



面向可持续目标的传统农村家庭食物-能源-水耦合研究：框架构建

吴梦蓉¹, 刘耕源^{1,2,✉}, 陈操操³, 熊小平⁴, 孟凡鑫¹, 高原¹, 张力小^{1,2}

1. 北京师范大学环境学院环境模拟与污染控制国家重点联合实验室, 北京 100875; 2. 北京市流域环境生态修复与综合调控工程技术研究中心, 北京 100875; 3. 北京市应对气候变化管理事务中心, 北京 100086; 4. 国务院发展研究中心资源与环境政策研究所, 北京 100010

摘要 家庭食物-能源-水 (FEW) 3 系统之间互相联系, 对其中 1 种资源的管理政策调整会对另外 2 个系统产生不同程度的影响, 需要深入理解其耦合关系。传统农村家庭屋顶和庭院的闲置率高, 可利用潜力大, 但城市家庭 FEW 的政策情景往往无法简单套用在农村家庭, 尤其是仍保留传统村庄特点的农村家庭。通过深入梳理中国传统农村家庭 FEW 消费模式和国内外相关政策关联内容设计, 全新构建了传统农村家庭 FEW 耦合研究框架。该框架由家庭 FEW 消费模块、屋顶/庭院利用模块和政策输入输出模块构成, 能够清晰地展示政策实施中跨边界耦合影响发生的节点, 提高对资源利用的理解和管理路径的识别。该框架可用于传统农村家庭 FEW 相关政策收集和制定、政策影响评估和政策优化, 助力农村可持续发展和乡村振兴。

关键词 传统农村家庭; 食物-能源-水耦合; 协同; 资源节约; 屋顶/庭院

食物、能源和水资源 (下简称 FEW) 是支撑人类日常生活和经济社会发展最重要的资源, 面临着需求持续增长和资源紧缺的挑战^[1]。FEW 耦合研究能够清晰地说明 FEW 之间的多尺度联系, 被认为是实现可持续发展议程、应对气候变化的有效手段^[2-3]。为探究解决传统政策和规划的“孤岛”问题的方案, 政策的制定必须考虑“耦合”方法, 以便识别政策实施过程中潜在的协同性和矛盾性^[4-5]。家庭是社会的基本单元, 其对 FEW 以及其他商品和服务的需求驱动着全球资源消耗和温室气体排放的增长^[6-7]。家庭 FEW 耦合通过捕捉家庭尺度饮食、能源和水之间的联系, 提高对资源利用和管理的理解, 是相关政策制定和优化的重要工具^[8]。目前, 家庭尺度 FEW 研究囿于数据局限、同视城乡, 多集中于城市地区, 忽略了处于快速发展和复杂转型阶段的农村^[9]。

2022 年, 中国有 4.9 亿人生活在农村地区, 占全国总人口的比重为 34.78%^[10]。在城镇化进程中, 农村也分化为不同的类型。一些农村完成了空间城市化, 例如形成了城中村、城乡结合部和城郊社区, 还有一些通过撤村并居等方式, 居民宅基地被拆除并搬入新社区集中居住, 这些农村家庭的生产生活方式接近城市^[11]。另一类农村保留着传统乡村景观, 居民住宅以独立的分户式、庭院型住宅为主, 占当前乡村类型的主体, 这里称之为“传统农村”。传统农村与城市在区域环境、经济条件、生活习惯、基础设施建设等方面存在差异, 这导致了传统农村家庭 FEW 消费模式与城市家庭的不同^[12-15]。目前, 国内外家庭尺度的 FEW 耦合研究多关注家庭终端器具、生活行为和社区政策等^[16-19]。但城市家庭 FEW 的框架方法和政策情景往往无法简单套用在农村家庭, 尤其是仍保留传统村庄特点的农村家庭。

本研究以传统农村家庭 FEW 耦合为核心, 梳理了其用能、用水、饮食的特点, 并归纳并比较了国内外

收稿日期: 2023-12-12; 录用日期: 2024-05-13

基金项目: 国家杰出青年科学基金资助项目 (52225902); 国家社科基金重大项目 (22&ZD108); 北京市科委科技计划项目 (Z221100005222027); 中央高校基本科研业务费专项资金资助

第一作者: 吴梦蓉 (2000—), 女, 硕士研究生, 20221180030@mail.bnu.edu.cn ✉通信作者: 刘耕源 (1983—), 男, 博士, 教授, liugengyuan@bnu.edu.cn

农村家庭研究中减少资源消费、提高利用效率、改变生活方式和利用庭院空间的多种政策措施,以此基础构建了全新的传统农村家庭 FEW 耦合政策分析框架,为面向可持续的传统农村家庭政策设定提供支撑。

1 中国传统农村家庭食物、能源和水资源消费模式特点分析

1.1 中国传统农村家庭能源消费特点

农村家庭的用能概况由 3 个关键因素决定:①当地街区、村庄或地区水平的能源基础设施,包括沼气装置、光伏发电装置、燃煤电网或燃气电网,或者当地资源禀赋下的自给能源,例如煤炭、柴薪等生物质能源,这一定程度上决定了农村家庭的能源结构;②住房能效,包括建筑隔热性能以及家庭用能设备,例如供暖装置、太阳能热水器等,这些决定了家庭能源消耗转化为最终用能服务的效率;③家庭成员的用能方式,包括取暖或制冷、烹饪、洗浴习惯等,决定最终家庭用能需求的多少^[20]。

