果表明：（1）2020年人均温室气体排放量为5.20 t（以CO₂计，余同），户均排放量为20.01 t。（2）居民生活排放占比为84.80%；其次分别为基础设施、农业生产和畜禽养殖，占比依次为8.46%、6.45%和0.29%。（3）直接和间接排放的温室气体分别为852 t及7153 t，分别占10.64%和89.36%。研究成果有助于推进城乡低碳建设进而实现双碳目标，为基于高时空分辨率的城乡温室气体治理提供支撑。

关键词：村落尺度；温室气体排放源；低碳发展；人地关系

Village-scale greenhouse gas emission accounting methodology and empirical study: a case of Yixili Village in Henan Province

XU Yueping^{1,2}, HAN Bin^{1,2}, LI Hongqing¹, ZHANG Lihua³, XUE Bing^{1,3*}

1. Institute of Applied Ecology, Chinese Academy of Sciences, Shenyang 110016, China

2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

3. College of Geography and Environment, Shandong Normal University, Jinan 250358, China

Abstract: Background, aim, and scope The study of greenhouse gas (GHG) emission at the village-scale plays an essential fundamental role in promoting low-carbon management and sustainable development in urban and rural areas. However, the current research on village-scale GHG emission accounting is still relatively blank, mainly due to the lack of integrated analysis methodology and research paradigms. **Materials and methods** The

收稿日期：2022-06-30；录用日期：2022-10-17；网络出版：2022-11-05

Received Date: 2022-06-30; Accepted Date: 2022-10-17; Online first: 2022-11-05

基金项目：国家自然科学基金项目（41971166）；中国科学院区域发展青年学者计划（2021-003）；中国科学院战略性先导科技专项（XDA2307050305）

Foundation Item: National Natural Science Foundation of China (41971166); Young Scholars Program for Regional Development of Chinese Academy of Sciences (2021-003); Strategic Priority Research Program of the Chinese Academy of Sciences (XDA2307050305)

通信作者：薛冰, E-mail: xuebing@iae.ac.cn

Corresponding Author: XUE Bing, E-mail: xuebing@iae.ac.cn

引用格式：徐月萍, 韩彬, 李宏庆, 等. 2023. 面向村落尺度的温室气体排放核算方法及实证：以河南省邑西里村为例 [J]. 地球环境学报, 14(6): 809–822.

Citation: Xu Y P, Han B, Li H Q, et al. 2023. Village-scale greenhouse gas emission accounting methodology and empirical study: a case of Yixili Village in Henan Province [J]. *Journal of Earth Environment*, 14(6): 809–822.

data were obtained mainly from on-site surveys, statistical yearbooks, and periodical literature. For the collection of micro-level data, based on IPCC national greenhouse gases emission inventory and provincial greenhouse gases inventory, the corresponding greenhouse gas emission sources were identified. Then, the village-level greenhouse gases emission sources were divided into seven categories, including industrial activities, agricultural production, tertiary industry, household, livestock breeding, infrastructure, and fisheries. With one year as the time unit, the life cycle assessment method was adopted to study the greenhouse gas emission accounting and structure of the surveyed village. **Results** The main activity of greenhouse gas emission consisted of agricultural production, livestock breeding, household, and infrastructure, and both direct emission and indirect emissions were considered. The per capita GHG emissions in 2020 were 5.20 t, and the average household emissions were 20.01 t. The residential emissions account for 84.80%, followed by infrastructure, agricultural production, and livestock breeding, accounting for 8.46%, 6.45%, and 0.29%, respectively. The direct and indirect GHG emissions were 852 t and 7153 t, accounting for 10.64% and 89.36%, respectively. **Discussion** We argue that a more complete and systematic accounting framework for village GHG emissions needs to be constructed to account for GHG emissions more accurately at the village-scale. However, because the study villages mainly rely on agricultural cultivation and outworking as their livelihoods, the specific GHG emission processes related to rural industries and tertiary industries were not considered when conducting the accounting. We also stated that there are still different degrees of differences in the selection of emission coefficients due to various influencing factors such as region and time and space, and the refinement of coefficients should be strengthened in the future. **Conclusions** Based on identifying GHG emission sources in the Yixili Village, an accounting framework for GHG emission sources at the village-scale was designed, and the 2020 emissions of the case village were accounted for. Carrying out the GHG emission accounting study in villages can help to understand the sources and structural composition of GHG emissions and provide scientific ideas for rural low-carbon governance at high spatial and temporal resolutions. **Recommendations and perspectives** Rural areas are emerging greenhouse gases emission growth points in China. To achieve more accurate dynamic accounting, statistics, and research on human activity data in village and town areas should be strengthened, an extensive database should be established, and research on emission factors should be enhanced to improve the accuracy of calculations. It also strengthens rural low-carbon governance and promotes green transformation.

Key words: village-scale; GHG emission sources; low carbon development; human-natural relationship

开展村落尺度温室气体排放核算研究对于促进城乡低碳管理和可持续发展具有重要的基础性作用（赵荣钦，2010；薛冰等，2019）。作为全球农业温室气体排放第一大国，我国农业农村温室气体排放量约占全国排放总量的 15%（高鸣和张哲晰，2022）。既有的关于乡村温室气体排放研究主要从农业、农村、农民三个层面展开，且侧重于农业物资投入、居民生活、能源消费和畜牧业等方面的研究。例如：张志高等（2017）、伍国勇等（2021）基于投入视角分别测算了河南省及我国的农业碳汇；罗晓予（2017）、韦玉琼和龙飞等（2022）分别测算了浙江省及我国农村的碳排放；刘莉娜等（2013）、李宏庆等（2020）、李颖（2021）等分别测算了我国农村、青藏高原

土家族、河南省等农村生活碳排放；陈艳和朱雅丽（2011）则测算了我国农村生活可再生能源消费碳排放。

村落是农村地区生产活动与生产要素结合形成的复杂开放系统（王成和李颖颖，2017；李宏庆，2021），其中生产活动主要包括工业及农产品加工、农业种植、乡村服务和牲畜养殖等（张小林，1998；李红波等，2018；周扬等，2019）。目前，温室气体排放的研究主要集中在工业（任婉侠等，2012）、能源（王少剑等，2018）、土地利用变化（付超等，2012）和废弃物（王育宝和何宇鹏，2018）等方面，而对农村具体村落的研究相对缺乏。近年来，国家出台了《国家乡村振兴战略规划》《关于推动城乡建设绿色发展

的意见》《农业农村减排固碳实施方案》《关于推进以县城为重要载体的城镇化建设的意见》等一系列推动城乡建设和绿色低碳发展的相关政策文件,农业农村发展及相关温室气体排放问题受到前所未有的关注;另一方面,随着农村经济的快速发展、城镇化建设和社会对农产品需求的增加(韦玉琼等,2022),乡村地区已经成为我国温室气体排放增长的重要组成部分。因此,展开村落尺度上的温室气体排放水平研究将具有重要意义。

当前关于温室气体排放核算研究主要从国家或省域层面展开(万文玉等,2017; Han et al., 2020),主要体现某一特定层面如农业、家庭和能源等(刘竹等,2011; 李宏庆等,2020; 伍国勇等,2021),尚未形成完整的多部门集成核算体系,且缺乏在微观尺度上的精细化研究。因此,为了能够更加精准地核算村落尺度上的温室气体排放源主体及构成,本研究以自然村落为研究对象,以河南省邑西里村为案例村,构建村落尺度上的温室气体排放源核算框架,以1 a为时间周期并基于全生命周期的计算方法,核算全村的温室气体排放量,以求更加精细地刻画出村落尺度温室气体排放结构,从而为农村地区制定减排措施和科学决策提供理论依据和数据支撑,更好地服务于乡村振兴等国家发展战略。

1 研究区域及方法

1.1 研究区域

调研村邑西里村(34.1830°N, 115.1026°E)位于河南省商丘市宁陵县黄岗镇,总面积133万m²,距所属乡镇5 km、所属县25 km。通过实地调研了解到,该村现有居民400户,常住人口1540人,基本农田91万m²。全村地处平原地区,土壤肥沃,农业种植以小麦和玉米为主,耕作方式为玉米收获—粉碎还田—旋耕地旋地—播种小麦(大蒜)—小麦收获、秸秆粉碎覆盖—播种玉米;居民建筑多以二层砖混结构为主,户均建筑面积235 m²。2020年全村居民人均年收入为3万元,为宁陵县人均收入的1.7倍,为河南省农村居民收入的1.86倍。

