

DOI: 10.12357/cjea.20240549

CSTR: 32371.14.cjea.20240549

毛戈平, 孟婷, 王娜, 李想. 基于土地利用的乡村尺度碳排放: 核算方法与微观实证[J]. 中国生态农业学报(中英文), 2025, 33(4): 619–631

MAO G P, MENG T, WANG N, LI X. Carbon emissions in rural areas based on land use types: Estimation methods and micro-empirical evidence[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2025, 33(4): 619–631

基于土地利用的乡村尺度碳排放: 核算方法与 微观实证*

毛戈平¹, 孟婷^{1**}, 王娜², 李想³

(1. 中国农业大学经济管理学院/全球食物经济与政策研究院/北京食品安全政策与战略研究基地 北京 100083; 2. 中国农业大学马克思主义学院 北京 100083; 3. 中国农业大学信息与电气工程学院 北京 100083)

摘要: 促进农业农村绿色发展是推进乡村振兴和应对气候变化挑战的重要路径, 乡村碳核算是推动农村减排固碳与高质量发展的重要基础。本文基于耕地、林地、养殖场、水域、居民点和其他土地利用类型, 全面考虑乡村生产与生活多个子类别, 详细构建乡村尺度碳核算清单, 系统梳理核算方法。此外, 以重庆市巴南区自力村为例, 结合地域特征选取排放系数, 对乡村场景下碳排放和碳吸收进行核算, 并提出乡村减碳对策。研究表明: 1) 该碳核算清单与核算方法可以根据核算结果横向比较不同类别碳源与碳汇, 具有实操性与普适性。2) 乡村中耕地、养殖场和居民点等为主要碳源, 其中居民点是最主要的碳排放土地利用类型; 林地和水域为碳汇, 林地在碳吸收中占据主导地位。3) 土地利用类型综合的乡村具有很强的碳汇潜力, 以重庆市自力村为例, 2023 年该村综合年碳汇为 3 722.153 t。根据核算方法与乡村尺度碳排放现状, 本研究从丰富乡村碳核算数据库、巩固森林碳汇与助力耕地和居民点升级减排以及促进地类间协调耦合 3 个方面, 提出微观乡村尺度低碳实现路径。

关键词: 乡村碳排放; 乡村碳汇; 土地利用类型; 乡村碳中和

中图分类号: F323; X321

Carbon emissions in rural areas based on land use types: Estimation methods and micro-empirical evidence*

MAO Geping¹, MENG Ting^{1**}, WANG Na², LI Xiang³

(1. College of Economics and Management, China Agricultural University / Academy of Global Food Economics and Policy / Beijing Food Safety Policy & Strategy Research Base, Beijing 100083, China; 2. College of Marxism, China Agricultural University, Beijing 100083, China; 3. College of Information and Electrical Engineering, China Agricultural University, Beijing 100083, China)

Abstract: Promoting green development of agricultural and rural areas is crucial for advancing rural revitalization and addressing climate change challenges. Given that the countryside serves as a fundamental unit of agricultural production and living activities, rural carbon accounting has become a vital foundation for promoting rural emission reduction, carbon sequestration, and high-quality development. First, the paper reconstructed a rural-scale carbon accounting inventory based on six major land-use types: arable land,

* 国家自然科学基金项目 (72103188, 72333003) 和国家自然科学基金国际 (地区) 合作与交流项目 (72061147002) 资助

** 通信作者: 孟婷, 主要研究方向为农业经济与环境政策。E-mail: tmeng@cau.edu.cn

毛戈平, 主要研究方向为农业经济与环境政策。E-mail: maogepingcau@163.com

收稿日期: 2024-09-06 接受日期: 2024-11-18

* The study was supported by the National Natural Science Foundation of China (72103188, 72333003) and the National Natural Science Foundation of China for International Cooperation and Exchange (72061147002).

** Corresponding author, E-mail: tmeng@cau.edu.cn

Received Sep. 6, 2024; accepted Nov. 18, 2024

forest land, livestock farm, waters, settlement, and other land use types, and comprehensively incorporated and meticulously examined multiple subcategories of rural production and life. The accounting methods and specific formulas for each carbon source and sink under the first to third inventory levels were systematically sorted. This accounting method covered a wide range of categories, fully considered the complexity and unity of the rural system, and enabled a horizontal comparison of carbon sources and sinks in rural carbon accounting. Then, taking Zili Village in the Banan District of Chongqing City as a typical case study, we selected the emission coefficients in line with the regional characteristics, combined the field research data with some statistical yearbook data, and carried out an accounting and detailed analysis of carbon emissions and carbon sequestration in rural scenarios. The case study provides micro research support for rural carbon accounting, and is of great significance at the policy level for precise policymaking and the demonstration and popularization of rural carbon accounting methods. The study showed that 1) based on detailed accounting results, the carbon accounting list and the accounting method proposed in this paper could calculate the specific values of carbon sources and sinks of different categories and made horizontal comparisons based on the accounting results, which was practical and universally applicable. 2) Arable land, livestock farm, settlement, and other land use types were the main sources of carbon emissions, with settlement being the most important type of carbon-emitting land use, accounting for 60.2% of the total emissions from carbon-emitting land use types. Forest land and waters were carbon sink land use types, and forest land dominated carbon sequestration, accounting for 84.0% of the total carbon sequestration of carbon sink in the accounting example. 3) At the micro scale, villages with comprehensive land use types had a strong carbon sink potential. The comprehensive annual carbon sink of the Zili Village in 2023 was 3 722.153 t. Finally, based on the current status of the accounting methodology and the results of village carbon accounting, this study proposed policy recommendations and low-carbon realization pathways at the micro-village scale from three aspects. 1) Enriching the village carbon accounting database and optimizing quantitative accounting methods. 2) Giving full play to the potential of carbon sink of forest land to help enhance the emission reduction of major carbon sources, particularly focusing on the carbon sources and sinks of arable land and settlement. 3) Fully exploiting the advantages of each land use type to promote coordinated coupling between land types.

Keywords: rural carbon emissions; rural carbon sink; land-use type; rural carbon neutrality

推进农业农村绿色发展是推进乡村振兴和应对气候变化挑战的重要路径^[1],乡村碳达峰、碳中和是国家实现“双碳”目标的重要领域。农业活动是二氧化碳(CO₂)、甲烷(CH₄)和氧化亚氮(N₂O)等温室气体的重要来源,其排放的温室气体量占全国排放总量的7.9%^[2]。同时,农业领域因农作物光合作用与植被和土壤等固碳途径而兼具碳汇功能,通过增强碳吸收功能和弱碳排放减少生产过程温室气体排放的方式发展低碳农业,可推动农业农村减排固碳,进而为“双碳”目标实现作出贡献^[3-4]。乡村是构成农业生产活动的基础单位与主要单元,因此,针对乡村领域展开碳核算研究有利于掌握乡村农业活动与经济活动各环节的碳排放水平与碳吸收能力,为推动乡村低碳建设与农业农村现代化的精准规划与决策奠定重要基础。

已有的村庄尺度碳核算研究主要围绕核算体系构建方法的优化展开。乡村碳核算中温室气体排放量由排放源的活动水平与排放系数的乘积之和得到,其中,排放系数的选取结合联合国政府间气候变化专门委员会(IPCC)^[5]系数与地方特征。以村为单位展开碳核算,方法可分为“来源核算法”与“地类核算法”两大核算体系。第一种是以碳源(汇)来源划分的“来源核算法”,将具体乡村生产生活类别作为碳排

放/吸收来源,分部门核算。在乡村生产和生活两方面^[6-7]基准上,结合村庄特征与特色,从建筑、交通和能源等不同部门对平原、山地和丘陵等地貌型乡村^[8]、城中村^[9]和空心型^[10]等发展特征型乡村以及矿址型^[11]、旅游型^[12]、城郊型^[13]和混合型^[14-15]等产业型村庄进行碳核算,并进一步讨论乡村碳排放与减排政策目标^[16]与乡村可持续^[17]的关系。第二种是以用地类型(地类)划分的“地类核算法”,依据土地用途划分具体用地类型分地类核算。以《土地利用现状分类》(GB/T 21010—2017)为参考^[18],结合农村具体情况,将林地、草地和湿地作为碳汇用地,耕地、建设用地和其他土地作为碳源,核算村级净排放^[19-21]。此外,一些研究更加切合实际地将碳排放用地细分为产业用地、居住用地、交通用地和商业服务用地等^[22-23]。

尽管乡村尺度碳核算框架与碳排放系数已初步建立,但乡村微观场景下的碳核算实证案例研究非常缺乏。已有研究所涵盖的排放活动较为笼统,缺乏细致归类与农业规模和地理位置差异等因素的考虑,鲜有基于土地利用类型,将农业活动与生产生活置于同一框架下,对每一地类的具体排放或吸收源头进行直观因素分析。因此,本研究依据土地利用类型建立乡村尺度碳核算清单,以重庆市巴南区自