1) 农村家庭能源结构。过去几十年间,随着社会经济的发展和居民收入的提高,农村家庭能源消费逐渐朝着现代化、清洁化的方向转变^[14]。传统常用于农村家庭烹饪和供暖等用途的固体燃料(煤炭、传统生物质能)逐渐由电力和燃气替代。LI 等^[21]基于多个中国能源统计数据集进行对比分析,结果表明 1998—2016 年间非商业能源(柴薪、秸秆等)在农村居民用能中的占比从 73.7% 下降至 37.2%,电能占比从 6.7% 增长到 31.5%,燃气(天然气、液化石油气)总占比不到 7%。同样,TAO 等^[22]基于全国范围大规模的家庭能源结构调查数据量化分析了 1992—2012 年中国农村的能源转型,结果也表明用于烹饪的电力和燃气(LPG 和沼气)分别从 3.5% 和 5.1% 增加到 34.0% 和 24.0%。2017 年,中国政府启动了北方地区清洁供暖规划(2017—2021),鼓励农村地区优先利用地热、生物质、太阳能等多种清洁能源供暖,有条件的发展天然气或电供暖^[23]。“煤改气”、“煤改电”项目对中国农村能源获取和升级的推动非常明显,“电+气”已经成为农村地区的主导烹饪能源模式^[24-25]。然而,不同省份的资源禀赋、经济发展以及地方财政的支撑能力的差异,使得农村地区的煤改清洁能源进度各异。2019 年底,北方农村地区平均清洁取暖率为 31%,多地存在散煤复烧现象,平均复燃率约为 8%,农村家庭能源转型但仍存在被动转型和能源负担加重等困难^[26-27]。

2) 农村住房能源效率及家庭用能行为。与城市相比,农村住宅多为独立分布的自建房,采暖、热水等分户独立控制,建筑能效相对滞后^[28-29]。这主要由 2 个原因造成,一是建筑隔热性能差,二是用能设施能效低。在中国农村地区,实心砖墙(67%)、单窗格玻璃窗(76%)和瓷砖(34%)是墙体、窗户和屋顶最常用的材料,中国南北农村家庭住房拥有高质量隔热材料的比例分别仅有 3% 和 11%^[30]。因此,有研究认为农村自建住房比城市开发商建造的住房更具可持续改造的潜力^[31]。用能设施方面,2015 年,农村家庭日常生活中常用的电器包括电视机、洗衣机和冰箱等的拥有率较高(67%~95%),但大部分农村家庭没有烘干机(99%)、空调(80%)、冰柜(87%)、计算机(76%)或热水器(69%)^[32]。农村家用电器拥有率将持续增长,预计到 2050 年,农村家庭空调、计算机的拥有率分别增加 40% 和 413%^[33],这将推动农村家庭电力需求的增长,这也说明推广节能电器政策的重要性。节能灯具、节能冰箱、节能洗衣机以及节能空调已经在中国农村广泛使用,推广率达到 66%~95%;而节能电热水器、节能电视机的推广率仅为 18%~33%^[32]。总的来说,住宅节能改造、节能电器推广和节能行为宣传等政策在农村地区有较大的实施空间。

1.2 中国传统农村家庭水资源消费特点

2020 年,中国农村地区的自来水普及率已经达到 83%,到 2025 年这一比例计划提升至 88%,部分农村家庭仍然依赖地下水、浅层地表水作为直接水源^[34]。用水行为方面,传统农村家庭保留着节约用水的习惯,FAN 等^[35]于 2013 年对渭河流域农村家庭用水概况进行入户调查,结果表明农村家庭传统的用水习惯包括家庭成员共用水、洗浴次数较低、太阳能热水器和洗衣机使用率低等。室外用水占农村家庭用水总量的 40% 左右,主要用于庭院清洁、家庭菜地浇灌等用途,由于室外用水的随意性,减少室外用水量通常是家庭节水的主要目标^[36]。另外,由于村庄布较为分散,农村地区生活污水的回收处理较为困难,家庭直接排放废水也导致了水资源的大量浪费^[37]。用水器具方面,热水器、洗碗机和冲水厕所在农村家庭中较为少见,未来热水器和简易冲水厕所的普及将成为农村家庭生活用水量增加的主要原因^[36]。2017 年,中国发布了《水效标识管理办法》,目前的节水标识仅覆盖马桶和洗碗机,引导消费者选择高效用水产品,但农村家庭对座便器、洗碗机的低拥有率决定了当前的水效管理很大程度上大多只能影响城市家庭的用水效率,对农村家庭用水效率的影响有限^[38]。

1.3 中国传统农村家庭食物消费的特点

近三十年来,随着社会经济发展和生活水平的提高,中国农村居民食物消费变化较大,主要体现在食物消费数量、饮食结构及其相关的环境影响和营养质量等方面。从食物消费总量来看,除粮食外,农村居民的蔬菜、肉类、蛋奶等人均消费量均低于城市;从人均食物消费的变化量来看,农村居民的人均猪肉、禽肉和鲜奶等动物性食物消费量迅速增长,涨幅是城市居民的3~5倍^[39]。此外,农村家庭的人均食物浪费量略高于城市家庭,可能与农村食物存储条件不足有关^[40]。从家庭膳食结构的营养角度分析,农村居民的鲜菜、瓜果和奶类等多种食物的消费量低于膳食指南推荐值,粮食和畜禽肉类消费高于推荐值,总体膳食平衡指数劣于城镇居民^[39,41]。自我供给农村家庭资源消费的重要特点,60%左右的农村家庭可以自我供给一部分食物^[42]。从家庭饮食环境足迹的角度分析,HE等^[43]综合评估了1997—2011年期间中国城乡居民饮食消费相关的环境足迹和营养质量变化,从二者的权衡和协同关系角度分析,低收入农村居民与营养损失相关的温室气体排放增长量占总增长量的81%,远高于城市居民。这说明,食物消费结构的变化在农村居民中比城市居民中更加显著,而且这种变化正在以环境影响和营养质量损失为代价^[44]。