1.2 数据来源

研究数据来源于实地调研、统计年鉴及文献资料等。在参考相关文献及统计年鉴等的基础上,

识别出村落温室气体排放核算的框架,然后在此基础上以自上而下和自下而上相结合的形式设计调查问卷,并结合半结构式访谈进行调研,每户调研时长40—60 min,调研对象包括村干部和村民两类人群,调研内容包括人口、经济、土地利用及畜禽养殖、能源消费、交通和生活废弃物等。为确保调研中数据的有效性和准确性,调研过程中分别选取不同收入、不同生计方式和不同年龄阶层的农户,并分两次展开此次调研,第一次调研时间为2021年2—3月,获得有效问卷20份;第二次调研时间为2021年5—6月,获得有效问卷20份。调研完成后,开展有效性检验,主要方式是通过与当地村干部和专业人士的汇报沟通,并开展抽样再验证(抽样样本量占有效问卷量的20%),总体认为调研数据具有良好的代表性。

1.3 温室气体核算框架

基于IPCC国家温室气体排放清单和省级温室气体清单,识别出相应的温室气体排放源,然后在查阅文献基础上(赵荣钦等,2010; 王敬敏和施婷,2013; 杨彬如,2014; 罗晓予,2017; 周志花,2018),将村落温室气体排放活动分成七类,分别为工业生产、农业生产、第三产业、居民生活、畜禽养殖、基础设施和渔业,并在此基础上进一步细分为厂房建设、工业生产过程、废弃物处置、农用物资消耗、农田翻耕、农用地、能源消耗、非商品能源消耗与服务、生活垃圾、生活废水、饲料生产、畜禽肠胃发酵、畜禽粪便管理、畜禽产品加工、道路、桥梁、建筑、渔业作料和设备生产及使用等小项的温室气体排放过程。在村落温室气体排放源分类的基础上,结合调研村的具体现状,了解到调研村温室气体排放主要来源于农业生产、居民生活、基础设施和畜禽养殖四大方面,可划分为十七项具体的温室气体排放活动,同时依据各排放源排放方式的不同,对其排放类别进行了直接排放和间接排放的划分,详见表1。基于此,构建了村落尺度温室气体排放的物质流模型(图1)。

2 核算过程及方法

村落尺度上的温室气体排放核算过程主要包括以下部分:农业生产温室气体核算、居民生活温室气体核算、基础设施温室气体核算以及畜禽养殖温室气体核算。

表 1 村落尺度温室气体活动识别及框架
Tab. 1 Accounting framework of greenhouse gases in village

指标体系 Indicator system	排放活动 Activities	温室气体种类 Types of greenhouse gases	排放类别 Category
农业生产 Agricultural production	农田翻耕有机碳流失 Organic carbon loss from farmland tillage	CO ₂	直接排放 Direct emission
	农田氮输入（氮肥、粪肥和秸秆还田） Nitrogen input (nitrogenous fertilizer, manure, and straw returning)	N ₂ O	
	翻耕、播种和收获等过程柴油消耗 Diesel consumption during tilling, sowing, and harvesting	CO ₂	
	大气氮沉降及氮淋溶和径流 Atmospheric nitrogen deposition and nitrogen leaching and runoff	N ₂ O	间接排放 Indirect emission
	化肥、农药、种子隐含碳 Embodied carbon emission of fertilizer, pesticide, and seed	CO ₂	
	灌溉和玉米脱粒电力消耗 Electricity consumption of irrigation and corn threshing	CO ₂	
居民生活 Resident and living	煤、汽油、液化石油气、玉米芯、薪柴 Coal, gasoline, LPG, straw, wood	CO ₂	直接排放 Direct emission
	生活垃圾运输及卫生填埋 Domestic waste transportation and sanitary landfill	CH ₄ 、CO ₂	
	生活废水 Wastewater	CH ₄	间接排放 Indirect emission
	电力 Electricity	CO ₂	
	非能源商品与服务：食品、衣着、居住、家庭设备用品与服务、医疗保健、交通与通讯、文化娱乐，其他商品与服务 Non-energy goods and services: food, clothing, residence, household equipment supplies and services, health care, transportation and communication, culture, education, and recreation, other goods and services	CO ₂	间接排放 Indirect emission
基础设施 Infrastructure	建筑物施工阶段耗能 Energy consumption during construction	CO ₂	直接排放 Direct emission
	建筑物拆除及废建材处理 Energy consumption during building demolition and waste building materials treatment	CO ₂	
	建筑物运行阶段耗能 Energy consumption during the operation phase of the building	CO ₂	间接排放 Indirect emission
	建筑材料 Building materials	CO ₂	
畜禽养殖 Livestock breeding	动物肠道发酵 Animal enteric fermentation	CH ₄	直接排放 Direct emission
	动物粪便管理 Animal manure management	CH ₄ 、N ₂ O	

2.1 农业生产温室气体核算

农业生产温室气体排放是指从农资的生产至收获整个过程中产生的排放（West and Marland, 2002; Huang et al., 2017; 周志花, 2018），主要为种子、化肥、农药、灌溉、收获、旋耕、播种、农用地翻耕导致的碳流失和农用地 N₂O 排放。各项农用地物资投入、农业用电、农用柴油消耗和农用地翻耕造成土壤有机碳流失产生的排放量计算

公式如下（IPCC, 2006）：

$$E_a = Q_i \times T_i \quad (1)$$

式中： E_a 为上述各项温室气体排放量总和（kg）； Q_i 为第 i 类排放源的活动水平（kg、hm²、MW·h）； T_i 为第 i 类排放源的排放系数（表 2）。

农用地 N₂O 排放量（ E_{N_2O} , kg）根据《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) 计算:

$$E_{N_2O} = E_D + E_S + E_L \quad (2)$$

式中: E_D 为农田 N_2O 直接排放量 (kg); E_S 为氮沉降排放量 (kg); E_L 为氮淋溶排放量 (kg)。

农田 N_2O 直接排放量 E_D 可根据《省级温室气体清单编制指南(试行)》计算:

$$E_D = Q_N \times N_d \times 265 \quad (3)$$

式中: Q_N 为总氮输入量 (kg); N_d 为总氮肥输入的排放因子; 265 为 N_2O 的潜在增温值(下同)(IPCC, 2014)。

氮沉降排放量 E_S 可根据《省级温室气体清单编制指南(试行)》计算:

$$E_S = (Q_e \times 20\% + Q_n \times 10\%) \times N_s \times 265 \quad (4)$$

式中: Q_e 为畜禽排泄氮量 (kg); Q_n 为化肥和秸秆还田氮肥输入量 (kg); N_s 为氮沉降温室气体排放因子(表2)。

氮淋溶排放量 E_L 可根据《省级温室气体清单编制指南(试行)》计算:

$$E_L = Q_N \times 20\% \times N_l \times 265 \quad (5)$$

式中: N_l 为氮淋溶/淋溶温室气体的排放因子(表2)。

2.2 居民生活温室气体核算

居民生活温室气体排放是指居民个人及其家庭为维持日常生活需求所进行的一系列活动产生的排放(Wei et al., 2007; 曾静静等, 2012; 王悦等, 2019), 主要包能源商品、非能源商品与服务、生活垃圾和生活废水温室气体排放。其中, 能源排放主要是指由电、液化石油气、汽油、煤炭和秸秆等产生的消耗品核算。液化气、汽油和煤炭的温室气体排放量 (E_e , kg) 计算公式如下(常琪, 2018):

$$E_e = \sum_{i=1}^n C_i \times N_i \times G_i \times 44 \div 12 \quad (6)$$

式中: C_i 为第 i 类能源的消耗量 (kg); N_i 为第 i 类能源的折标准煤系数(表3); G_i 为第 i 类能源的温室气体排放系数(表3)(IPCC, 2014); 44/12 为 C 与 CO_2 的转换系数。