力村为实际案例,选取符合自力村地域特征的排放系数,对乡村尺度碳汇与碳源进行核算,以此衡量特定乡村碳排放的真实水平,为乡村碳核算提供微观研究支撑,对乡村精准施策、碳核算方法示范推广和助推农业可持续具有重要意义。

相较于已有研究,本文可能的边际贡献体现在以下两方面。一是从土地利用角度重新构建乡村碳核算体系,通过对重庆市巴南区自力村的碳核算,为基于土地利用类型的乡村碳核算方法提供实践路径,同时也为明晰乡村低碳定位和因地制宜发展提供参考。二是在碳汇碳源研究基础上,提出丰富乡村核算数据库,巩固森林碳汇潜力,助力耕地与居民点升级减排,促进地类间协调耦合,从数据优化与减排/增汇两方面为乡村碳中和建设提供具体可行方法与有益思路。

1 研究方法

1.1 基于土地利用的乡村尺度碳核算框架

本文构建了乡村尺度碳核算清单(表1),核算对象为温室气体,以CO₂排放为主,同时包括农作物种植及畜禽养殖等过程中的CH₄与N₂O排放。以独立行政村为边界划定地理范围,以耕地、林地、养殖场、水域、居民点及其他地类作为一级地类,核算发生在地理边界内由乡村生产生活需求引起的居民直接或间接碳排放。排放类别的选取遵循系统性与科学性原则,充分考虑乡村系统的复杂性与统一性,结合多个生活生产部门,细化各土地类型中子系统的具体碳源(汇),力求真实反映乡村碳排放的基本特征。清单具体构成见表1。本文的主要目标之一是提供乡村碳核算方法(图1)与体系,因此该核算清单尽可能全面囊括农村生产生活的各项活动,但在实

表1 乡村尺度碳核算清单
Table 1 Carbon accounting inventory at rural scale

一级分类 Primary classification	二级分类 Secondary classification	三级分类 Tertiary classification
耕地 Arable land	农作物碳吸收 Crop carbon sequestration (C_i)	农作物光合作用碳吸收 Carbon sequestration of crop photosynthesis
		化肥投入碳排放 Carbon emissions from fertilizer inputs
	农用物资投入 Agricultural material input (T_{ii})	农药投入碳排放 Carbon emissions from pesticide inputs
		农膜投入碳排放 Carbon emissions from agricultural film inputs
	种植业活动 Planting activity (T_{i2})	农用柴油投入碳排放 Carbon emissions from agricultural diesel inputs
		农地翻耕碳排放 Carbon emissions from ploughing of agricultural land
		农业灌溉碳排放 Carbon emissions from agricultural irrigation
		农作物土壤N ₂ O排放 Crop soil N ₂ O emissions
	农作物土壤 Crop soil (T_{i3})	土壤呼吸CO ₂ 排放 Soil respiration CO ₂ emissions
		水稻CH ₄ 排放 Paddy CH ₄ emissions
	水稻田 Paddy field (T_{i4})	林地生物质碳储量变化量(包括地上、地下生物量) Change in biomass carbon stocks in forest land (including above-ground and below-ground biomasses)
		林下灌木层碳储量变化量 Change in carbon stocks in the understory shrub layer
林地 Forest land	生物量碳库 Biomass carbon pool (C_{B1})	林下草本层碳储量变化量 Change in carbon stocks in herbaceous understory
		枯死木碳储量变化量 Change in carbon stocks in dead wood
	死有机质碳库 Dead organic matter carbon pool (C_{B2})	枯落物碳储量变化量 Change in carbon stocks in dead litter
		土壤有机质碳库 Soil organic matter carbon pool (C_s)
	土壤有机质碳库 Soil organic matter carbon pool (C_s)	Change in soil organic matter carbon stocks
		畜禽肠道CH ₄ 排放 Livestock and poultry enteric CH ₄ emissions
	畜禽肠道发酵 Livestock and poultry enteric fermentation (C_{a1})	畜禽粪便CH ₄ 排放 Livestock and poultry faecal CH ₄ emissions
		畜禽粪便N ₂ O排放 Livestock and poultry faecal N ₂ O emissions
	畜禽排泄物处理 Livestock and poultry excreta treatment (C_{a2})	
养殖场 Livestock farm	畜禽排泄物处理 Livestock and poultry excreta treatment (C_{a2})	

续表 1

一级分类 Primary classification	二级分类 Secondary classification	三级分类 Tertiary classification
水域 Waters	河湖水面 River and lake water surface (C_{w1})	保持土地利用类型: 碳吸收 Maintain land use type: carbon sequestration 转变土地利用类型: 水面移入/出碳吸收/排放 Shift land use type: carbon sequestration / emissions of water surface move in / out
	泥炭沼泽 Peat bog (C_{w2})	保持土地利用类型: 碳吸收 Maintain land use type: carbon sequestration 转变土地利用类型: 水面移入/出碳吸收/排放 Shift land use type: carbon sequestration / emissions of water surface move in / out
	滩涂盐沼 Mudflat salt marsh (C_{w3})	保持土地利用类型: 碳吸收 Maintain land use type: carbon sequestration 转变土地利用类型: 水面移入/出碳吸收/排放 Shift land use type: carbon sequestration / emissions of water surface move in / out
居民点 Settlement	人类呼吸 Human respiration (C_{hr})	人类呼吸直接碳排放 Direct carbon emissions from human respiration
	能源燃料消费 Energy fuel consumption (C_{en})	生活能源燃料直接碳排放 Direct carbon emissions from domestic energy fuels
	热力消费 Heat consumption (C_h)	生活热力消费直接碳排放 Direct carbon emissions from domestic heat consumption
	电力消费 Electricity consumption (C_{el})	生活电力消费直接碳排放 Direct carbon emissions from domestic electricity consumption
	房屋建设 House construction (C_{ho})	房屋建设耗材间接碳排放 Indirect carbon emissions from house construction consumables
	交通运输 Transport (C_{tr})	生活交通工具间接碳排放 Indirect carbon emissions from domestic transport
	食品消费 Food consumption (C_{fo})	食品消费间接碳排放 Indirect carbon emissions from food consumption
其他 Others	废弃物处理 Waste disposal (C_{w})	生活垃圾填埋间接碳排放 Indirect carbon emissions from domestic waste landfill 生活垃圾焚烧间接碳排放 Indirect carbon emissions from domestic waste incineration
	商品能源消费 Commodity energy consumption (T_{ec})	工业能源碳排放 Industrial energy carbon emissions
	路面布局 Road layout (T_{rlc})	路面建设碳排放 Carbon emissions from road construction
	固体废弃物排放 Solid waste emission (T_{gk})	其他固体废弃物焚烧碳排放 Carbon emissions from other solid waste incineration

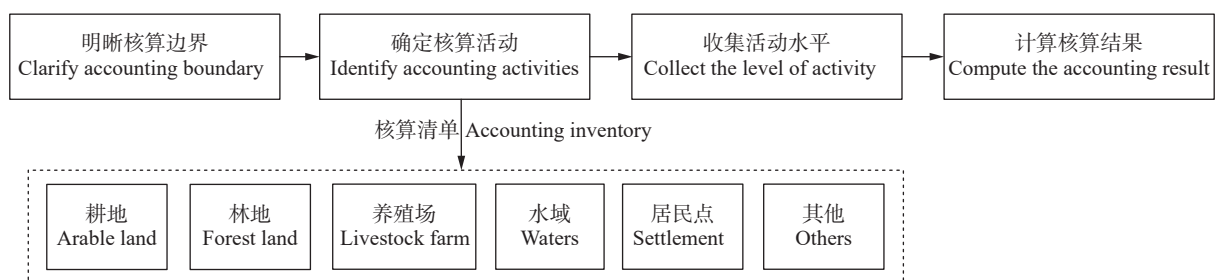


图 1 乡村尺度碳核算方法

Fig. 1 Carbon accounting methodology at rural scale

际应用中需要根据具体情况对核算内容进行选择与调减, 并注意土地利用变化带来的碳排放/吸收。

1.2 碳汇/碳排放核算方法及步骤

本研究基于六大土地利用类型划分, 综合“来源核算法”与“地类核算法”, 以具体碳汇和碳源为核算类别, 系统全面地进行乡村碳核算, 不仅细致呈现了乡村碳排放与吸收源头, 同时能够以土地利用类型

反映区域排放特征。

1.2.1 耕地碳核算

选用净碳汇法计算耕地地块类型的碳汇^[24]。一方面, 农作物在全生长周期中通过光合作用对碳进行吸收^[25-26]; 另一方面, 农用物资投入、种植业活动、农作物土壤和水稻田为 4 类农业活动/耕地类型主要碳排放。耕地碳汇计算如下所示:

$$N_i = C_i - T_i \quad (1)$$

$$C_i = \sum_{i=1}^n C_{ti} = \sum_{i=1}^n CF_i \times Y_i \times \frac{(1 - W_i)}{H_i} \quad (2)$$

$$T_i = \sum_{j=1}^m T_{ij} = \sum_{j=1}^m E_j \times \delta_j \quad (3)$$

式中: N_i 为耕地碳汇; C_i 为耕地总碳吸收量; T_i 为耕地总碳排放; i 为作物类型; CF 为碳吸收率; Y 为经济产量; W 为含水率; H 为经济系数; j 为碳排放源; E 为碳排放源总投入量; δ 为排放系数。