1.4 屋顶和庭院利用是中国传统农村家庭的典型模式

屋顶和庭院的空间资源常被用于种植蔬菜、利用太阳能和收集雨水,表1展示了多种利用方式。能源方面,农村建筑屋顶为分布式光伏系统提供了充足的空间资源,2020年全国农村建筑屋顶面积约为 $2.73 \times 10^{10} \text{ m}^2$,农村屋顶可安装光伏板面积约为 $1.31 \times 10^{10} \text{ m}^2$,年总发电量可达 $2.95 \times 10^{12} \text{ kWh}$ ^[45]。郜慧等^[46]对中国西南山区农村户用沼气生态庭院模式的效益进行分析,结果表明户用沼气生态庭院模式的内部收益率约为24.8%,平均年沼气产量可以分别替代3.55 t柴薪、0.47 t秸秆和3.02 t煤炭。水资源方面,基于雨水利用的“庭院经济-雨水收集”等综合发展模式,对农村庭院雨水集蓄利用模式进行优化改造,能够提高雨水利用率,缓解中国北方农村用水压力^[47]。食物方面,农村庭院植物配置模式以食用性和经济性为主要目的^[48]。在国家政策层面,庭院经济被作为乡村经济发展的一种重要模式,并于2023年首次被写入中央一号文件《中共中央国务院关于全面做好2023年全面推进乡村振兴重点工作的意见》,足见庭院利用在乡村振兴进程中的重要作用^[49]。目前,中国传统农村家庭屋顶和庭院的闲置率高,可利用潜力大^[50]。

表1 农村屋顶和庭院利用模式

Table 1 Rural courtyard utilization model

领域	功能	庭院利用模式	参考文献
能源	清洁能源生产	屋顶光伏	[45]
		农户庭院型沼气	[46]
水资源	节约水资源	农村庭院雨水集蓄利用	[47]
	污水处理	庭院式人工湿地污水处理	[51]
食物	食物生产	庭院种植(厨房花园)	[48]
其他	养殖	庭院养殖	[52]

2 国内外传统农村家庭 FEW 相关政策分析

农村地区是食物、能源和水相关政策的重点区域,我国国家能源局发布的《加快农村能源转型发展助力乡村振兴的实施意见》指出,计划到2025年,建成一批农村绿色低碳试点,风电、太阳能、生物质能和地热能占农村能源的比重持续提升^[53];《“十四五”节能减排工作方案》和《国家节水行动方案》都在政策文本中单独强调了农村地区节能节水、绿色低碳发展^[54-55];《中国食物与营养发展纲要》和《粮食节约行动方案》也对家庭饮食提出减少浪费、保障营养的多重要求^[56-57]。国际上,欧盟发布的欧盟农村地区长期愿景指出,当前欧洲农村地区的食物/能源系统忽视了当地的潜力,主要体现在农村社区参与可再生能源生产的程度较低、食物供应系统过度全球化,应当鼓励创建基于太阳能、风能或生物质能系统的可再生能源社区,加强当地的内部食品供应^[58]。美国能源政策也将家庭能源消费作为不可或缺的一部分,通过税收抵免等激励性手段鼓励家庭对高效电器和太阳能光伏等的应用^[59]。印度农村绿色发展管理计划为提高环境可持续性,在农村家庭能源和水资源高效利用等方面推行多种措施^[60]。表2和表3分别列举了国内外农村 FEW 相关政策的实施领域、政策目标和主要政策内容。

2.1 政策类型及目标分析

识别家庭 FEW 相关政策措施的类型是政策分析的重要前提,ASI (avoid-shift-improve) 框架是理解政策分类中常用的工具^[61-62]。在该框架中,“避免”是指直接减少家庭资源需求,“转变”是指家庭消费方式向环境影