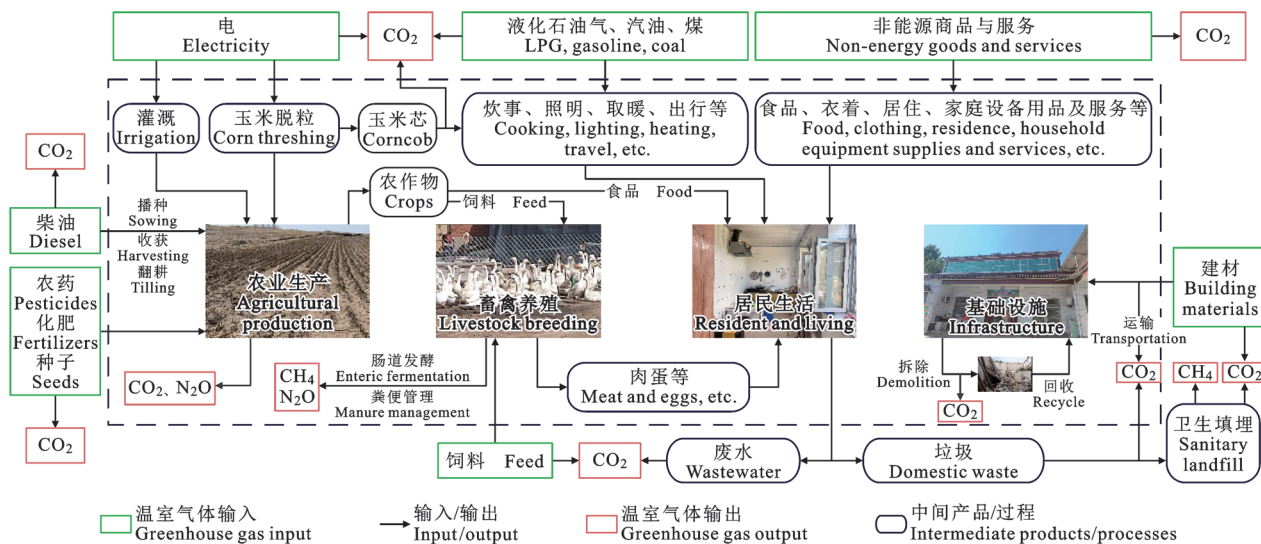


图1 村落尺度(调研村)温室气体排放的物质流模型

Fig. 1 Identification of GHG emission sources at village-scale based on Material Flow Model

电力温室气体排放量 (E_p , kg) 计算公式如下(张保留等, 2021):

$$E_p = \gamma \times \beta \quad (7)$$

式中: γ 为电力消耗量 ($kW \cdot h$); β 为电力温室气体排放系数, 取 $858.7 \text{ kg} \cdot (\text{MW} \cdot \text{h})^{-1}$ (https://www.mee.gov.cn/ywggz/ydqbhb/wsqtzk/202012/t20201229_815386.shtml)。

秸秆温室气体排放量 (E_s , kg) 计算公式如下(陈艳和朱雅丽, 2011):

$$E_s = B_s \times C_s \times O_s \times 44 \div 12 \quad (8)$$

式中: B_s 为玉米芯消耗量 (kg); C_s 为玉米芯含碳系数, 取 44.45% (冯伟林等, 2012); O_s 为玉米芯的氧化率, 此处选用秸秆的氧化率 (85%) (陈艳和朱雅丽, 2011)。

表 2 农业生产温室气体排放源与排放系数

Tab. 2 Greenhouse gas emission sources and emission coefficient of agricultural production

碳源 Carbon sources		排放系数 Emission coefficient	参考文献 References
化肥 Fertilizer	氮肥 N	CO ₂ : 7.76 kg·kg ⁻¹	陈舜等, 2015 (Chen S et al., 2015)
	磷肥 P ₂ O ₅	CO ₂ : 2.33 kg·kg ⁻¹	
	钾肥 K ₂ O	CO ₂ : 0.66 kg·kg ⁻¹	
农药 Pesticide	除草剂 Herbicide	CO ₂ : 23.10 kg·kg ⁻¹	史磊刚等, 2011 (Shi L G et al., 2011); Lal R., 2004
	杀虫剂 Insecticide	CO ₂ : 18.70 kg·kg ⁻¹	
	灭菌剂 Sterilant	CO ₂ : 14.30 kg·kg ⁻¹	
种子 Seed	小麦 Wheat	CO ₂ : 0.40 kg·kg ⁻¹	史磊刚等, 2011 (Shi L G et al., 2011); West and Marland, 2002
	玉米 Corn	CO ₂ : 3.85 kg·kg ⁻¹	
柴油 Diesel	—	CO ₂ : 3.45 kg·kg ⁻¹	左红娟等, 2017 (Zuo H J et al., 2017); 史磊刚等, 2011 (Shi L G et al., 2011)
翻耕 Tilling	—	CO ₂ : 1146.2 kg·hm ⁻²	何艳秋等, 2018 (He Y Q et al., 2018); 伍国勇等, 2021 (Wu G Y et al., 2021)
电力 Electricity	—	CO ₂ : 858.7 kg·(MW·h ⁻¹)	2019 年度减排项目中国区域电网基准线排放因子 China regional grid baseline emission factors for the 2019 emission reduction project (https://www.mee.gov.cn/ywggz/ydqhbh/wsqtkz/202012/t20201229_815386.shtml)
农用地 N ₂ O 排放 N ₂ O emissions from agricultural land	氮输入 Nitrogen input	N ₂ O: 0.0057 kg·kg ⁻¹	省级温室气体清单编制指南 (试行) Provincial greenhouse gas inventory compilation guidelines (trial) (http://www.cbcsd.org.cn/sjk/nengyuan/standard/home/20140113/download/shengjiwenshiqiti.pdf)
	氮沉降 Nitrogen deposition	N ₂ O: 0.01 kg·kg ⁻¹	
	淋溶 / 径流 Nitrogen leaching/runoff	N ₂ O: 0.0075 kg·kg ⁻¹	

表 3 不同能源的折标准煤系数和温室气体排放系数

Tab. 3 Standard coal coefficient and greenhouse gas emission coefficient of different energy

能源 Energy	折标准煤系数 Standard coal coefficient/(kgce·kg ⁻¹)	排放系数 Emission coefficient/(t·t ⁻¹)
汽油 Gasoline	1.4714	C: 0.5538
煤 Coal	0.7143	C: 0.7559
液化石油气 LPG	1.7143	C: 0.5042

非能源商品与服务温室气体排放主要包括耐用品 (冰箱、电视、空调、洗衣机等) 和非耐用品 (食品、衣服、文化娱乐品等) 在开发、生产、使用过程中产生的温室气体排放 (刘莉娜等, 2016), 计算公式如下 (刘莉娜等, 2013):

$$E_1 = \sum_{j=1}^n I_j \times L_j \quad (9)$$

式中: E_1 为非能源商品与服务温室气体排放量 (kg); I_j 为第 j 类生活项目年消费支出量 (元); L_j 为第 j 类生活项目排放系数。综合分析对比商丘市与已有文献中八大消费所涉及部门, 最终选取 Wei et al. (2007) 和王钦池 (2015) 研究中相关系数的平均值, 如表 4 所示。

生活垃圾温室气体排放主要是指垃圾收集、垃

圾运输和垃圾填埋等产生的温室气体排放 (朱文婷和韦保仁, 2011; 陈友媛等, 2018)。调研村居民生活垃圾一般集中存放在安置垃圾桶内, 定期清理和转运到所属县垃圾卫生填埋场。生活垃圾排放温室气体排放量 (E_g , kg) 计算公式如下 (潘玲阳等, 2011):

$$E_g = E_G \times 28 + E_t \quad (10)$$

式中: E_g 为卫生填埋中 CH₄ 排放量 (kg); E_t 为垃圾收集和运输中消耗柴油产生的 CO₂ 排放量 (kg); 28 为 CH₄ 潜在增温值 (IPCC, 2014)。

卫生填埋中 CH₄ 排放量 E_G 可根据以下公式计算 (郭宇杰等, 2022):

$$E_G = G \times D \times D_f \times M \times F \times 16 \div 12 \quad (11)$$

式中: G 为生活垃圾质量 (kg); D 可降解有机碳, 取 14% (IPCC, 2006); D_f 为实际分解的可降解有机碳比例, 取 50% (IPCC, 2006); M 为甲烷修正因子, 取 100%; F 为填埋气中 CH₄ 体积比例, 取 50% (IPCC, 2006); 16/12 为 C 与 CH₄ 的转换系数。