相关核算系数包括各类作物的经济系数、含水率、碳吸收率^[25]、作物土壤 N_2O 排放系数^[27-30]、水稻田 CO_2 ^[24,31] 与 CH_4 排放系数^[32]、柴油和灌溉排放系数^[33-34], 这些系数来自相关参考文献; 化肥、农药、农膜和农地翻耕的排放系数分别来自美国橡树岭国

家实验室 (ORNL)、南京农业大学农业资源与生态环境研究所和中国农业大学。

1.2.2 林地碳核算

林地和其他生物质碳储量按照生物量碳库、死有机质碳库和土壤有机质碳库计算。本文结合现有研究^[35-36], 并参考《森林生态系统碳储量计量指南》(LY/T 2988—2018)、《造林项目碳汇计量监测指南》(LY/T 2253—2014) 以及《竹林碳计量规程》(LY/T 3196—2020) 展开核算。第一步是计算碳储量。乔木林地、疏林地和其他生物质的生物量碳库采用生物量扩展因子法计算, 乔木林下灌木层、枯落物和枯死木碳储量采用生物量关系模型计算, 竹林地、灌木林地和林下草本层采用单位面积生物量法计算, 林地土壤和其他生物质土壤采用碳密度法计算。具体计算公式见表 2。第二步是根据林地利用类型计算碳储量年变化量。对一直为林地的土地采用库差

表 2 林地碳核算公式
Table 2 Forest land carbon accounting formulas

核算类别 Accounting category	公式 Formula	符号含义及单位 Symbol meaning and unit
林地碳储量 Carbon stock in forest land		
乔木林地、疏林地和其他生物质 Arborvitae woodland, open woodland, and other biomass	$C_{Bi} = \sum_{i=1}^n [V_i \times BEF_i \times D_i \times (1 + R_i) \times CF_i]$	i : 树种; C_{Bi} : 碳储量, t; V_i : 蓄积量, m^3 ; BEF_i : 生物量扩展因子; D_i : 木材基本密度, $t \cdot m^{-3}$; R_i : 根茎比; CF_i : 含碳率 i : tree species; C_{Bi} : carbon stock, t; V_i : volume of storage, m^3 ; BEF_i : biomass expansion factor; D_i : wood bulk density, $t \cdot m^{-3}$; R_i : root to stem ratio; CF_i : carbon content
乔木林林下灌木层、枯落物和枯死木 Understory shrub layer of arbor forest, dead litter, and dead wood	$C_B = \sum_{i,j} [f(N_{i,j}) \times A_{i,j} \times CF_{i,j}]$	j : 森林类型; i : 碳库类型; C_B : 碳储量, Mg; $f(N_{i,j})$: 生物量与乔木层蓄积量关系模型; $N_{i,j}$: 乔木层单位面积蓄积量, $m^3 \cdot hm^{-2}$; $A_{i,j}$: 面积, hm^2 ; $CF_{i,j}$: 含碳率 j : forest type; i : carbon pool type; C_B : carbon stock, Mg; $f(N_{i,j})$: model of the relationship between biomass and tree layer stock; $N_{i,j}$: stock per unit area of tree layer, $m^3 \cdot hm^{-2}$; $A_{i,j}$: area, hm^2 ; $CF_{i,j}$: carbon content
竹林地、灌木林地和林下草本层 Bamboo woodland, shrubland, and understorey herb layer	$C_B = \sum_{i,j} (B_{i,j} \times A_{i,j} \times CF_{i,j})$	j : 森林类型; i : 碳库类型; C_B : 碳储量, Mg; $B_{i,j}$: 碳库单位面积生物量, $Mg \cdot hm^{-2}$; $A_{i,j}$: 面积, hm^2 ; $CF_{i,j}$: 含碳率 j : forest type; i : carbon pool type; C_B : carbon stock, Mg; $B_{i,j}$: biomass per unit area of carbon pool, $Mg \cdot hm^{-2}$; $A_{i,j}$: area, hm^2 ; $CF_{i,j}$: carbon content
乔木林地、竹林地、灌木林地、其他 林地和其他生物质土壤 Soils of arbor forest land, bamboo woodland, shrubland, other woodland, and other biomass	$C_{s,i} = A_i \times D_i$	i : 森林类型; $C_{s,i}$: 林地土壤碳储量, Mg; A_i : 林地土壤面积, hm^2 ; D_i : 土壤有机碳密度, $Mg \cdot hm^{-2}$ i : forest type; $C_{s,i}$: forest land soil carbon stock, Mg; A_i : forest land soil area, hm^2 ; D_i : soil organic carbon density, $Mg \cdot hm^{-2}$
林地碳汇量 Carbon sink of forest land		
土壤 Soil	$\Delta C_{FL_SOC} = \sum_{k=1}^n \sum_{m=1}^n [A_{FL,mk} \times (SOC_k - SOC_m) / 20]$	ΔC_{FL_SOC} : 土壤碳储量变化量, Mg; $A_{FL,mk}$: 间隔期内 m 类林地与 k 类林地间的转化总面积, hm^2 ; SOC_k 、 SOC_m : 转化后 k 类、转化前 m 类林地的平均土壤有机碳密度, $Mg \cdot hm^{-2}$ ΔC_{FL_SOC} : change in soil carbon stock, Mg; $A_{FL,mk}$: total area converted between forest land of category m and k during the interval, hm^2 ; SOC_k and SOC_m : average soil organic carbon density of forest land of category k after conversion and category m before conversion, $Mg \cdot hm^{-2}$
其他生物质(散生木、四旁树) Other biomass (scattered wood and quadrangular trees)	$\Delta C_{TOF} = (C_{TOF,t2} - C_{TOF,t1}) / (t2 - t1)$	ΔC_{TOF} : 其他生物质碳储量变化量, Mg; $C_{TOF,t2}$ 、 $C_{TOF,t1}$: $t2$ 和 $t1$ 两时期其他生物质碳储量, Mg ΔC_{TOF} : change in biomass carbon stocks of other biomass, Mg; $C_{TOF,t2}$, $C_{TOF,t1}$: biomass carbon stocks of other biomass in periods of $t2$ and $t1$, respectively, Mg

枯落物、枯死木、林下灌木层和林下草本层的 $CF_{i,j}$ 分别取 0.42、0.5、0.465 和 0.45, 紫色土的 D_i 取 $126.6 Mg \cdot hm^{-2}$ 。 $CF_{i,j}$ of dead litter, dead wood, understory shrub layer and understory herb layer are taken as 0.42, 0.5, 0.465, and 0.45, respectively. D_i of purple soil is taken as $126.6 Mg \cdot hm^{-2}$.

别法计算前后两期碳储量年变化量,由二级地类变化引起的土壤碳储量变化计算见表 2 中“土壤”的计算方法。类似地,对转化为林地的土地也采用库差别法计算前后期碳储量年变化量^[35]。相关核算系数包括树种生物量扩展因子、木材基本密度、根茎比和含碳率、林下草本层单位面积生物量与平均含碳率和土壤有机碳密度,参数模型为以乔木层单位面积蓄积量构建的林下灌木层生物量计量模型、枯死木和枯落物碳库计量模型^[35-36]。

1.2.3 养殖场碳核算

养殖场(畜牧业)碳排放量的估算涵盖多个畜种,如猪、牛、羊、鸡等。核算内容涉及畜禽肠道发酵 CH₄ 排放、畜禽排泄物处理过程中产生的 CH₄ 和 N₂O 排放,其具体计算公式如下所示。

$$C_a = \sum_{m=1}^n C_{am} = \sum_{m=1}^n [6.82 \times T_m \times (\gamma_m + \varepsilon_m) + 81.27 \times T_m \times \beta_m] \quad (4)$$

式中: C_a 为养殖场碳排放, kg; C_{am} 为 m 类畜禽碳排放量, kg; T_m 为 m 类畜禽年均饲养量, head; γ_m 、 ε_m 和 β_m 分别为 m 类牲畜的肠道发酵 CH₄、粪便排放 CH₄ 和粪便排放 N₂O 的年排放系数, kg·head⁻¹^[37]。相关的年排放系数为畜禽各排放来源的 CH₄ 与 N₂O 排放系数^[38]。