表 2 中国农村家庭食物-能源-水政策梳理

Table 2 Chinese rural household FEW policy review

领域	政策目标	政策内容	政策来源
能源	节能	推进节能及绿色农房建设, 鼓励农村居民使用高效节能电器。开展全民节约行动和节能进家庭、进社区、进农村等, 鼓励农民绿色出行	《“十四五”节能减排综合工作方案》 ^[54]
	能源替代	开展北方清洁取暖工作, 农村地区优先利用地热、生物质、太阳能等多种清洁能源供暖, 有条件的发展天然气或电供暖, 适当利用集中供暖延伸覆盖	《北方地区清洁取暖规划》 ^[23]
	可再生能源生产和消纳	稳步扩大农村电力、燃气和洁净型煤供给, 加快替代农村劣质散煤 支持具备资源条件的地区, 特别是乡村振兴重点帮扶县, 以县域为单位, 采取“公司+村镇+农户”等模式, 鼓励利用农户闲置土地和农房屋顶, 建设分布式风电和光伏发电, 配置一定比例的储能, 自发自用, 就地消纳, 余电上网 在农林生物质资源丰富的县域, 探索建设生物质热电联产、生物质天然气等项目, 满足乡镇生活用电、用热、用气等需求; 在畜禽养殖规模较大的县域, 结合农村有机垃圾治理, 建设园区型“养殖-沼气-种植”项目和农户庭院型沼气项目	《加快农村能源转型发展助力乡村振兴的实施意见》 ^[53]
水资源	节水	加快推进农村生活节水, 完善农村集中供水和节水配套设施建设, 在有条件的地方实施计量收费。加强农村生活用水设施改在, 推广使用节水器具, 创造良好节水条件	《国家节水行动方案》 ^[55]
	水卫生	推进农村厕所革命, 实施农村污水处理工程和保障饮用水安全; 加强生活污水源头减量和尾水回收利用	
食物	节约粮食	开展节粮减损文明创建, 把粮食减损要求融入村规民约, 推进粮食节约宣传教育进社区、进农村、进家庭等, 将“光盘行动”等纳入文明村镇、文明家庭等创建中	《粮食节约行动方案》 ^[57]
	饮食营养	推进居民影响健康知识知晓率提高, 推广应用《中国居民膳食指南》指导日常饮食, 做好农村留守儿童营养保障工作	《中国食物与营养发展纲要》 ^[56]
	庭院种养	发展庭院特色种植, 重点发展蔬菜、林果、花卉、盆栽等特色作物, 形成与大田作物差异化、互补性发展; 发展庭院特色养殖, 推动庭院养殖融入现代养殖生产体系	《关于鼓励引导脱贫地区高质量发展庭院经济的指导意见》 ^[49]

表 3 国际农村家庭食物-能源-水代表性政策

Table 3 Foreign rural household FEW representative policy

国家/地区	领域	政策内容	政策来源
欧盟	能源	鼓励社区可再生能源行动和减少煤炭过度依赖	A Long-term Vision
	水资源	支持农村保留水的措施和活动, 例如通过智能水管理和雨水、中水管理、绿色屋顶等	For the EU's Rural Areas By 2040 ^[58]
	食物	在个人层面上激励环境友好做法, 发展当地食品系统, 加强有机食品倡议	
美国	能源	联邦政府为家庭节能升级提供税收抵免, 包括太阳能设备、风力涡轮机和燃料电池、隔热、高效的供暖和空调系统	United States Energy Review ^[59]
印度	能源	促进农村地区电力供应; 通过财政补贴为农村家庭提供清洁的烹饪设施; 通过离网安装(主要是微电网)支持印度农村采用分布式光伏发电; 在农村地区发展可持续的生物燃料; 促进微型太阳能照明在农村地区推广; 鼓励农村家庭取水系统转向可再生能源	Greening Rural Development in India ^[60]
	水资源	印度实施国家农村饮用水计划(NRDWP), 在可持续的基础上满足农村家庭安全饮用水; 该计划还包括实施有效的废水管理, 例如有宅基地和菜园空间的农村家庭利用灰水(洗碗、洗衣等)灌溉厨房花园; 雨水回收作为满足家庭用水需求的替代来源	

响较小的模式转变, “提高”主要是指通过技术提高过程、产品或服务的环境绩效。将国内外农村食物、能源和水资源政策进行一一对应, 相关政策目标可以归纳为资源节约、“能-水”增效和“能-食”转型。首先是资源节约, 相应的措施包括随手关灯、降低空调设置等节能措施, 衣物集中洗涤、控制水量及洗浴时长等节水措施和粮食节约行动, 这些措施往往意味着家庭生活舒适度和便利性的降低。促进资源节约需要借助外部政策的推动, 从源头减少家庭对 FEW 资源的消耗, 从需求侧的角度缓解农村地区的资源压力; 二是“能-水”增效,

通过在农村地区推广高效节能电器和节水器具，提高电力和水资源利用效率；三是“能-食”转型，家庭能源去煤化、电气化和增加可再生能源利用是国内外农村地区能源政策的重点，居民饮食政策促进家庭膳食结构朝着兼顾营养健康和绿色低碳的方向转变。此外，为进一步促进 FEW 可持续发展，国内外相关政策鼓励农村家庭对闲置院落和屋顶空间进行有效利用，包括建设分布式光伏、户用庭院型沼气以提供可再生能源，通过雨水回收和中水管理促进水资源循环利用，进行庭院种植养实现农村家庭的自我发展和经济增收。

2.2 政策领域及关联关系分析

就政策实施关注的领域而言，农村家庭食物-能源-水政策大多自成体系，针对单一系统，较少考虑 3 个系统之间的关联性。然而，在实际政策实施过程中，1 个领域的政策调整可能会对其他领域产生直接或间接影响。例如，居民减少洗涤频率可以同时达到节水和节电的目的，对家庭用水的管理可以有效地控制能源消耗，加强家庭成员的环保意识可以同步提高对食物、能源和水资源的可持续利用^[16]。印度农村废水管理政策考虑了家庭水资源和食物系统的关联关系，鼓励有宅基地和菜园空间的农村家庭使用灰水(来自洗碗、洗衣和洗澡的未经处理的废水)进行灌溉，能够为家庭菜地提供部分水资源，同时利用种植床分解废水中的有机化合物并回收营养物质^[60]。欧盟农村家庭结合绿色屋顶构建，采取雨水保留和中水管理等措施实现水资源综合管理和利用^[58]。

FEW 中 1 种资源的消费(或生产)伴随或隐含着另外 2 种资源量的变化，这是 FEW 物理量的耦合。因此，FEW 中某一领域的政策措施，在实施中可能对其他资源产生了跨领域的影响，这一现象被称为政策效果的耦合^[63]。在家庭 FEW 系统中，耦合过程发生在特定的耦合节点处，关系到家庭 3 个领域不同政策的协同性。当前，传统农村家庭 FEW 政策框架(表 2、3)将各领域分而治之，政策之间潜在的协同性和矛盾性会影响政策的实施和结果，可能造成政策实施成本高而效益低等问题。因此，需要构建全新的 FEW 耦合政策框架，指导传统农村进行政策制定和实施，促进传统农村可持续发展。