垃圾收集和运输中消耗柴油产生的温室气体排放量 E_t 可根据以下公式计算 (IPCC, 2006):

$$E_t = X \times C_b \quad (12)$$

式中: X 为柴油消耗量 (kg), C_b 为柴油温室气体排放系数。

生活废水温室气体排放主要是指废水排放到不流动河流中产生的温室气体排放, 计算公式如下 (IPCC, 2006):

$$E_w = P \times B \times W_i \times 365 \times 28 \quad (13)$$

式中: E_w 为生活废水温室气体排放量 (kg); P 为常住人口数 (人); B 为生化需氧量, 取 $0.04 \text{ kg} \cdot \text{人}^{-1} \cdot \text{d}^{-1}$ (IPCC, 2006); W_i 为生活废水的温室气体排放因子 (以 CH_4 计), 取 $0.06 \text{ kg} \cdot \text{kg}^{-1}$ (BOD) (IPCC, 2006), 28 为 CH_4 潜在增温值 (下同) (IPCC, 2014)。

表4 居民生活消费各项目温室气体排放系数
Tab. 4 Greenhouse gas coefficient of household consumption items

消费项目 Consumption items	排放系数 / (kg · 元 ⁻¹) Emission coefficient /(kg · yuan ⁻¹)
食品 Food	0.076
衣着 Clothing	0.064
居住 Residence	1.018
家庭设备用品及服务 Household equipment supplies and services	0.031
交通和通讯 Transportation and communication	0.080
文化娱乐 Culture, education, and recreation	0.162
医疗保健 Health care	0.058
其他 Other	0.064

2.3 基础设施温室气体核算

基础设施主要是指住房建筑、道路和桥梁等 (白静, 2019)。一般而言, 基础设施温室气体排放主要包括建筑材料生产、建筑施工 (建材运输和施工本身)、建筑运行、建筑物拆除和建筑材料回收利用 (黄娟娟, 2013; 杨磊, 2013)。建筑物运行阶段温室气体排放主要由能源消耗产生; 施工本身温室气体排放主要是考虑施工现场产生的能源消耗 (熊宝玉, 2015)。调研村现场施工能源消耗以电力为主, 本文已将能源消耗产生的温室气体排放纳入到居民生活温室气体排放中, 此处不再考虑; 调研村新建房屋大部分是在闲置宅基地上建造, 少部分在拆除旧房子基础上进行建造 (拆除过程中以人工为主), 故不再考虑这部分温室气体排放。住房建筑温室气体排放

(E_b , kg) 计算公式参照《GB/T 51366—2019, 建筑碳排放计算标准》(中华人民共和国住房和城乡建设部和国家市场监督管理总局, 2019):

$$E_b = E_m + E_c \quad (14)$$

式中: E_m 为建筑材料排放量 (kg); E_c 为运输过程排放量 (kg)。

建筑材料排放量 E_m 可根据《GB/T 51366—2019, 建筑碳排放计算标准》(中华人民共和国住房和城乡建设部和国家市场监督管理总局, 2019) 计算:

$$E_m = \sum_{i=1}^n M_i \times H_i \times \frac{1}{30} \quad (15)$$

式中: M_i 为第 i 类主要建材的消耗量 (kg、块、片), 调研村房子类型主要为砖混和砖木结构, 单位面积建材消耗量取自曲建升等 (2014) (表5); H_i 为第 i 类建材的排放系数, 选自《GB/T 51366—2019, 建筑碳排放计算标准》(中华人民共和国住房和城乡建设部和国家市场监督管理总局, 2019), 因无瓦的排放系数, 故本文在计算时选取和砖块一样的系数 ($22.8 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$, 以 CO_2 计) 进行计算; $1/30$ 为建筑材料当年服务期与建筑平均生命期之比, 源于仇保兴在第六届国际绿色建筑与建筑节能大会上指出我国建筑平均寿命为 30 a (<https://www.chinabuilding.com.cn/article-665.html>)。

运输过程排放量 E_c 可根据《GB/T 51366—2019, 建筑碳排放计算标准》(中华人民共和国住房和城乡建设部和国家市场监督管理总局, 2019) 计算:

$$E_c = \sum_{i=1}^n M_i \times D_i \times O_i \quad (16)$$

式中: D_i 为第 i 类建材平均运输距离 (km), 了解到村民大多去镇上购买材料, 而镇上材料大多从县城购买, 故此处计算时统一选取调研村距县城距离 25 km; O_i 为第 i 类建材的运输方式 (统一选取轻型柴油货车运输) 下的单位重量距离的排放系数, 取 $0.286 \text{ kg} \cdot \text{t}^{-1} \cdot \text{km}^{-1}$ (中华人民共和国住房和城乡建设部和国家市场监督管理总局, 2019)。

2.4 畜禽养殖温室气体核算

畜禽养殖温室气体排放是指从畜禽所摄入的食物的生产阶段至其产品加工过程中产生的排放 (姚成胜等, 2017), 主要包括饲料在种植、加工及

运输过程中产生的温室气体排放, 畜禽肠胃发酵引起的 CH_4 排放、畜禽粪便管理引起的 CH_4 和 N_2O 排放、畜禽饲养过程中耗能温室气体排放和畜禽产品加工产生的温室气体排放。畜禽养殖温室气体排放量计算公式如下 (陈胜涛等, 2020):

$$E_b = E_{b1} \times 28 + E_{b2} \times 265 \quad (17)$$

式中: E_{b1} 为畜禽肠道及粪便 CH_4 排放量 (kg); E_{b2} 为畜禽粪便 N_2O 排放量 (kg)。畜禽品种及相应温室气体排放系数见表 6。

表 5 不同类型住宅建材消耗量和建材温室气体排放系数
Tab. 5 Consumption and greenhouse gas emission coefficient of different types of residential building materials

材料 Materials	消耗量 Consumption		排放系数 Emission coefficient
	砖木结构 Brick-wood structure	砖混结构 Brick-concrete structure	
水泥 Cement	10 $\text{kg} \cdot \text{m}^{-2}$	166 $\text{kg} \cdot \text{m}^{-2}$	735 $\text{kg} \cdot \text{t}^{-1}$
钢材 Steel	0.864 $\text{kg} \cdot \text{m}^{-2}$	23 $\text{kg} \cdot \text{m}^{-2}$	2050 $\text{kg} \cdot \text{t}^{-1}$
玻璃 Glass	0.845 $\text{kg} \cdot \text{m}^{-2}$	1.8 $\text{kg} \cdot \text{m}^{-2}$	1130 $\text{kg} \cdot \text{t}^{-1}$
砖 Solid brick	312 块 $\cdot \text{m}^{-2}$	250 块 $\cdot \text{m}^{-2}$	22.8 $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$
	312 block $\cdot \text{m}^{-2}$	250 block $\cdot \text{m}^{-2}$	
瓦 Tile	38 片 $\cdot \text{m}^{-2}$	90 片 $\cdot \text{m}^{-2}$	22.8 $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$
	38 piece $\cdot \text{m}^{-2}$	90 piece $\cdot \text{m}^{-2}$	
砂 Grit	675 $\text{kg} \cdot \text{m}^{-2}$	422 $\text{kg} \cdot \text{m}^{-2}$	2.51 $\text{kg} \cdot \text{t}^{-1}$
石灰 Lime	80 $\text{kg} \cdot \text{m}^{-2}$	27.17 $\text{kg} \cdot \text{m}^{-2}$	747 $\text{kg} \cdot \text{t}^{-1}$
碎石 Gravel	—	1367 $\text{kg} \cdot \text{m}^{-2}$	2.18 $\text{kg} \cdot \text{t}^{-1}$

表 6 畜禽品种对应的温室气体排放系数
Tab. 6 Greenhouse gas emission coefficient of livestock
单位: $\text{kg} \cdot \text{头}^{-1} \cdot \text{a}^{-1}$ Unit: $\text{kg} \cdot \text{head}^{-1} \cdot \text{a}^{-1}$

畜禽 Livestock	肠道 CH_4 排放系数 Intestinal CH_4 emission coefficient	粪便 CH_4 排放系数 Manure CH_4 emission coefficient	粪便 N_2O 排放系数 Manure N_2O emission coefficient
猪 Hog	1.000	3.500	0.530
羊 Sheep	5.000	0.160	0.330
家禽 Poultry	—	0.020	0.020
兔子 Rabbit	0.254	0.080	0.020

畜禽肠道及粪便 CH_4 排放量 E_{b1} 可根据以下公式计算 (姚成胜等, 2017):

$$E_{b1} = \sum_{i=1}^n A_i \times (U_i + K_i) \times 365 \quad (18)$$

式中: A_i 为第 i 类畜禽平均饲养量 (头、只); U_i 为第 i 类畜禽肠道 CH_4 排放系数; K_i 为第 i 类畜禽粪便 CH_4 排放系数; 365 为饲养天数 (下同)。