畜禽年均饲养量的计算参考闵继胜等^[39]的方法。出栏率 ≥ 1 和 < 1 的畜禽年均饲养量分别采用式 (5) 和式 (6) 进行计算。

$$T_m = D_{am} \times \frac{M_m}{365} \quad (5)$$

$$T_m = \frac{C_{mt} + C_{m(t-1)}}{2} \quad (6)$$

式中: T_m 为 m 类畜禽年均饲养量, head; D_{am} 为 m 类畜禽平均饲养周期, d; M_m 为 m 类畜禽年出栏量, head; C_{mt} 和 $C_{m(t-1)}$ 分别为 t 和 $t-1$ 期畜禽年末存栏量, head。

1.2.4 水域碳核算

按照土地利用类型将水域分为保持土地利用类型的水面和转变土地利用类型的水面两类,运用排放系数法计算,见式 (7):

$$C_w = \sum_{i=1}^n C_{wi} = \sum_{i=1}^n A_i \times \theta_i \quad (7)$$

式中: C_w 为区域水域年碳汇, t; i 为水域类型; A 为水域面积, hm²; θ 为水域年固碳系数, t·hm⁻², 具体取值参考水域碳吸收或排放系数^[40]。

1.2.5 居民点碳核算

居民点碳排放由居民家庭直接碳排放和间接碳排放两部分构成^[41],均采用排放系数法计算。相关核算系数包括人类呼吸^[42]、直接与间接能源消费^[5,41]、建筑耗材^[43-44]和交通工具^[7]的碳排放系数以及食物消费直接排放因子^[45-46]。具体计算公式见表 3。

1.2.6 其他碳核算

其他碳排放主要来自商品能源消费、路面布局和固体废弃物排放 3 个方面。其中,商品能源消费与固体废弃物排放碳排放计算参考居民点的计算方法,采用排放系数法计算路面布局碳排放。

$$C_{lc} = T_{elc} + T_{rlc} + T_{glc} \quad (8)$$

$$T_{rlc} = \frac{\sum_{i=1}^n M_i \times EF_i}{40} \times \frac{12}{44} \quad (9)$$

式中: C_{lc} 为其他碳排放总量, t; T_{elc} 为工业生产消耗的商品能源的碳排放总量, t; T_{rlc} 为路面布局对应碳排放总量, t; T_{glc} 为固体废弃物处理对应碳排放总量, t; i 为道路类型; M_i 为道路长度, km; EF_i 为道路二氧化碳排放系数, t·km⁻¹; 40 为道路使用年限, a^[47]。

1.2.7 乡村尺度碳核算汇总

$$T_{lc} = N_t + N_f - C_a + C_w - C_g - C_{lc} \quad (10)$$

式中: N_t 为耕地碳汇; N_f 为林地碳汇; C_a 为养殖场碳排放; C_w 为水域碳汇; C_g 为居民点碳排放; C_{lc} 为其他碳排放。计算结果为正则碳汇,为负则为碳排放。为方便核算,在案例计算时均转化为 CO₂ 核算,IPCC 第四次评估报告 (2006 年) 中指出, 1 t N₂O 和 1 t CH₄ 所引发的温室效应与 298 t CO₂ (81.27 t C) 和 25 t CO₂ (6.82 t C) 所产生的温室效应相当。

2 案例选取与数据

2.1 案例选取

本研究选取重庆市巴南区自力村为案例,该村具有丰富的自然资源与碳汇潜力,村内耕地、林地、养殖场、水域和居民点等土地利用类型完备,适合作为代表性乡村,用于基于乡村土地利用类型的碳核算案例研究。对该村展开碳核算,一方面可以通过具体微观实例来验证核算方法的可行性与应用性,另一方面可以准确摸清并考察重庆市土地利用完备型村落的碳源与碳汇现状。

案例点自力村所处的巴南区是重庆市主城九区之一,地处四川盆地东部和主城区南部,是极少数典型的“大城市+大乡村+大森林”的区县,因此该区有望在全市率先建立区域内部碳平衡,形成“零碳

表3 居民点碳核算公式
Table 3 Settlement carbon accounting formulas

核算类别 Accounting category	公式 Formula	符号含义及单位 Symbol meaning and unit
居民点碳排放 Settlement carbon emissions	$C_g = C_d + C_{id}$	C_g : 居民家庭碳排放, t; C_d : 直接碳排放, t; C_{id} : 间接碳排放, t C_g : residential household carbon emissions, t; C_d : direct carbon emissions, t; C_{id} : indirect carbon emissions, t
直接碳排放 Direct carbon emissions	$C_d = C_{br} + C_{en} + C_h + C_{el}$	C_d : 直接碳排放, t; C_{br} : 人类呼吸碳排放, t; C_{en} : 能源燃料消费碳排放, t; C_h : 热力消费碳排放, t; C_{el} : 电力消费碳排放, t C_d : direct carbon emissions, t; C_{br} : carbon emissions from human respiration, t; C_{en} : carbon emissions from energy fuel consumption, t; C_h : carbon emissions from heat consumption, t; C_{el} : carbon emissions from electricity consumption, t
人类呼吸 Human respiration	$C_{br} = C_p \times P \times 10^{-3} \times 12/44$	C_{br} : 人类呼吸碳排放, t; C_p : 人均呼吸年CO ₂ 排放, kg·cap ⁻¹ ; P : 区域人口总量 C_{br} : carbon emissions from human respiration, t; C_p : average annual CO ₂ emissions of respiratory per capita, kg·cap ⁻¹ ; P : total regional population
能源燃料消费 Energy fuel consumption	$C_{en} = \sum_{i=1}^n (F_i \times NCV_i \times CC_i \times O_i) \times 10^4$	i : 能源类型; C_{en} : 能源燃料消费碳排放, t; F_i : 能源燃料实际消耗量, $\times 10^4$ t; NCV_i : 低位发热值, TJ·(10 ⁴ t) ⁻¹ ; CC_i : 单位热值含碳量, t·TJ ⁻¹ ; O_i : 碳氧化率, % i : energy type; C_{en} : carbon emissions from energy fuel consumption, t; F_i : actual consumption of energy fuel, $\times 10^4$ t; NCV_i : low level heating value, TJ·(10 ⁴ t) ⁻¹ ; CC_i : carbon content per unit heat value, t·TJ ⁻¹ ; O_i : carbon oxidation rate, %
热力消费 Heat consumption	$C_h = HC_h \times EF_h \times 10^4 \times 12/44$	C_h : 热力消费碳排放, t; HC_h : 热力消费量, $\times 10^{10}$ kJ; EF_h : 热力CO ₂ 排放系数, $\times 10^4$ t·(10 ¹⁰ kJ) ⁻¹ C_h : carbon emissions from heat consumption, t; HC_h : heat consumption, $\times 10^{10}$ kJ; EF_h : CO ₂ emission coefficient of heat, $\times 10^4$ t·(10 ¹⁰ kJ) ⁻¹
电力消费 Electricity consumption	$C_{el} = EC_{el} \times EF_{el} \times 10^4 \times 12/44$	C_{el} : 电力消费碳排放, t; EC_{el} : 电力消费量, $\times 10^8$ kWh; EF_{el} : 电力CO ₂ 排放系数, $\times 10^4$ t·(10 ⁸ kWh) ⁻¹ C_{el} : carbon emissions from electricity consumption, t; EC_{el} : electricity consumption, $\times 10^8$ kWh; EF_{el} : CO ₂ emission coefficient of electricity, $\times 10^4$ t·(10 ⁸ kWh) ⁻¹
间接碳排放 Indirect carbon emissions	$C_{id} = C_{ho} + C_{tr} + C_{fo} + C_{ru}$	C_{id} : 间接碳排放, t; C_{ho} : 房屋建设碳排放, t; C_{tr} : 交通运输碳排放, t; C_{fo} : 食品消费碳排放, t; C_{ru} : 废弃物处理碳排放, t C_{id} : indirect carbon emissions, t; C_{ho} : carbon emissions from house construction, t; C_{tr} : carbon emissions from transport, t; C_{fo} : carbon emissions from food consumption, t; C_{ru} : carbon emissions from waste treatment, t
房屋建设 House construction	$C_{ho} = \sum_{k=1}^3 \sum_{l=1}^n CM_l \times Area_k \times \frac{EF_l}{Year_k} \times 10^{-3} \times 12/44$	l : 材料类型; k : 房屋类型; C_{ho} : 房屋建设碳排放, t; CM_l : 单位面积材料消耗量, kg·m ⁻³ ; $Area_k$: 建设面积, m ² ; EF_l : 材料CO ₂ 排放系数, kg·kg ⁻¹ ; $Year_k$: 房屋使用年限 l : material type; k : house type; C_{ho} : carbon emissions from house construction, t; CM_l : material consumption per unit area, kg·m ⁻³ ; $Area_k$: house construction area, m ² ; EF_l : CO ₂ emission coefficient of material, kg·kg ⁻¹ ; $Year_k$: year of house service life
交通运输 Transport	$C_{tr} = \sum_{i=1}^n L_{ti} \times EF_{ti} \times 10^{-3} \times 12/44$	i : 交通工具类型; C_{tr} : 交通运输碳排放, t; L_{ti} : 年耗油量, L; EF_{ti} : 交通运输CO ₂ 排放系数, kg·L ⁻¹ i : transportation type; C_{tr} : carbon emissions from transport, t; L_{ti} : annual fuel consumption, L; EF_{ti} : CO ₂ emission coefficient of transportation, kg·L ⁻¹
食品消费 Food consumption	$C_{fo} = \sum_{i=1}^n N_{fi} \times EF_{fi} \times 10^{-3}$	i : 食物类型; C_{fo} : 食品消费碳排放, t; N_{fi} : 食品年消耗量, kg; EF_{fi} : 食物碳排放系数, kg·kg ⁻¹ i : food type; C_{fo} : carbon emissions from food consumption, t; N_{fi} : annual food consumption, kg; EF_{fi} : carbon emission coefficient of food, kg·kg ⁻¹
废弃物处理 Waste disposal	$C_{ru} = C_{CH_4} + C_{CO_2}$	C_{ru} : 废弃物处理碳排放, t; C_{CH_4} : 垃圾填埋碳排放, t; C_{CO_2} : 废弃物焚烧碳排放, t C_{ru} : carbon emissions from waste disposal, t; C_{CH_4} : carbon emissions from landfill, t; C_{CO_2} : carbon emissions from waste incineration, t
垃圾填埋 Landfill	$C_{CH_4} = (MSWT \times MSWF \times L_0 - R) \times (1 - OX) \times 25 \times 12/44$	C_{CH_4} : 垃圾填埋碳排放, t; $MSWT$: 废弃物年产量, t; $MSWF$: 乡村废弃物填埋处理率, %; L_0 : CH ₄ 产生潜力, kg(CH ₄)·kg ⁻¹ ; R : CH ₄ 回收量, t; OX : 氧化因子 C_{CH_4} : carbon emissions from landfill, t; $MSWT$: annual waste production, t; $MSWF$: rural landfill disposal rate, %; L_0 : methane generation potential, kg(CH ₄)·kg ⁻¹ ; R : methane recovery, t; OX : oxidation factor
废弃物焚烧 Waste incineration	$C_{CO_2} = MSWT \times CCW \times FCF \times EEF$	C_{CO_2} : 废弃物焚烧碳排放, t; $MSWT$: 废弃物年产量, t; CCW : 废弃物碳含量; FCF : 矿物碳在碳总量的占比; EEF : 燃烧效率 C_{CO_2} : carbon emissions from waste incineration, t; $MSWT$: annual waste production, t; CCW : waste carbon content; FCF : proportion of mineral carbon in total carbon; EEF : combustion efficiency