3 传统农村家庭 FEW 耦合政策分析新框架

针对目前农村家庭 FEW 相关政策视角单一、缺乏耦合考量的问题，单一 FEW 资源政策设置无法满足传统农村的可持续发展的需求。需要深入分析家庭内部食物、能源和水 3 个系统之间的关联关系，更好地理解政策实施过程中可能产生的政策效果耦合。基于对中国传统农村家庭 FEW 特点和国内外农村家庭 FEW 关联政策的深入梳理，本研究构建了全新的传统农村家庭 FEW 耦合政策分析框架(如图 1)。

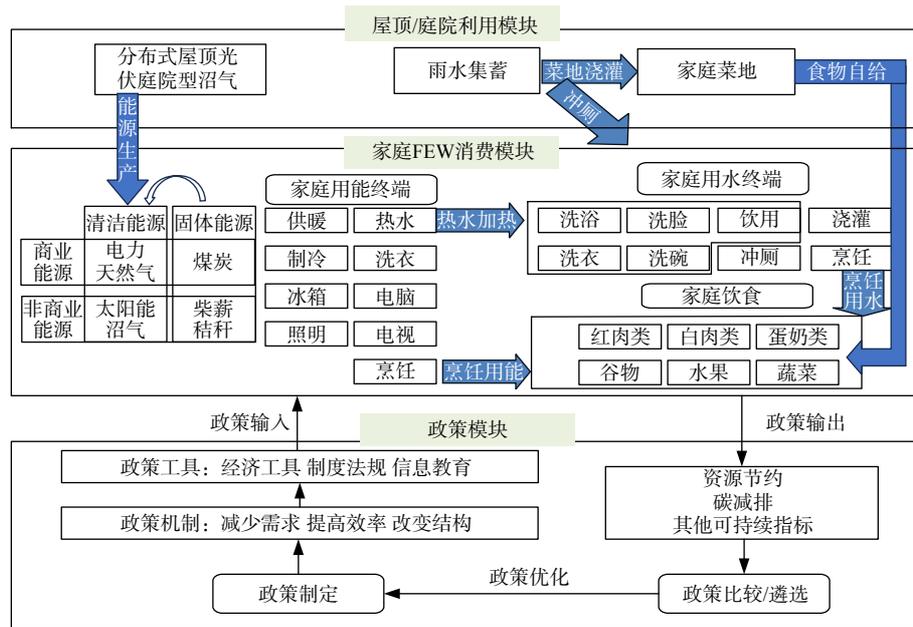


图 1 中国传统农村家庭 FEW 耦合研究框架

Fig. 1 FEW nexus research framework for Chinese traditional rural household

该政策分析框架由家庭 FEW 消费、屋顶/庭院利用和政策模块 3 个部分构成。①家庭 FEW 消费模块：将传统农村家庭 FEW 消费分解到终端。传统农村家庭能源消费纳入了清洁能源替代，按照能源用途将其分解为供暖、制冷、热水等终端用能；家庭用水部分，根据传统农村家庭用水结构的特点，家庭水资源用途可分为饮用水和烹任用水、个人卫生用水（洗澡、洗漱、洗衣、洗碗）、冲厕和户外菜地浇灌用水等类别。其中，冲厕和菜地浇灌用水对水质的要求较低，可以回收利用生活废水和雨水，实现水资源的循环和节约。食物消费部分，将家庭食物消费分解为红/白肉类、蛋奶类、蔬菜、水果和谷物，以反映家庭大致饮食结构。农村家庭能够通过家庭菜地自给一部分食物，减少从外部购买食物的量。②屋顶/庭院利用模块：闲置的屋顶和地面空间的利用是传统农村家庭 FEW 系统的特色模式。具体来说，农房屋顶为发展分布式光伏提供宝贵的空间资源，为农村家庭提供清洁电力。闲置庭院地面可用于开发家庭菜地，为农村家庭供给一部分食物。在闲置的屋顶和地面，均可搭建雨水收集系统，收集到的雨水可用于家庭菜地的浇灌。③政策模块：家庭 FEW 管理的不同政策机制，通过经济工具、制度法规和信息教育等手段，建立调控政策与家庭 FEW 消费行为的关联，可分析 FEW 单一资源政策可能产生对其他资源管理的影响。通过传统农村家庭 FEW 政策关联的耦合分析，可对现有政策或拟制定政策可能产生的协同效应、拮抗效应进行综合评估。

该框架能够清晰地展示政策实施中跨边界耦合影响的影响机制与传递路径。①水-能耦合：与家庭用水相关的能耗主要发生在热水加热过程中，这意味着家庭洗浴、洗脸、洗衣等活动所用热水越多，用于加热水的能源消耗越多。因此，当政府实施控制家庭用水量的政策例如阶梯水价、节水宣传时，也会影响用于加热过程的能耗量。②食物-能耦合：在烹饪过程中，动物性食物所需的烹饪能源是植物性食物的 5 倍多。因此，当家庭饮食结构发生改变时，用于烹任用途的能耗也会随之改变^[64]。③食物-水耦合：在烹饪过程中，动物性食物所需的烹任用水是植物性食物的 3 倍多。因此，当家庭饮食结构发生改变时，用于烹任用途的水量也会随之改变^[64]。此外，屋顶/庭院菜地连接了水和食物 2 个系统，农村家庭食物自给自足的比例越高，家庭菜地的蔬菜产量和灌溉用水量越多，可能会影响家庭用水量和用水结构。