畜禽粪便 N_2O 排放量 E_{b2} 可根据以下公式计算 (姚成胜等, 2017):

$$E_{b2} = \sum_{i=1}^n A_i \times J_i \times 365 \quad (19)$$

式中: J_i 为第 i 类畜禽粪便 N_2O 排放系数 (姚成胜等, 2017)。

3 结果分析

3.1 农业生产温室气体排放

以 1 a 为单位, 在整个农业生产过程中, 产生的温室气体总量为 516 t。其中, 直接排放量为 191 t, 分别为氮输入、柴油和农田翻耕产生; 间接排放量为 325 t, 分别为化肥、农药、种子、农业用电、氮沉降和氮淋溶/径流产生。农业生产过程中小麦需种子 225 $\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ 、玉米需种子 30 $\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ (均为商业购买)、大蒜需种子 2250 $\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ (自留, 不计入温室气体排放), 由种子产生的排放量为 18 t, 占 3.57%; 化肥使用量为 1084 $\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ 、农药使用量分别为除草剂 3 $\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ 、杀虫剂 6 $\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ 和灭菌剂 6 $\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$, 由施肥和农药产生的排放量分别为 226 t 和 24 t, 占比分别为 43.83% 和 4.72%; 农田灌溉以电力为主, 用电为 326 $(\text{kW} \cdot \text{h}) \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$, 部分村民玉米收获后不进行玉米脱粒直接进行售卖 (约占总种植面积的 20%), 玉米脱粒用电为 0.6 $(\text{kW} \cdot \text{h}) \cdot \text{hm}^{-2}$, 由农业用电产生的排放量为 39 t; 农田翻耕产生的排放为 104 t, 占比分别为 7.54% 和 20.24%; 小麦和玉米播种、收获及旋耕以机械为主, 柴油消耗分别为播种 15 $\text{L} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ 、收获 101 $\text{L} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ (其中小麦 33 $\text{L} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ 、玉米 68 $\text{L} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$) 和旋耕 68 $\text{L} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$, 大蒜播种和收获以人工为主 (不计入温室气体排放核算), 由柴油产生的排放量为 48 t, 占 9.30%; 而农用地 N_2O 排放量为 56 t, 占 10.79% (图 2a)。

3.2 居民生活温室气体排放

居民生活温室气体排放总量为 6788 t, 其中

直接排放量为 600 t, 间接排放量为 6188 t。调研发现, 居民炊事、取暖、交通等活动以电、液化气、汽油为主, 辅以玉米芯和少量煤(因薪柴使用量较少且统计较困难, 本文未计算在内), 其产生的温室气体总量为 985 t, 其中电和汽油为温室气体排放产生的主体, 分别为 652 t 和 271 t; 液化石油气和煤次之, 分别为 60 t 和 2 t。因非能源产品及服务使用过程中多是消耗电力、汽油等能源商品(人工不计入在内), 在统计时已计入直接能源部分, 为避免重复计算, 此处只考虑其在开发、生产过程中消耗能源产生的间接排放, 为 5537 t。生活垃圾温室气体排放量为 230 t, 以垃圾填埋为主, 为 229 t。生活废水温室气体排放量为 38 t。各类排放占比见图 2b。

3.3 基础设施温室气体排放

经实地走访可知, 调研村无桥梁建筑(不计入核算), 且村落道路仍以土路为主, 仅有几条水泥路和沥青路且使用年限均在 10 a 以上, 而四级公路年限一般为 10 a(《JTG D40—2011, 公路水泥混凝土路面设计规范》)(中交公路规划设计院有限公司, 2011), 本文核算的为 2020 年温室气体排放量, 因道路已超过其使用年限, 故不核算在内。所以调研村基础设施主要为当年新建建筑产生的排放量(建筑材料和运输)和之前已建成的所需建筑材料在服务期内产生的排放量。经核算, 温室气体排放总量为 677 t, 其中直接碳排放量为 37 t, 间接排放量为 640 t。住房建筑温室气体排放以已建建筑为主, 为 626 t, 占 92.40%; 其次为当年新建的 10 栋建筑, 为 51 t, 占 7.60%(图 2c)。

3.4 畜禽养殖温室气体排放

调研村畜禽来源于少数家庭饲养的猪、羊、鸡鸭鹅和兔等, 且鸡鸭鹅和兔主要为自家食用。畜禽所需饲料大部分来自自产, 只有少部分来自村外购买, 故进行计算时不考虑畜禽所需饲料在种植、加工及运输过程中产生的温室气体排放和畜禽产品加工温室气体的排放; 另为避免与上文居民生活耗能温室气体排放重复计算, 此处不再单独计算畜禽饲养过程中耗能产生的温室气体排放。经核算, 畜禽养殖温室气体排放量为 23 t, 且全为直接排放, 其主要来源于畜禽粪便管理排放(16 t), 占 70.40%, 其次为畜禽肠道发酵过程中的排放(7 t), 占 29.60%(图 2d)。

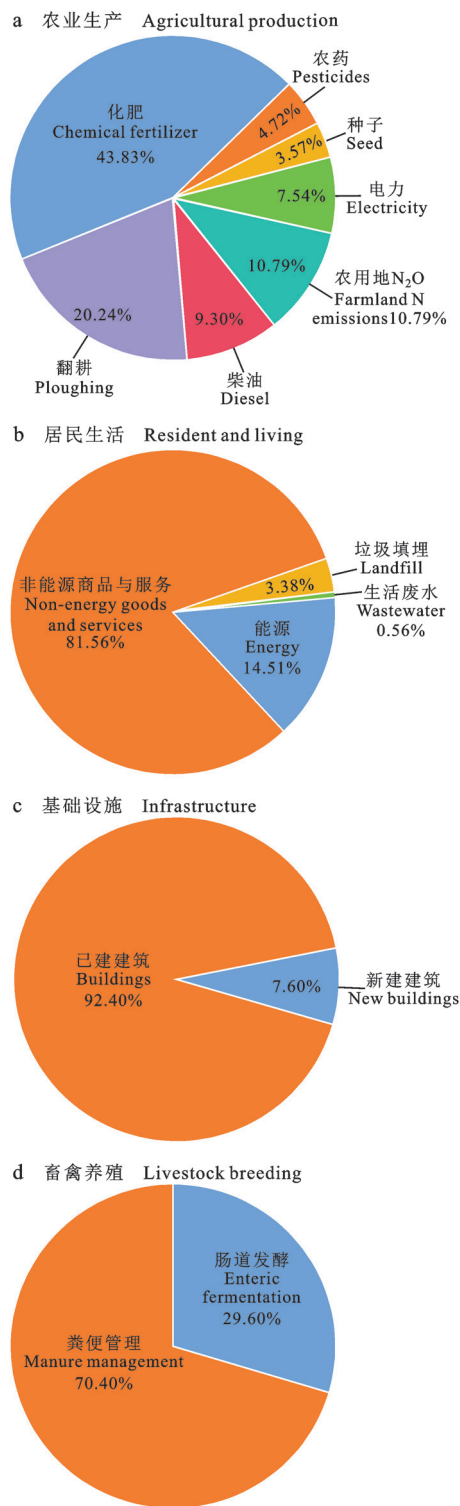


图 2 温室气体排放结构

Fig. 2 Structure of greenhouse gases emission

3.5 总体分析

总体来看(图 3), 2020 年邑西里村的总排放量为 8005 t, 户均排放量为 20.01 t, 人均排放量为 5.20 t。在村落温室气体排放的总体构成中, 居

民生活是温室气体排放量的主体,总排放量为 6788 t,占 84.80%;排在其次的为基础设施,总排放量为 677 t,占 8.46%;农业生产和畜禽养殖的排放总量分别为 515 t 和 23 t,占比分别为 6.45% 和 0.29%。