MSWF、 L_0 、 R 、 OX 、 CCW 、 FCF 和 EEF 分别取100%、0.02、0 t、0、0.20、0.39和0.95^[7]。MSWF, L_0 , R , OX , CCW , FCF and EEF are taken as 100%, 0.02, 0 t, 0, 0.20, 0.39, and 0.95^[7], respectively.

巴南”。自力村距离重庆市中心约45 min车程,交通条件便利,种植业和畜牧业发展良好,旅游资源丰

富,在乡村设施建设与村民文化思想上具有较强发展基础,能够为后续探索乡村低碳政策与试点提供

借鉴,对具有类似资源禀赋的其他乡村具有经验参照性。

2.2 基础数据

本文展开碳核算的相关数据主要来自 2023 年 8 月团队于重庆市自力村展开的实地调研数据与部分统计年鉴数据。通过访谈自力村村委与林业局工作人员获取村庄特征、作物生产、林地分布、畜禽养殖和居民生活等农业与社会经济数据,同时,深入田间与农家详细询问种植户生产投入、成本收益、农户能源消费、垃圾处理、电器使用和房屋状况等生产生活情况,并进一步走访民宿经营户,收集其经营状况与村庄旅游特色信息,最终整理一手数据与相关年鉴数据,形成碳核算基础数据集。

全村辖区面积约 10 km²,地处山地,海拔 300~1 100 m。当地土地肥沃,光照充足,雨量充沛,无需额外灌溉。全年气温基本在 0℃以上,自然条件具有天然优势。333 hm²耕地碎片分散,地势不平坦,难以实现机械化规模种植;主要种植水稻(*Oryza sativa* L.)、玉米(*Zea mays* L.)、红薯 [*Ipomoea batatas* (L.) Lam.] 和大豆 [*Glycine max* (L.) Merr.] 等主粮作物;蔬菜种植较少,农户自行种植并额外购买供家庭食用。在种植方式上倡导绿色、健康和安全的种植理念,农药使用量极少。柚子 [*Citrus maxima* (Burm.) Osbeck.] 和李子 (*Prunus salicina* Lindl.) 为特色水果,接龙牌无公害农产品已成功申报商标注册(巴南接龙蜜柚),并于 2021 年被认定为“一村一品”示范村镇。在养殖业上,大力发展鹌鹑产业,拥有一个鹌鹑养殖基地,部分农户散养少量猪和鸡。同时,该村林地资源丰富,拥有人工林 267 hm²,主要林地类型为大型常绿乔木,主要树种为马尾松(*Pinus massoniana* Lamb., 200 hm²)与杉木 [*Cunninghamia lanceolata* (Lamb.) Hook., 33 hm²], 并有少量柏树 [*Platycladus orientalis* (L.) Franco]; 马尾松与杉木树龄均在 30 年以上,属成熟林。土壤类型为紫色土。

村民生活方面,全村总户数约 1 000 户,村人口 3 490 人,常住人口多为 60 岁以上老人。房屋多为二层小楼,房屋使用年限为 50 年^[48],单层面积约 90 m²,村住宅建设空间约 5.4×10⁵ m³;村内汽车保有量约 500 辆,私家车平均百公里油耗 8 L,年均行驶里程 1.5×10⁴ km;全村垃圾桶共 42 个,每人每天产生生活垃圾约 1.35 kg;村民主要能源消耗为电能,涵盖做饭、取暖和照明等用途,农户冬季大多选择不取暖或使用空调取暖,用电标准参考我国制定的小康社会用电标准水平,即农村居民每人每年 85 kWh。食物消

费方面参考 2023 年《重庆调查年鉴》公布的农村居民家庭人均食物消费量。此外,该村系非物质文化遗产“接龙民间吹打乐”发源地之村,拥有度假区与体验村等一众旅游资源。

3 结果与分析

3.1 耕地碳核算

耕地具有碳排放和碳吸收的双重属性,采用净碳汇法核算的自力村 2023 年耕地综合碳排放为 1 705.233 t(表 4)。在碳排放总量中占比最大的为水稻田土壤呼吸带来的碳排放,主要为 CH₄ 与 CO₂ 排放,占总排放量的 59.6%;其次为农用物资投入带来的碳排放,占耕地总排放的 28.5%,主要来自化肥使用。此外,农作物土壤 N₂O 排放也是重要的碳排放来源。耕地碳吸收主要来自水稻、玉米和大豆的光合作用,水稻占总碳吸收量的 47.6%。依据核算结果,从碳汇角度,调整作物种植结构是提高耕地中农作物碳吸收的主要途径,主粮作物中,相较于水稻这一代表性碳排放作物,玉米具有更大的碳汇潜力;从碳排放角度,合理的农资投入是耕地得以有效控碳的重要措施,尤其是通过提升化肥利用效率达到减碳效果。

3.2 林地碳核算

自力村林地年均碳汇量为 15 623.054 t。参考《马尾松、杉木-硬阔类针阔混交林目标树单木择伐模式》^[49],并根据重庆市二元立木材蓄积表估算蓄积量,以林龄 30 年为时间间隔,计算碳储量年变化量,其中,同一林地由于年际间土壤有机质碳储量变化很小,在年碳汇量计算中未纳入土壤有机质对应碳储量变化量。从不同碳库碳储量分配角度(表 5),生物量碳库最大;从不同地类(树种)碳储量角度,马尾松和杉木生物质碳储量分别占林地生物质总碳储量的 93.5% 和 6.5%。

3.3 养殖场碳核算

养殖场(畜牧业)各畜禽种类年碳排放总量为 722.649 t(表 6)。从畜禽品种来看,鹌鹑碳排放量最大,占碳排放总量的 89.4%;其次为猪的碳排放,占碳排放总量的 6.1%。鹌鹑年饲养量最大,因此对畜牧业碳排放的影响最大,鸡虽然年饲养量较大,但由于其 CH₄ 和 N₂O 排放因子较小,因此对应碳排放较小。按照气体产生的来源来看,粪便排放是各畜禽产生温室气体的最大和主要来源。由此,探索畜禽粪便的科学收集与处理方式,将粪便产生的 CH₄ 与 N₂O 有效转化,是实现畜牧业低碳升级的着力点。

表 4 耕地年碳吸收与排放量
Table 4 Annual carbon sequestration and emissions from arable land