中国传统农村家庭 FEW 政策耦合分析框架的应用包括以下几个步骤：第一，制定并输入政策，形成不同领域、政策机制和政策工具的政策措施集合；第二，基于调研/文献数据，建立中国传统农村家庭 FEW 消费和庭院利用的数学模型；第三，建立政策-家庭接口，评估相关政策对 FEW 三系统的综合影响，并比较政策效果的耦合。最终，根据政策实施的效果对政策进行优化调整。

4 结论

本研究构建了传统农村家庭 FEW 政策耦合分析的全新框架，该框架具有 2 个亮点：一是能够充分体现传统农村家庭 FEW 消费的特点，强调了传统农村家庭屋顶/庭院空间的利用潜力；二是清晰地展示了传统农村家庭 FEW 三系统之间的关联关系，能够捕捉相关政策作用于家庭 FEW 系统的复杂影响，揭示政策效果的耦合性，实现对相关政策措施的跨领域权衡分析。本研究为政策制定和政策优化提供了理论框架，该框架能够面向政策制定者，为其提供传统农村家庭 FEW 耦合管理的全局视角，助力农村可持续发展和乡村振兴。

参考文献

- [1] TASHTOUSH F, AL-ZUBARI W, SHAH A. A review of the water-energy-food nexus measurement and management approach[J]. *International Journal of Energy and Water Resources*, 2019, 3: 361-374.
- [2] DARGIN J, BERK A, MOSTAFAVI A. Assessment of household-level food-energy-water nexus vulnerability during disasters[J]. *Sustainable Cities and Society*, 2020, 62: 102366.
- [3] HOLGER H. Understanding the nexus. Background paper for the Bonn2011 Conference: The water, energy and food security nexus[R]. Stockholm: Stockholm Environment Institute, 2011.
- [4] ESCAP. Water, food and energy nexus in Asia and the Pacific[R]. Bangkok: Economic and Social Commission for Asia and the Pacific, 2013.
- [5] FAO. The water-energy-food nexus: A new approach in support of food security and sustainable agriculture[R]. Italy: Food and Agriculture Organization of the United Nations Rome, 2014.
- [6] JONES C M, KAMMEN D M. Quantifying carbon footprint reduction opportunities for U. S. households and communities[J]. *Environmental Science & Technology*, 2011, 45(9): 4088-4095.
- [7] CONNOLLY M, SHAN Y L, BRUCKNER B, et al. Urban and rural carbon footprints in developing countries[J]. *Environmental Research Letters*, 2022, 17(8): 084005.
- [8] ITAYI C L, MOHAN G, SAITO O. Understanding the conceptual frameworks and methods of the food-energy-water nexus at the household level for