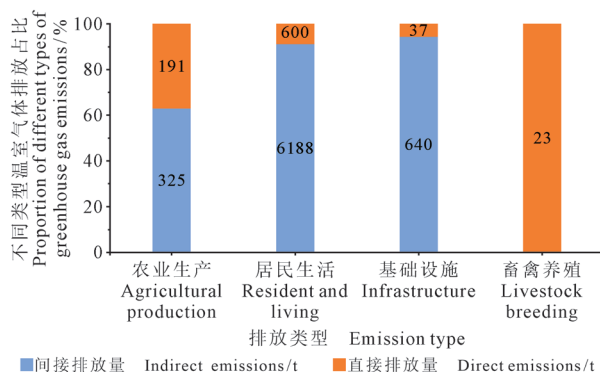


图 3 调研村温室气体排放量

Fig. 3 Greenhouse gases emissions of the surveyed village

在温室气体排放类型上,可以看出全村温室气体排放构成主要为间接排放,共 7153 t,占 89.36%;直接排放总量为 852 t,占 10.64%。农业生产、居民生活和基础设施等温室气体排放结构中,间接排放也是主要的构成部分,占比分别为 62.96%、91.16% 和 94.42%;直接排放的比例整体偏低,除农业生产的直接排放占 37.04% 外,其余不足 10%。而在畜禽养殖过程中的温室气体排放全部为直接排放 (23 t)。

4 讨论

展开村落尺度上的温室气体排放研究,是支撑农村地区碳减排和农业农村绿色低碳发展的重要内容 (刘凤莲和林爱文, 2012; 杨彬如, 2014)。为了更精准地核算村落尺度上的温室气体排放量,需要构建一个更加完整和系统的村落温室气体排放核算框架。目前,既有的关于农村地区温室气体排放的研究框架主要针对乡村经济产业 (农业、工业和第三产业等) 和生活等方面 (罗晓予, 2017), 或聚焦于农、林、畜牧和渔业 (王敬敏和施婷, 2013) 或聚焦于土地利用 (冯真, 2015)。而本文从整个村落的角度出发,构建了在整个生命周期视角下的村落温室气体排放指标和框架,主要包含农业生产、畜禽养殖、居民生活和基础设施等部分,并对每个主题下的具体指标进行了分类和计算,同时依据各

排放源排放方式的不同,将其分成直接排放和间接排放,从而得到整个调研村的温室气体排放水平,同时也为相同 (近) 地区或相同 (近) 生产生活方式的村落温室气体核算研究提供了相关核算方法和理论支撑,对地区开展村落尺度温室气体核算研究和乡村绿色低碳发展具有借鉴意义。另外,2022 年 5 月国家提出要依托县城开展城镇化建设,促进乡村产业发展 (https://www.gov.cn/zhengce/2022-05/06/content_5688895.htm)。产业温室气体排放是乡村温室气体排放不可忽视的一部分 (韦惠兰和杨彬如, 2014), 因调研村主要以农业种植和外出打工为生计方式,在进行核算时没有考虑与工业和第三产业相关的具体温室气体排放过程。因此,将持续关注乡村产业温室气体核算和不同类型乡村温室气体核算,以期提供全面系统的村落温室气体核算框架和模型。

在系数选择上,选择温室气体排放因子时尽可能以全生命周期范围内的研究为基础,并选取与调研村区域相同或相近的相关文献作为参考,同时考虑省级温室气体排放清单或 IPCC 温室气体排放清单。但由于地区和时空等各种影响因素的不同,在系数的选择上仍存在不同程度的差异。例如:农业生产温室气体排放核算中化肥温室气体排放系数的选择,West and Marland (2002) 及陈舜等 (2015) 都是基于全生命周期计算相关温室气体排放系数,但因所处地区所选取的数据不同,系数存在差异,为进一步确保数据的准确性,本文最终选择了陈舜等 (2015) 基于我国相关数据计算的化肥温室气体排放系数。在结果可靠性方面,对比相同地区其他学者的研究数据,李颖 (2021) 发现河南省农村直接温室气体排放呈波动下降的趋势,且 2018 年农村直接温室气体排放占 31.25%,略高于本研究数据。其原因一方面是将电力作为直接温室气体排放计算;另一方面进行温室气体排放计算时只考虑了居民生活消费温室气体排放。而本文从电力生产过程考虑,将电力作为间接温室气体排放计算;另外除考虑生活消费温室气体排放外,还涉及农业生产、畜禽养殖和住房建筑温室气体排放,且在这三部分中温室气体排放主要为间接温室气体排放。对比全国农村地区其他学者的研究数据,韦玉琼等 (2022) 指出我国农业农村温室气体排放结构以养殖业、电力、住房建设、煤和汽车为主,而邑西里村温室气体排放

结构以居住、住房建筑、电力和食品消耗产生的温室气体排放为主,与以往研究稍有偏差。其原因一方面在于西里村以农业种植和外出打工为主要生计方式、畜禽养殖数量较少;另一方面调研村所处地区(商丘市)年平均温度为11—21℃,冬季取暖以电为主,很少使用煤炭,因此畜禽养殖和煤的温室气体排放量相对较低。

5 结论

以自然村落为研究对象,在实际调研和文献资料结合的基础上,通过识别西里村的温室气体排放源要素,设计村落尺度上的温室气体排放核算框架,并对其2020年的排放量进行核算,主要结论如下:(1)2020年全村人均排放量为5.20 t,户均排放量为20.01 t。(2)温室气体排放主要来源于居民生活,占84.80%;其次分别为基础设施、农业生产和畜禽养殖,占比依次为8.46%、6.45%和0.29%。(3)村落温室气体排放构成以间接排放为主,全年排放量为7153 t,占89.36%;直接排放量为852 t,占10.64%。通过开展村落的温室气体排放核算研究,不仅可以全面了解温室气体排放的来源和结构组成,同时还可以为高时空分辨率下农村低碳发展治理提供科学支撑。

参考文献

- 白静. 2019. 中国基础设施隐含碳时空变化特征及驱动因素研究[D]. 兰州: 兰州大学. [Bai J. 2019. Study on temporal and spatial variation characteristics and driving factors of embodied carbon emissions in China's infrastructure [D]. Lanzhou: Lanzhou University.]
- 常琪. 2018. 江苏农村居民生活能源消费碳排放测定及分析[J]. 农村经济与科技, 29(17): 136–137. [Chang Q. 2018. Measurement and analysis of carbon emissions of rural residents' living energy consumption in Jiangsu Province [J]. *Rural Economy and Science-Technology*, 29(17): 136–137.]
- 陈胜涛, 朱佳文, 钱骏. 2020. 江苏省畜禽养殖业区域温室气体排放研究[J]. 农业经济, (2): 24–25. [Chen S T, Zhu J W, Qian J. 2020. Study on regional greenhouse gas emissions of livestock and poultry industry in Jiangsu Province [J]. *Agriculture Economy*, (2): 24–25.]
- 陈舜, 逯非, 王效科. 2015. 中国氮磷钾肥制造温室气体排放系数的估算[J]. 生态学报, 35(19): 6371–6383. [Chen S, Lu F, Wang X K. 2015. Estimation of greenhouse

gases emission factors for China's nitrogen, phosphate, and potash fertilizers [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 35(19): 6371–6383.]

- 陈艳, 朱雅丽. 2011. 中国农村居民可再生能源生活消费的碳排放评估[J]. 中国人口·资源与环境, 21(9): 88–92. [Chen Y, Zhu Y L. 2011. Evaluation of carbon emissions from renewable energy consumption by rural residents in China [J]. *China Population, Resources and Environment*, 21(9): 88–92.]
- 陈友媛, 魏来, 孙萍, 等. 2018. 两种典型农村生活垃圾处理处置模式的生命周期评价[J]. 中国海洋大学学报(自然科学版), 48(10): 82–89. [Chen Y Y, Wei L, Sun P, et al. 2018. The comparative life cycle assessment study of two typical disposal modes of rural living waste [J]. *Periodical of Ocean University of China*, 48(10): 82–89.]
- 冯伟林, 金群力, 蔡为明, 等. 2012. 棉籽壳、玉米芯及麸皮的重要营养成分与重金属含量分析[J]. 食用菌, 20(4): 220–221. [Feng W L, Jin Q L, Cai W M, et al. 2012. Analysis of important nutritional components and heavy metal contents of cottonseed hull, corncob and bran [J]. *Edible and Medicinal Mushrooms*, 20(4): 220–221.]
- 冯真. 2015. 浙江山区型乡村用地低碳规划模拟分析研究[D]. 杭州: 浙江大学. [Feng Z. 2015. Research of low carbon land planning simulation analysis in Zhejiang mountainous countries [D]. Hangzhou: Zhejiang University.]
- 付超, 于贵瑞, 方华军, 等. 2012. 中国区域土地利用/覆被变化对陆地碳收支的影响[J]. 地理科学进展, 31(1): 88–96. [Fu C, Yu G R, Fang H J, et al. 2012. Effects of land use and cover change on terrestrial carbon balance of China [J]. *Progress in Geography*, 31(1): 88–96.]
- 高鸣, 张哲晰. 2022. 碳达峰、碳中和目标下我国农业绿色发展的定位和政策建议[J]. 华中农业大学学报(社会科学版), (1): 24–31. [Gao M, Zhang Z X. 2022. Positioning and policy suggestions of China's agricultural green development under the targets of carbon peaking and carbon neutrality [J]. *Journal of Huazhong Agricultural University (Social Sciences Edition)*, (1): 24–31.]
- 郭宇杰, 龚亚萍, 邹玉飞, 等. 2022. 天津市生活垃圾处理碳排放时间变化特征及影响因素[J]. 环境工程技术学报, 12(3): 834–842. [Guo Y J, Gong Y P, Zhou Y F, et al. 2022. Temporal variation characteristics and influencing factors of carbon emissions from municipal solid waste treatment in Tianjin [J]. *Journal of Environmental Engi-*