核算项目 Accounting item	类别 Category	产量/使用量/种植面积 Yield / usage / planting area	CO ₂ 排放/吸收量 CO ₂ emissions / sequestration /t
碳吸收总量 Total carbon sequestration			2 965.197
农作物光合作用 Crop photosynthesis	水稻 Rice	475.000 t	1 411.416
	玉米 Maize	192.500 t	722.920
	薯类 Potato	275.000 t	196.672
	大豆 Soybean	137.500 t	563.946
	水果 Fruit	1 490.000 t	70.243
碳排放总量 Total carbon emissions			4 670.430
农用物资投入 Agricultural material input			1 333.126
	化肥 Fertilizer	400.000 t	1 314.133
	农膜 Agricultural film	1.000 t	18.993
种植业活动 Planting activity	农地翻耕 Ploughing of agricultural land	333.300 hm ²	382.028
农作物土壤 N ₂ O排放 N ₂ O emissions from crop soil			172.265
	水稻 Rice	63.333 hm ²	4.530
	大豆 Soybean	36.667 hm ²	8.414
	玉米 Maize	36.665 hm ²	27.665
	蔬菜 Vegetable and melon	96.667 hm ²	121.276
	其他旱地作物 Other dryland crops	36.665 hm ²	10.380
水稻田 Paddy field			2 783.011
	土壤呼吸 CO ₂ 排放 CO ₂ emissions of soil respiration	63.333 hm ²	2 375.621
	中季稻 CH ₄ 排放 CH ₄ emission from mid-season rice paddy	63.333 hm ²	407.390
净CO ₂ 排放量 Net CO ₂ emissions			1 705.233

N₂O排放已转化为CO₂排放。N₂O emission is converted into CO₂ emissions.

表 5 林地碳储量
Table 5 Carbon stock in forest land

核算项目 Accounting item	类别 Category	蓄积量/种植面积 Accumulation / planting area	CO ₂ 储量 CO ₂ stock /t
生物量碳库 Biomass carbon pool			462 687.576
林地生物质 Woodland biomass			461 969.853
	马尾松 Masson pine	2.313×10 ⁵ m ³	432 058.847
	杉木 Fir	2.179×10 ⁴ m ³	29 911.006
林下灌木层 Understorey shrub layer			167.174
	马尾松 Masson pine	200.000 hm ²	138.928
	杉木 Fir	33.333 hm ²	28.246
林下草本层 Understorey herb layer		233.333 hm ²	550.549
死有机质碳库 Dead organic matter carbon pool			6 004.031
枯死木 Dead wood	针叶林 Coniferous forest	233.333 hm ²	4 825.621
枯落物 Dead litter			1 178.410
	马尾松 Masson pine	200.000 hm ²	837.793
	杉木 Fir	33.333 hm ²	340.617
土壤有机质碳库 Soil organic matter carbon pool		233.333 hm ²	108 313.179
CO ₂ 总储量 Total CO ₂ stock			577 004.786
年CO ₂ 吸收量 Annual CO ₂ sequestration			15 623.054

3.4 水域碳核算

自力村水域年碳汇为 9.824 t。村中积极发展渔业养殖, 拥有池塘 75 个, 共计占地约 13.333 hm², 包含一个 4.6 hm² 的大型鱼塘, 其余为分散的小型鱼塘/池塘。保持土地利用类型的河湖水面具有持续的固碳能力, 其为碳吸收土地利用类型。水域是农业碳

汇的途径之一, 加强水面保护与利用对增强农业碳汇具有重要意义。

3.5 居民点碳核算

2023 年自力村居民点碳排放总量为 8 958.563 t (表 7)。其中, 居民家庭直接碳排放占居民点总碳排放量的 14.7%, 人类呼吸产生的 CO₂ 是最主要的直接

表 6 畜牧业各畜禽种类碳排放量
Table 6 Carbon emissions from different livestock and poultry species of animal production

畜禽品种 Livestock and poultry species	饲养量 Stocking /head	CH ₄ 排放 CH ₄ emissions /t ¹⁾		粪便N ₂ O排放 ¹⁾ N ₂ O emissions from manure /t	总CO ₂ 排放量 Total CO ₂ emissions /t
		肠胃发酵 Enteric fermentation	粪便 Manure		
猪 Pig	164	4.101	14.354	25.901	44.356
鸡 Chicken	5 000		2.501	29.799	32.300
鹌鹑 Quail	100 000		50.013	595.980	645.993
合计 Total		4.101	66.868	651.680	722.649

1) CH₄与N₂O排放量均转化为CO₂排放量。1) Emissions of CH₄ and N₂O are both converted into CO₂ emissions.

表 7 居民点碳排放量
Table 7 Carbon emissions from settlement

核算项目 Accounting item	类别 Category	人数/使用量 Population / usage	CO ₂ 排放 CO ₂ emissions /t
直接碳排放 Direct carbon emissions			1 313.449
人类呼吸 Human respiration		3 490 person	1 146.465
电力消费 Electricity consumption		2.967×10 ⁵ kWh	166.984
间接碳排放 Indirect carbon emissions			7 645.114
房屋建设 House construction			3 616.164
	水泥 Cement	8.640×10 ⁴ t	1 399.680
	钢铁 Steel	1.026×10 ⁴ t	393.984
	红砖 Red brick	2.025×10 ⁵ t	1 822.500
交通运输 Transport	私家车 Private car	6.000×10 ⁵ L	1 404.000
废弃物处理 Waste disposal	垃圾填埋 Landfill	985.500 t	492.750
食物消费 Food consumption			2 132.200
	粮食 Grain	698.489 t	836.976
	蔬菜 Vegetable	479.037 t	48.127
	蛋类 Egg	51.233 t	180.829
	植物油 Vegetable oil	44.847 t	190.552
	猪肉 Pork	161.447 t	703.973
	奶及奶制品 Milk and milk products	35.493 t	55.388
	水产品 Aquatic product	43.381 t	116.355
总CO ₂ 排放 Total CO ₂ emissions			8 958.563

房屋建设耗材以农村自建房砖混结构的标准材料用量计算^[50]。废弃物处理中,因常住人口多为老人,以每户两名老人计算。House construction consumables are calculated by the standard material consumption of brick-concrete structure in rural self-built houses^[50]. In waste disposal, since the permanent residents are mostly the elderly, the calculation is based on two elderly people per household.

碳排放来源;间接碳排放占总碳排放的 85.3%,房屋建设、食物消费和交通运输活动中产生的汽车尾气是最主要的间接碳排放源,其中房屋建设和食物消费分别占居民点碳排放总量的 40.4%和 23.8%。食物消费中,粮食和猪肉产生的碳排放量最大,二者占食物消费碳排放总量的 72.3%。根据电力消费与交通运输的核算结果,新型交通工具如新能源汽车的使用对居民点的减碳效果较好。同时,加强废弃物资源化利用、提高垃圾回收效率和实现碳循环再利用也是居民点合理控碳的重要渠道。

3.6 其他碳核算

自力村其他年均碳排放为 524.280 t。依托本地自然气候条件和区位优势,村内交通便利,开通了长达 32 km 的水泥路,目前没有加工厂和制造厂。因

此,其他碳排放主要来自路面布局中 2 车道混凝土道路在建设、养护和拆除阶段产生的碳排放。这也说明,支持先进技术与致力于节能减排的新型乡村企业发展是推动农业农村绿色低碳转型的重要举措。

3.7 自力村净碳核算

经核算,自力村耕地、养殖场、居民点和其他均为碳排放土地类型,林地和水域为碳吸收土地类型,2023 年该村综合体现为年碳汇 3 722.153 t。其中,居民点是最主要的碳源,其年排放量占所有地类排放总量的 60.2%,耕地、养殖场和其他土地类型的碳排放占比分别为 31.4%、4.9%和 3.5%;林地是最主要的碳汇,其年吸收量占总量的 84.0%。需要说明的是,核算过程中,囿于数据的可获得性,对林地地

类的估算未能细分植被类型可能导致结果存在一定误差, 其他碳排放涉及的相关能源消费并未纳入核算体系。

4 结论与政策启示

本文基于乡村6种土地利用方式, 以微观乡村尺度碳核算为研究视角, 构建乡村地域碳排放/碳吸收核算清单, 并选取重庆市自力村为代表案例, 系统核算乡村尺度碳排放与碳吸收。

本文主要结论包括3方面。第一, 本文构建了囊括乡村生产与生活多个类别的乡村尺度碳核算清单, 详细介绍了一级、二级和三级清单分类下各碳源与碳汇的核算方法, 案例实证表明该清单与核算方法具有可操作性与普适性。第二, 土地利用类型综合的微观乡村尺度具有很强的碳汇潜力, 以重庆市自力村为例, 2023年该村综合年碳汇为3 722.153 t。第三, 耕地、养殖场和居民点等为乡村尺度主要碳源, 林地和水域表现为碳汇; 案例乡村碳核算中, 居民点是最主要的碳排放土地利用类型, 占碳排放来源总量的60.2%, 林地在碳吸收中占据主导地位, 占碳吸收总量的84.0%。