- development-oriented policy support: a systematic review[J]. *Environmental Research Letters*, 2021, 16(3): 033006.
- [9] SHAHBAZ P, UL HAQ S, ABBAS A, et al. Food, energy, and water nexus at household level: Do sustainable household consumption practices promote cleaner environment?[J]. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 2022, 19(19): 12945.
- [10] 国家统计局. 中国统计年鉴 2022[EB/OL]. [2023-11-05]. <https://www.stats.gov.cn/sj/ndsj/2022/indexch.htm>.
- [11] 刘华芹. 类型学视角：城镇化进程中的农村社区分化和乡村振兴重点[J]. *河北学刊*, 2019, 39(1): 167-173.
- [12] ZHANG P L, ZOU Z H, LIU G, et al. Socioeconomic drivers of water use in China during 2002–2017[J]. *Resources, Conservation and Recycling*, 2020, 154: 104636.
- [13] MATOS C, CUNHA A, PEREIRA F, et al. Characterization of water and energy consumptions at the end use level in rural and urban environments: Preliminary results of the ENERWAT project[J]. *Urban Science*, 2019, 3(1): 8.
- [14] XU C. Towards balanced low-carbon development: Driver and complex network of urban-rural energy-carbon performance gap in China[J]. *Applied Energy*, 2023, 333: 120663.
- [15] GAO J, TANG Z, LI C Y. Comparative analysis of food consumption on carbon emission of urban and rural residents in China[J]. *Pratacultural Science*, 2018, 35(8): 2022-2030.
- [16] XUE J Y, LIU G Y, CRISTIANO I, et al. Development of an urban household food-energy-water policy nexus dynamic simulator[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2021, 328: 129521.
- [17] DU S P, LIU G Y, LI H, et al. System dynamic analysis of urban household food-energy-water nexus in Melbourne (Australia)[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2022, 379: 134675.
- [18] MENG F, YUAN Q, BELLEZONI R A, et al. The food-water-energy nexus and green roofs in Sao Jose dos Campos, Brazil, and Johannesburg, South Africa[J]. *npj Urban Sustainability*, 2023, 3(1): 12.
- [19] TOBOSO-CHAVERO S, NADAL A, PETIT-BOIX A, et al. Towards productive cities: environmental assessment of the food-energy-water nexus of the Urban Roof Mosaic[J]. *Journal of Industrial Ecology*, 2018, 23(4): 767-780.
- [20] LIU W. Exploring a low carbon development in rural China: The role of households[D]. Netherlands: Wageningen University and Research, 2013.
- [21] LI J L, CHEN C, LIU H X. Transition from non-commercial to commercial energy in rural China: Insights from the accessibility and affordability[J]. *Energy Policy*, 2019, 127: 392-403.
- [22] TAO S, RU M Y, DU W, et al. Quantifying the rural residential energy transition in China from 1992 to 2012 through a representative national survey[J]. *Nature Energy*, 2018, 3(7): 567-573.
- [23] 中国发展和改革委员会. 北方地区冬季清洁取暖规划(2017-2021年)[EB/OL]. (2017-12-20)[2023-10-15]. https://www.gov.cn/xinwen/2017-12/20/content_5248855.htm.
- [24] CAO Z, MENG Q, GAO B Z. The consumption patterns and determining factors of rural household energy: A case study of Henan Province in China[J]. *Renewable & Sustainable Energy Reviews*, 2021, 146: 111142.
- [25] ZHAO B, ZHAO J, ZHA H, et al. Health benefits and costs of clean heating renovation: an integrated assessment in a major Chinese city[J]. *Environmental Science & Technology*, 2021, 55(14): 10046-10055.
- [26] 袁闪闪, 陈潇君, 薄宇, 等. “十四五”清洁取暖重点城市筛选方法及改造目标研究[J]. *建筑科学*, 2021, 37(12): 131-136.
- [27] WANG Q, FAN J, KWAN M P, et al. Examining energy inequality under the rapid residential energy transition in China through household surveys[J]. *Nature Energy*, 2023, 8(3): 251-263.
- [28] EVANS M, YU S, SONG B, et al. Building energy efficiency in rural China[J]. *Energy Policy*, 2014, 64: 243-251.
- [29] XU J, GAO W J, HUO X P. Analysis on energy consumption of rural building based on survey in northern China[J]. *Energy for Sustainable Development*, 2018, 47: 34-48.
- [30] HAN T Z, LIU P, NIU C L, et al. Evaluation of energy-saving retrofit projects of existing rural residential envelope structures from the perspective of rural residents: the Chinese case[J]. *Environment, Development and Sustainability*, 2023, 25(8): 8419-8446.
- [31] GAN X L, YAN K K, WEN T. Using fuzzy cognitive maps to develop policy strategies for the development of green rural housing: A case study in China[J]. *Technological Forecasting and Social Change*, 2023, 192: 122590.
- [32] ZOU B L, MISHRA A K. Appliance usage and choice of energy-efficient appliances: Evidence from rural Chinese households[J]. *Energy Policy*, 2020, 146: 111800.
- [33] LI M Q, SHAN R, HERNANDEZ M, et al. Effects of population, urbanization, household size, and income on electric appliance adoption in the Chinese residential sector towards 2050[J]. *Applied Energy*, 2019, 236: 293-306.
- [34] 水利部. 全国“十四五”农村供水保障规划[EB/OL]. (2021-9-23)[2023-11-12]. http://www.mwr.gov.cn/xw/sjzs/202109/t20210922_1544799.html.
- [35] FAN L, LIU G, WANG F, et al. Factors Affecting Domestic Water Consumption in Rural Households upon Access to Improved Water Supply: Insights from the Wei River Basin, China[J]. *Plos One*, 2013, 8(8): e71977.
- [36] 樊良新. 渭河流域关中地区农村居民生活用水行为研究[D]. 西安: 西北农林科技大学, 2015.
- [37] YU X M, GENG Y, HECK P, et al. A review of China's rural water management[J]. *Sustainability*, 2015, 7(5): 5773-5792.
- [38] LIANG J R, ZHANG S J, WANG H, et al. Adoption behavior of water efficiency labeling: Origin, research progress and theoretical framework—evidence from China[J]. *Water Policy*, 2022, 24(1): 66-82.
- [39] 汪希成, 谢冬梅. 我国农村居民食物消费结构的合理性与时空差异[J]. *财经科学*, 2020(3): 120-132.
- [40] CHENG S, SONG G, YANG D, et al. Spatial-temporal and structural differences in the carbon footprints embedded in households food waste in urban and rural China[J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2023, 30(12): 35009-35022.
- [41] 江文曲, 李晓云, 刘楚杰, 等. 城乡居民膳食结构变化对中国水资源需求的影响——基于营养均衡的视角[J]. *资源科学*, 2021, 43(8): 1662-1674.
- [42] SI Z Z, LI Y Y, FANG P, et al. “One family, two systems 十四五”: Food safety crisis as a catalyst for agrarian changes in rural China[J]. *Journal of Rural Studies*, 2019, 69: 87-96.
- [43] HE P, BAIOCCHI G, HUBACEK K, et al. The environmental impacts of rapidly changing diets and their nutritional quality in China[J]. *Nature Sustainability*, 2018, 1(3): 122-127.
- [44] LIAN Y Y, GU L J, YANG L S, et al. The Reasonableness and Spatial Differences of the Food Consumption Structure of Urban and Rural Residents in China, 2015-2021[J]. *Foods*, 2023, 12(10): 1997.
- [45] 江亿, 胡珊. 屋顶光伏为基础的农村新型能源系统战略研究[J]. *气候变化研究进展*, 2022, 18(3): 272-282.
- [46] 郜慧, 周传斌, 王如松. 西南山区农村生物质能有效利用模式及其效益分析——以户用沼气生态庭院模式为例[J]. *中国人口·资源与环境* 2014年专