- neering Technology, 12(3): 834–842.]
- 何艳秋, 陈 柔, 吴昊玥, 等. 2018. 中国农业碳排放空间格局及影响因素动态研究 [J]. 中国生态农业学报, 26(9): 1269–1282. [He Y Q, Chen R, Wu H Y, et al. 2018. Spatial dynamics of agricultural carbon emissions in China and the related driving factors [J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 26(9): 1269–1282.]
- 黄娟娟. 2013. 甘肃农村建筑能耗的全生命周期评价与降低方法研究 [D]. 兰州: 兰州理工大学. [Huang J J. 2013. Evaluation and reduction of energy consumption of rural building in Gansu with the method of life cycle assessment [D]. Lanzhou: Lanzhou University of Technology.]
- 李红波, 胡晓亮, 张小林, 等. 2018. 乡村空间辨析 [J]. 地理科学进展, 37(5): 591–600. [Li H B, Hu X L, Zhang X L, et al. 2018. On the analysis of rural space [J]. Progress in Geography, 37(5): 591–600.]
- 李宏庆, 邢 冉, 姜 璐, 等. 2020. 青藏高原东北部土族家庭能源消费特征 [J]. 自然资源学报, 35(11): 2793–2802. [Li H Q, Xing R, Jiang L, et al. 2020. Household energy consumption characteristics of the Tusetnic group in the northeast of the Tibetan Plateau [J]. Journal of Natural Resources, 35(11): 2793–2802.]
- 李宏庆. 2021. 村域尺度能源代谢活动过程及效应研究——以山东省滕州市东桥头村为例 [D]. 北京: 中国科学院大学. [Li H Q. 2021. Study on the process and effect of energy metabolism at village scale—a case study of Dongqiaotou Village, Tengzhou City, Shandong Province [D]. Beijing: University of Chinese Academy of Sciences.]
- 李 颖. 2021. 河南省农村居民生活消费碳排放与居民收入关系研究 [J]. 农村经济与科技, 32(19): 165–166. [Li Y. 2021. Study on the relationship between carbon emissions of rural residents' living consumption and residents' income in Henan Province [J]. Rural Economy and Science-Technology, 32(19): 165–166.]
- 刘凤莲, 林爱文. 2012. 基于低碳经济视角的中国城乡一体化模式探讨 [J]. 湖北农业科学, 51(16): 3632–3635, 3640. [Liu F L, Lin A W. 2012. Research on urban-rural integration model in China from the view of low-carbon economy [J]. Hubei Agricultural Sciences, 51(16): 3632–3635, 3640.]
- 刘莉娜, 曲建升, 黄雨生, 等. 2016. 中国居民生活碳排放的区域差异及影响因素分析 [J]. 自然资源学报, 31(8): 1364–1377. [Liu L N, Qu J S, Huang Y S, et al. 2016. Analyze on the spatial-temporal pattern and influence factors of China's per capita household carbon emissions [J]. Journal of Natural Resources, 31(8): 1364–1377.]
- 刘莉娜, 曲建升, 曾静静, 等. 2013. 灰色关联分析在中国农村家庭碳排放影响因素分析中的应用 [J]. 生态环境学报, 22(3): 498–505. [Liu L N, Qu J S, Zeng J J, et al. 2013. Application of gray relational analysis method in the influencing factor analysis of China's rural household carbon emissions [J]. Ecology and Environmental Sciences, 22(3): 498–505.]
- 刘 竹, 耿 涌, 薛 冰, 等. 2011. 城市能源消费碳排放核算方法 [J]. 资源科学, 33(7): 1325–1330. [Liu Z, Geng Y, Xue B, et al. 2011. A calculation method of CO₂ emission from urban energy consumption [J]. Resources Science, 33(7): 1325–1330.]
- 罗晓予. 2017. 基于碳排放核算的乡村低碳生态评价体系研究 [D]. 杭州: 浙江大学. [Luo X Y. 2017. Study on low-carbon ecological evaluation system of villages based on carbon emission accounting [D]. Hangzhou: Zhejiang University.]
- 潘玲阳, 齐 涛, 崔胜辉, 等. 2011. 半城市化地区家庭生活垃圾特征及低碳对策: 以厦门市集美区为例 [J]. 环境科学学报, 31(10): 2319–2328. [Pan L Y, Lin T, Cui S H, et al. 2011. Characteristics of generation and low-carbon management strategies for household waste in peri-urban area: a case study of Jimei District, Xiamen [J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 31(10): 2319–2328.]
- 曲建升, 王 莉, 邱巨龙. 2014. 中国居民住房建筑固定碳排放的区域分析 [J]. 兰州大学学报 (自然科学版), 50(2): 200–207. [Qu J S, Wang L, Qiu J L. 2014. Regional analysis of carbon dioxide emission from house building materials in China [J]. Journal of Lanzhou University (Natural Sciences), 50(2): 200–207.]
- 任婉侠, 耿 涌, 薛 冰. 2012. 中国老工业城市能源消费碳排放的驱动力分析——以沈阳市为例 [J]. 应用生态学报, 23(10): 2829–2835. [Ren W X, Geng Y, Xue B. 2012. Driving forces of carbon emission from energy consumption in China old industrial cities: a case study of Shenyang City, Northeast China [J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 23(10): 2829–2835.]
- 史磊刚, 陈 阜, 孔凡磊, 等. 2011. 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, 21(9): 93–98. [Shi L G, Chen F, Kong F L, et al.