针对碳核算现状, 结合乡村特有禀赋与优势, 提出如下对策建议。一是丰富乡村碳核算数据库, 优化定量核算方法。推动乡村碳核算定量研究, 通过应用和实践不断完善、拓展和细化核算清单, 提高排放系数准确性, 开展资源摸底, 丰富碳核算数据量。二是充分发挥森林碳汇潜力, 助力耕地与居民点升级减排。加大林地保护, 提高森林质量, 在减少碳排放的策略中, 应重点关注主要碳源(耕地与居民区生活)的节能减排措施, 如食物运输与交通运输过程以及农用物资使用产生的碳排放。三是充分发挥各地类优势, 促进地类间协调耦合。如通过控制农用物资投入, 降低耕地碳排放量, 则耕地具有转变为碳汇功能土地的潜力, 进而挖掘碳源减排潜力与碳汇固碳优势, 构建相互协同和相互促进的生态乡村系统。

未来需进行更长时间跨度的研究, 在本研究搭建的基于土地利用乡村碳核算方法的基础上, 应更加细致地考察耕地碳汇核算, 特别是植物光合作用碳汇核算。同时, 关注研究期间土地利用类型变化带来的碳排放/碳吸收变化, 从动态视角细化核算方法以提高估算精度。

参考文献 References

- [1] 中华人民共和国农业农村部, 中共中央 国务院关于做好2023年全面推进乡村振兴重点工作的意见[EB/OL]. 北京: 中

华人民共和国农业农村部, [2023-02-14]. http://www.moa.gov.cn/ztzl/2023yhwj/zxgz_29323/202302/t20230214_6420463.htm?eqid=f4f44df3001193e700000003642a385c

- Ministry of Agriculture and Rural Affairs of the People's Republic of China. Opinions of the Central Committee of the Communist Party of China and the State Council on doing a good job of promoting the key work of rural revitalisation in a comprehensive way in 2023[EB/OL]. Beijing: Ministry of Agriculture and Rural Development of the People's Republic of China, [2023-02-14]. https://www.moa.gov.cn/ztzl/2023yhwj/zxgz_29323/202302/t20230214_6420463.htm?eqid=f4f44df3001193e700000003642a385c
- [2] 中华人民共和国生态环境部. 中华人民共和国气候变化第三次国家信息通报[M]. 北京: 中国环境出版社, 2018: 41
- Ministry of Ecology and Environment of the People's Republic of China. Third National Communication on Climate Change of the People's Republic of China[M]. Beijing: China Environment Press, 2018: 41
- [3] 王松良, C. D. Caldwell, 祝文烽. 低碳农业: 来源、原理和策略[J]. 农业现代化研究, 2010, 31(5): 604-607
- WANG S L, CALDWELL C D, ZHU W F. Low carbon agriculture: Origins, principles and strategies[J]. *Research of Agricultural Modernization*, 2010, 31(5): 604-607
- [4] 中华人民共和国农业农村部, 中华人民共和国国家发展和改革委员会. 农业农村减排固碳实施方案[EB/OL]. 北京: 中华人民共和国国家发展和改革委员会. [2022-06-30]. https://www.moa.gov.cn/govpublic/KJJYS/202206/t20220630_6403715.htm?eqid=d677bfc8000024df00000006645a188c
- Ministry of Agriculture and Rural Affairs of the People's Republic of China, National Development and Reform Commission. Implementation programme for emission reduction and carbon sequestration in agriculture and rural areas[EB/OL]. Beijing: National Development and Reform Commission. [2022-06-30]. https://www.moa.gov.cn/govpublic/KJJYS/202206/t20220630_6403715.htm?eqid=d677bfc8000024df00000006645a188c
- [5] IPCC. 2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories[R]. Hayama: Institute for Global Environment Strategies (IGES), 2006
- [6] 刘晨烨. 中国西部低碳乡村可行性研究——以甘肃省文县李子坝村为例[D]. 兰州: 兰州大学, 2013: 30-57
- LIU C Y. Feasibility study on low-carbon villages in western China: A case study of Liziba Village in Wenxian County, Gansu Province[D]. Lanzhou: Lanzhou University, 2013: 30-57
- [7] 王剑. 蒙西农牧交错带乡村地域系统碳排放研究——以伊金霍洛旗和杭锦后旗为例[D]. 西安: 陕西师范大学, 2018: 25-46
- WANG J. Study on carbon emission of rural regional system in farming-pastoral ecotone in western Mongolia — Taking Ejinhoro Banner and Hangjinhou Banner as examples[D]. Xi'an: Shaanxi Normal University, 2018: 25-46
- [8] 罗晓予. 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, 2017: 71-125
- LUO X Y. Study on low-carbon ecological evaluation system of villages based on carbon emission accounting[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2017: 71-125
- [9] CHEN Y M, JIANG L. Influencing factors of direct carbon

- emissions of households in urban villages in Guangzhou, China[J]. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 2022, 19(24): 17054
- [10] HUANG Z J, TANG H, WEN Y H, et al. Life-cycle carbon emission calculation and reduction for rural dwellings of “hollow village”: A case study in South China[J]. *Environmental Impact Assessment Review*, 2024, 106: 107514
- [11] GOODFIELD D, ANDA M, HO G. Carbon neutral mine site villages: Myth or reality?[J]. *Renewable Energy*, 2014, 66: 62–68
- [12] SUSILORINI R M I R, ISMAIL A, ARYA WASTUNIMPUNA B Y, et al. Tourism village carbon footprint after COVID-19 pandemic: A challenge to sustainability[J]. *Sustainability*, 2022, 14(4): 2400
- [13] SONG L M, XU F, SHENG M, et al. The relationship between rural spatial form and carbon emission — A case study of suburban integrated villages in Hunan Province, China[J]. *Land*, 2023, 12(8): 1585
- [14] DU T T, JIAO Y, ZHANG Y, et al. Approach for calculating and analyzing carbon emissions and sinks of villages: A case study in Northern China[J]. *Energies*, 2024, 17(9): 2212
- [15] WU Y Q, SUN Y, ZHOU C Y, et al. Spatial-temporal characteristics of carbon emissions in mixed-use villages: A sustainable development study of the Yangtze River Delta, China[J]. *Sustainability*, 2023, 15(20): 15060
- [16] GE J, LUO X Y, LU J. Evaluation system and case study for carbon emission of villages in Yangtze River Delta region of China[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2017, 153: 220–229
- [17] ZHU X Q, ZHANG Z Q, CHEN X W, et al. Nexus of mixed-use vitality, carbon emissions and sustainability of mixed-use rural communities: The case of Zhejiang[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2022, 330: 129766
- [18] 中华人民共和国自然资源部. GB/T 21010—2017 土地利用现状分类[S]. 北京: 中华人民共和国自然资源部, 2017
Ministry of Natural Resources of the People's Republic of China. GB/T 21010—2017 Current Land Use Classification[S]. Beijing: Ministry of Natural Resources of the People's Republic of China, 2017
- [19] 丁雨莲. 碳中和视角下乡村旅游地净碳排放估算与碳补偿研究——皖南宏村与合肥大圩案例实证[D]. 南京: 南京师范大学, 2015: 65–102
DING Y L. Estimation of net carbon emission and carbon compensation in rural tourist destinations from the perspective of carbon neutrality — A case study of Hongcun in southern Anhui and Dawei in Hefei[D]. Nanjing: Nanjing Normal University, 2015: 65–102
- [20] HUANG Z S, LIU Y F, GAO J, et al. Approach for village carbon emissions index and planning strategies generation based on two-stage optimization models[J]. *Land*, 2022, 11(5): 648
- [21] ZHU X Q, ZHONG Y B, LI Z X, et al. Study on low-carbon construction system of desakota village-and-town communities: Take Zhejiang Province as an example[J]. *Sustainability*, 2022, 14(18): 11525
- [22] 吴宁, 李王鸣, 冯真, 等. 乡村用地规划碳源参数化评估模型[J]. *经济地理*, 2015, 35(3): 9–15
WU N, LI W M, FENG Z, et al. A parametric evaluation model of the carbon resource aiming at rural land planning[J]. *Economic Geography*, 2015, 35(3): 9–15
- [23] 唐彩飞. 工业型乡村用地低碳测算与布局模式研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2016: 17–35
TANG C F. Study on low carbon measurement and distribution model of industrial rural land use[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2016: 17–35
- [24] 谭美秋, 崔耀平, 马晓哲, 等. 河南省农田生态系统碳汇核算研究[J]. *生态与农村环境学报*, 2022, 38(9): 1129–1137
TAN M Q, CUI Y P, MA X Z, et al. Study on carbon sink estimation of cropland ecosystem in Henan Province[J]. *Journal of Ecology and Rural Environment*, 2022, 38(9): 1129–1137
- [25] 许萍萍. 江苏省农田碳源/汇动态变化及低碳农业发展研究[D]. 南京: 南京农业大学, 2018: 16–27
XU P P. Research on dynamic changes of farmland carbon sources/sinks and development of low carbon agriculture in Jiangsu Province[D]. Nanjing: Nanjing Agricultural University, 2018: 16–27
- [26] 胡春胜, 王玉英, 董文旭, 等. 华北平原农田生态系统碳过程与环境效应研究[J]. *中国生态农业学报(中英文)*, 2018, 26(10): 1515–1520
HU C S, WANG Y Y, DONG W X, et al. Carbon processes and environmental effects on agro-ecosystem in the North China Plain[J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2018, 26(10): 1515–1520
- [27] 王智平. 中国农田 N₂O 排放量的估算[J]. *农村生态环境*, 1997, 13(2): 51–55
WANG Z P. Estimation of nitrous oxide emission of farmland in China[J]. *Journal of Ecology and Rural Environment*, 1997, 13(2): 51–55
- [28] 熊正琴, 邢光熹, 鹤田治雄, 等. 种植夏季豆科作物对旱地氧化亚氮排放贡献的研究[J]. *中国农业科学*, 2002, 35(9): 1104–1108
XIONG Z Q, XING G X, TSURUTA H, et al. The effects of summer legume crop cultivation on nitrous oxide emissions from upland farmland[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2002, 35(9): 1104–1108
- [29] 王少彬, 苏维瀚. 中国地区氧化亚氮排放量及其变化的估算[J]. *环境科学*, 1993, 14(3): 42–46, 92–93
WANG S B, SU W H. Estimation of nitrous oxide emission and its future change in China[J]. *Environmental Science*, 1993, 14(3): 42–46, 92–93
- [30] 邱炜红, 刘金山, 胡承孝, 等. 种植蔬菜地与裸地氧化亚氮排放差异比较研究[J]. *生态环境学报*, 2010, 19(12): 2982–2985
QIU W H, LIU J S, HU C X, et al. Comparison of nitrous oxide emission from bare soil and planted vegetable soil[J]. *Ecology and Environmental Sciences*, 2010, 19(12): 2982–2985
- [31] 吴贤荣, 张俊飏, 田云, 等. 中国省域农业碳排放: 测算、效率变动及影响因素研究——基于 DEA-Malmquist 指数分解方法与 Tobit 模型运用[J]. *资源科学*, 2014, 36(1): 129–138
WU X R, ZHANG J B, TIAN Y, et al. Provincial agricultural carbon emissions in China: Calculation, performance change and influencing factors[J]. *Resources Science*, 2014, 36(1): 129–138
- [32] 田云, 张俊飏. 中国农业生产净碳效应分异研究[J]. *自然资源学报*, 2013, 28(8): 1298–1309
TIAN Y, ZHANG J B. Regional differentiation research on net carbon effect of agricultural production in China[J]. *Journal of*