- 刊, 2014, 24: 90-95.
- [47] 赵雪妍, 王丹, 陈映珠, 等. 低碳视角下北方农村庭院雨水积蓄利用模式探讨[J]. *现代农业研究*, 2023, 29(6): 140-142.
- [48] 祝遵凌, 刘亚亮, 褚茜. 长三角新农村庭院植物多样性与配置模式[J]. *东北林业大学学报*, 2011, 39(7): 35-37.
- [49] 国家乡村振兴局. 关于鼓励引导脱贫地区高质量发展庭院经济的指导意见[EB/OL]. (2022-09-26)[2023-10-23]. https://nrta.gov.cn/art/2022/9/30/art_50_196921.html.
- [50] LIU Y Q, WANG A L, HOU J, et al. Comprehensive evaluation of rural courtyard utilization efficiency: A case study in Shandong Province, Eastern China[J]. *Journal of Mountain Science*, 2020, 17(9): 2280-2295.
- [51] 李婉文, 刘京, 赵本良, 等. 庭院人工湿地在农村污水处理中的应用及前景[J]. *水处理技术*, 2020, 46(4): 16-19.
- [52] 周传斌, 陈灏, 张付申. 基于脱贫和环境改善目标的寒旱地区农村庭院生态工程[J]. *环境工程学报*, 2022, 16(9): 3125-3133.
- [53] 国家能源局. 加快农村能源转型发展助力乡村振兴的实施意见[EB/OL]. (2021-12-29)[2023-11-13]. https://www.gov.cn/zhengce/zhengceku/2022-01/07/content_5666809.htm.
- [54] 中华人民共和国生态环境部. “十四五”节能减排综合工作方案[EB/OL]. (2021-12-28)[2023-11-10]. https://www.mee.gov.cn/czwj/gwywj/202201/t20220124_968089.shtml.
- [55] 发展和改革委员会. 国家节水行动方案[EB/OL]. (2019-4-15)[2023-11-10]. <https://zfxgk.ndrc.gov.cn/web/iteminfo.jsp?id=16153>.
- [56] 国务院. 中国食物与营养发展纲要[EB/OL]. (2014-2-10)[2023-11-10]. https://www.gov.cn/zwgk/2014-02/10/content_2581766.htm.
- [57] 国务院. 粮食节约行动方案[EB/OL]. (2021-11-01)[2023-11-10]. https://www.gov.cn/gongbao/content/2021/content_5651724.htm.
- [58] EU. A vision for rural areas towards 2040[EB/OL]. (2021)[2023-11-10]. https://rural-vision.europa.eu/rural-vision_en#a-vision-for-rural-areas-towards-2040.
- [59] IEA. United States 2019 Review[R]. Paris: International Energy Agency, 2019.
- [60] UNDP. Greening Rural Development in India[R]. New York: The United Nations Development Programme, 2012.
- [61] GRAN C, BARTH J, KISS-DOBRONYI B, et al. Demand-side solutions to carbon-neutrality in the EU: introducing the concept of sufficiency[R]. Cologne: ZOE Institute for future-fit economies, 2021.
- [62] AKENJI L, LETTENMEIER M, KOIDE R, et al. 1.5-degree lifestyles: targets and options for reducing lifestyle carbon footprints[R]. Hayama: Institute for Global Environmental Strategies, 2019.
- [63] 薛婧妍, 刘耕源. 城市生态系统能—水—食物—土地—气候的“物理量与政策效果”双维耦合研究综述[J]. *应用生态学报*, 2018, 29(12): 4226-4238.
- [64] HUSSIEN W E A, MEMON F A, SAVIC D A. An integrated model to evaluate water-energy-food nexus at a household scale[J]. *Environmental Modelling & Software*, 2017, 93: 366-380.

(责任编辑: 金曙光)

Food-energy-water nexus in traditional rural households to achieve sustainability goals: Framework construction

WU Mengrong¹, LIU Gengyuan^{1,2,*}, CHEN Caocao³, XIONG Xiaoping⁴, MENG Fanxin¹, GAO Yuan¹, ZHANG Lixiao^{1,2}

1. State Key Joint Laboratory of Environment Simulation and Pollution Control, School of Environment, Beijing Normal University, Beijing 100875, China; 2. Beijing Engineering Research Center for Watershed Environmental Restoration & Integrated Ecological Regulation, Beijing 100875, China; 3. Beijing Climate Change Management Centre, Beijing 100086, China; 4. Institute of Resources and Environmental Policy, Development Research Center of the State Council, Beijing 100010, China

*Corresponding author, E-mail: liugengyuan@bnu.edu.cn

Abstract The interconnected systems of household food, energy, and water (FEW) are deeply intertwined. Adjusting management policies for one resource can significantly influence the other two, thus requiring a deeper understanding of their nexus relationships. In traditional rural household, the underutilization of roofs and courtyards presents a substantial opportunity for resource optimization. However, the FEW policy frameworks designed for urban households are not directly transferable to rural households, particularly those preserving traditional village characteristics. Through an analysis of consumption patterns in Chinese traditional rural households and a critical review of nexus policy designs both domestically and internationally, this study developed a novel FEW nexus policy analysis framework tailored for traditional rural households. This framework comprised a FEW household consumption module, a roof/courtyard utilization module, and a policy input and output module. It effectively highlighted the points of cross-boundary nexus effects during policy implementation, enhancing our comprehension of resource utilization and clarifying management trajectories. The framework serves as a tool to gather and shape policies pertinent to traditional rural households, evaluate policy impacts, refine policy approaches, and ultimately support sustainable rural development and revitalization efforts.

Keywords traditional rural household; food-energy-water nexus; synergy; resource saving; roof/courtyard