2011. The carbon footprint of winter wheat-summer maize cropping pattern on North China Plain [J]. *China Population, Resources and Environment*, 21(9): 93–98.]
- 万文玉, 赵雪雁, 王伟军, 等. 2017. 我国农村居民生活能源碳排放的时空特征分析 [J]. *生态学报*, 37(19): 6390–6401. [Wan W Y, Zhao X Y, Wang W J, et al. 2017. Analysis of spatio-temporal patterns of carbon emission from energy consumption by rural residents in China [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 37(19): 6390–6401.]
- 王成, 李颖颖. 2017. 乡村生产空间系统的概念性认知及其研究框架 [J]. *地理科学进展*, 36(8): 913–923. [Wang C, Li H Y. 2017. Conceptual and research frameworks of rural production space system [J]. *Progress in Geography*, 36(8): 913–923.]
- 王敬敏, 施婷. 2013. 中国农村碳排放统计监测指标体系的构建 [J]. *统计与决策*, (2): 34–37. [Wang J M, Shi T. 2013. Construction of statistical and monitoring index system of rural carbon emission in China [J]. *Statistics & Decision*, (2): 34–37.]
- 王钦池. 2015. 家庭规模对中国能源消费和碳排放的影响研究 [J]. *资源科学*, 37(2): 299–307. [Wang Q C. 2015. Effects of household size on energy consumption and carbon emissions [J]. *Resources Science*, 37(2): 299–307.]
- 王少剑, 苏泳娴, 赵亚博. 2018. 中国城市能源消费碳排放的区域差异、空间溢出效应及影响因素 [J]. *地理学报*, 73(3): 414–428. [Wang S J, Su Y X, Zhao Y B. 2018. Regional inequality, spatial spillover effects and influencing factors of China's city-level energy-related carbon emissions [J]. *Acta Geographica Sinica*, 73(3): 414–428.]
- 王育宝, 何宇鹏. 2018. 城市废弃物处理温室气体排放的影响机制研究 [J]. *西安交通大学学报(社会科学版)*, 38(1): 60–70. [Wang Y B, He Y P. 2018. Study on greenhouse gas emission from urban waste disposal and influence mechanism [J]. *Journal of Xi'an Jiaotong University (Social Sciences)*, 38(1): 60–70.]
- 王悦, 李锋, 孙晓. 2019. 城市家庭消费碳排放研究进展 [J]. *资源科学*, 41(7): 1201–1212. [Wang Y, Li F, Sun X. 2019. Progress of research on carbon emissions of urban household consumption [J]. *Resources Science*, 41(7): 1201–1212.]
- 韦惠兰, 杨彬如. 2014. 中国低碳乡村发展的产业战略 [J]. *甘肃社会科学*, (4): 211–214. [Wei H L, Yang B R. 2014. Industrial strategy of low-carbon rural development in China [J]. *Gansu Social Sciences*, (4): 211–214.]
- 韦玉琼, 龙飞, 岳欣冉. 2022. 乡村振兴背景下农村碳排放变动及减排策略 [J]. *农业经济问题*, 43(9): 62–73. [Wei Y Q, Long F, Yue X R. 2022. Carbon emission changing and reduction strategy of agriculture and rural areas under the background of rural vitalization [J]. *Issues in Agricultural Economy*, 43(9): 62–73.]
- 伍国勇, 刘金丹, 杨丽莎. 2021. 中国农业碳排放强度动态演进及碳补偿潜力 [J]. *中国人口·资源与环境*, 31(10): 69–78. [Wu G Y, Liu J D, Yang L S. 2021. Dynamic evolution of China's agricultural carbon emission intensity and carbon offset potential [J]. *China Population, Resources and Environment*, 31(10): 69–78.]
- 熊宝玉. 2015. 住宅建筑全生命周期碳排放量测算研究 [D]. 深圳: 深圳大学. [Xiong B Y. 2015. Research on the measurement of carbon emissions in the whole life cycle of residential buildings [D]. Shenzhen: Shenzhen University.]
- 薛冰, 董书恒, 逯承鹏, 等. 2019. 乡村振兴政策与规划实践的可视化研究 [J]. *辽宁大学学报(自然科学版)*, 46(1): 1–9. [Xue B, Dong S H, Lu C P, et al. 2019. Visible comparison of local planning and policies on rural revitalization [J]. *Journal of Liaoning University (Natural Sciences Edition)*, 46(1): 1–9.]
- 杨彬如. 2014. 多维角度的中国低碳乡村发展研究 [D]. 兰州: 兰州大学. [Yang B R. 2014. A study on low-carbon rural development of China from multi-dimensional perspective [D]. Lanzhou: Lanzhou University.]
- 杨磊. 2013. 农村住宅全生命周期二氧化碳排放量评估研究——以河北省三河市杨庄镇农村住宅为例 [D]. 沈阳: 沈阳建筑大学. [Yang L. 2013. Studies of rural houses carbon dioxide emissions based on life cycle assessment—rural houses of Sanhe Yangzhuang Town of Hebei Province as an example [D]. Shenyang: Shenyang Jianzhu University.]
- 姚成胜, 钱双双, 李政通, 等. 2017. 中国省际畜牧业碳排放测度及时空演化机制 [J]. *资源科学*, 39(4): 698–712. [Yao C S, Qian S S, Li Z T, et al. 2017. Provincial animal husbandry carbon emissions in China and temporal-spatial evolution mechanism [J]. *Resources Science*, 39(4): 698–712.]
- 曾静静, 张志强, 曲建升, 等. 2012. 家庭碳排放计算方法分析评价 [J]. *地理科学进展*, 31(10): 1341–1352. [Zeng J J,

- Zhang Z Q, Qu J S, et al. 2012. Analysis and evaluation of methods for household carbon emissions calculation [J]. *Progress in Geography*, 31(10): 1341–1352.]
- 张保留, 吕连宏, 吴 静, 等. 2021. 农村居民生活碳达峰路径及对策 [J]. *环境科学研究*, 34(9): 2065–2075. [Zhang B L, Lü L H, Wu J, et al. 2021. Rural household carbon-peak path and countermeasures [J]. *Research of Environmental Sciences*, 34(9): 2065–2075.]
- 张小林. 1998. 乡村概念辨析 [J]. *地理学报*, 53(4): 365–371. [Zhang X L. 1998. On discrimination of rural definitions [J]. *Acta Geographica Sinica*, 53(4): 365–371.]
- 张志高, 袁 征, 李贝歌, 等. 2017. 基于投入视角的河南省农业碳排放时空演化特征与影响因素分解 [J]. *中国农业资源与区划*, 38(10): 152–161. [Zhang Z G, Yuan Z, Li B G, et al. 2017. Spatial-temporal evolution characteristics and factor decomposition on agricultural carbon emissions in Henan Province [J]. *Chinese Journal of Agricultural Resources and Regional Planning*, 38(10): 152–161.]
- 赵荣钦, 黄贤金, 钟太洋. 2010. 中国不同产业空间的碳排放强度与碳足迹分析 [J]. *地理学报*, 65(9): 1048–1057. [Zhao R Q, Huang X J, Zhong T Y. 2010. Research on carbon emission intensity and carbon footprint of different industrial spaces in China [J]. *Acta Geographica Sinica*, 65(9): 1048–1057.]
- 中华人民共和国住房和城乡建设部, 国家市场监督管理总局. 2019. GB/T 51366—2019, 建筑碳排放计算标准 [S]. 北京: 中国建筑工业出版社. [Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China, State Administration for Market Regulation. 2019. GB/T 51366—2019, standard for building carbon emission calculation [S]. Beijing: China Architecture & Building Press.]
- 中交公路规划设计院有限公司. 2011. JTG D40—2011, 公路水泥混凝土路面设计规范 [G]. 北京: 人民交通出版社: 4–5. [CCCC Highway Consultants Co., Ltd. 2011. JTG D40—2011, specifications for design of highway cement concrete pavement [G]. Beijing: China Communications Press: 4–5.]
- 周 扬, 郭远智, 刘彦随. 2019. 中国乡村地域类型及分区发展途径 [J]. *地理研究*, 38(3): 467–481. [Zhou Y, Guo Y Z, Liu Y S. 2019. Areal types and their development paths in rural China [J]. *Geographical Research*, 38(3): 467–481.]
- 周志花. 2018. 利用 LCA 法核算农作物生产碳足迹 [D]. 北京: 中国农业科学院. [Zhou Z H. 2018. Estimates of carbon footprint of crop production by life cycle assessment (LCA) method [D]. Beijing: Chinese Academy of Agricultural Sciences.]
- 朱文婷, 韦保仁. 2011. 苏州市生活垃圾处理碳足迹核查 [J]. *环境科学研究*, 24(7): 828–834. [Zhu W T, Wei B R. 2011. Carbon footprint calculation for disposal of household solid waste in Suzhou [J]. *Research of Environmental Sciences*, 24(7): 828–834.]
- 左红娟, 曹 辉, 石彦召. 2017. 河南省小麦—玉米典型农田生态系统碳源/汇变化分析 [J]. *农业科技通讯*, (7): 63–65. [Zuo H J, Cao H, Shi Y. 2017. Change of carbon source/sink in typical wheat—maize farmland ecosystem in Henan Province [J]. *Bulletin of Agricultural Science and Technology*, (7): 63–65.]
- Han M Y, Yao Q H, Lao J M, et al. 2020. China's intra- and inter-national carbon emission transfers by province: a nested network perspective [J]. *Science China Earth Sciences*, 63(6): 852–864.
- Huang X M, Chen C Q, Qian H Y, et al. 2017. Quantification for carbon footprint of agricultural inputs of grains cultivation in China since 1978 [J]. *Journal of Cleaner Production*, 142: 1629–1637.
- IPCC. 2006. 2006 IPCC guidelines for national greenhouse gas inventories: energy [R]. Kanagawa: Institute for Global Environmental Strategies.
- IPCC. 2014. Climate change 2014: synthesis report. contribution of working groups , and to the fifth assessment report of the intergovernmental panel on climate change [R]. Cambridge: Cambridge University Press: 86–87.
- Lal R. 2004. Carbon emission from farm operations [J]. *Environment International*, 30(7): 981–990.
- Wei Y M, Liu L C, Fan Y, et al. 2007. The impact of lifestyle on energy use and CO₂ emission: an empirical analysis of China's residents [J]. *Energy Policy*, 35(1): 247–257.
- West T O, Marland G. 2002. A synthesis of carbon sequestration, carbon emissions, and net carbon flux in agriculture: comparing tillage practices in the United States [J]. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 91(1/2/3): 217–232.