- Natural Resources, 2013, 28(8): 1298–1309
- [33] 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(1/2/3): 217–232
- [34] 李波, 张俊飏, 李海鹏. 中国农业碳排放与经济发展的实证研究[J]. 干旱区资源与环境, 2011, 25(12): 8–13
LI B, ZHANG J B, LI H P. Empirical study on China's agriculture carbon emissions and economic development[J]. Journal of Arid Land Resources and Environment, 2011, 25(12): 8–13
- [35] 侯瑞萍, 夏朝宗, 陈健, 等. 长江经济带林地和其他生物质碳储量及碳汇量研究[J]. 生态学报, 2022, 42(23): 9483–9498
HOU R P, XIA C Z, CHEN J, et al. Carbon storage and carbon sink of forest land and other biomass in the Yangtze River Economic Belt[J]. Acta Ecologica Sinica, 2022, 42(23): 9483–9498
- [36] 中国林业科学研究院木材工业研究所. 中国主要树种的木材物理力学性质[M]. 北京: 中国林业出版社, 1982: 2–79
Research Institute of Wood Industry, Chinese Academy of Forestry. Physical and Mechanical Properties of Wood of Major Tree Species in China[M]. Beijing: China Forestry Publishing House, 1982: 2–79
- [37] 韦沁. 我国农牧业碳排放的时空差异和影响因素分析及预测研究[D]. 兰州: 兰州大学, 2018: 16–17
WEI Q. Research on spatial-temporal differences, influence factors and prediction of carbon emission in agriculture and animal husbandry in China[D]. Lanzhou: Lanzhou University, 2018: 16–17
- [38] 胡向东, 王济民. 中国畜禽温室气体排放量估算[J]. 农业工程学报, 2010, 26(10): 247–252
HU X D, WANG J M. Estimation of livestock greenhouse gases discharge in China[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2010, 26(10): 247–252
- [39] 闵继胜, 胡浩. 中国农业生产温室气体排放量的测算[J]. 中国人口·资源与环境, 2012, 22(7): 21–27
MIN J S, HU H. Calculation of greenhouse gases emission from agricultural production in China[J]. China Population, Resources and Environment, 2012, 22(7): 21–27
- [40] 赖力. 中国土地利用的碳排放效应研究[D]. 南京: 南京大学, 2010: 57–60
LAI L. Carbon emission effect of land use in China[D]. Nanjing: Nanjing University, 2010: 57–60
- [41] 曾静静. 城乡居民家庭碳排放评估与减排对策研究[D]. 兰州: 兰州大学, 2022: 35–44
ZENG J J. Research on household carbon emission assessment and emission reduction countermeasures of urban and rural areas[D]. Lanzhou: Lanzhou University, 2022: 35–44
- [42] 宋永昌. 城市生态学[M]. 上海: 华东师范大学出版社, 2000: 178
SONG Y C. Urban Ecology[M]. Shanghai: East China Normal University Press, 2000: 178
- [43] 朱重阳. 苏州地区住宅全生命周期碳足迹核算[J]. 中国建材科技, 2012, 21(5): 72–74
ZHU C Y. Carbon footprint calculation of the whole life cycle of residential in Suzhou[J]. China Building Materials Science & Technology, 2012, 21(5): 72–74
- [44] 赵艳云. 内蒙古典型草原碳特征及管理决策支持系统研究——基于家庭牧场视角[D]. 呼和浩特: 内蒙古大学, 2018: 37–48
ZHAO Y Y. Carbon characteristics and management decision support system of Inner Mongolia typical grassland from the household perspective[D]. Hohhot: Inner Mongolia University, 2018: 37–48
- [45] 曹志宏, 郝晋珉. 中国家庭居民饮食行为碳消费时空演变及其集聚特征分析[J]. 干旱区资源与环境, 2018, 32(12): 20–25
CAO Z H, HAO J M. Spatial-temporal succession and agglomeration characteristics of diet carbon consumption for Chinese households[J]. Journal of Arid Land Resources and Environment, 2018, 32(12): 20–25
- [46] 黄和平, 李亚丽, 杨斯玲. 中国城镇居民食物消费碳排放的时空演变特征分析[J]. 中国环境管理, 2021, 13(1): 112–120
HUANG H P, LI Y L, YANG S L. Spatio-temporal evolution characteristics of carbon emissions from food consumption of urban residents in China[J]. Chinese Journal of Environmental Management, 2021, 13(1): 112–120
- [47] 张金喜, 苏词, 王超, 等. 道路基础设施建设中的节能减排问题及技术综述[J]. 北京工业大学学报, 2022, 48(3): 243–260
ZHANG J X, SU C, WANG C, et al. Review of energy-saving and emission-reduction issues and technologies in the construction of road infrastructure[J]. Journal of Beijing University of Technology, 2022, 48(3): 243–260
- [48] 中华人民共和国住房和城乡建设部. GB 50068—2018 建筑结构可靠性设计统一标准[S]. 北京: 中华人民共和国住房和城乡建设部, 2018
Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China. GB 50068—2018 Unified Standard for Reliability Design of Building Structures[S]. Beijing: Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China, 2018
- [49] 国家林草局资源司. 马尾松、杉木-硬阔类针阔混交林目标树单木择伐模式[EB/OL]. 北京: 国家林草局资源司. [2023-09-20]. <https://www.forestry.gov.cn/c/www/sdsf/368058.jhtml>
Resource Department of National Forestry and Grassland Administration. Horsetail pine. Target tree singletimber harvesting patterns in fir-hardwood mixed conifer forests[EB/OL]. Beijing: Resource Department of National Forestry and Grassland Administration. [2023-09-20]. <https://www.forestry.gov.cn/c/www/sdsf/368058.jhtml>
- [50] 乡村住宅在线. 农村自建房用料明细[EB/OL]. 长沙: 乡村住宅地线. 2023(2023-08-10). <https://www.zhuzhai.com/news/read-29964.html>
Rural Residential Online. Material details for self-built houses in rural areas [EB/OL]. Changsha: Rural Residential Online. 2023(2023-08-10). <https://www.zhuzhai.com/news/read-29964.html>